

東京都水道局耐震設計ガイドライン

令和6年4月

東京都水道局

目 次

第1章 総則	1
1. 1 はじめに	1
1. 2 適用の範囲	1
1. 3 用語解説	1
1. 4 耐震化の経緯	8
第2章 耐震設計の基本	10
2. 1 耐震設計の手順	10
2. 1. 1 新設設計の手順	10
2. 1. 2 既設の耐震診断・耐震補強設計の手順	11
2. 2 水道施設の重要度に応じた要求性能の設定	12
2. 2. 1 施設の重要度	12
2. 2. 2 設計地震動と要求性能の定義	12
2. 2. 3 重要度に応じた要求性能の設定	13
2. 3 地盤調査及び地盤評価	13
2. 3. 1 耐震設計における地盤調査の概要	13
2. 3. 2 地盤の動的解析で必要となる地盤調査	18
2. 3. 3 工学的基盤面の設定	24
2. 3. 4 地盤固有周期の算出	26
2. 3. 5 地盤の液状化の判定	27
2. 4 設計地震動	28
2. 4. 1 当局における設計地震動の設定方針	28
2. 4. 2 レベル1地震動（静的解析）の設定	33
2. 4. 3 レベル2地震動（静的解析）の設定	38
2. 4. 4 レベル2地震動（動的解析）の設定	45

第3章 池状コンクリート構造物の耐震計算法	54
3. 1 総説	54
3. 1. 1 池状コンクリート構造物の耐震計算法.....	54
3. 1. 2 耐震計算法の選択.....	54
3. 1. 3 当局における池状コンクリート構造物の耐震設計フロー.....	55
3. 1. 4 耐震計算法の概要.....	58
3. 1. 5 当局における耐震設計の標準	63
3. 2 動的解析による耐震計算.....	70
3. 2. 1 池状コンクリート構造物への適用目的.....	70
3. 2. 2 動的解析における解析フローの標準	73
3. 2. 3 解析計画	75
3. 2. 4 設計条件の設定	76
3. 2. 5 動的解析手法の選定	77
3. 2. 6 地盤応答の分析（地盤の動的解析）	80
3. 2. 7 解析モデルの構築.....	83
3. 2. 8 池状コンクリート構造物の動的解析	103
3. 2. 9 池状コンクリート構造物の動的解析における当局の留意点	106
3. 3 静的解析による耐震計算.....	109
3. 3. 1 池状コンクリート構造物への適用目的.....	109
3. 3. 2 耐震計算の手順	109
3. 3. 3 解析手法の選定	111
3. 3. 4 解析モデルの構築.....	111
3. 4 性能の照査	133
3. 4. 1 総則.....	133
3. 4. 2 限界値の設定方法.....	134
3. 4. 3 照査方法	135

3. 5 危機耐性への対応	137
3. 5. 1 本ガイドラインにおける危機耐性の位置付け	137
3. 5. 2 危機耐性に関する設計手順	138
3. 5. 3 被災シナリオに対する危機耐性への対策例	143

第1章 総 則

第 1 章 総則

1.1 はじめに

本書は、東京都水道局（以下「当局」という。）の職員が「水道施設耐震工法指針・解説 2022」（以下「指針」という。）に基づいた耐震設計を行うに当たり、判断の拠り所となる事項及び留意点を示したものである。

（１）設計地震動は、画一的な水平設計震度や時刻歴波形から脱却し、構造物ごとに最も不利になる地震動を設定すること。

（２）解析手法は、静的解析から脱却し、動的解析により実態を反映した設計を行うこと。

（３）解析モデル・解析条件の設定は、設計者が自ら構造物ごとに適切な条件設定を行うこと。

本書で扱う耐震解析は、あくまでも設計者自らが設計実務を行う上での判断を行うためのツールである。設計者は、本書に従った照査値のみを満足すればよいのではなく、耐震解析によって表現できる範囲（限界）を把握した上で、解析結果から施設の耐震性を総合的に判断する必要がある。

1.2 適用の範囲

本書は、主に池状コンクリート構造物を対象とする。

なお、水管橋、ＰＣタンクや 鋼製タンク等の地上水槽、立坑及び暗きょなどの池状コンクリート構造物以外の構造物においても、設計地震動設定の基本的な考え方、動的解析の適用及び各種解析の詳細について、本書を参照することができる。ただし、池状コンクリート構造物以外の構造物については、固有周期、施設配置状況及び地震被害の特徴が池状コンクリート構造物と異なることから、その影響を考慮し、本書のほか指針・他基準類を参照の上、設計すること。

水管橋、ＰＣタンクや 鋼製タンク等の地上水槽、立坑及び暗きょなどについては、指針を参照のこと。また、建築構造物・複合構造物については、指針参考資料 5 を参照のこと。

1.3 用語解説

（１）仕様設計・性能設計・性能規定型設計

指針では、設計思想として性能規定型設計を取り入れている。

仕様設計と性能設計及び性能規定型設計の概要は、次のとおりである。

ア 仕様設計・性能設計

構造物などを設計する際、仕様設計では、材料、構造計算法、施工方法などが細かく規定されるが、性能設計では、構造物などに求められる性能のみが要求される。

イ 性能規定型設計

性能規定型設計は、法令で規定された性能を満たすように設計することである。

水道施設においては、国交省令に定められた設計地震動及び重要度に応じた耐震性能を満足する設計を行うことになる。指針では、性能規定型設計の遵守すべき事項は耐震設計の目的、耐震設計の基本方針、国交省令に定める項目としており、耐震性能の照査方法は選択が可能としている。

(2) 地震発生のメカニズム

地震動の基本的な知識として、震源・震央、震源域、震源距離・震央距離、アスペリティ及びマグニチュードを知っておくことは重要である。

ア 震源・震央

地震は地球内部の急激なひずみにより岩石が破壊されて生ずる現象とされている。破壊が最初に発生した点を震源、震源の真上の点を震央という。

イ 震源域

地震により破壊された領域を震源域という。大規模な地震では、震源域は数十 km から数百 km に達する。震源域では、同時に破壊が生じるのではなく、ある点から破壊が始まり、それが広がっていく。

ウ 震源距離・震央距離

観測点から震源までの直線距離を震源距離、観測点から地表面に沿った震央までの距離を震央距離という（図 1.1 参照）。

エ アスペリティ

震源域の中で大きくずれ、大きな揺れを起こす地震波が発生すると想定される部分をアスペリティといい、通常は強く固着しているが、地震時に大きくずれ動く（図 1.2 参照）。

オ マグニチュード

マグニチュードは、地震のエネルギー規模を表す単位である。1935 年にアメリカの地震学者リヒターが定義を示し、震源地から 100km の位置にある標準地震計の最大振幅の常用対数を用いる。この方法では、地震計の周波数特性から大規模な地震に対しては小さな値となる傾向があるため、大規模な地震の規模を反映するものとしてモーメントマグニチュードが使われる場合がある。

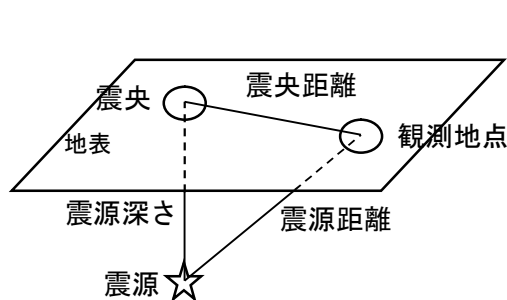


図 1.1 震源、震央

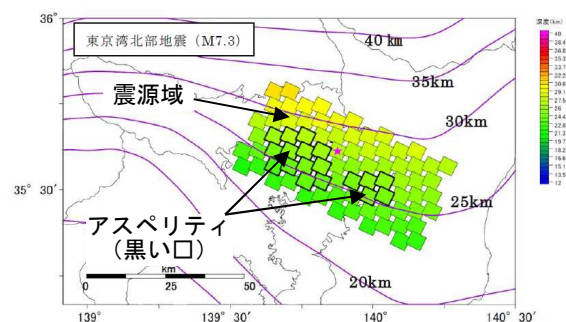


図 1.2 震源域・アスペリティ

（３）地震波の種類と伝搬

耐震設計では、地震波の評価が重要である。地震波の基本事項として、P 波・S 波、工学的基盤、深部地盤・表層地盤及び地盤増幅率がある。

ア P 波・S 波

地震動により、地震波は、深部地盤から表層地盤を経て地表に達する。

地震波には、P（primary）波、S（secondary）波がある。P 波は、疎密波ともいい、S 波は、せん断波ともいう。

なお、P 波は、S 波に比べて伝搬速度が早い。

イ 工学的基盤

工学的基盤面は、構造物を設計する際に地震動設定の基礎とする良好な地盤のことを示し、十分堅固で、せん断弾性波速度が地表地盤に比べて十分に大きい地盤の上面をいう。（詳細は、p.24【水滴くんのワンポイントアドバイス】を参照。）建築や土木等の工学分野で使用される用語である。

構造物の耐震計算用の地震波形は、通常、工学的基盤の波形から計算により求めた表面波形を用いる（詳細は、p.32【水滴くんのワンポイントアドバイス】を参照）。

なお、当局では、首都直下地震等による東京の被害想定（令和 4 年 5 月 東京都防災会議）（以下、「東京都被害想定」という。）で使用しているせん断弾性波速度が $V_s=350\text{m/s}$ 以上を工学的基盤面とする。

ウ 深部地盤・表層地盤

深部地盤は、工学的基盤から下部のせん断弾性波速度が概ね 300m/s 以上の固い地盤をいう。また、表層地盤は、工学的基盤から上部の地盤をいう。（詳細は、p.24【水滴くんのワンポイントアドバイス】を参照。）

エ 地盤増幅率

表層地盤では、地層の構造や地震波の入射角度によっては、振動振幅（揺れ）が大きく増幅される。これを地盤増幅率として数値化しており、ボーリングデータから求めた各種物理定数や平均的な地盤の S 波速度を用いて計算する方法のほか、「地震ハザードステーション」（詳細は、p.25【水滴くんのワンポイントアドバイス】を参照。）からも調べることができる。

（４）地震動の評価

地震動を評価する場合には、時刻歴波形、応答スペクトル図を参考にする。その際、ガル（加速度）、カイン（速度）、構造物の相対速度の大きさ、卓越周期などが重要なポイントとなる。

ア ガル（gal）

ガルは、加速度を表す単位で、毎秒 1cm の変化を生じる加速度を 1 ガル（ 1cm/s^2 ）という。地震動の最大加速度と重力加速度の比は、耐震設計に用いられる震度（設計水平震度）とし

て表される。重力加速度は 980 ガルなので、設計水平震度 0.5 は水平方向の最大加速度を 490 ガルとしていることをいう。

イ カイン (kine)

カインは、地震動の速度を表す単位で、毎秒 1cm の変化を生じる速度を 1 カイン (1cm/s) という。

ウ 構造物の相対速度

地震動は、通常の外力とは異なり、地面が振動して構造物に外力を与えることになり、地面の振動と構造物（柱）の揺れは図 1.3 のように表すことができる。構造物が地盤と共に A から B へ移動する際には、構造物そのものの速度は 0 であり、振動の折り返し点に達した後、構造物が変位するが、その際の速度を相対速度という（図 1.3 参照）。

エ 卓越周期

皿に置いたこんにやくや豆腐を箸でつつくとあるリズムで震えるように、一見固そうに見える地盤も揺れやすい周期を持つ。これを固有周期という。堅い地盤の固有周期は比較的短く（0.1s～0.2s 程度）、柔らかい地盤の固有周期は比較的長い（0.6s 以上等）。

地震動には、短周期の地震動成分が大きいものや長周期の地震動成分が大きいものがあり、これが地盤の固有周期と一致すると共振・増幅し、地表が大きく揺れることになる。このため、地盤の固有周期を知ることが耐震設計の第一歩となる。

地表各地点で最も大きい応答（加速度・振幅等）を生ずる固有周期を卓越周期ということがある（図 1.4 参照）。

固有周期や卓越周期は、常時微動測定※等により求めることができる。

※常時微動測定：動いていないように見える地面も、絶えず微細な振動を繰り返している。この振動を深夜人通りのない時間帯に地震計により波形を記録し、スペクトル図を描く（計算で各周期の成分の波に分解しグラフを描く）ことによりその地盤がどのような周期で最も揺れやすいかを知ることができる（2. 3. 2（3）参照）。

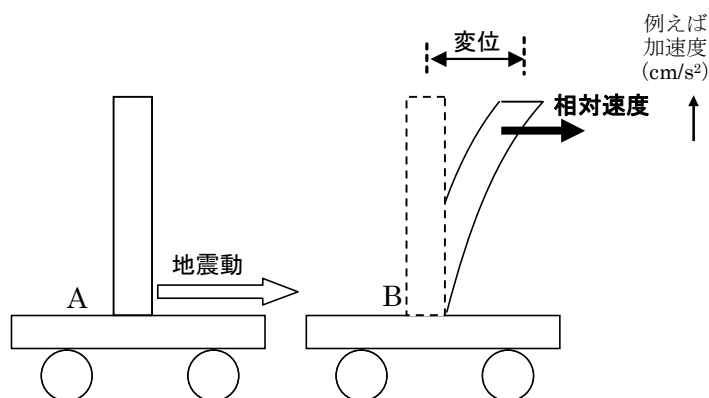


図 1.3 相対速度

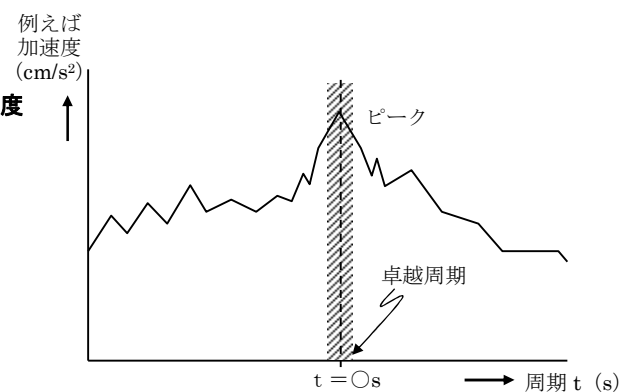


図 1.4 卓越周期

(5) 耐震解析における基本事項

耐震解析では、線形・非線形、弾性・塑性・降伏、じん性などが基本的な事項として重要である。

ア 線形・非線形

応力とひずみの関係を図に描くと、降伏応力以下では応力とひずみの関係は直線であり、これを線形という。その後、ある応力（降伏応力）に達すると塑性変形が起こって、非直線になることを非線形という（図1.5参照）。

なお、図1.6の鉄筋の場合は、線形＝弾性といえるが、弾性材料でもゴムのように、応力とひずみは非線形関係になる物質があるので、必ずしも線形＝弾性とはいえない場合もある。

また、地盤においては、ある地震動レベル以上の時に、一部の軟弱地盤で非線形挙動（剛性が低下して減衰が増加する現象）が発生する。

イ 弾性・塑性・降伏

弾性は、ある一定の範囲内で力を加えると変形するが、力を取り除くと元の形に戻る現象のことである。

塑性は、力を加えて変形し、力を取り除いても元の形に戻らず変形が残る現象のことである。

針金のハンガーで例えると、ハンガーの長い部分を少し引っ張り離すと元に戻る範囲の現象を弾性といい、大きく引っ張り元に戻らなくなった現象を塑性という。

また、弾性状態を超えて塑性状態になることを降伏という（図1.6参照）。

ウ じん性

材料の粘りの強さ、外力に抗して破壊されにくい性質をいう。じん性の高い材料には、亀裂の進展が遅く、高い極限強さとともに塑性、延性がある。

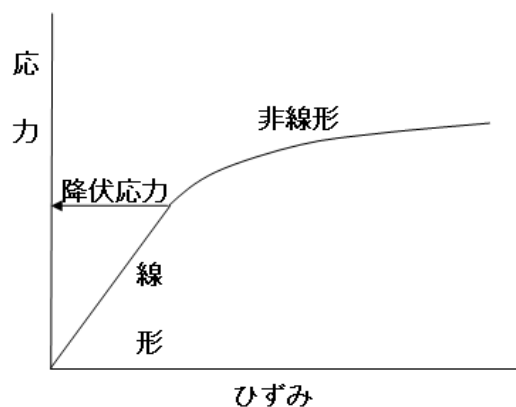


図1.5 線形・非線形

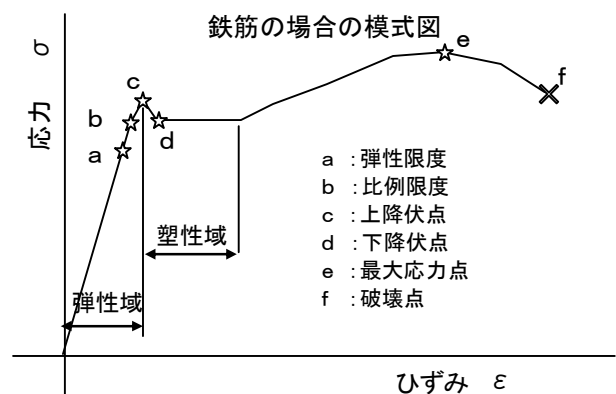


図1.6 弾性・塑性・降伏

(6) 耐震解析法

耐震解析法に関しては、動的解析、静的解析、FEM 解析、フレーム解析など、よく使われる用語について示す。

ア 動的解析

動的解析は、地震波形データを元に、時間とともに変化する動的地震荷重（大きさ・方向）を解析モデルに作用させ、細かく区切った時刻一点一点において計算し、時々刻々と移り変わる地盤や構造物の状態を把握する方法である。具体的な解析手法については、3. 2 参照。

地震動は時間とともに変化する動的現象であり、構造物の応答も動的であるので、動的解析は静的解析に比べて、より実際に近い値を求めることができる。指針では、構造物の応答値の算定は、地震動の作用を適切に考慮でき、地盤・構造物の地震時挙動を精度良く評価できる動的解析法を用いることを基本とするとしている。

イ 静的解析

静的解析は、一般的には、死荷重のように静的な荷重（時間とともに変化しない。）がかかった時の、構造部材の応力や変位を求める手法である。

耐震計算においては、時刻とともに変動する地震荷重のうち最大（又は代表的）なものを取り出し、それを静的に構造物に作用させた時の応力や変位を求める。指針では、施設重要度、地盤条件、構造条件、施設規模などについて、一定の条件を満たす施設は、静的線形解析を用いてもよいこととしている。

ウ FEM解析

FEM とは、Finite Element Method（有限要素法）の頭文字をとったものである。

部材を図 1. 7 のように細かな線状、面状及び立体状といった単純な要素に分割し、それぞれの部分（要素）にそれぞれの材料定数を考慮し、要素相互の力のやりとりを電子計算機で計算して積み上げることにより、部材各部の応力や変位を求める解析手法である。

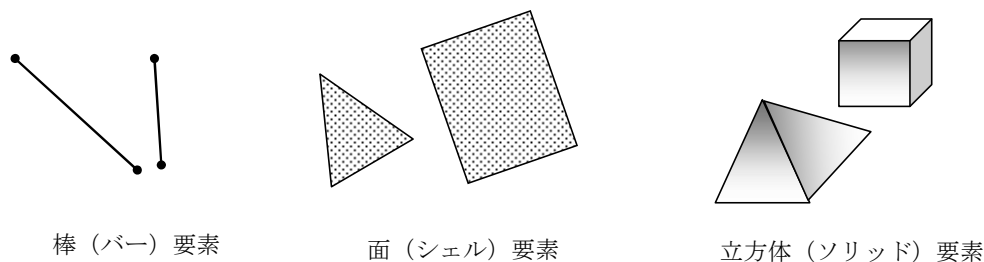


図 1. 7 FEMの要素

エ フレーム解析

フレーム解析とは、有限要素法の一手法であり、構造をバー要素と接点というシンプルな構成要素でモデル化し、各部に働く応力や変位を求める手法である（図 1. 8 参照）。

構造をバー要素と接点でモデル化することにより、はりやトラスの計算のように比較的単純な計算で行えることが特徴である。有限要素法で用いられるその他の要素と比べて、計算量が少なくて済むことから、電子計算機の性能が高くなかった以前は便利な手法であった。

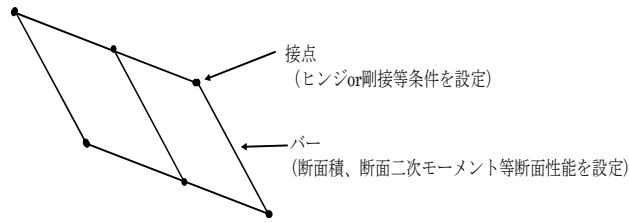


図 1.8 フレーム解析

(7) 危機耐性

危機耐性とは、「安全性で定義した事象を超えて安全性が損なわれた場合に、水道施設が危機的な状況に至る可能性を小さくする性能」と指針に定義されている。

耐震設計においては、設定したレベル1地震動やレベル2地震動に対して、これらの地震動に対する使用性、復旧性および安全性を確保するように設計するが、レベル2地震動を超えるような想定外事象に対しては危機耐性を確保することで、危機的な状況を回避することが求められる。

本ガイドラインでは地震による影響のみを対象とし、それ以外の災害(津波、風水害、土砂崩れ、大規模停電、これらの複合災害)は別途検討とする。

本ガイドラインでは、指針で示されている危機耐性への段階別の対応(図1.9)のうち、個々の施設で対応すべき範囲のみを対象とし、事業全体での対応や浄水場、配水場など施設全体での対応が必要な範囲は別途検討とする。

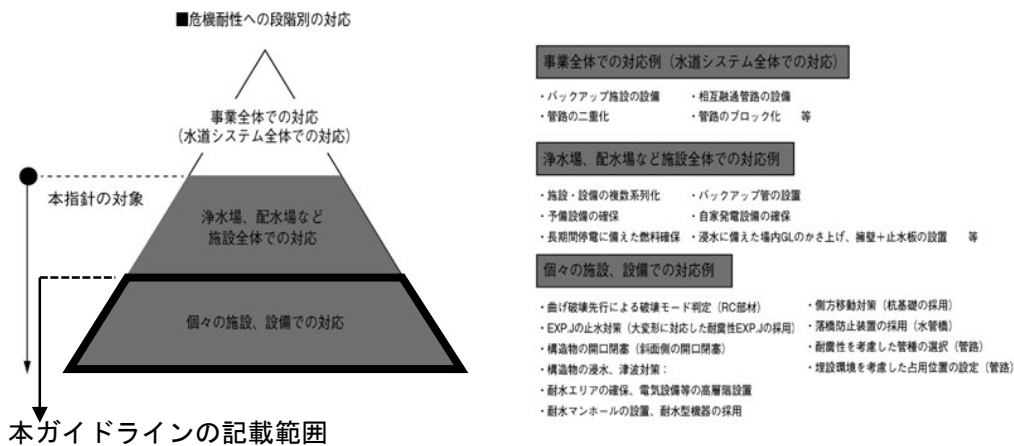


図 1.9 本ガイドラインで記載する危機耐性の範囲

出典：指針・本編 p.30 (日本水道協会、2022 年) に加筆

1.4 耐震化の経緯

表 1. 1 水道施設の設計基準の変遷と主な地震（1980 年代まで）

年	水道施設の設計基準の変遷	主な地震等	主要浄水場の建設（年度）
1920		1916(T5)震度法の概念が提案される	
1930		1923(T12)関東大震災(M7.9)	
1940		・強度不足による被害	
1950		1948(S23)福井地震(M7.1)	1943 年度 金町浄水場の拡張ほか
		・強度不足による被害	
		・水道施設の被害が甚大	
1960	1953(S28)「水道施設の耐震工法」発行 ・震度法の採用(Kh=0.1～0.3) ・地震時土圧・水圧を考慮 ・高架水槽の設計震度割増		
1970	1966(S41)「水道施設の耐震工法」一部改訂	1964(S39)新潟地震(M7.5) ・液化化被害の認識 1968(S43)十勝沖地震(M8.1) ・せん断破壊現象	1963 年度 東村山浄水場等の建設 1963・64 年度 金町浄水場の拡張 1965 年度 東村山浄水場の拡張 1966 年度 朝霞浄水場第Ⅰ期工事 1968 年度 朝霞浄水場第Ⅱ期工事 1969 年度 金町浄水場の拡張
1980	1979(S54)「水道施設耐震工法指針・解説」 ・Kh=0.1～0.3(標準水平震度は 0.2 を下回らない) ・応答変位法、動的解析法の採用 ・地震時の地盤変位、構造物の慣性力、地震時動水圧、液面揺動を考慮	1973(S48)石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準を定める省令 1977(S52)新耐震設計法(案) ・S52 年以降設計の建築物は現行基準とほぼ同じ耐震水準 1977(S52)地下埋設管路耐震継手の技術基準(案) 1978(S53)宮城県沖地震(M7.1) ・PC タンクの損傷 ・PC 橋脚の損傷	1970 年度 朝霞浄水場第Ⅲ期工事 1973 年度 金町浄水場の拡張 1974 年度 東村山浄水場の拡張 1975 年度 三園浄水場の建設 1976 年度 小作浄水場第Ⅱ期工事
			1985 年度 三郷浄水場第Ⅰ期工事

表 1. 2 水道施設の設計基準の変遷と主な地震（1990 年代以降）

年	水道施設の設計基準の変遷	主な地震等	主要浄水場の建設（年度）
1990	1997(H9)「水道施設耐震工法指針・解説」改訂 ・新たな震度法(修正震度法と統合)、応答変位法、動的解析 ・レベル 1、2 地震動を用いた耐震水準の設定（兵庫県南部地震クラスの地震動に対応した設計の導入） ・材料の非線形性を考慮した構造物特性係数	1995(H7)兵庫県南部地震(M7.3) ・土木・建築構造物に甚大な被害	1991 年度 三郷浄水場第Ⅱ期前期完成 1991 年度 金町浄水場高度浄水施設完成 1993 年度 三郷浄水場第Ⅱ期後期完成 1995 年度 金町浄水場高度浄水施設(二期)完成 1998 年度 三郷浄水場高度浄水施設完成
2000	2009(H21)「水道施設耐震工法指針・解説」改訂 ・性能設計の導入 ・経済性照査の紹介 ・動的解析の推奨	2000(H12)水道施設の技術的基準を定める省令 2003(H15)十勝沖地震(M8.0) ・液面揺動による石油タンクの被害 2004(H16)新潟県中越地震(M6.8) ・中山間地での孤立集落の発生 2007(H19)新潟県中越沖地震(M6.8) ・相互応援体制の見直し 2008(H20)水道施設の技術的基準を定める省令の一部改正	2004 年度 金町浄水場の施設更新 2004 年度 朝霞浄水場高度浄水施設完成 2006 年度 砧浄水場膜ろ過施設完成 2006 年度 砧下浄水所膜ろ過施設完成 2007 年度 三園浄水場高度浄水施設完成 2009 年度 東村山浄水場高度浄水施設完成
2010		2011(H23)東北地方太平洋沖地震（M9.0） ・津波被害、東北から関東までの広域災害発生 ・甚大な液状化被害 2014（H26）長野県神城断層地震 2016（H28）熊本地震 2016（H28）鳥取中部地震 2018（H30）大阪府北部を震源とする地震 2018（H30）平成 30 年 北海道胆振東部地震	2012 年度 金町浄水場高度浄水施設（三期）完成 2013 年度 三郷浄水場高度浄水施設（二期）完成 2013 年度 朝霞浄水場高度浄水施設（二期）完成
2020	2022（R4）「水道施設 耐震工法指針・解説」改訂 ・性能規定型設計の徹底 ・要求性能を規定 ・危機耐性の導入	2023（R6） 令和 6 年能登半島地震	

第2章 耐震設計の基本

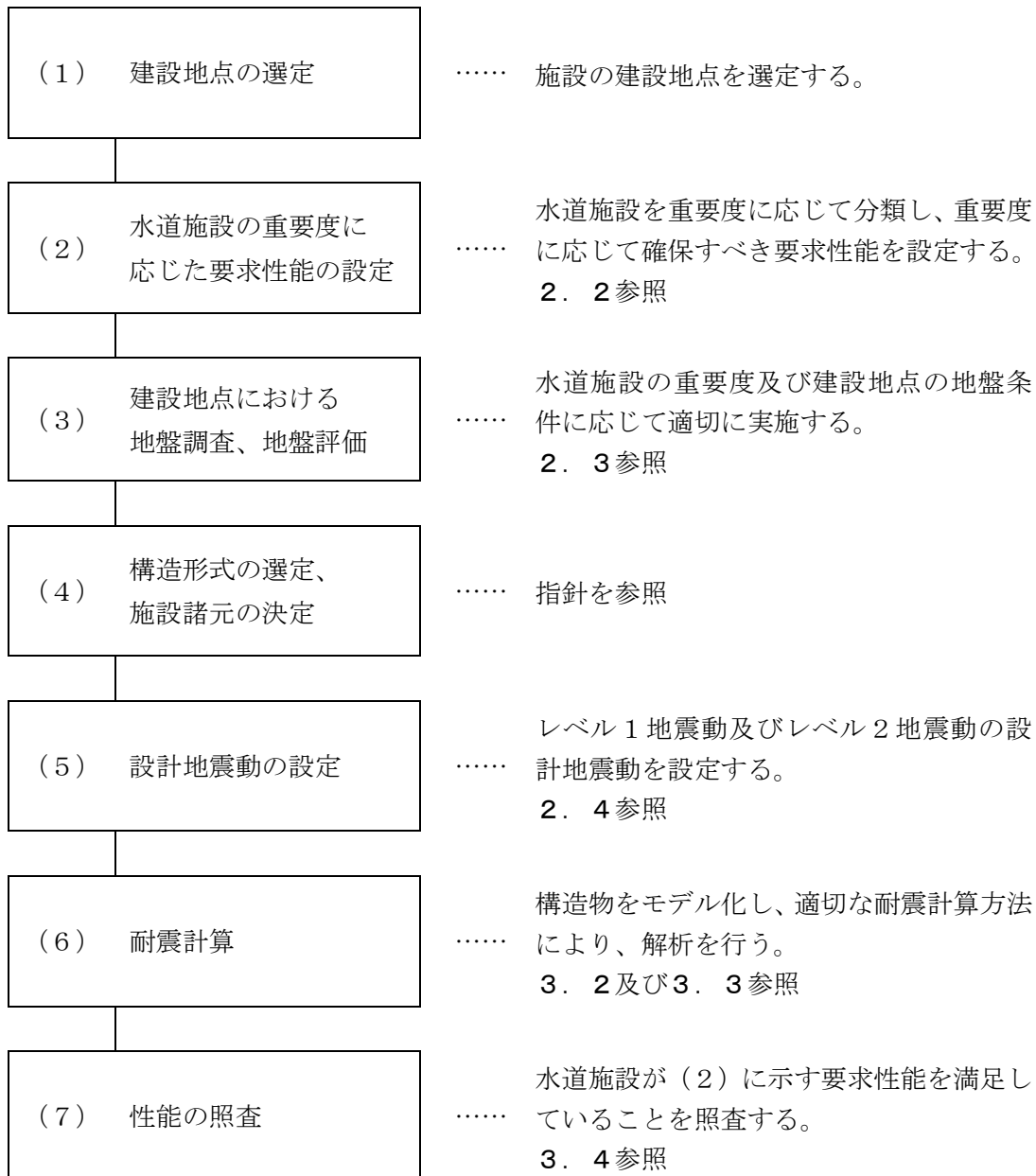
第2章 耐震設計の基本

2. 1 耐震設計の手順

2. 1. 1 新設設計の手順

水道施設は、当該施設の重要度に応じて保持すべき要求性能を確保できるように設計する（耐震計算は、当該施設が保持すべき要求性能を満足していることを照査する。）。

新設の耐震設計は、図2. 1に示す手順に従って行うことを基本とする。

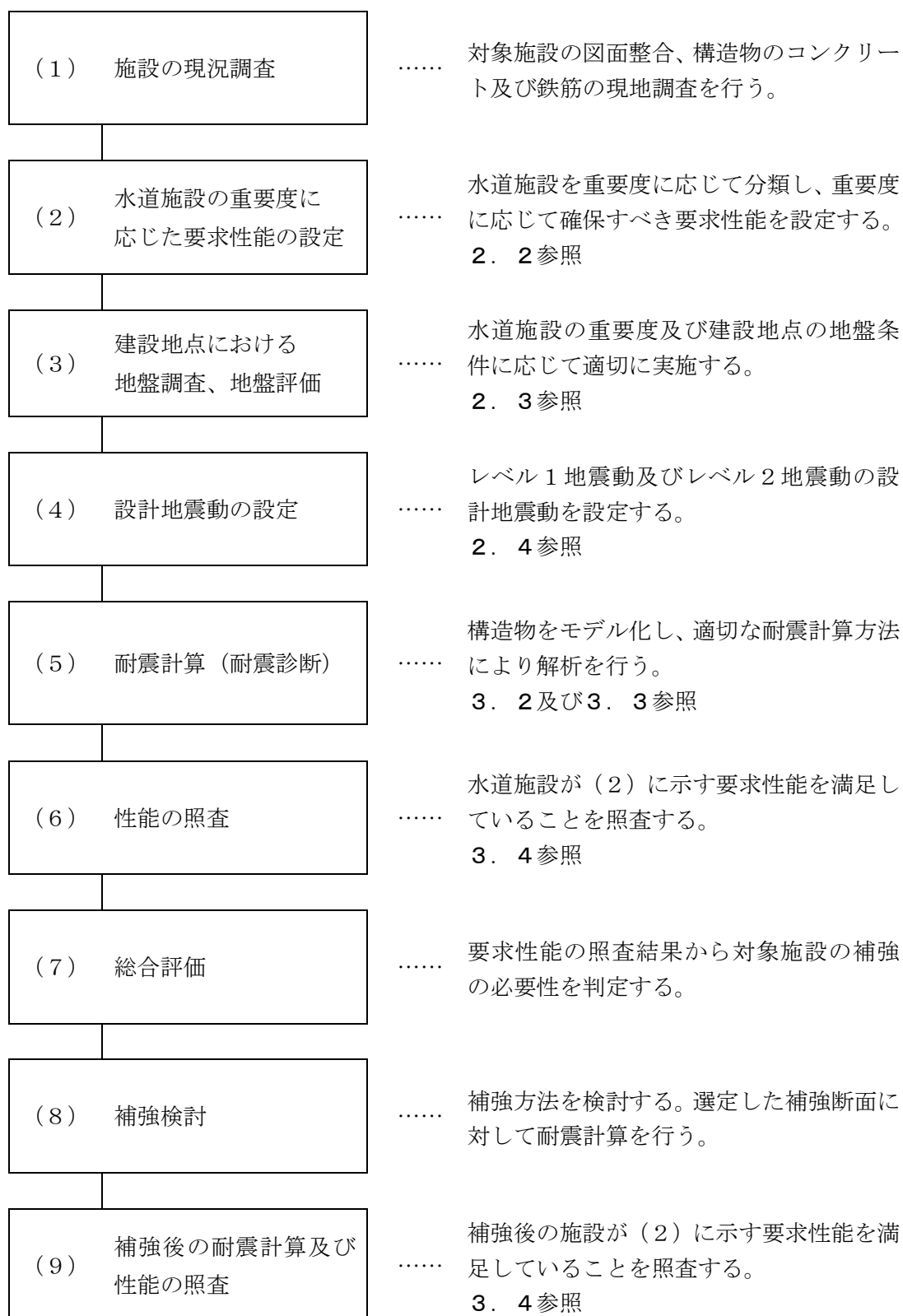


※ (5) から (7) は、検討結果によりフィードバックが必要となる。

図2. 1 新設設計の耐震設計のフロー

2. 1. 2 既設の耐震診断・耐震補強設計の手順

既設構造物の耐震診断・耐震補強設計は、図2. 2に示す手順に従って行うことを基本とする。



※（5）から（7）まで並びに（8）及び（9）は、検討結果によりフィードバックが必要となる。

図2. 2 耐震診断・補強設計の耐震設計のフロー

2. 2 水道施設の重要度に応じた要求性能の設定

2. 2. 1 施設の重要度

地震被害により生じる施設本来の機能に与える直接的な影響及び二次的影響の視点から、池状構造物の重要度は全てランク A1 とし、表 2. 1 のとおり設定する。

表 2. 1 施設の重要度区分

重要度区分	施設区分		対象施設
ランク A1	水道施設	貯水施設	全ての施設を対象とする。
		取水施設	
		導水施設	
		浄水施設	
		送水施設	・ 給(配)水所 ・ ポンプ所 ・ 応急給水施設
		配水施設	

2. 2. 2 設計地震動と要求性能の定義

(1) 設計地震動の定義

対象施設の耐震設計では、表 2. 2 に示す 2 段階のレベルの設計地震動を考慮する。

表 2. 2 設計地震動の定義

設計地震動	定義
レベル 1 地震動	当該施設の設置地点において発生するものと想定される地震動のうち、当該施設の供用期間中に発生する可能性が高いもの 原則として使用性の照査に使用する
レベル 2 地震動	当該施設の設置地点において発生するものと想定される地震動のうち、最大規模の強さを有するもの 復旧性、安全性の照査に使用する

(2) 要求性能の定義

水道施設の要求性能は、表 2. 3 に示すとおりとする。

表 2. 3 要求性能の定義

要求性能	定義
使用性	設定した地震作用等に対して、水道施設が継続的に使用できるための性能
復旧性	地震の影響等により低下した水道施設の性能を早期に復旧できる性能
安全性	設定した地震作用等に対して、水道施設機能に重大な影響を及ぼすような損傷が発生しない性能。さらに、利用者や周辺の人々の生命や財産を脅かさないための性能
危機耐性	安全性で定義した事象を超えて安全性が損なわれた場合に、水道施設が危機的な状況に至る可能性を小さくする性能

2. 2. 3 重要度に応じた要求性能の設定

施設の重要度に対して、設計地震動レベル別に保持すべき要求性能と、照査に用いる限界状態（3. 4 参照）は、表 2. 4 に示すとおりとする。

ランク A1 である池状構造物は、レベル 1 地震動に対しては使用性（限界状態 1）を、レベル 2 地震動に対しては復旧性（限界状態 2）を満たす必要がある。レベル 2 地震動に対しては、復旧性を保持することで安全性が確保される。

表 2. 4 池状構造物の要求性能に対する照査に用いる設計地震動と限界状態

要求性能	設計地震動		限界状態		
	レベル 1 地震動	レベル 2 地震動	限界状態 1	限界状態 2	限界状態 3
使用性	当局池状構造物 (ランク A1)		当局池状構造物 (ランク A1)		
復旧性		当局池状構造物 (ランク A1)		当局池状構造物 (ランク A1)	
安全性		当局池状構造物 (ランク A1)			当局池状構造物 (ランク A1)
危機耐性	危機耐性については「3. 5 危機耐性への対応」により考慮する				

2. 3 地盤調査及び地盤評価

2. 3. 1 耐震設計における地盤調査の概要

(1) 土質調査の基本

水道施設の耐震設計に当たっては、施設の重要性及び既存地盤調査資料の状況に応じて、建設地点の地盤に関する土質調査を行う。

水道施設は、地盤条件に合わせた構造形式及び基礎工が必要になり、耐震設計法も施設の構造形式だけでなく、地盤条件にも左右される。

したがって、土質調査を行い、建設地点の地盤の状態を正しく把握することが必要となる。

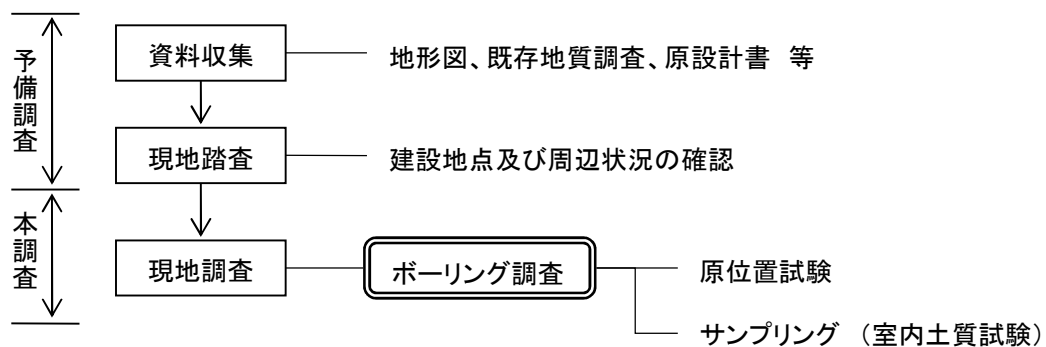


図 2. 3 土質調査の予備調査と本調査

(2) 既存の資料による調査

既存の資料から施設建設地点の地盤における土質の概略状況を把握する。施設によっては、既存の資料のみを使用して設計や診断を実施することも可能であるが、これらの資料を基に現地踏査を実施し、必要な調査項目を検討することが望ましい。収集する資料を次に示す。

- ア 地形図
- イ 地質図
- ウ 地盤図
- エ 土質柱状図

(3) 一般的な土質調査

一般的な耐震設計において、最低限必要となる調査項目を次に示す。建設地点の状況や解析手法に応じて必要な調査を追加すること。

- ア 層厚
- イ 地下水位
- ウ N 値
- エ 各層のせん断強さ（粘着力 C 、内部摩擦角 ϕ ）
- オ 各層の変形係数（ヤング率 E 、せん断弾性係数 G ）
- カ 各層の密度
- キ 土質断面図

(4) 地盤の動的解析のための土質調査

地盤の動的解析を実施するためには、土質定数に及ぼすひずみ速度効果やひずみ依存性の影響が重要になる。その場合は必要に応じ、次に示す土質定数を求める。

- ア 初期せん断弾性係数 G_0
- イ 減衰定数 h
- ウ ポアソン比 ν
- エ 弾性波速度（縦波速度 V_p 、横波速度 V_s ）
- オ 地盤のひずみ依存特性（繰り返しせん断試験） $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$
- カ 地盤の卓越周期 T_G
- キ その他

なお、液状化の発生が予測される地点において、詳細な液状化評価（有効応力解析等）を実施する場合には、液状化強度特性を調査する必要がある。

【水滴くんのワンポイントアドバイス】 ～ボーリング調査の必要本数と調査深度～

① ボーリング調査の必要本数

土質調査のなかでも、層厚やN値、地下水位を把握することを目的として、ボーリング調査が一般的に行われる。ボーリング調査の必要本数は、周辺地形や構造物規模、構造物の支持形式などにより異なるが、調査本数が少ないと地盤の特性を十分に把握できない可能性があり、危険側の設計に陥ったり、過度に安全側の設計となることがある。特に、下記に示すような施設・地盤についてはボーリング試験を必ず複数本実施し、三次元的な地質構造、地盤構成を把握することが重要である。

- ・ 既往調査から地層が水平方向に不整形である場合、または不明な場合
- ・ 施設規模が中～大規模の場合
- ・ 構造物基礎が杭基礎など直接基礎以外となる場合

また、必要本数の考え方の参考として、日本建築学会の指針では、建築面積とボーリング本数の目安(図2. 4)が示されている。構造設計指針・同解説(平成30年・東京都財務局)においては、基礎形式及び施工方法を選定するためのボーリング調査位置は、縦・横30～40mの間隔以内の位置で行うことを原則とすると記載されている(令和4年の国土交通省基準の改定に伴い、記載は削除されたが、財務局ポータルサイトに参考掲載されている。)

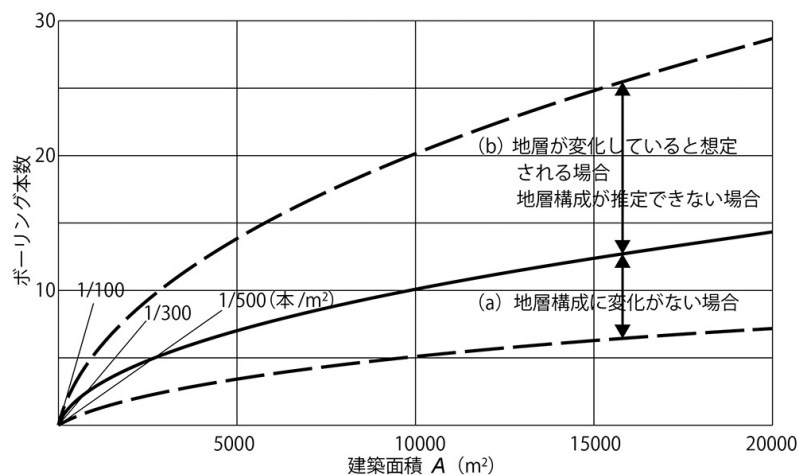


図2. 4 建築面積とボーリング本数の目安 (大規模建築物)

出典：建築基礎設計のための地盤調査計画指針 第3版 (日本建築学会,2009)

② ボーリング調査の調査深度

ボーリング調査は、一般的には工学的基盤(2. 3. 3参照)や支持層が確認できたところで掘止めとなる。工学的基盤や支持層の確認を目的とする場合、実務上はN値50以上の層を5m確認することが目安とされている。しかしながら、軟弱地盤の地域ではN値50以上の層が深層部まで連続して出ない場合もあり、以下に示すような対応を検討する。

- ・ PS検層を実施し工学的基盤相当の層であることを確認する。
- ・ 代表箇所では工学的基盤面の確認を行い、その他の箇所では支持層(目安として粘性土N値20程度以上、砂層・砂礫層N値30程度以上)までの調査を行う。
- ・ 支持層までの調査を行い、支持層以深については常時微動測定や地震ハザードステーションの公開地盤データを用いて工学的基盤面までの地盤情報を補完する。

(5) 解析条件に応じた調査項目の設定

土質調査の実施に当たっては、構造物の種類と地盤性状に応じて、調査項目と調査方法を選定する。各種の調査及び室内試験について、日本工業規格（JIS）及び地盤工学会基準（JGS）に定められているものは、その規格及び基準に従うこと。

表 2. 5 調査項目－土質試験 対比表

No	調 査 項 目	記 号	単 位	試 験 方 法 (規 格)	設計における使用箇所	解 析	
						静的	動的
1	N 値	N	—	標準貫入試験 (JIS A 1219)	構造計算全般で使用	○	○
2	層厚	-	m		〃	○	○
3	自然地下水位	-	m		液状化判定、浮力等	○	○
4	変形係数	E_0	kN/ m ²	孔内水平載荷試験 (LLT) (JGS 1421)	地盤ばね係数	△	△
5	せん断弾性波速度	V_p V_s	m/s	PS 検層 (JGS 1122)	地盤固有周期 T_G ポアソン比 ν ヤング率 E_0 せん断弾性係数 G	○	○
6	表層地盤の卓越周期・ 増幅率	T_p A_p	sec —	常時微動測定	地盤固有周期 T_G	△	△
7	透水係数	k	—	現場透水試験 (JGS 0311)	排水計画、有効応力解析等	△	△
8	単位体積重量	γ_t γ_s	kN/ m ³	土粒子密度試験 (JIS A 1202)	土砂荷重、支持力計算等	○	○
9	含水比	ω		土の含水比試験 (JIS A 1203)	間隙比 e 、飽和度 S_r	○	○
10	湿潤密度	ρ_t		土の湿潤密度試験 (JIS A 1224)	支持力、沈下、土圧、 斜面安定計算	○	○
11	平均粒径	D_{50}	%	土の粒度試験 (JIS A 1204)	液状化判定	○	○
12	細粒分含有率	Fc	%	細粒分含有率試験 (JIS A 1223)	〃	○	○
13	粘着力 (粘性土)	C	kN/ m ²	土の三軸圧縮試験 (UU) (JGS 0521) (CU) (JGS 0522)	支持力、土圧、斜面安定計算	○	○
14	内部摩擦角 (砂質土)	ϕ	°	土の三軸圧縮試験 (CD) (JGS 0524)	〃	○	○
15	塑性指数	I_p	—	土の液性限界・塑性限界試験 (JIS A 1205)	液状化判定、土の分類	○	○
16	圧縮指数 (粘性土)	C_c	—	土の圧密試験 (JIS A 1217)	圧密沈下量 (e-logp 曲線)	△	△
17	体積圧縮係数 (粘性土)	m_v	—		〃	△	△
18	せん断弾性係数／ 初期せん断弾性係数	G/G_0	—	繰返し三軸試験 (JGS 0542)	繰返しせん断特性、地震応答解析	-	○
19	減衰定数	h	—	繰返し中空ねじり試験 (JGS 0543)	〃	-	○
20	液状化強度比	R	—	繰返し非排水三軸試験 (JGS 0541)	液状化判定、液状化強度特性の評価、有効応力解析	-	△

凡例 ○ 多く用いられる。 △ 用いられる場合がある。



【水滴くんのワンポイントアドバイス】 ～設計対象施設と調査項目～

・変形係数

変形係数とは地盤の弾性係数である。主に杭基礎施設や地下施設の設計において地盤ばね係数を算出するうえで必要となるが、地上で直接基礎の施設では一般的に孔内水平載荷試験は不要であることから、本ガイドラインでは△の評価としている。変形係数は室内試験や標準貫入試験の結果から算定することも可能であるが、原位置試験である孔内水平載荷試験は信頼性が高い。測定位置は、杭基礎の応答値が大きくなる杭頭付近や軟弱層を対象とすることが多い。

・表層地盤の卓越周期・増幅率

表層地盤の卓越周期や増幅率は、標準貫入試験やPS検層の結果のほか、常時微動測定からも算定することができる。常時微動測定は各層の地質や層厚などを把握するのは不向きであるが、表層全体の周期特性を比較的容易に直接計測することができるため、ボーリング調査結果の補完や、周期特性を簡易的に把握することを目的として用いられる。ボーリング調査結果で周辺の周期特性を十分把握できる場合、一般的に常時微動調査は不要であることから、本ガイドラインでは△の評価としている。

・透水係数

透水係数は水が土中を通過する際の通りやすさの度合いを示し、現場透水試験により求められる。実務上は、地下水以深を掘削する場合の仮設排水検討や、薬液注入などの地盤改良を行う場合、液状化地盤で有効応力解析を行う場合などに必要となる。上記に示すような仮設排水検討や地盤改良、有効応力解析による解析を行わない場合、一般的に現場透水試験は不要であることから、本ガイドラインでは△の評価としている。

・圧縮指数、体積圧縮係数

圧密は透水性の低い土が圧縮力を受けることで長時間をかけて体積が減少する現象である。特に軟らかい粘土やシルト層上に新たに施設や道路整備を行う場合、圧密による地盤沈下が問題となり得ることから、圧縮指数や体積圧縮係数を求めるために圧密試験が行われる。土質が粘土やシルト以外の場合や載荷荷重が特に増えない場合、一般的に圧密試験は不要であることから、本ガイドラインでは△の評価としている。

・せん断弾性係数、初期せん断弾性係数、減衰定数、液状化強度比

地盤の動的解析を行う場合、中～大ひずみ領域の物性値が必要となることから、繰返しせん断試験（繰返し三軸試験、繰返し中空ねじり試験）を行う。繰返しせん断試験は室内試験の中でも比較的高価なことから、影響が大きい主要な地層に対して行われ、それ以外の地層では土研式の繰返しせん断特性などを用いられることも多い。また、繰返し中空ねじり試験は繰返し三軸試験に比べ実際の応力状態に近い状態が再現できるが、繰返し三軸試験に比べ高価となることから、実務上は繰返し三軸試験を用いることが多い。

地盤が液状化地盤の場合、繰返し非排水三軸試験を行うことにより、液状化強度特性や動的解析に必要なパラメータが求められ、合理的な施設設計が可能となる。液状化の懸念が無く全応力解析での解析が可能な地盤の場合、繰返し非排水三軸試験は一般的に不要であることから、本ガイドラインでは△の評価としている。

2. 3. 2 地盤の動的解析で必要となる地盤調査

(1) 地盤の動的特性試験

地盤応答解析（動的解析）を行う場合に必要となるデータを次に示す。

- ① 層厚
- ② 単位体積重量（ γ_t ）と N 値
- ③ ポアソン比
- ④ 弾性波速度（縦波速度 V_p 、横波速度 V_s ）又は初期せん断弾性係数（ G_0 ）
- ⑤ せん断弾性係数比－ひずみ関係（ $G/G_0 \sim \gamma$ ）、減衰定数－ひずみ関係（ $h \sim \gamma$ ）

このうち③、④及び⑤が動的物性値に当たり、解析に求められる精度や得られる地盤情報によって設定方法を選択する。

ア 試験・調査から直接求める方法

動的物性値を直接求める方法を表 2. 6 に示す。

表 2. 6 動的物性値の調査方法

種 類	調査・試験方法	物 性 値
原位置試験	PS 検層	V_p 、 V_s
	常時微動測定	T_G
室内試験	繰返し三軸試験（繰返し）	E 、 G 、 ν 、 h
	繰返し中空ねじり試験（繰返し）	

イ 計算や既往研究から推定する方法

ポアソン比、せん断弾性波速度などを推定する計算式は主要な基準類においても規定されている。主な式を以下に示す。ただし、PS 検層を実施しない場合、ポアソン比は計算式から求めることができないため、既往の文献や報告等を参考に設定する。

$$(ア) \text{ ポアソン比} \quad \nu = \frac{1 - 2 \cdot (V_s/V_p)^2}{2 - 2 \cdot (V_s/V_p)^2}$$

ここに、

ν : ポアソン比

V_p : 縦波速度 (m/s)

V_s : せん断波（横波）速度 (m/s)

N 値から V_s を推定する場合は、表 2. 11 を参照のこと。

$$(イ) \text{ せん断弾性係数} \quad G = \frac{1}{g} \cdot \gamma_t \cdot V_s^2 \quad (\text{kN/m}^2)$$

ここに、

G : せん断弾性係数 (kN/m²)

g : 重力加速度 (m/s^2)
 γ_t : 単位体積重量 (kN/m^3)

(ウ) ヤング率 $E = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot G$ (kN/m^2)

ここに、

E : ヤング率 (kN/m^2)

(2) PS 検層 (弾性波速度検層)

PS 検層は、ボーリング地点における深さ方向の詳細な速度分布を求めることができる試験である。PS 検層により V_p 及び V_s が求められると、地盤のポアソン比 ν 、ヤング率 E 及びせん断弾性係数 G は、2. 3. 2 に示す式により求められる。

また、表層地盤の固有周期 T_G や地盤のせん断弾性波速度 V_s は、弾性波探査や PS 検層によって測定するのが望ましいが、実測値がない場合は、 N 値から推定してもよい。

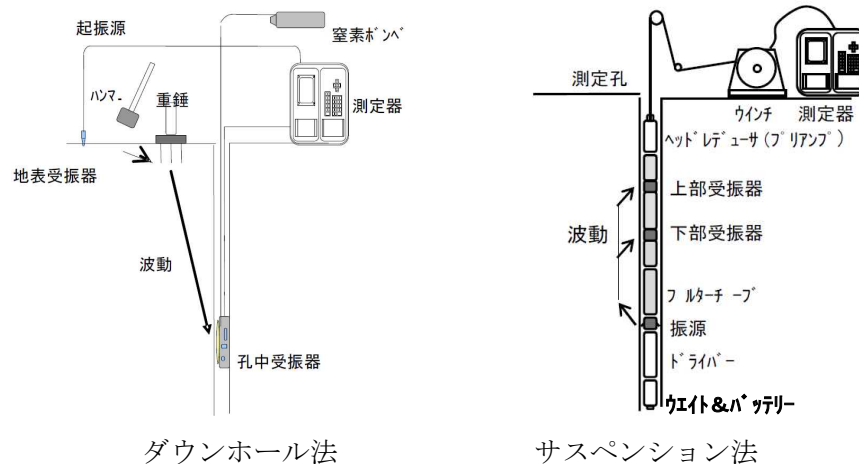


図 2. 5 PS 検層の試験装置の例

出典：新版 物理探査適用の手引き～土木物理探査マニュアル 2008～ p.491,p.505

(物理探査学会、2008 年)

(3) 常時微動測定

一般に微小震動のうちで振動数が $1 \sim 20\text{Hz}$ 程度のものを常時微動と呼んでおり、常時微動測定によって地盤の地震工学的特性である測定地点の卓越周期や増幅特性の推定ができる。

1 地点における常時微動測定では、水平動 (H) と上下動 (V) とのスペクトル比 (以下「H/V スペクトル比」という。) から地盤の振動特性を評価する方法が提案されている。

この方法は、微動の H/V スペクトル比の最大ピークを与える周期を地盤の卓越周期、その周期における H/V スペクトル比を地盤の増幅倍率として見なすものである。

また、常時微動のアレー観測により地下構造を探査する方法がある。これは、表面波の性質を利用して、様々な周期をもつ表面波の伝播速度を推定し、深いところから浅いところまで (地震基盤から地表まで (p.20 【水滴くんのワンポイントアドバイス】参照) の地下構造を推定するものである。

【水滴くんのワンポイントアドバイス】 ～地盤構造の物理探査法～

① 屈折法地震探査

屈折法地震探査は、地表付近での発破などによって人工的に弾性波（P 波及び S 波）を発生させ、地下の速度の異なる地層境界で屈折して戻ってきた屈折波を地表に設置した測定装置で観測し、地下の速度構造を求める探査法である。

測定では、現地に測線を設定し、測線上の全ての受振点には、その位置を示す杭を打設して標高を測量する。受振点間隔は 5m 又は 10m にすることが一般的である（S 波探査は、1.0m～2.5m 程度）。

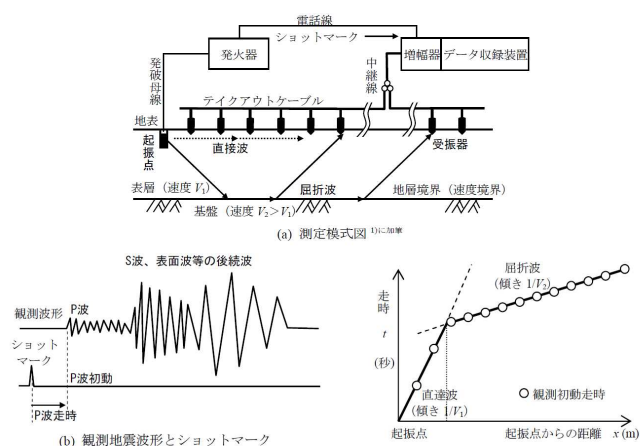


図 2. 6 屈折法探査の測定概念

出典：新版 物理探査適用の手引き～土木物理探査マニュアル 2008～ p.20
(物理探査学会、2008 年)

② 反射法地震探査

反射法地震探査は、地表で発生させた波が地中の反射面（主に、速度や密度が変化する地層境界面）で反射して返ってくる様を捉え、その到達時間その他の情報を用いて地下構造を探査する手法である。断層調査などに用いられている。

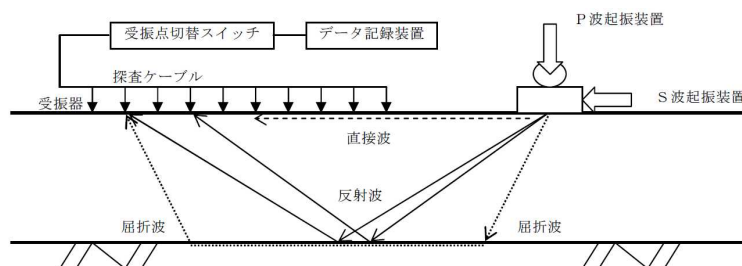


図 2. 7 反射法探査の測定概念

出典：新版 物理探査適用の手引き～土木物理探査マニュアル 2008～ p.67
(物理探査学会、2008 年)

(4) 繰返し三軸試験（変形特性）

この試験は、地盤工学会基準 JGS-0542-2009 に準拠する。土が過去に受けた応力履歴をできるだけ忠実に室内の要素試験で再現し（乱さない試料）、さらに、荷重を加えて土の挙動を推定する試験である。

試験装置は、加振装置、三軸セル、測定装置及び記録装置から構成される。土の非線形特性、砂の液状化を含む強度及び砂の締固め特性を調べることが主な目的である。

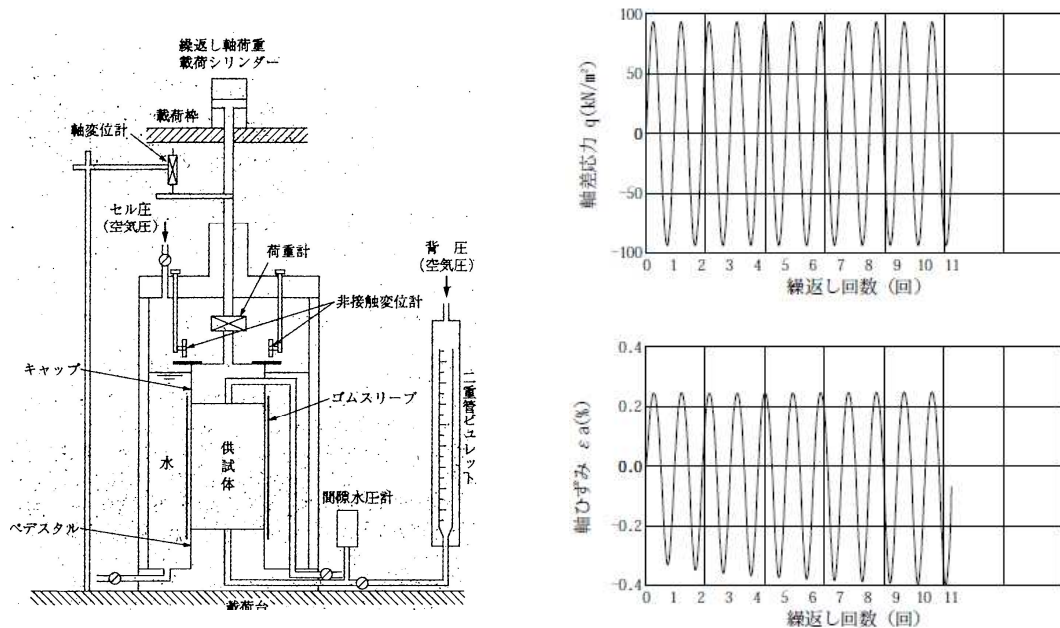


図 2. 8 試験装置と試験記録の例

出典：地盤材料試験の方法と解説、p.752（地盤工学会、2009 年）

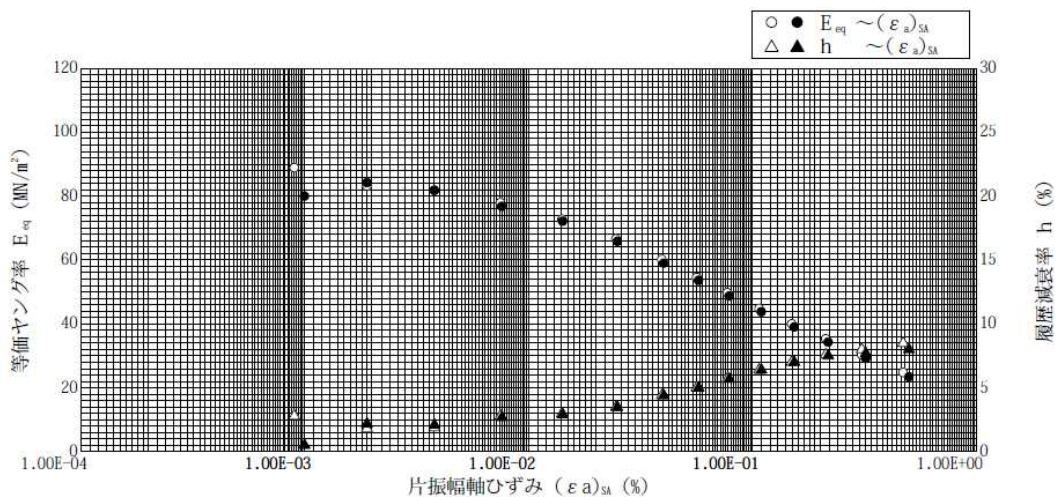


図 2. 9 試験結果のとりまとめ例（土のせん断剛性と減衰定数のひずみ依存曲線）

(5) 繰返し中空ねじりせん断試験（変形特性）

この試験は、地盤工学会基準 JGS-0543-2009 に準拠する。中空の円筒形供試体を用いて上端にトルクを加えて円周方向にねじることによって、供試体全体にせん断変形を与える試験である。片振幅せん断ひずみ (γ) が 0.001%以下から 0.1%以上の一定振幅の繰返しねじり力を連続して載荷する。

三軸試験のような間接型せん断試験と比べて、地震時における原地盤での応力及び変形条件を比較的忠実に再現できることに利点がある。

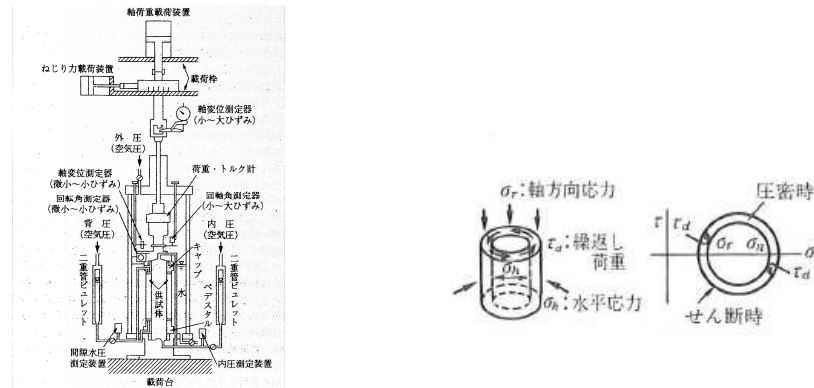


図 2. 10 試験装置の例

出典：地盤材料試験の方法と解説、p.768（地盤工学会、2009 年）

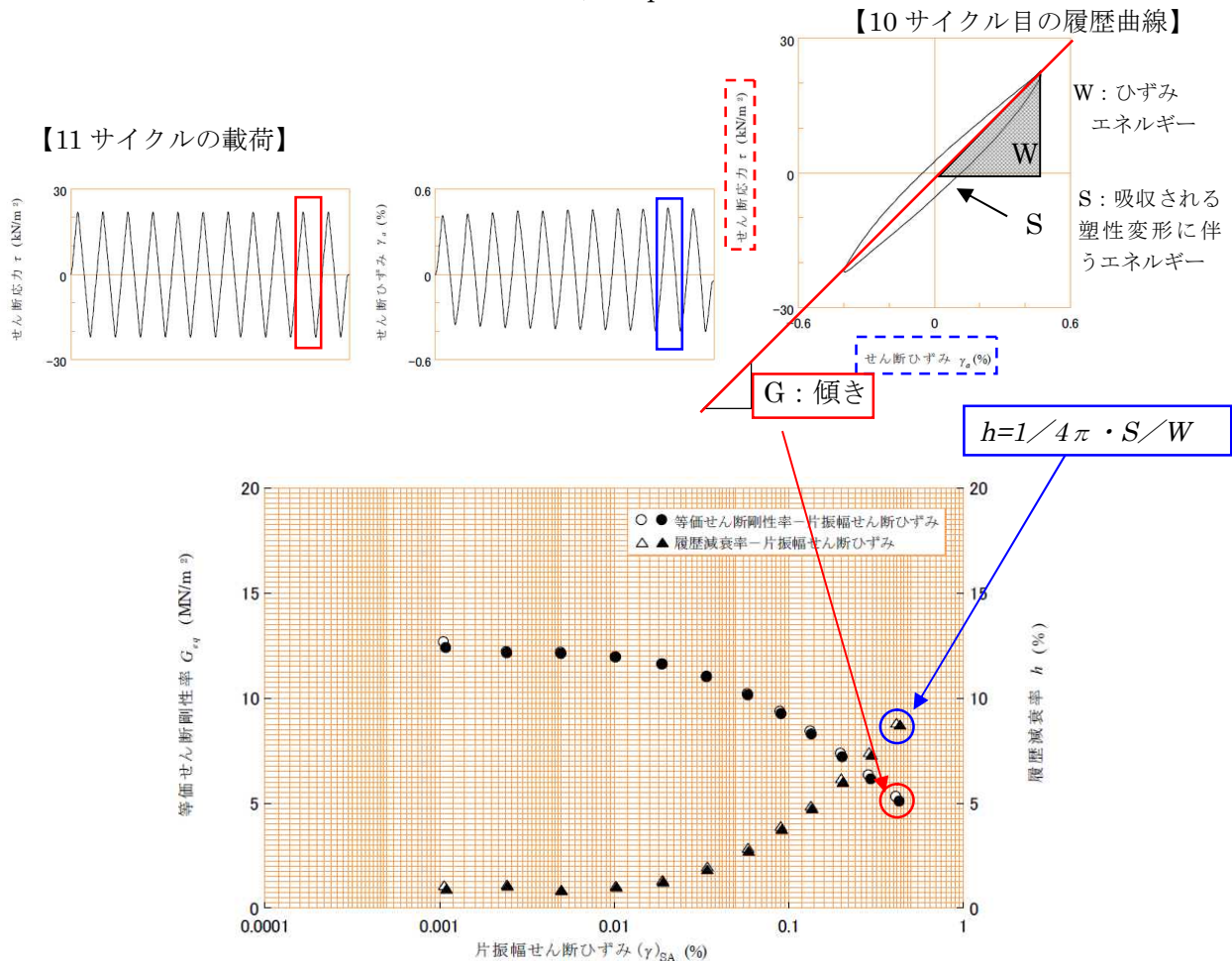


図 2. 11 試験結果のとりまとめ例（土のせん断剛性と減衰定数のひずみ依存曲線）

(6) 繰返し非排水三軸試験（液状化特性）

この試験は、地盤工学会基準 JGS-0541-2009 に準拠する。等方応力状態で圧密された土に対して、繰返し三軸試験装置を用いて、①非排水状態における繰返し軸差応力の片振幅又は繰返し応力振幅比と所定の両振幅軸ひずみ、②所定の過剰間隙水圧に達するまでの繰返し載荷回数との関係を求めることを目的とする。

主として飽和砂質土を対象とした試験であり、砂質土の液状化特性として、繰返し応力振幅比、液状化強度曲線図、有効応力経路図などを得ることができる。詳細な液状化評価（有効応力解析など）を行う際に実施する試験である。

なお、液状化特性を求める試験には、中空ねじり試験装置を用いた繰返し非排水中空ねじりせん断試験もある。

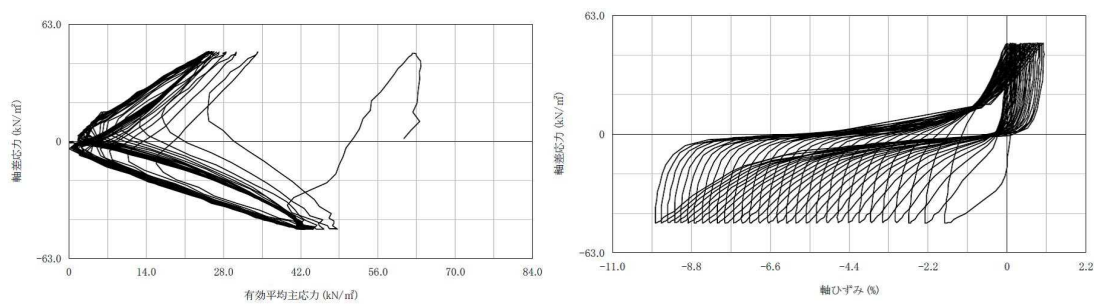


図 2. 1 2 有効応力経路図（結果例）

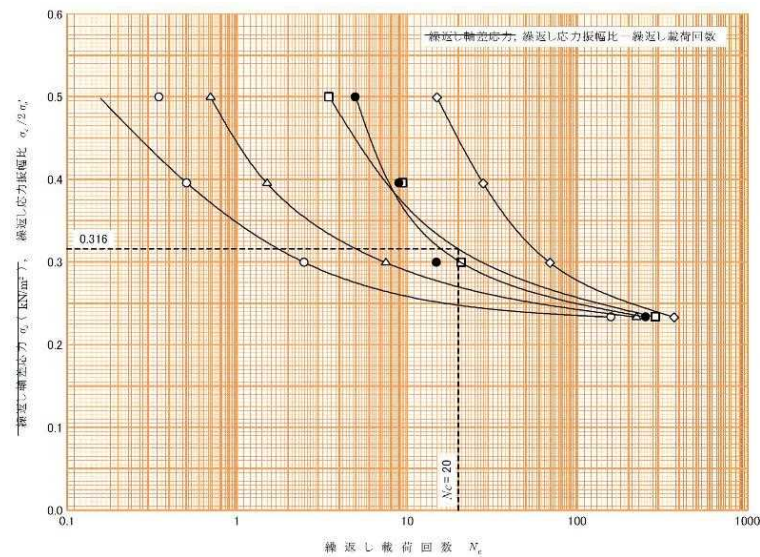


図 2. 1 3 液状化強度曲線（結果例）

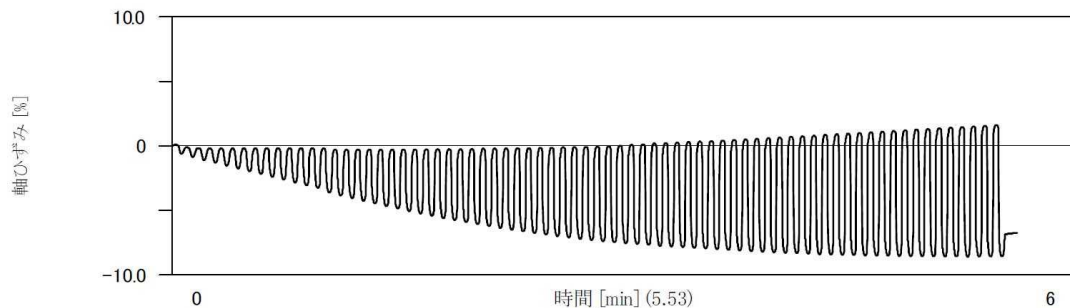


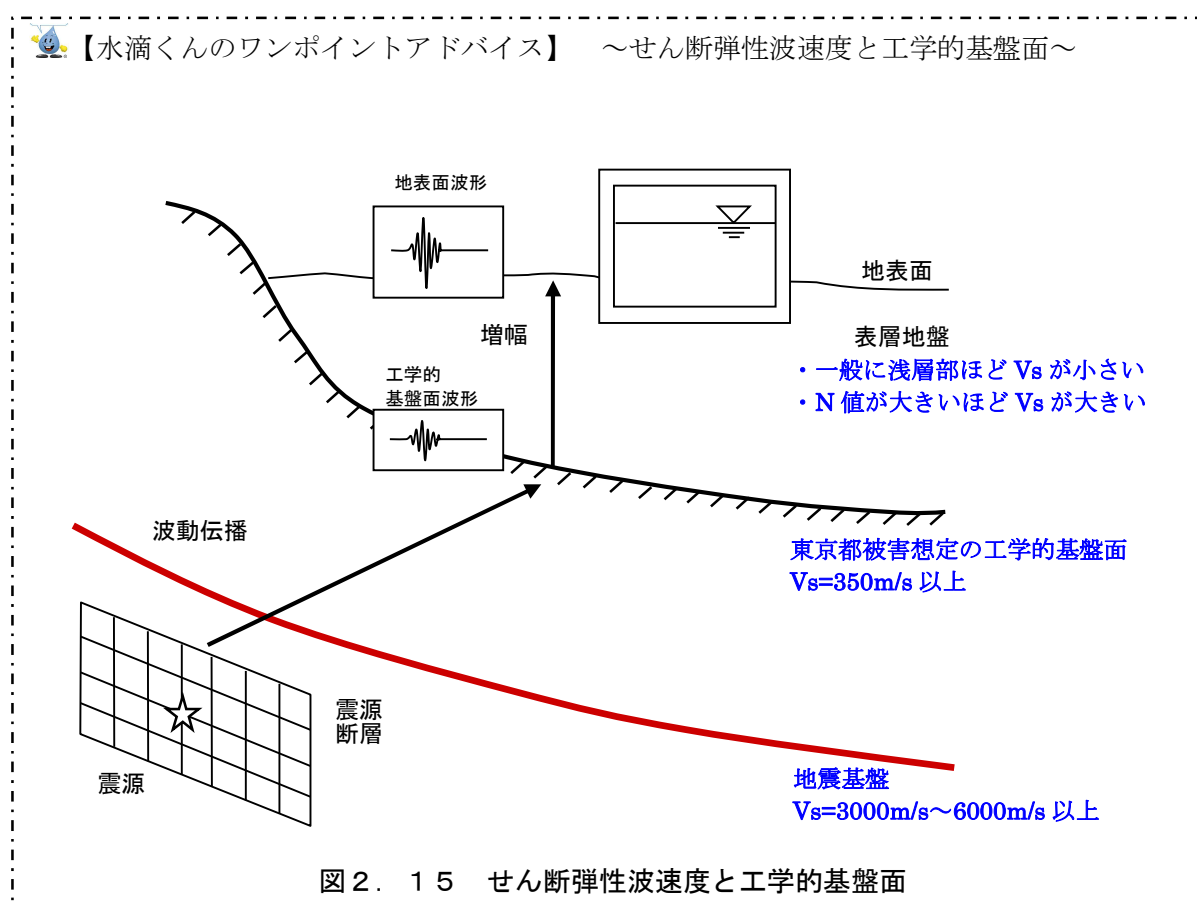
図 2. 1 4 軸ひずみ履歴図（結果例）

2. 3. 3 工学的基盤面の設定

工学的基盤面とは、地盤のモデル化において、耐震設計上の基盤面と見なす地層であり、工学的基盤面の設定は、耐震設計において重要である。

工学的基盤面は、対象地点に共通する広がりを持ち、堅固（非線形化しない）でせん断弾性波速度が表層地盤のそれと比べて十分に大きい地盤の上面を想定する。設定においては、当該地点の地質調査データのみでなく、周辺地盤の情報も十分に収集し、総合的な視点で設定しなければならない。

指針の工学的基盤面は N 値 50 以上またはせん断弾性波速度 $V_s \geq 300\text{m/s}$ となっているが、本ガイドラインでは東京都地震被害想定 of 工学的基盤面に合わせ、せん断弾性波速度 $V_s \geq 350\text{m/s}$ の連続した地層の上面を原則とする。



【水滴くんのワンポイントアドバイス】～地震ハザードステーション J-SHIS～

地震ハザードステーション J-SHIS は、防災科学技術研究所が運営している「地震動予測地図」の公開システムである。250m メッシュの地震動予測地図をはじめ、表層地盤及び深部地盤のデータが公開されているので、建設地点の地盤概況等を調べる際に活用できるシステムである。

<http://www.j-shis.bosai.go.jp/map/>

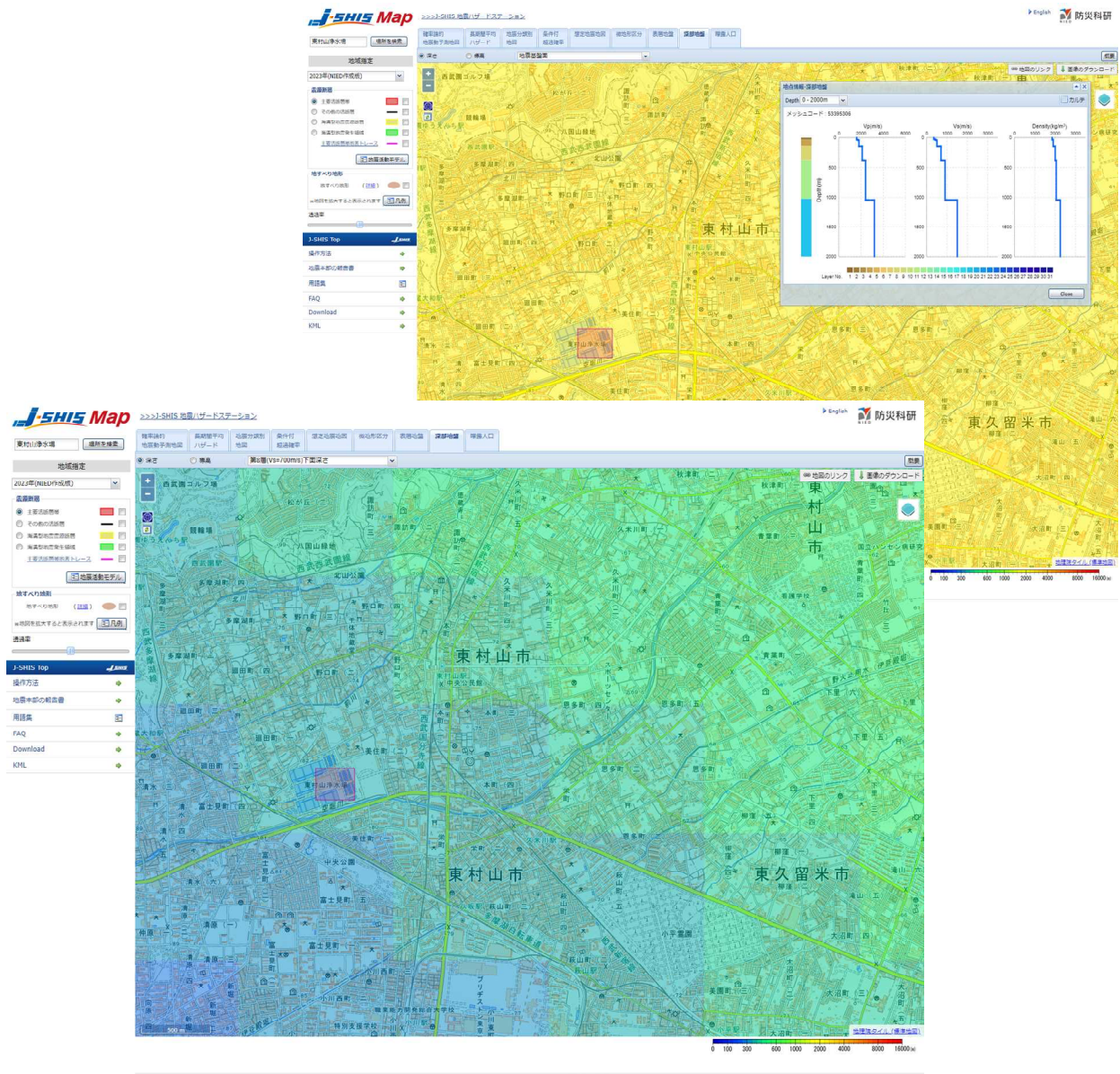


図2. 16 地震ハザードステーション (J-SHIS)

出典：防災科学技術研究所 HP より

2. 3. 4 地盤固有周期の算出

地盤の固有周期には、平常時（微小ひずみ）における固有周期 T_G と地震時（大ひずみ）における固有周期 T_G' がある。前者は、PS 検層の結果や常時微動測定により実測することができる。後者は、一次元地盤応答解析結果の収束剛性を用いて算出する方法（2. 4. 4（6）参照）や地震観測記録から求める方法などがある。やむを得ず N 値から平常時の地盤固有周期 T_G を算出する場合は、表 2. 1 1 からせん断弾性波速度 V_s を求めてもよい。

なお、地盤の地震時挙動を評価する場合には、地震時の地盤固有周期 T_G' が重要となるため、動的解析を行う場合には、地震時の地盤固有周期 T_G' を算定することを原則とする。

【水滴くんのワンポイントアドバイス】～地盤固有周期について～

地震時における構造物の挙動は、地盤の揺れ方に大きく影響されるので、耐震設計では地盤の揺れ方の評価が重要である。地盤の揺れ方を見る指標の一つに地盤固有周期がある。

地盤固有周期は、地盤種別の判定、応答変位法における地盤変位の算定、動的解析の入力地震動の選定などに用いられる。ただし、地震時の地盤剛性は平常時に比べて低下し、地盤固有周期は平常時よりも地震時の方が長くなるため、地盤固有周期は用途に応じて使い分けが必要となる。本ガイドラインにおける地盤固有周期の定義を次に示す。

① 平常時の地盤固有周期： T_G

【求め方】

- ・ 常時微動測定の卓越周期
- ・ PS 検層よりせん断弾性波速度 V_s を求め、2. 4. 2（4）イの式より T_G を算定する。
- ・ N 値を用いて表 2. 1 1 よりせん断弾性波速度 V_s を求め、 T_G を算定する。

【用途】

- ・ 地盤種別の判定、地盤の揺れやすさの評価

② 地震時（レベル 2 地震動）の地盤固有周期： T_G'

【求め方】

- ・ 一次元地盤応答解析の収束値のせん断弾性波速度 V_s を用いて、 T_G' を算定する。
算定方法の詳細は、2. 4. 4（6）を参照のこと。

【用途】

- ・ 動的解析における入力地震動の選定、地震時の地盤周期特性の評価
- ・ 応答変位法における地震時地盤変位、地震時周面せん断力の算定（レベル 2 地震動）

③ 地震時（レベル 1 地震動）の地盤固有周期： T_s

【求め方】

- ・ 次式より求める。

$$T_s = 1.25 T_G$$

ここに、 T_s ：応答変位法（レベル 1 地震動）に用いる地盤固有周期（sec）

T_G ：平常時の地盤固有周期（sec） ※①の地盤固有周期

出典：指針・総論 p.94（3.3 立坑、暗渠、共同溝及びシールドトンネルの耐震計算法）

【用途】

- ・ 応答変位法における地震時地盤変位、地震時周面せん断力の算定（レベル 1 地震動）

2. 3. 5 地盤の液状化の判定

地盤の液状化とは、砂質地盤が地震動による繰返し応力により、急激にその強度と剛性を喪失し、あたかも地盤全体が液体のように振る舞う現象である。地盤の液状化は、地中構造物の浮上や構造物の沈下、傾斜等の被害を水道施設に生じさせるため、耐震設計上の配慮と対策が必要である。

(1) 地盤の液状化判定が必要な地盤条件

沖積層で次の三つの条件全てに該当する場合に、液状化の判定を行う。

- ア 地下水位が現地盤面から 10m 以内にあり、かつ、現地盤面から 25m 以内の深さに存在する飽和土層
- イ 細粒分含有率 FC が 35%以下の土層又は FC が 35%を超えても塑性指数 I_P が 15 以下の土層
- ウ 平均粒径 D_{50} が 10 mm以下であり、かつ、10%粒径 D_{10} が 1 mm以下である土層

なお、洪積土は、東北地方太平洋沖地震や兵庫県南部地震を含む既往の地震において液状化した事例が報告されていない。洪積土は、一般に N 値が高く、続成作用（軟かい堆積物が堅い堆積岩に変化すること）により液状化に対する抵抗が高いため、一般に液状化の可能性は低い。が、軟弱な洪積土は、液状化判定をする必要がある。

(2) 液状化判定

(1) の規定により液状化の判定を行う必要がある土層に対しては、レベル 1 地震動及びレベル 2 地震動に対して、液状化に対する抵抗率 F_L を算出し、この値が 1.0 以下の土層については液状化するものとみなす。

$$F_L = R / L$$

れた設計地

R : 動的せん断強度比

L : 地震時せん断応力比

動的せん断強度比 R とは、地震時における地盤のせん断抵抗力の指標であり、繰返し非排水三軸試験により求められる。簡易的には（一般的な設計では）、 N 値より求めることができる。なお、動的せん断強度比 R は、抵抗力を示す指標であるが、地震動特性（直下型、海溝型）により補正係数 C_w の値が変化するので、注意が必要である。

地震時せん断応力比 L とは、地震時における地盤に発生するせん断応力の指標であり、応答解析により求めることができる（3. 2. 6 参照）。簡易的には、地中の設計水平震度から求めることができる。

簡易法（FL 法）による液状化判定方法や、液状化程度の評価法（PL 法）の詳細は、指針・参考資料 p.316 及び道示（平成 29 年版）V 耐震設計編 p.161 を参照。

$PL > 15$: 液状化の可能性が大

$5 < PL \leq 15$: 液状化の可能性が中

また、液状化判定は、FL 法等の簡易法を用いることが標準であるが、詳細な液状化予測を行う場合には、全応力解析法と有効応力解析法を用いて判定する必要がある（解析手法の詳細は、3. 2 参照）。

2. 4 設計地震動

2. 4. 1 当局における設計地震動の設定方針

(1) 設定方法の概要

当局における設計地震動の設定方法の概要を表 2. 7 に示す。用語等の詳細については (2) 及び (3) に示す。

表 2. 7 設計地震動の設定方法の概要

	静的解析	動的解析
レベル 1 地震動	指針のレベル 1 地震動の設計震度を用いる。	指針のレベル 1 地震動の設計震度にスペクトルフィッティングした時刻歴加速度波形を用いる。
レベル 2 地震動	- 方法 2、方法 4 で、どちらか大きい方を採用する。 - 方法 2 は、都心南部直下地震、多摩東部直下地震、立川断層帯地震、大正関東地震の中から選定する。 - 方法 4 は、09 年版指針・総論解説編Ⅲのレベル 2 地震動の設計震度を用いる。	- 方法 2、方法 3 を併用する（3 波以上）。 - 方法 2 は、都心南部直下地震、多摩東部直下地震、立川断層帯地震、大正関東地震の中から選定する。 - 方法 3 は、1995 年兵庫県南部地震、2004 年新潟県中越地震、2007 年新潟県中越沖地震、2016 年熊本地震の中から震度 6 強程度の波形を選定する。

(2) レベル 1 地震動の設定方法

レベル 1 地震動とは、水道施設の耐震設計に用いる入力地震動であり、「当該施設の設置地点において発生するものと想定される地震動のうち、当該施設の供用期間中に発生する可能性が高いもの」と定義されている（水道施設の技術的基準を定める省令（平成 12 年厚生省令第 15 号。以下「国交省令」という。）。指針では、従来方法（09 年版指針の手法）によりレベル 1 地震動を設定する場合と、経済性照査を用いてレベル 1 地震動を設定する場合の 2 つの手法が記載されている。

当局における水道施設の耐震設計においては、従来方法を用いてレベル 1 地震動を設定することを基本とする。経済性照査は、耐震化事業の最適化等の詳細検討が必要な場合に有効であるが、便益算定方法等の条件について別途検討を要するため、今後の検討課題とする。

従来方法でレベル 1 地震動を設定する場合における指針の規定を表 2. 8 に示す。

表 2. 8 レベル 1 地震動の設定方法（指針の規定の抜粋）

設定方法	動的解析に用いる設計地震動	静的解析に用いる設計地震動
従来方法を用いて設定する場合	線形解析を行う場合は、建設地点の地盤条件を用い、「09 年版指針・総論解説編Ⅲ」に示す設計震度スペクトルフィッティングした時刻歴加速度波形を用いる。	建設地点の地盤条件及び構造物の固有周期を用い、「09 年版指針・総論解説編Ⅲ」に示す設計震度を用いる。

出典：指針・本編 p.43（日本水道協会、2022 年）

(3) レベル2地震動の設定方法

レベル2地震動とは、水道施設の耐震設計に用いる入力地震動であり、「当該施設の設置地点において発生するものと想定される地震動のうち、最大規模の強さを有するもの」と定義されている（国交省令）。

指針では、レベル2地震動の設定として、表2.9に示す4つの方法が示されており、解析手法に応じて適用できる方法が定められている。当局においては、レベル2地震動を動的解析と静的解析で区別し、次のように設定する。

ア 動的解析（非線形） 方法2、方法3を併用し、3波形以上を用いる。

イ 静的解析（線形・非線形）方法2、方法4のうちどちらか大きい方の設計震度を用いる。

表2.9 レベル2地震動の設定方法（指針の規定）

設定方法		動的解析	静的解析※
方法1	震源断層を想定した地震動評価を行い、当該地点での地震動を使用する	地震動評価結果の地表面、工学的基盤面の加速度時刻歴波形を用いる	地震動評価結果の地表面、工学的基盤面の応答スペクトルを用いる
方法2	地域防災計画等の想定地震動を使用する	想定地震動の地表面、工学的基盤面の加速度時刻歴波形を用いる	想定地震動の地表面、工学的基盤面の応答スペクトルを用いる
方法3	当該地点と同様な地盤条件（地盤種別）の地表面における強震記録の中で、震度6強～震度7の記録を用いる	強震記録の加速度時刻歴波形を用いる	強震記録の応答スペクトルを用いる
方法4	兵庫県南部地震の観測記録を基に設定された設計震度、設計応答スペクトル		「09年版指針・総論解説編Ⅲ」の設計応答スペクトル等を用いる

※方法1、方法2、方法3においては、原則として静的線形解析を適用しない。ただし、方法4と同程度以上かつ地震動の応答特性から静的線形解析の適用が可能と判断された場合には、静的線形解析を用いてもよい。

(4) 方法2（地域防災計画の想定地震）を設計地震動として用いる場合の定義

当局における方法2は、首都直下地震等による東京の被害想定（東京都総務局 令和4年5月。以下「被害想定」という。）の都心南部直下地震、多摩東部直下地震、立川断層帯地震、大正関東地震の4種類の想定地震を対象とする。

南海トラフ巨大地震は、被害想定において主に島しょ地域への津波の影響を想定するために設定されていることから、設計地震動には用いないこととする。

各地震動による都内の揺れについては、250m×250mメッシュ単位で波形が用意されている。ただし、用意されている各メッシュの波形は、せん断弾性波速度 $V_s=350\text{m/s}$ とした工学的基盤面上の波形である。

各地震動について、どのメッシュの地震動を用いるかは、次のア及びイによる。

ア 都心南部直下地震・多摩東部直下地震について

被害想定では、都心直下として都心南部・都心西部・都心東部の3地震、多摩直下地震として多摩東部、多摩西部の2地震の震度分布が示されているが、水道を含むインフラ等の被害状況の想定では、都心直下が都心南部地震を、多摩直下が多摩東部地震を代表地震として採用している。当局では被害想定との一貫性を確保するため、都心南部直下地震と多摩東部直下地震の2地

震を設計地震動として用いる方針とする。

都心直下地震及び多摩直下地震は、震源が明確に特定されておらず、被害想定では、都心南部直下と多摩東部直下に震源を想定した場合に予測される地震動が示されているが、水道施設の各地点において最も不利な想定ではない。

すなわち、都内のどのような場所であっても震源が直下となる地震が発生する可能性がある。このため、設計地震動として用いる場合は、水道施設にとって最も不利な状況を考慮し、震源直上のメッシュにおける波形を使用する（震源が水道施設直下にあると考える）。

イ 立川断層帯地震・大正関東地震について

立川断層帯地震は、活断層を特定して想定した地震である。

また、大正関東地震は、海溝型地震であり、震源位置が特定されている地震である。

すなわち、これらの地震は震源位置に特徴と意味がある地震動である。このため、設計地震動として用いる場合は、水道施設地点のメッシュにおける波形を使用する（震源を移動させず、震源からの距離による地震波の減衰を考慮する。）。

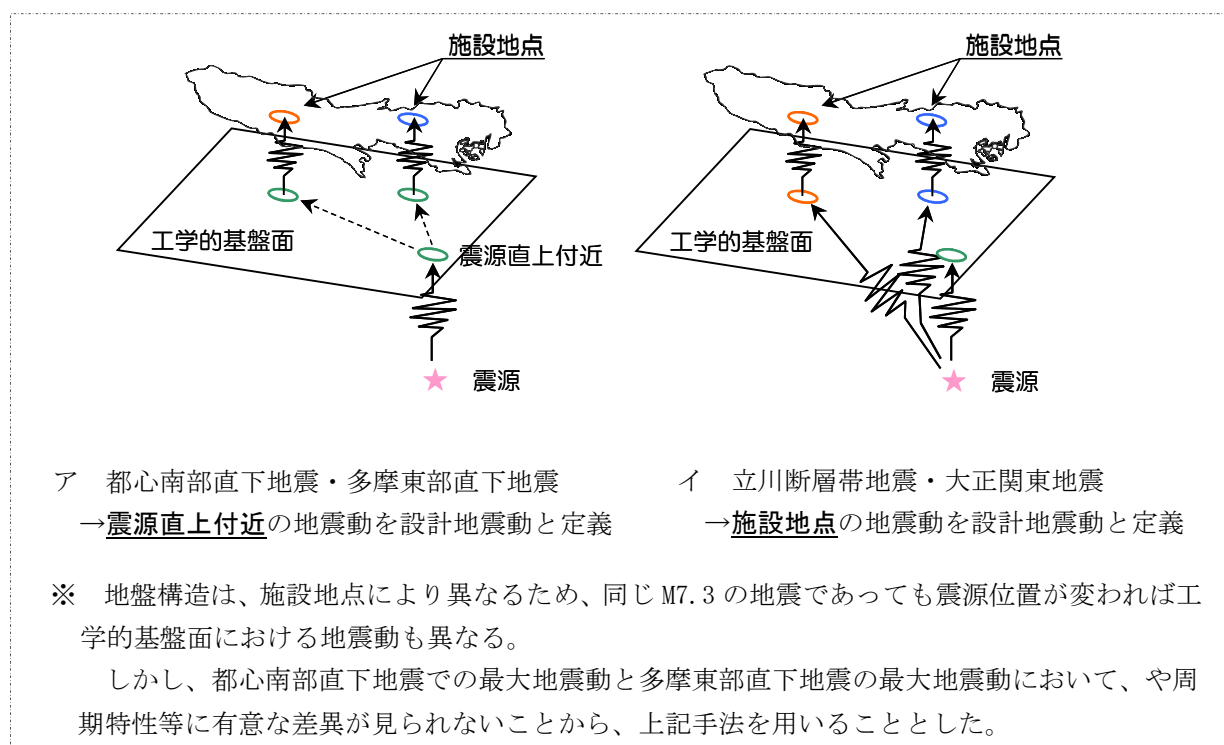


図2. 17 各想定地震を設計地震動として用いる場合の定義の概念図

なお、被害想定で示されている地震動は、近年の国内における強震記録の地震動に比べて、小さくなる場合があるので、当局ではレベル2地震動において、方法2（地域防災計画の想定地震動）のみでなく、動的解析においては方法3（過去の強震記録）、静的解析においては方法4（09年版指針の設計地震動）を併用するものとした。



【水滴くんのワンポイントアドバイス】 ～設計地震動に関する基礎知識～

地震動を評価する際には、①時刻歴波形と②応答スペクトル図を見ることが重要である。

①及び②は、地震動の異なる見方であり、1つの地震動からそれぞれを得ることができる。

なお、本欄では、地震動の加速度について記述するが、速度についても全く同じことが言える。

① 時刻歴波形

時刻歴波形は、ある地震動について、時間ごとの加速度を示したものであり、地震動の基本的な表し方である。 → **【横軸：時間、縦軸：加速度】**

このとき、最大加速度、地震動の継続時間、一部だけ特異な加速度が出ていないかなどが見るべきポイントとなる。

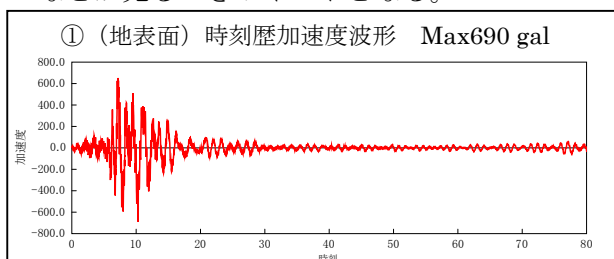
② 応答スペクトル図

構造物や地盤は、それぞれ共振しやすい周期(固有周期)を持っており、地震を受けたときには、この固有周期に応じて揺れ方が異なる。

応答スペクトル図は、ある地震動について、その地震動を受けた構造物や地盤が固有周期に応じてそれぞれどの程度揺れるか(つまり応答)を示したものである。

→ **【横軸：構造物や地盤の固有周期、縦軸：加速度応答スペクトル(応答加速度ともいう。)]**

このとき、最大加速度応答スペクトルやどの固有周期に対して大きな応答が現れるか(卓越周期)などが見るべきポイントとなる。



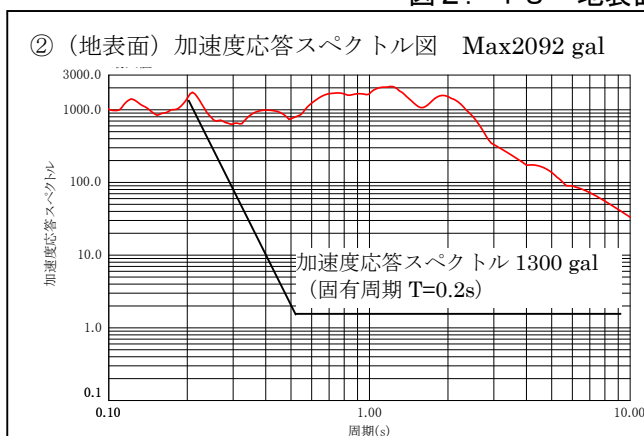
※ ①の最大加速度(690 gal)と②の最大加速度応答スペクトル(2092 gal)は、異なる値を示すことに注意

※ gal (ガル) = cm/s^2 加速度
kine (カイン) = cm/s 速度

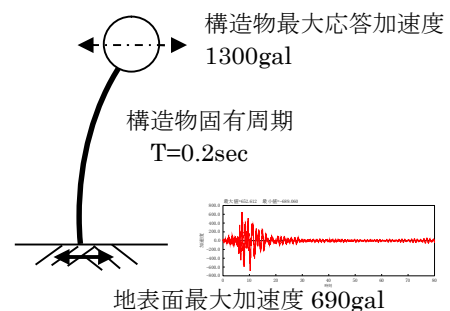


固有周期によるスペクトル分解(表し方が異なるだけで同じ地震動)

図2. 18 地表面時刻歴加速度波形



この地震動は、例えば、固有周期 0.2s の構造物を最大 1300 gal で揺らす地震動



注) 例えば、固有周期 0.2 秒の構造物に対して上図の設計地震動で静的解析を行う場合を考える。

上図は、地表面最大加速度 690 gal の地震動により、固有周期 0.2 秒の構造物が 1300 gal で揺れることを意味する。つまり、設計地震動の入力値は 1300 gal となる。

しかし、当局の池状コンクリート構造物に対する静的解析では、2. 4. 2 (2) ア及び 09 年版指針 p.125 に示す理由により、地表面加速度を設計震度と見なす。つまり設計地震動の入力値は 690 gal となる。

【水滴くんのワンポイントアドバイス】 ～一次元地盤応答解析～

地震動は、工学的基盤及び表層地盤を通過して地表に現れる。

表層地盤を通過する過程で地震動が増幅又は減衰するが、一次元地盤応答解析を用いることにより、地震動波形の変化を求めることができる（詳細は、3. 3. 6 参照）。

地震動が表層地盤を通過することで、例えば、地震動の卓越周期が地盤の固有周期に近づくなど、地震動が表層地盤の影響を受ける。工学的基盤の段階で同じ波形であっても、地表面波形が場所ごとに異なるということに注意が必要である。

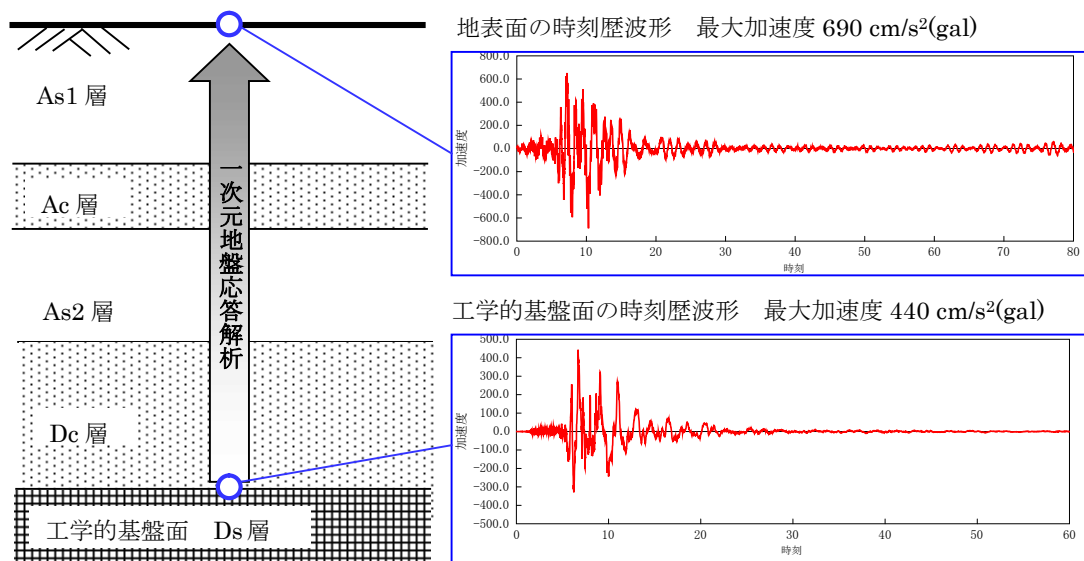


図 2. 20 一次元地盤応答解析の概念図

一次元地盤応答解析により、工学的基盤における波形から地表面の波形を求めることができる。

例えば、レベル2地震動の方法2（地域防災計画の想定地震）の波形は、工学的基盤面での波形として与えられるが、この波形が地表面でどのような波形になるのかを知ることができる。

また、地上の地震観測記録（地表面波形）からその地震が工学的基盤面でのどのような波形であったかを逆算することもできる。

例えば、レベル2地震動の方法3（過去の強震記録）の波形の多くは、地上の地震計で観測されているが、工学的基盤面の波形を計算する（引き戻す）ことにより、観測地点における表層地盤の影響を取り除いた波形を得ることができる。これを当局水道施設直下の工学的基盤に入力することで、例えば、兵庫県南部地震が当局水道施設直近で発生したと仮定した場合の影響を算出することができる。

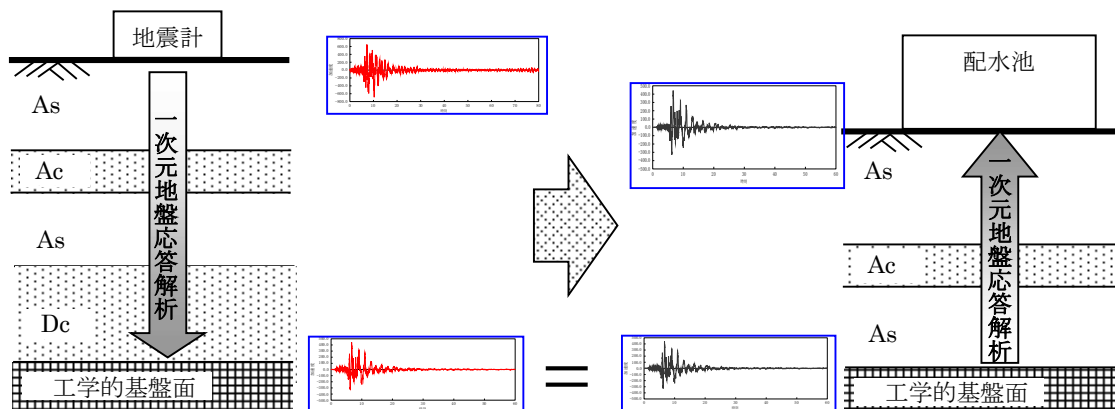


図 2. 21 表面波から工学的基盤面の波形を求めた場合のイメージ

2. 4. 2 レベル1地震動（静的解析）の設定

（1）設計地震動の設定フロー

レベル1地震動（静的解析）の設定フローを図2. 22示す。

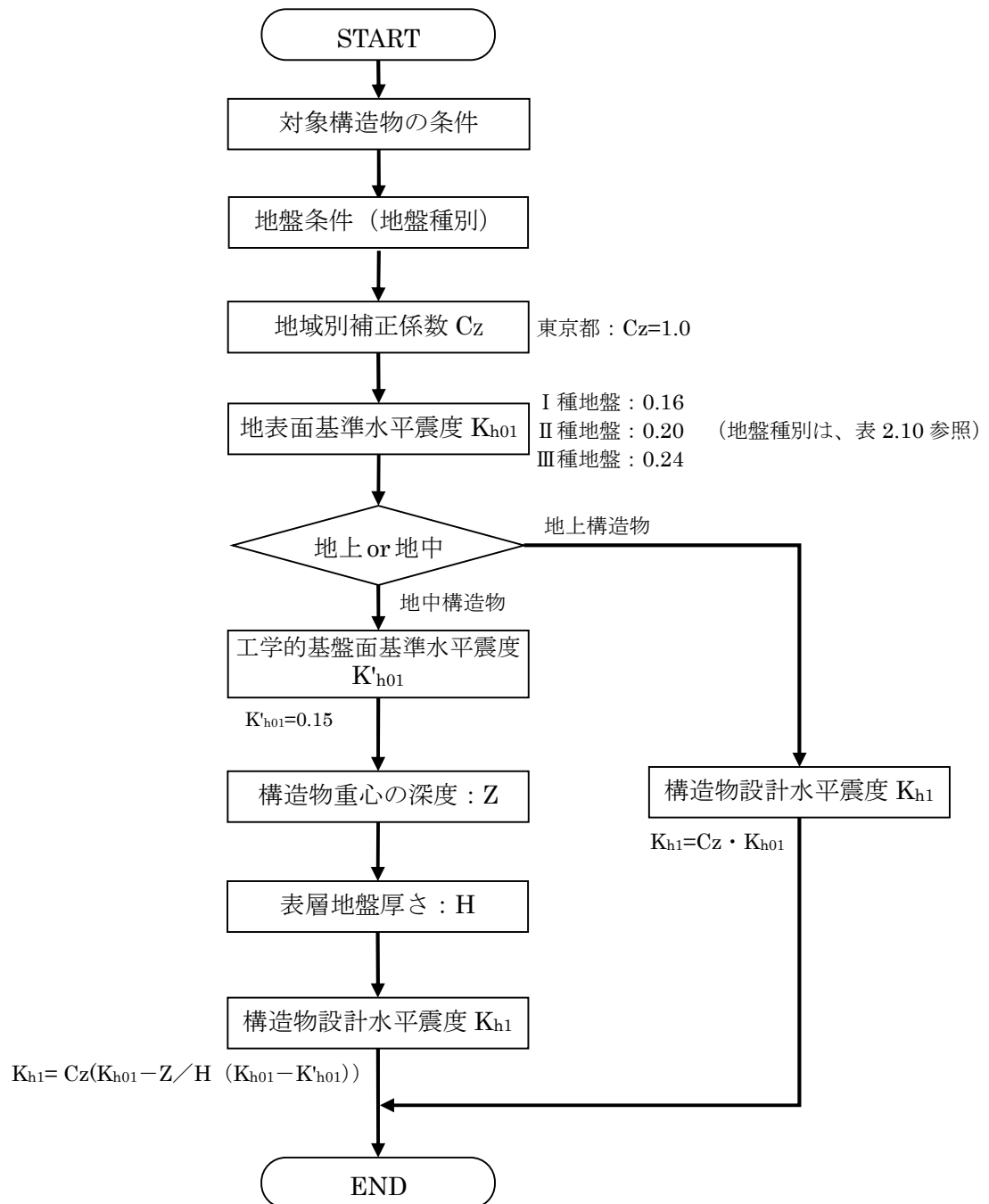


図2. 22 レベル1地震動の設定フロー（静的解析）

(2) 池状コンクリート構造物の設計震度の求め方

ア 池状コンクリート構造物における固有周期算定の省略

池状コンクリート構造物は、一般に構造系全体の水平せん断剛性が大きく、比較的固有周期が短い。また、地表付近に設置されているため、地表面加速度を設計震度とみなす(09年版指針・総論 p.125 の記述より)。

イ 地上構造物と地中構造物の区分

構造物の大半が地中部にある(構造物の3分の2程度が地中部にある)場合には、地表面の設計震度と工学的基盤面の設計震度を直線補間して求めた構造物重心位置の設計震度を用いる(09年版指針・総論 p.125 の記述より)。

ウ 工学的基盤以深に設置された構造物

構造物重心位置が工学的基盤面以深となる場合には、設計水平震度は工学的基盤面の基準水平震度を採用する。

エ 震度法と応答変位法の適用区分

指針では、静的解析における解析手法の適用範囲が明確にされていない(指針・本編 p.56)。

解析手法の選定では、対象とする構造物の地形条件や構造特性を考慮し、慣性力が支配的な場合には震度法、地震時の地盤変形の影響が支配的な場合には応答変位法をそれぞれ適用する。解析方法の適用区分の詳細については、3. 3. 3 (1) を参照すること。

(3) 地上構造物の設計震度

地上構造物の設計水平震度(K_{h1})は、次式により求める。

$$K_{h1} = C_Z \cdot K_{h01}$$

ここに、

K_{h01} : 基準水平震度 (I 種地盤 0.16、II 種地盤 0.20、III 種地盤 0.24)

C_Z : 地域別補正係数 (東京都の場合、1.0)

鉛直震度を考慮する場合は、 $K_{v1} = \frac{1}{2} K_{h1}$ とする。(09年版指針・総論 p.185 の記述より)

(4) 地盤種別の判定方法

耐震設計上の地盤種別は、地盤固有周期 T_G により分類し、地盤固有周期 T_G は、地盤調査結果から求めることを原則とする。

ア 耐震設計上の地盤種別

耐震設計上の地盤種別は、地盤固有周期 T_G を用いて表 2. 1 0 に示す区分により判定する。

表 2. 1 0 耐震設計上の地盤種別

地盤種別	地盤固有周期	概略の目安
I 種地盤	$T_G < 0.2s$	良好な洪積地盤及び岩盤
II 種地盤	$0.2s \leq T_G < 0.6s$	I 種、III 種に属さない地盤
III 種地盤	$0.6s \leq T_G$	軟弱な沖積地盤、埋立て地

【地盤種別判定における留意点】

- ・ 地表面が工学的基盤面と一致する場合は、I 種地盤とする。
- ・ 地盤固有周期により I 種地盤と判定される地盤であっても、表層に軟弱層が分布している場合は、地盤の非線形性の影響により地震時の卓越周期が長くなる傾向にある。このような地盤の場合には、II 種地盤として見なすことも必要である。

イ 地盤固有周期の算出方法

地盤固有周期の算出は、次式により求める。

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{si}}$$

ここに、

T_G : 地盤の固有周期 (s)

H_i : i 番目の地層厚さ (m)

V_{si} : i 番目の地層の平均せん断弾性波速度 (m/s)

i : 当該地盤の地表面から工学的基盤面まで n 層に区分されるとき、地表面から i 番目の地層の番号

なお、せん断弾性波速度 V_{si} は、弾性波探査や PS 検層によって測定することが望ましいが、実測値がない場合は、表 2. 1 1 により N 値から推定してもよい。

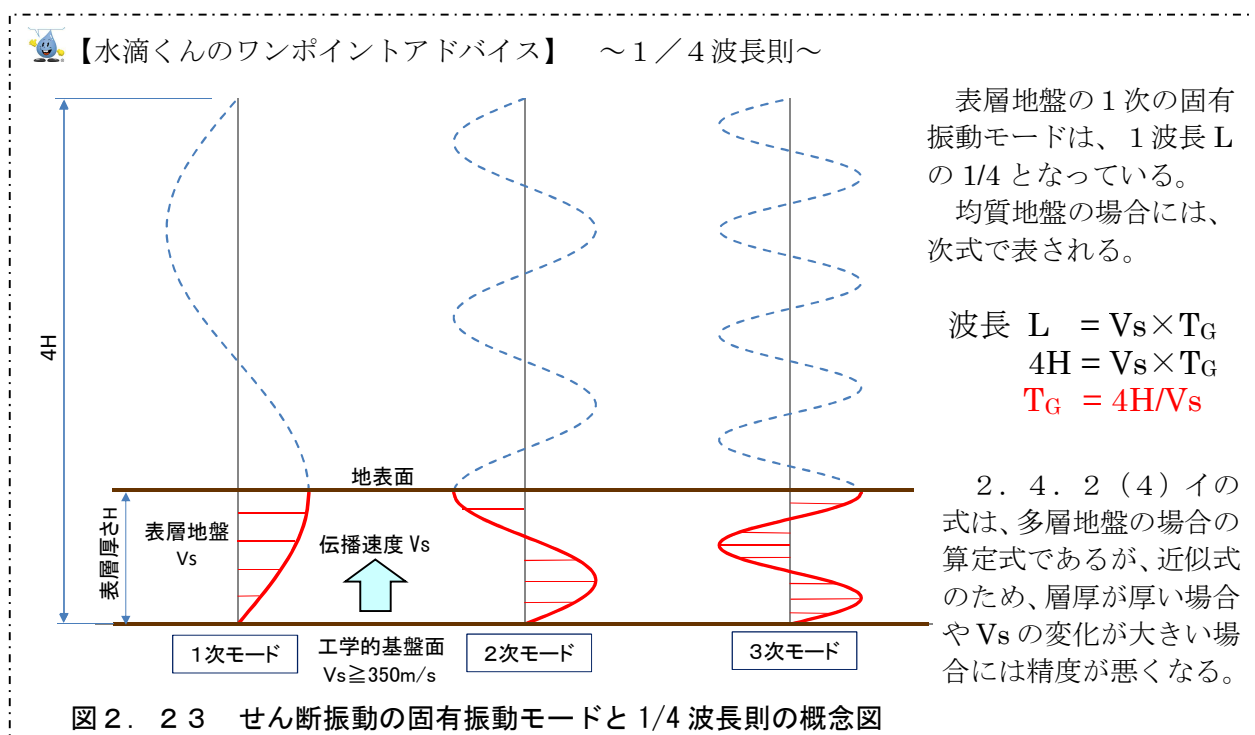


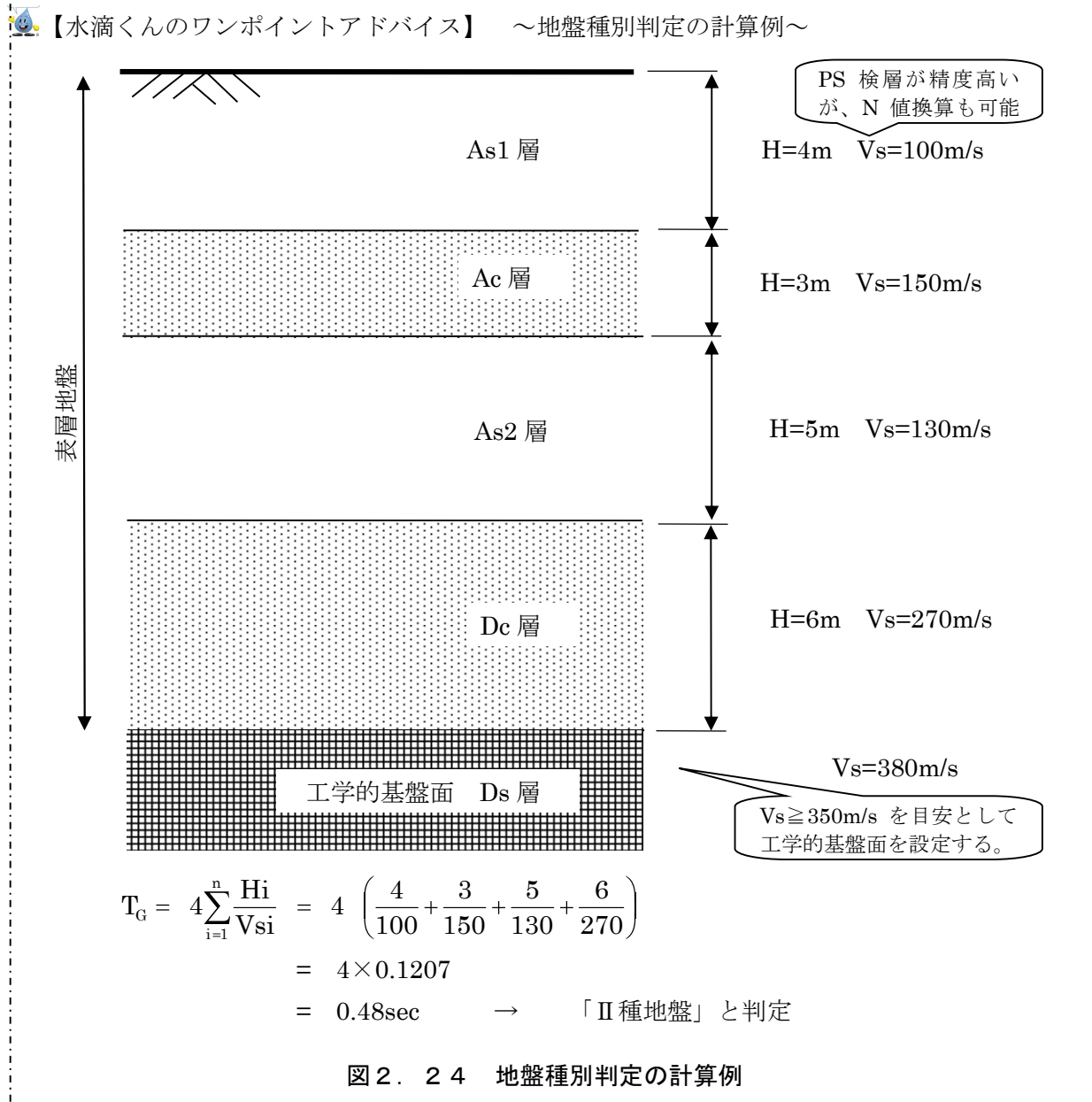
表 2. 1 1 地盤のせん断弾性波速度（せん断ひずみとの関係）

堆積時代及び土質		Vs (m/s)		
		せん断ひずみ 10 ⁻³	せん断ひずみ 10 ⁻⁴	せん断ひずみ 10 ⁻⁶
洪積世	粘性土	129N ^{0.183}	156N ^{0.183}	172N ^{0.183}
	砂質土	123N ^{0.125}	200N ^{0.125}	205N ^{0.125}
沖積世	粘性土	122N ^{0.0777}	142N ^{0.0777}	143N ^{0.0777}
	砂質土	61.8N ^{0.211}	90N ^{0.211}	103N ^{0.211}

出典：09 年版指針・総論 p.62（日本水道協会,2009 年）

注）・網掛け部分（せん断ひずみ 10⁻⁶）は、平常時のひずみレベルを示す。

・地盤種別判定時には、せん断ひずみ 10⁻⁶におけるせん断弾性波速度 Vs を用いる。



(5) 地中構造物の設計震度の算定式

地中構造物の設計水平震度 (K_{h1}) は、次式により求める。

$$K_{h1} = C_z \left(K_{h01} - \frac{Z}{H} (K_{h01} - K'_{h01}) \right)$$

ここに、

K_{h01} : 地表面における基準水平震度 (表 2. 12 参照)

K'_{h01} : 工学的基盤面における基準水平震度 (表 2. 12 参照)

C_z : 地域別補正係数 (東京都の場合、1.0)

H : 表層地盤厚さ(m)

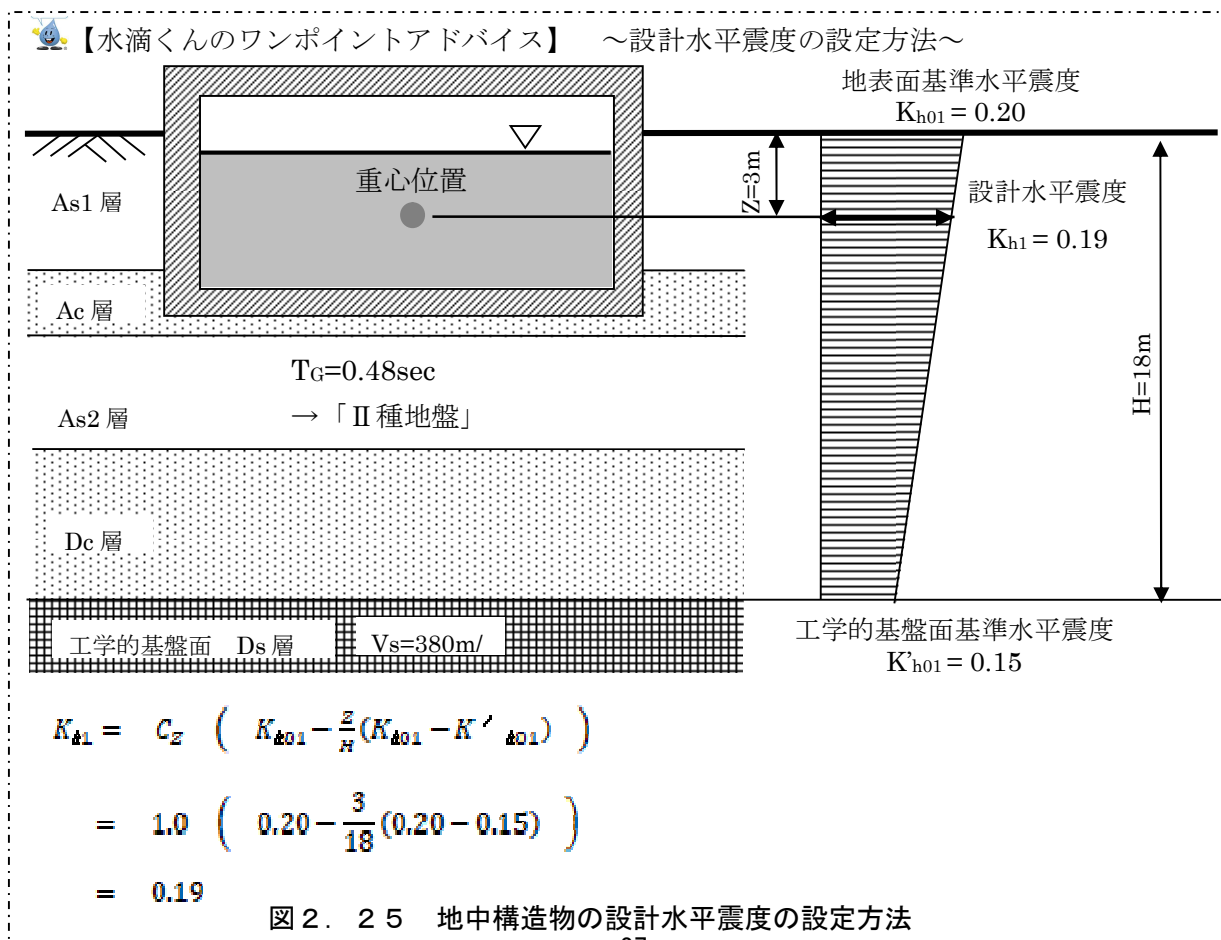
Z : 地表面から構造物重心位置までの深度(m)。重心位置が地表面付近の場合は、 $Z=0$

鉛直震度を考慮する場合は、 $K_{v1} = \frac{1}{2} K_{h1}$ とする。

表 2. 12 地中構造物に用いる基準水平震度 (レベル1地震動)

地盤種別	地表面における基準水平震度	工学的基盤面における基準水平震度
I 種地盤 [$T_G < 0.2s$]	$K_{h01} = 0.16$	$K'_{h01} = 0.15$
II 種地盤 [$0.2s \leq T_G < 0.6s$]	$K_{h01} = 0.20$	
III 種地盤 [$0.6s \leq T_G$]	$K_{h01} = 0.24$	

T_G : 地盤の固有周期(s)



2. 4. 3 レベル2地震動（静的解析）の設定

（1）設計地震動の設定フロー

※ 立川断層帯地震、大正
関東地震は震度 6 強以上
が想定される地域でのみ
採用する。
(詳細は、(2)を参照の
こと。)

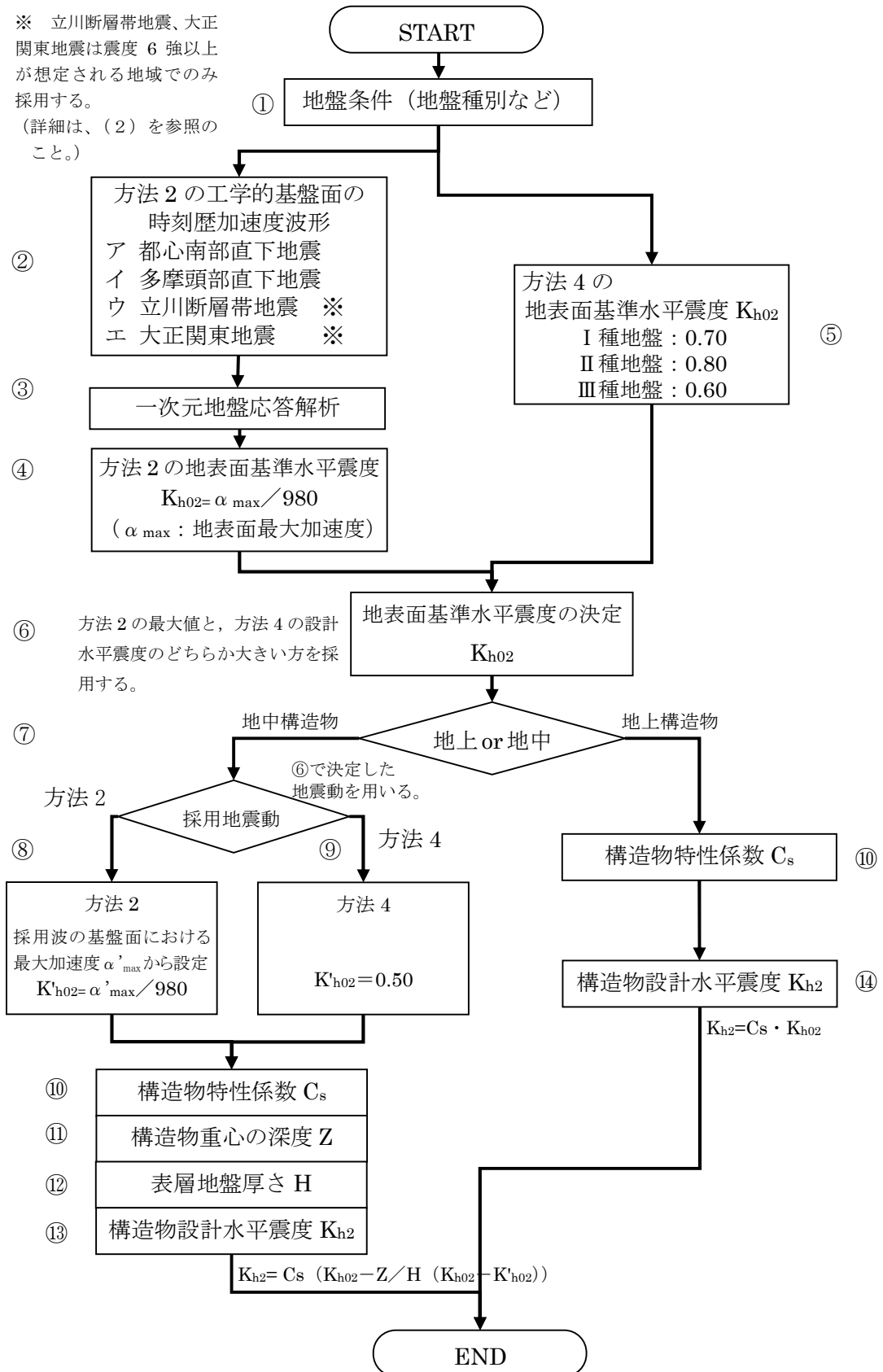


図2. 26 レベル2地震動（静的解析）の設定フロー

表 2. 13 レベル 2 地震動（静的解析）の設定のフロー解説

No.	項目	内容	詳細箇所
①	地盤条件（地盤種別など）	耐震設計上の地盤種別を判定する。 Ⅰ種～Ⅲ種の 3 種類に分類される。	2. 3. 4 参照 2. 4. 2 (4) 参照
②	方法 2 の工学的基盤面の時刻歴加速度波形	地域防災計画の想定地震であるア都心南部直下地震、イ多摩東部直下地震、ウ立川断層帯地震、エ大正関東地震の 4 波形。ただし、ア及びイの地震は施設位置により採用地震を決定し、ウ及びエの地震は想定震度分布図で震度 6 強となる地区でのみ候補として採用する。	2. 4. 3 (2) 参照
③	一次元地盤応答解析	②の想定地震の加速度波形（1～3 波形）を入力した一次元地盤応答解析を行い、地表面における最大応答加速度を求める。	3. 3. 6 (2) 参照
④	方法 2 の地表面基準水平震度 $K_{h02} = \alpha_{\max} / 980$ （ $\alpha_{\max}$ ：地表面最大加速度）	③の一次元地盤応答解析による地表面最大加速度（1～3 波形）の最大値を求め、設計震度を算出する。	2. 4. 3 (4) 参照
⑤	方法 4 の地表面基準水平震度 K_{h02}	指針・総論の方法 4 による設計地震動	2. 4. 3 (4) 参照
⑥	地表面基準水平震度の決定 K_{h02}	方法 2 の最大値④と、方法 4 の設計水平震度⑤の大きい方を地表面基準水平震度として採用する。	
⑦	地上 or 地中の判断	構造物の大半が地中部にある場合（構造物の 2／3 程度が地中部にある）には地中構造物として判断する。	
⑧	基盤面基準水平震度 方法 2 K'_{h02}	工学的基盤面の基準水平震度 $K'_{h02} = \text{入力波形の最大加速度} \div 980$	⑥で方法 2 を採用した場合
⑨	基盤面基準水平震度 方法 4 K'_{h02}	方法 4 $K'_{h02} = 0.50$	⑥で方法 4 を採用した場合
⑩	構造物特性係数 C_s	構造物の塑性変形特性によるエネルギー吸収を表現する係数である。 C_s は震度法・応答変位法ともに、 $C_s=1.00$ を原則とする。	2. 4. 3 (4) 参照
⑪	構造物重心の深度 Z	地表面から構造物重心位置までの深度	
⑫	表層地盤厚さ H	地表面から工学的基盤面までの表層地盤の厚さ	
⑬	地中構造物の設計水平震度 K_{h2}	地中構造物の設計水平震度。 $K_{h2} = C_s (K_{h02} - Z/H (K_{h02} - K'_{h02}))$	2. 4. 3 (5) 参照
⑭	地上構造物の設計水平震度 K_{h2}	地上構造物の設計水平震度 $K_{h2} = C_s \cdot K_{h02}$	2. 4. 3 (4) 参照

(2) 方法2（地域防災計画の想定地震動）による設計水平震度の設定方法

レベル2地震動は、被害想定に示される次のア及びイ及びウの地の地震動波形の中から複数の地震動（1波以上）を選定し、一次元地盤応答解析を行う。その結果で地表面最大加速度が最も大きい値から、地表面の基準水平震度を求める。表2. 14に方法2の一次元地盤応答解析に用いる入力地震動の波形を示す。

なお、一次元地盤応答解析では、解析コード（プログラム）に SHAKE を用いると加速度を過小評価することが指摘されているので、せん断ひずみが大きい場合には、FDEL、DYNEQ 等の適切に加速度を評価できる解析コードを用いることを原則とする。

ア 都心南部直下地震及び多摩東部直下地震

(ア) 区部（豊島区、北区、板橋区及び練馬区を除く。）の設定方法

豊島区、北区、板橋区及び練馬区を除く区部は、都心南部直下地震を採用する。

(イ) 豊島区、北区、板橋区及び練馬区の設定方法

豊島区、北区、板橋区及び練馬区は、多摩東部直下地震を採用する。

(ウ) 多摩地区の設定方法

多摩地区においては、多摩東部直下地震を採用する。

イ 立川断層帯地震

多摩地区において、立川断層帯地震で震度6強以上が想定される場所（図2. 27参照）では、これを設計地震動の候補とする。

ウ 大正関東地震

大正関東地震で震度6強以上が想定される場所（図2. 27参照）では、これを設計地震動の候補とする。

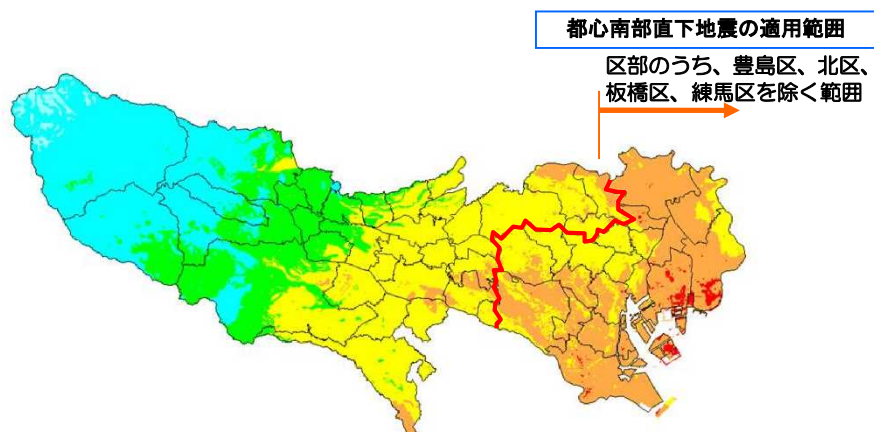
表2. 14 方法2の一次元地盤応答解析に用いる入力地震動の波形（1波以上を選定）

想定地震	工学的基盤面 最大加速度	備考
都心南部直下地震※	638gal	区部（豊島区、北区、板橋区及び練馬区を除く。）
多摩東部直下地震※	744gal	豊島区、北区、板橋区、練馬区及び多摩地区
立川断層帯地震	—	震度6強以上の地点で採用
大正関東地震	—	震度6強以上の地点で採用

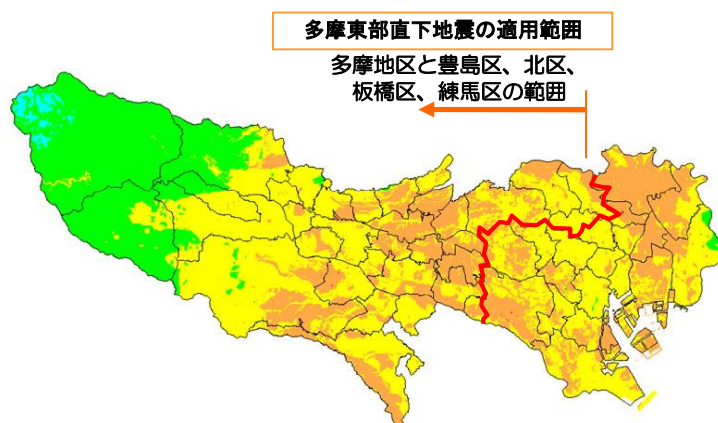
※ 全てのメッシュで最大加速度が最も大きい波形

$V_s \geq 350\text{m/s}$ の工学的基盤面における時刻歴加速度波形

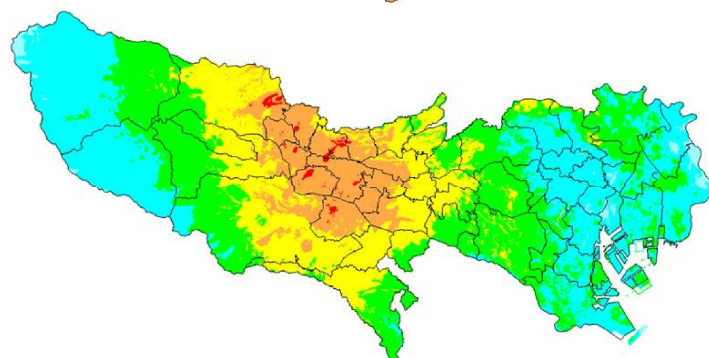
【都心南部直下地震】



【多摩東部直下地震】



【立川断層帯地震】



【大正関東地震】

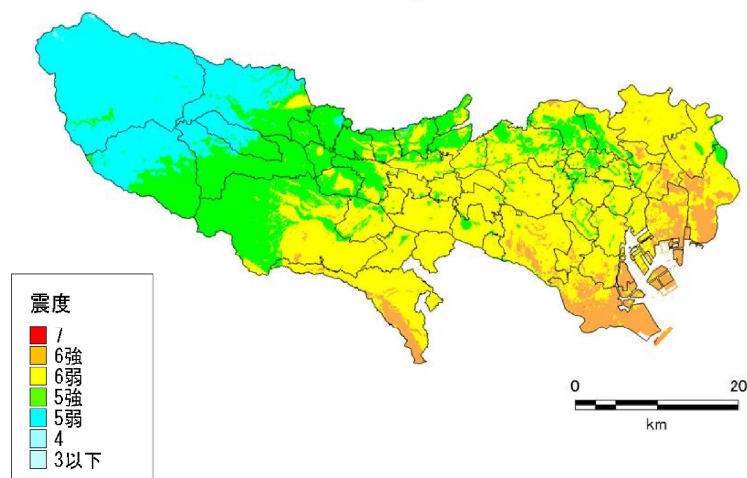


図 2. 27 各想定地震の震度分布図

※ 指針・本編 p.46 では、「方法 1、2 の想定地震動を用いる場合には、複数の地震の中で最も不利となるシナリオを用いる。ただし、最も不利となるシナリオを特定するためには、震源断層のパラメータ（破壊開始点、アスペリティ等）を複数設定した解析が必要なため、それが困難な場合には、当該地点と同じ地盤種別で断層距離が等しい区域での最大値を用いる。」としている。

したがって、当局において震源直上付近の最大値を設計地震動として採用することは、指針の記述と同義と判断される。

（３）池状コンクリート構造物の設計震度の求め方

池状コンクリート構造物の設計震度の算定に当たり、「池状コンクリート構造物の固有周期算定の省略」、「地上構造物と地中構造物の区分」、「工学的基盤以深に設置された構造物」及び「震度法と応答変位法の適用区分」の取扱いについては、2. 4. 2（２）による。

（４）地上構造物の設計震度

ア 地上構造物の設計水平震度（ K_{h2} ）

地上構造物の設計水平震度（ K_{h2} ）は、次式により求める。

なお、設計水平震度（ K_{h2} ）は、方法 2（地域防災計画の想定地震動）と方法 4（09 年版指針の設計地震動）についてそれぞれ算出し、値の大きい方を採用する。

また、地表面における基準水平震度（ K_{h02} ）の算出方法については、イ及びウによる。

$$K_{h02} = C_s \cdot K_{h2}$$

ここに、

K_{h02} : 地表面における基準水平震度

C_s : 構造物特性係数（一般的な RC 構造物で 1.0）

なお、 $K_{h2} \geq 0.3$ とする。

また、鉛直震度を考慮する場合は、 $K_{v2} = \frac{1}{2} K_{h2}$ とする。

イ 方法 2（地域防災計画の想定地震動）の地表面における基準水平震度（ K_{h02} ）

方法 2 の地表面における基準水平震度（ K_{h02} ）は、表 2. 14 より選定した入力地震動に対して一次元地盤応答解析を行い、その結果の地表面最大加速度の最大値 α_{max} から求める（ $K_{h02} = \alpha_{max} \div 980$ ）。

ウ 方法 4（09 年版指針の設計地震動）の地表面における基準水平震度（ K_{h02} ）

方法 4 の地表面における基準水平震度（ K_{h02} ）は、表 2. 15 に示す地表面における基準水平震度とする。

表 2. 15 地上構造物に用いる地表面における基準水平震度（レベル2地震動）

地盤種別	地表面における基準水平震度
I 種地盤 [$T_G < 0.2s$]	$K_{h02} = 0.70$
II 種地盤 [$0.2s \leq T_G < 0.6s$]	$K_{h02} = 0.80$
III 種地盤 [$0.6s \leq T_G$]	$K_{h02} = 0.60$

T_G : 地盤の固有周期(s)

(5) 地中構造物の設計震度

ア 地中構造物の設計水平震度 (K_{h2})

地中構造物の設計水平震度 (K_{h2}) は、次式により求める。

なお、設計水平震度 (K_{h2}) は、方法 2（地域防災計画の想定地震動）と方法 4（09 年版指針の設計地震動）のうち地表面における基準水平震度 K_{h02} が大きい方のものを採用する。

また、基準水平震度 K_{h02} 及び K'_{h02} の算出方法については、イ及びウによる。

$$K_{h2} = Cs \left(K_{h02} - \frac{Z}{H} (K_{h02} - K'_{h02}) \right)$$

ここに、

K_{h02} : 地表面における基準水平震度

K'_{h02} : 工学的基盤面における基準水平震度

Cs : 構造物特性係数 (1.0)

H : 表層地盤厚さ(m)

Z : 地表面から構造物重心位置までの深度(m)

なお、 $K_{h2} \geq 0.3$ とする。

イ 方法 2（地域防災計画の想定地震動）の基準水平震度 (K_{h02} 、 K'_{h02})

方法 2 の基準水平震度 (K_{h02} 、 K'_{h02}) は、表 2. 14 より選定した入力地震動に対して一次元地盤応答解析を行い、その結果の地表面加速度の最大値 α_{Smax} と、工学的基盤面加速度の最大値 α_{Bmax} から求める ($K_{h02} = \alpha_{Smax} \div 980$ 、 $K'_{h02} = \alpha_{Bmax} \div 980$)。

ウ 方法 4（09 年版指針の設計地震動）の基準水平震度 (K_{h02} 、 K'_{h02})

方法 4 の基準水平震度 (K_{h02} 、 K'_{h02}) は、表 2. 16 に示す地表面及び工学的基盤面における基準水平震度とする。

表 2. 16 地中構造物に用いる基準水平震度（レベル2地震動）

地盤種別	地表面における基準水平震度	工学的基盤面における基準水平震度
I 種地盤 [$T_G < 0.2s$]	$K_{h02} = 0.70$	$K'_{h02} = 0.50$
II 種地盤 [$0.2s \leq T_G < 0.6s$]	$K_{h02} = 0.80$	
III 種地盤 [$0.6s \leq T_G$]	$K_{h02} = 0.60$	

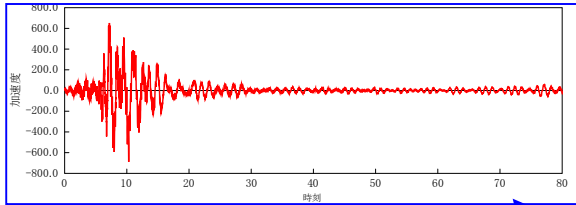
T_G : 地盤の固有周期(s)

【水滴くんのワンポイントアドバイス】 ～レベル2地震動の設計水平震度の設定方法～

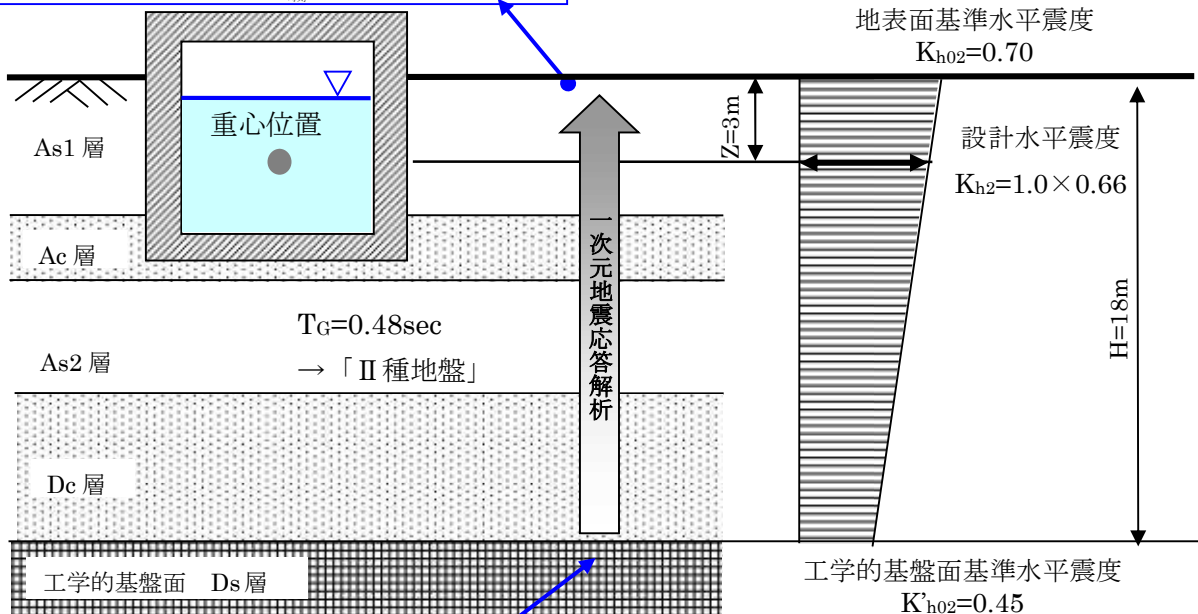
① 方法2（地域防災計画の想定地震動）の場合

工学的基盤面の時刻歴波形は、あらかじめ与えられている。このため、一次元地盤応答解析により地表面波形とその最大加速度を求め、水平設計震度 K_{h02} を算出する。

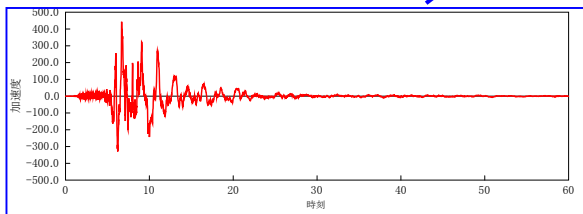
地表面の時刻歴波形 最大加速度 $690 \text{ cm/s}^2(\text{gal})$



地表面波形の最大加速度
 $\alpha_{\max} = 690 \text{ cm/s}^2$
 $K_{h02} = 0.70$



工学的基盤面の時刻歴波形 最大加速度 $440 \text{ cm/s}^2(\text{gal})$



$$\begin{aligned}
 K_{h2} &= C_s \left(K_{h02} - \frac{Z}{H} (K_{h02} - K'_{h02}) \right) \\
 &= 1.0 \left(0.70 - \frac{3}{18} (0.70 - 0.45) \right) \\
 &= 1.0 \times 0.66 \\
 &= 0.66
 \end{aligned}$$

図2. 28 レベル2地震動の設計水平震度の設定

② 方法4（09年版指針の設計地震動）の場合

表 2.16 より、地表面基準水平震度 $K_{h02} = 0.80$ 、工学的基盤面基準水平震度 $K'_{h02} = 0.50$ と求まる。

$$\begin{aligned}
 K_{h2} &= C_s \left(K_{h02} - \frac{Z}{H} (K_{h02} - K'_{h02}) \right) \\
 &= 1.0 \left(0.80 - \frac{3}{18} (0.80 - 0.50) \right) \\
 &= 1.0 \times 0.75 \\
 &= 0.75
 \end{aligned}$$

本例においては、
 方法4 ($K_{h2} = 0.75$) > 方法2 ($K_{h2} = 0.66$)
 であるので、方法4を採用する。

2. 4. 4 レベル2地震動（動的解析）の設定

（1）設計地震動の設定フロー

レベル2地震動の動的解析では、図2. 29に示すフローに従い、3波形以上を選定し、動的解析の入力地震動として用いる。

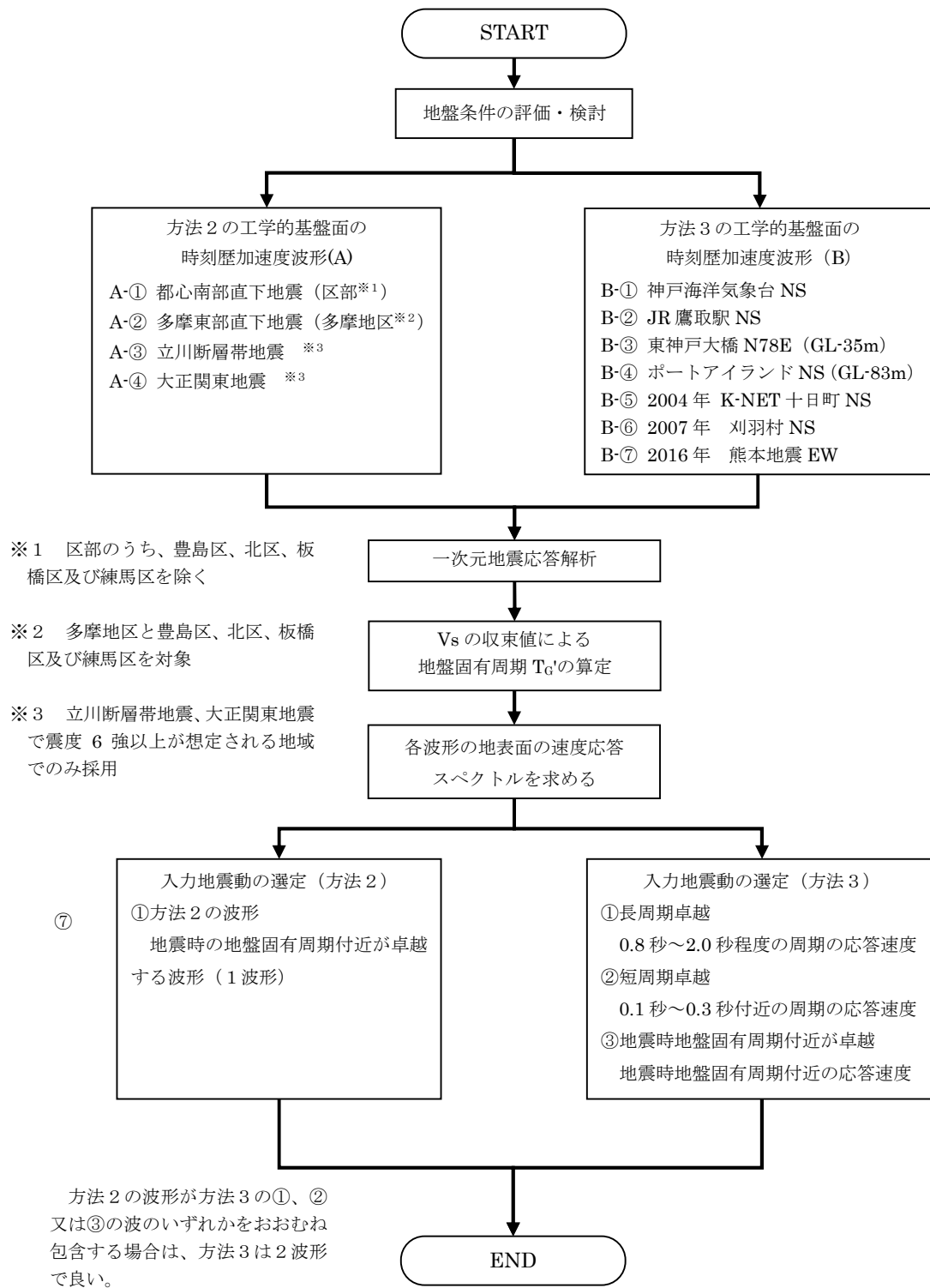


図2. 29 レベル2地震動の設定フロー（動的解析）

なお、図 2. 29 に示した方法 3（過去の強震記録）における時刻歴波形のデータの管理者及び出典は、次のとおりである。

ア 神戸海洋気象台 NS、2007 年刈羽村 NS

気象庁：気象庁ホームページ (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>)

イ JR 鷹取駅 NS

西日本旅客鉄道株式会社、公益財団法人鉄道総合技術研究所

ウ 東神戸大橋 N78E、ポートアイランド NS

公益社団法人日本地震工学会：兵庫県南部地震における強震記録データベース（強震動アレ
ー観測記録データベース、データ提供：財団法人震災予防協会）

エ 2004 年 K-NET 十日町 NS 2016 年熊本地震 KiK-net 益城 EW

独立行政法人防災科学技術研究所（NIED）：強震観測網（K-NET、KiK-net）（NIED ホー
ムページ (<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>))

（2）方法 2 の採用波形について

方法 2 については、被害想定における想定震度分布の状況より、各地区において影響が大きい
と考えられる地震を対象とする。表 2. 17 に方法 2 に用いる入力地震動の波形を示す。

ア 都心南部直下地震及び多摩東部直下地震

（ア）区部（豊島区、北区、板橋区及び練馬区を除く。）の設定方法

豊島区、北区、板橋区及び練馬区を除く区部は、都心南部直下地震を採用する。

（イ）豊島区、北区、板橋区及び練馬区の設定方法

豊島区、北区、板橋区及び練馬区は、多摩東部直下地震を採用する。

（ウ）多摩地区の設定方法

多摩地区においては、多摩東部直下地震を採用する。

イ 立川断層帯地震

多摩地区において、立川断層帯地震で震度 6 強以上が想定される場所（図 2. 30 参照）で
は、これを設計地震動の候補とする。

ウ 大正関東地震

大正関東地震で震度 6 強以上が想定される場所（図 2. 30 参照）では、これを設計地震動
の候補とする。

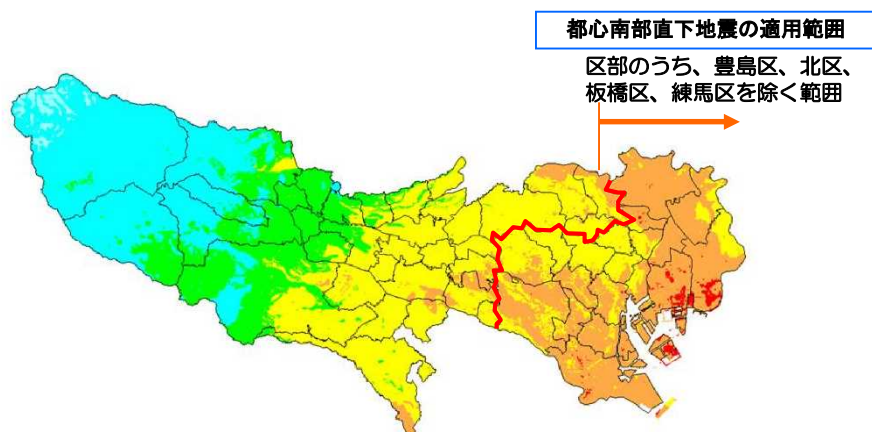
表 2.17 方法 2 の入力地震動の波形（1 波以上を選定）

	想定地震	工学的基盤 面 最大加速度	備 考
A - ①	都心南部直下部地震※	638 gal	区部（豊島区、北区、板橋区及び練馬区を除く。）
A - ②	多摩東部直下地震※	744 gal	豊島区、北区、板橋区、練馬区及び多摩地区
A - ③	立川断層帯地震	—	震度 6 強以上が想定される地点で採用
A - ④	大正関東地震	—	震度 6 強以上が想定される地点で採用

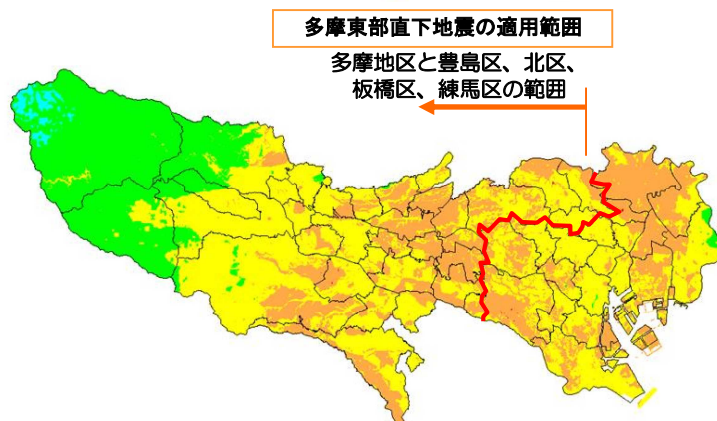
※ 全てのメッシュで最大加速度が最も大きい波形

$V_s \geq 350\text{m/s}$ の工学的基盤面における時刻歴加速度波形

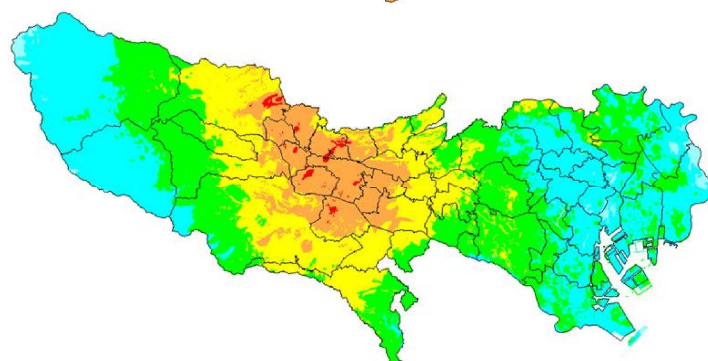
【都心南部直下地震】



【多摩東部直下地震】



【立川断層帯地震】



【大正関東地震】

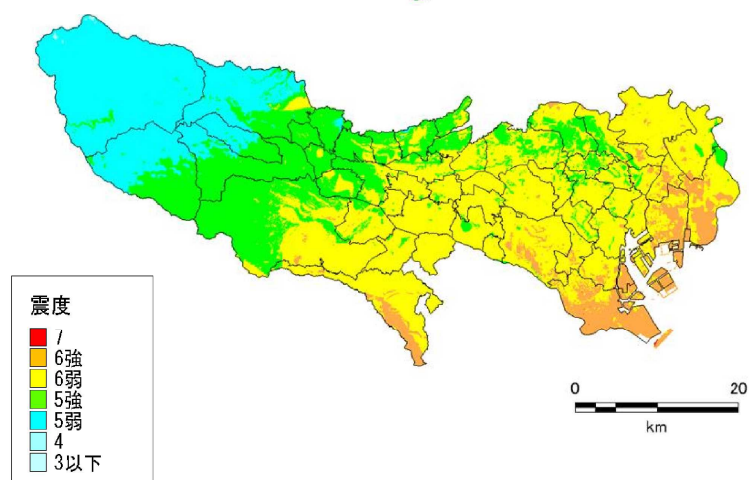


図 2. 3 0 各想定地震の震度分布図

(3) 方法3の採用波形について

方法3では、表2. 18に示す兵庫県南部地震、新潟県中越地震、新潟県中越沖地震及び熊本地震の観測波形を対象として一次元地盤応答解析を行い、その結果から次の波形を選定する。

ア 方法3-1 短周期卓越 → 0波形又は1波形を選定

地表面波形の応答速度スペクトルが0.1～0.3秒付近で卓越する波形

イ 方法3-2 長周期卓越 → 0波形又は1波形を選定

地表面波形の応答速度スペクトルが0.8～2秒付近で卓越する波形

ウ 方法3-3 地震時地盤固有周期が卓越 → 0波形又は1波形を選定

地表面波形の応答速度スペクトルが地震時の地盤固有周期 T_g 付近で卓越する波形

なお、方法2（地域防災計画の想定地震動）の波形が上記の**ア**から**ウ**までのいずれかを包含する大きさの波形である場合には、該当する周期特性の方法3の波形を選定しなくてよい。

したがって、方法3で選定される波形は、2波形又は3波形となる。

表2. 18 方法3（直下型）の入力地震動の波形

	地震名称	波形名称	地震動の特徴	最大加速度	震度	観測地点
B-①	1995年 兵庫県南部地震	神戸海洋気象台 NS	良質地盤での強震記録	818 gal	震度6強	地表面
B-②		JR 鷹取駅 NS	震度7付近の強震記録	604 gal	震度6強	地表面
B-③		東神戸大橋 N78E	軟弱地盤での強震記録	443 gal	震度6強	GL-35m
B-④		ポートアイランド NS	軟弱地盤での強震記録	679 gal	震度6強	GL-83m
B-⑤	2004年 新潟県中越地震	K-NET 十日町 NS	直下地震での短周期が卓越する強震記録	1,716 gal	震度6強	地表面
B-⑥	2007年 新潟県中越沖地震	刈羽村 NS (気象庁)	直下地震での長周期が卓越する強震記録	465 gal	震度6強	地表面
B-⑦	2016年 熊本地震	KiK-NET 益城町 EW	震度7付近の強震記録	1,157 gal	震度7	地表面

【水滴くんのワンポイントアドバイス】 ～K-NET、KiK-net の強震記録の入手方法～

方法3のうち K-NET、KiK-net の記録は、防災科学技術研究所（NIED）の強震観測網（K-NET、KiK-net）の HP から入手が可能である。

<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>

【入手の手順】

- ① ユーザー登録（無料）
 - ② 登録完了メール受取り
 - ③ 地震選択及びダウンロード
- ※ データ内容及び形式については、HP のマニュアルを参照のこと。

The screenshot displays the NIED (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology) website. The top navigation bar includes links for TOP, 概要 (Overview), ダウンロード (Download), 特集 (Special), ユーザー情報 (User Information), マニュアル (Manual), and リンク (Link). The 'ユーザー情報' link is highlighted with a red box. Below the navigation bar, there is a section for 'お知らせ' (Notice) dated 2012年4月6日. The left sidebar contains a 'ユーザー登録' (User Registration) section with a flowchart showing steps 1 through 6. The main content area is titled '地震選択とダウンロード' (Earthquake Selection and Download) and includes a table of earthquake data with columns for date, time, location, and magnitude. Below the table, there are buttons for '地震一覧' (Earthquake List), '最新の状態に更新' (Update to the latest status), and 'データ種別' (Data Type). The bottom section shows a table of earthquake data with columns for date, time, location, and magnitude.

図2. 31 K-NET、KiK-net の強震記録

出典：防災科学技術研究所 HP より

【水滴くんのワンポイントアドバイス】 ～東京都における長周期地震動の観測～

長周期地震動は、平成 15 年 9 月に発生した十勝沖地震の際に、震源から 250km 離れた苫小牧市内で発生した石油タンクの火災の原因として注目された。東京都においても、2004 年新潟県中越地震、2011 年東北地方太平洋沖地震等で長周期地震動を観測し、超高層建築物のエレベータの運転等に影響を与えた。

参考として、K-NET 亀戸及び K-NET 新宿で観測された地震の速度応答スペクトルを図 2. 3 2 に示す。2004 年新潟県中越地震及び 2004 年紀伊半島沖の地震では、6 秒～8 秒が卓越している。一方、2011 年東北地方太平洋沖地震では、1 秒～10 秒で大きな応答を示しており、関東平野では震源方向によって卓越周期が異なっていることが示されている。

東海・東南海・南海連動地震が発生した場合には、長周期が卓越する地震動となり、2004 年紀伊半島南東沖地震の KiK-net CHBH10 で観測された地震動の 3～5 倍になる可能性がある。水道施設の場合、池状構造物や埋設管路の耐震設計では、長周期地震動が問題になることはないが、貯留水のスロッシング（揺動）に対しては、長周期地震動を考慮しなければならない。

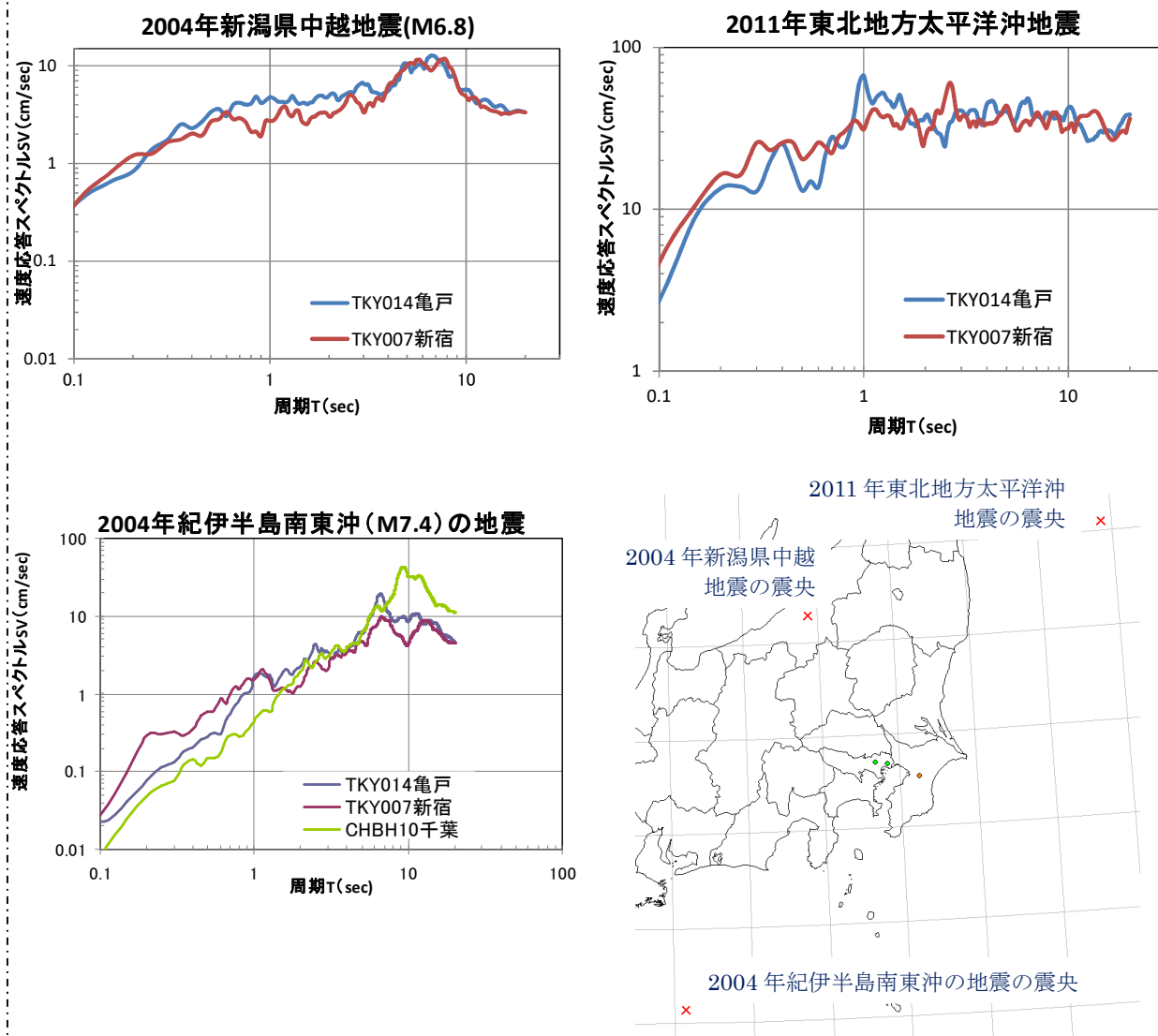
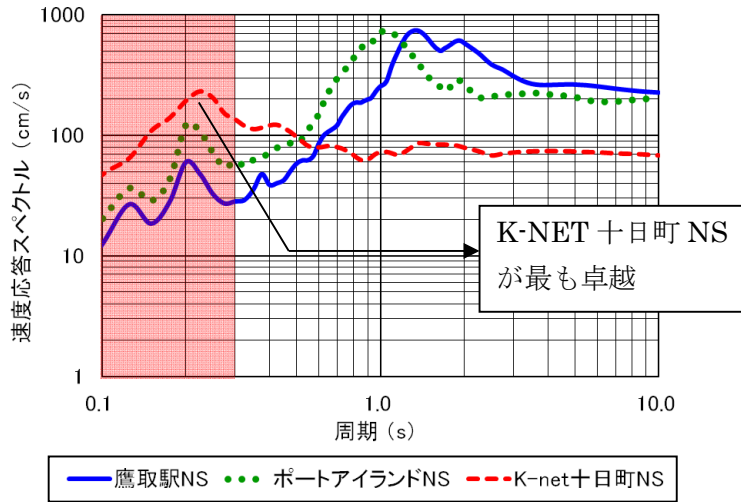
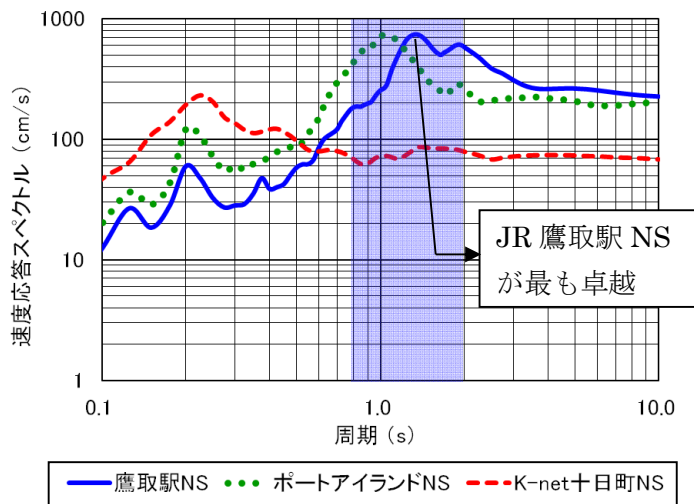


図 2. 3 2 東京都における長期周期地震動の速度応答スペクトル

ア 短周期が卓越



イ 長周期が卓越



【入力地震動の採用波形】

ア 短周期：
K-NET 十日町 NS

イ 長周期：
JR 鷹取駅 NS

ウ 地盤固有周期付近：
ポートアイランド NS

ウ 地震時地盤固有周期が卓越

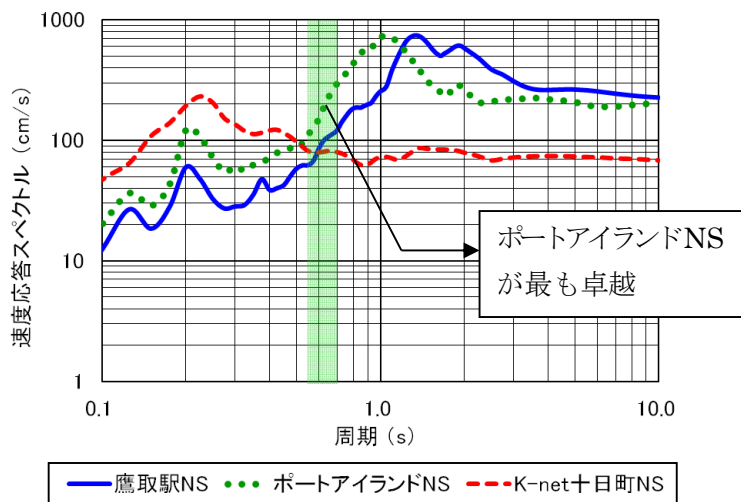


図 2. 3 3 方法 3 の入力地震動の波形の選定例

(4) 一次元地盤応答解析について

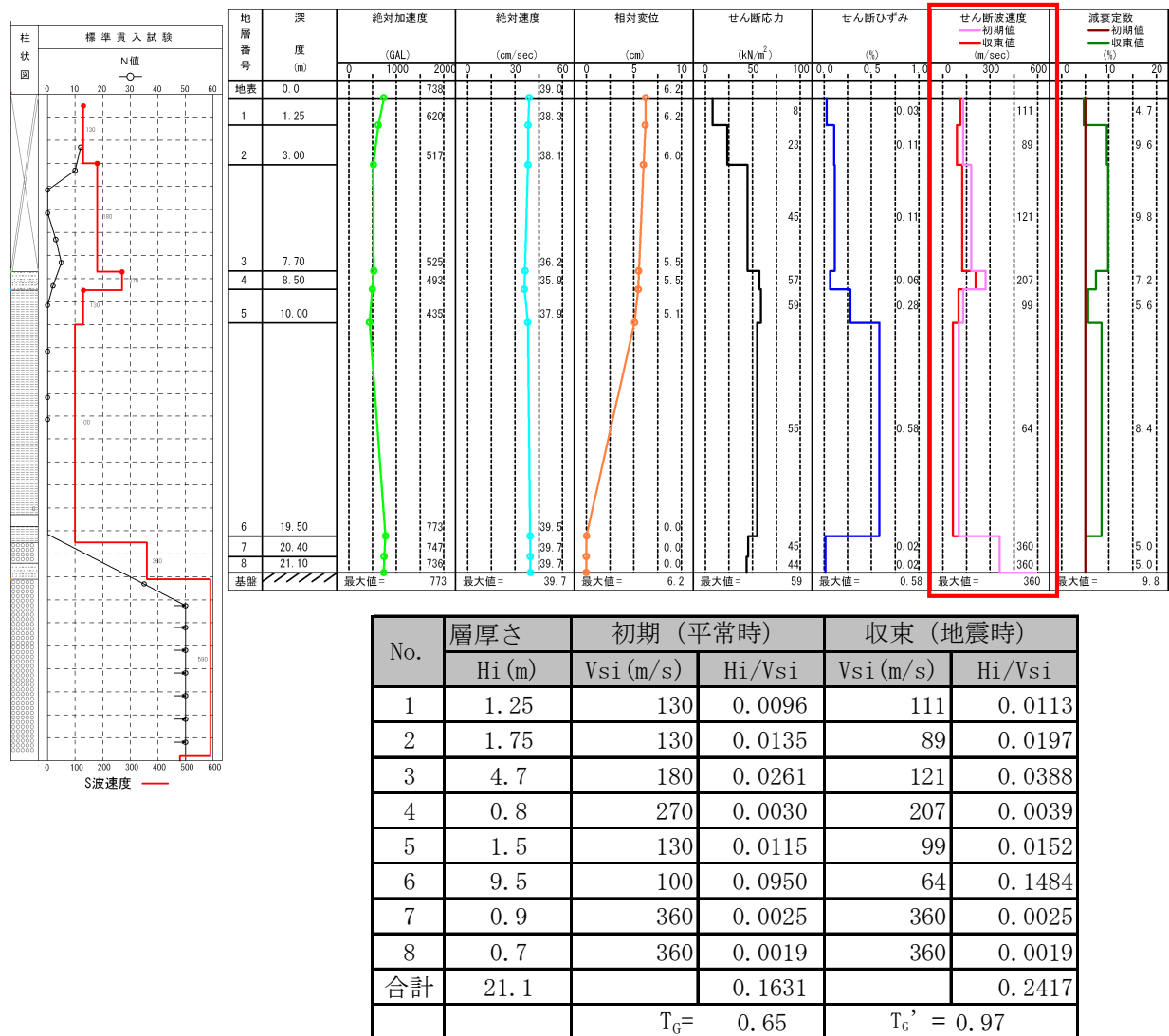
一次元地盤応答解析は、対象地点の地盤情報を用い、工学的基盤面に方法2（地域防災計画の想定地震動）及び方法3（過去の強震記録）の時刻歴加速度波形を入力し、地表面における地盤応答を求める解析である。解析手法の詳細及び条件設定方法は、3.2.6(2)を参照のこと。

(5) Vsの収束値による地盤固有周期 T_G' 算定方法

地盤種別判定における地盤固有周期 T_G は、地震時ではない平常時の固有周期であり、初期のせん断波速度 V_s （表2.11の場合は、せん断ひずみ 10^{-6} の V_s が相当）を用いて算定する。

しかし、地震時には、地盤の非線形性の影響により地盤の剛性が低下し、せん断波速度が減少する。このとき、地震時の地盤固有周期 T_G' の値は、初期（平常時）よりも大きくなる。

地震時の地盤固有周期 T_G' は、地盤剛性低下後のせん断波速度 V_s により求められる。ここでは一次元地盤応答解析のせん断波速度 V_s の収束値を用いる。算定例を図2.34に示す。



地震時の地盤固有周期 $T_G' = 0.97\text{sec}$

図2.34 せん断波速度の収束値を用いた地盤固有周期の算定例

第3章 池状コンクリート構造物の耐震計算法

第3章 池状コンクリート構造物の耐震計算法

3. 1 総説

3. 1. 1 池状コンクリート構造物の耐震計算法

構造物の耐震計算法は、静的解析と動的解析とに大別される。池状コンクリート構造物の耐震計算法には、従来、静的解析が適用されてきており、旧指針においては、動的解析を含む高度な耐震計算技術が取り入れられた。ただし、旧指針では動的解析は目指す方向であるものの、標準的な手法とは位置づけられていなかったこと、動的解析に関する当局の設計事例が十分ではなかったことを考慮し、旧ガイドラインにおいてはレベル2地震動に対する設計において、静的解析と動的解析を併用していた。

一方、22年版指針では動的解析が標準手法に定められ、静的解析は一定の条件下における適用に限定された。

本ガイドラインでは、22年版指針の規定や当局における動的解析の採用実績を考慮し、池状コンクリート構造物の耐震計算法の標準手法に動的解析を採用するとともに、静的解析を適用する場合の目安を示すこととする。

3. 1. 2 耐震計算法の選択

池状コンクリート構造物の耐震計算法は、指針に準拠しつつ、当局における施設の特徴や耐震設計の考え方などを踏まえ、表3. 1により選定する。

表3. 1に示すように当局では、レベル1地震動の耐震計算法は、静的解析（線形）を基本とする。ただし、レベル2地震動の耐震設計を動的解析により行う場合、解析の作業性を考慮し、レベル1地震動とレベル2地震動の耐震計算において解析モデルは同一で地震波形のみを入れ替え計算を行う場合などは、レベル1地震動の耐震設計も動的解析により行ってもよい。

レベル2地震動の耐震計算法は新設構造物、既設構造物ともに大規模施設については、周辺地盤変状の影響の有無に関係なく、動的解析（非線形）を基本とする。ただし、周辺地盤変状の影響が無しの場合において地上式池状コンクリート構造物（構造物全体が地上にあるもの）の場合は、地盤との相互作用の影響も無いことから、静的解析（非線形）による照査を実施してもよい。大規模施設以外の施設については、周辺地盤変状の影響が無しの場合、静的解析（線形）を基本とし、周辺地盤変状の影響が有りの場合は、動的解析（非線形）を基本とする。ただし、周辺地盤変状の影響が有りの場合であっても、1次元地盤応答解析などにより液状化の影響などによる地盤変状を予測できる場合は、静的解析（線形）を適用してもよい。なお、構造物全体の変位や構造目地及び取り合い管路の相対変位などを詳しく照査する場合などにおいては、動的解析（非線形・連成系モデル）により詳しく照査を行うこと。

既設構造物の耐震診断や耐震補強設計において、簡易な解析手法として静的解析（線形）を適用する場合は、22年版指針に準拠し、「97年版指針」による手法を適用しても良い。

表 3. 1 池状コンクリート構造物の耐震計算法【新設、既設（耐震診断、耐震補強設計）共通】

設計地震動 (要求性能)	大規模施設※ ¹		大規模施設以外	
	周辺地盤変状の影響： 無し	周辺地盤変状の影響：有り	周辺地盤変状の影響： 無し	周辺地盤変状の影響： 有り
レベル 1 地震動 (使用性)	静的解析（線形）※ ²			
レベル 2 地震動 (復旧性) (安全性)	動的解析（非線形） 地上構造物※ ³ の場合は、静的解析（非線形）の適用可	動的解析（非線形）	静的解析（線形）	動的解析（非線形） 一次元地盤応答解析などにより液状化の影響による地盤変状が予測できる場合は静的解析（線形）適用可。

※¹ 容量 2,000 m³以上の池状コンクリート構造物を対象とする。

※² 動的解析（非線形）による照査を実施してもよい。

※³ 構造物の全てが地上にある池状コンクリート構造物を対象とする。

※⁴ 条件に該当しなくても、より高度な解析手法、解析モデルを適用することを妨げるものではない。

なお、表 3. 1 に示す周辺地盤変状の影響の判断については、基礎地盤又は周辺地盤が液状化地盤（改良地盤除く）などで地盤変状が想定される場合、杭基礎構造の場合を、周辺地盤変状の影響有りとする。

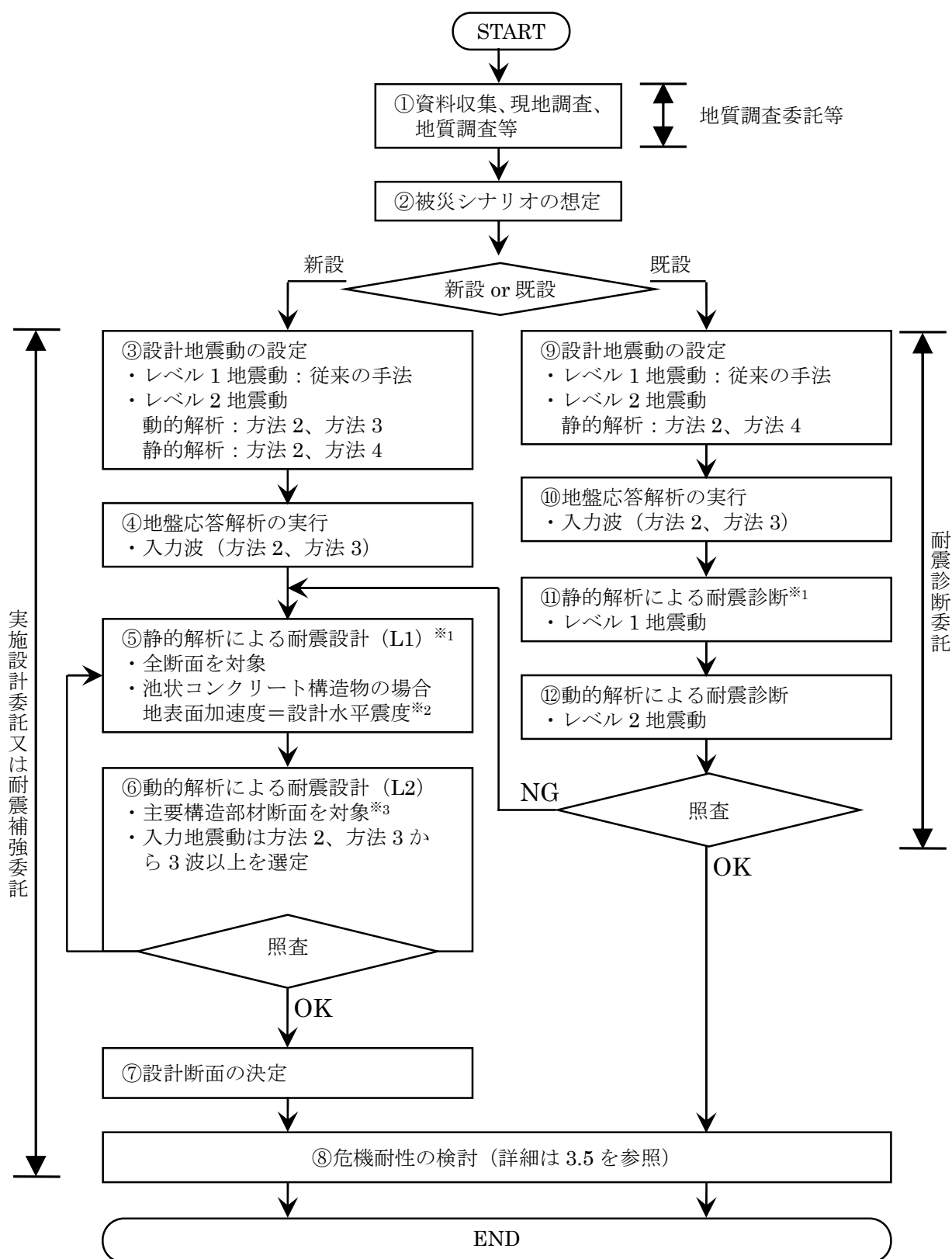
この地盤変状の影響の判断に際しては、例えば、液状化の影響の評価として、3. 2. 9 を参照しても良い。

また、指針・本編、図 3. 4. 4 では、既設構造物において、条件によっては 1997 年版指針を適用できることになっているが、構造物特性係数として（ $C_s = 0.45$ ）については、適用しないことを基本とする。非線形性を考慮する場合は、静的非線形解析（プッシュオーバー解析）を適用すること。

3. 1. 3 当局における池状コンクリート構造物の耐震設計フロー

当局における池状コンクリート構造物の動的解析を適用する場合の耐震設計フローを図 3. 1 に示す。図 3. 1 に示すように、既設構造物の耐震補強設計は、新設設計と同じ耐震設計フローを適用する。

耐震設計では、耐震計算を実施するための事前調査として、まず、対象施設や地盤、地形などに関する資料を収集する。その際には現地調査や必要に応じて地質調査等を実施する。次に、これらの調査結果も踏まえ、地盤の検討などを行い、液状化の可能性や地盤変状による影響の有無などの検討を行ったうえで、被災シナリオの想定を行う。被災シナリオの想定では、構造物の損傷だけでなく、取り扱い管路や構造目地部の相対変位、及び構造物基礎の変位など、耐震計算により照査すべき項目を明確にする。



※1：動的解析により照査を行ってもよい。

※2：指針本編 p.121 の記述により池状コンクリート構造物の固有周期算定が不要。

※3：主要構造部材断面以外は静的解析により照査を行ってもよい。

図 3. 1 耐震設計のフロー（レベル 2 地震動の耐震計算を動的解析により行う場合）

動的解析を適用する場合、設計地震動は地盤応答解析の結果により当該構造物に対して最も厳しい結果となる地震動を選定する（2.4 参照）。

動的解析による設計断面の設定は、常時やレベル1地震動の静的解析結果によるものとし、レベル1地震動の耐震設計の後、レベル2地震動の動的解析による耐震設計を行う手順を基本とする。レベル2地震動の動的解析によって設計断面が満足されない結果となった場合は、再度、設計断面の設定を行うものとする。再設定した設計断面にて動的解析モデルを修正し、動的解析による再照査を行い、設定した設計断面が満足することを確認するものとする。

また、耐震計算は、全ての構造部材を対象として全断面を対象に実施するが、構造物の種類や形状によっては、動的解析において全部材を照査することは実務的に困難な場合もある。そのため、図3.2に示すように、主要な構造部材（参照）については、動的解析の対象とするが、局部の部材などについては、静的解析（線形、構造物特性係数=1.0）や静的解析（非線形）により照査を行っても良いものとする。その場合、構造全体をモデル化せず、対象部材のみモデル化し照査を行ってもよい。

耐震設計や既設構造物の耐震診断等においては、連成系モデルを適用の場合、構造物の耐震計算に用いる地盤モデルの設定や、地盤の応答状況を地盤応答解析等により事前に確認すること。さらに構造物の耐震計算結果の確認に用いることを目的として1次元地盤の地震応答解析を実施するものとする。

なお、大規模施設においては、危機耐性を考慮した耐震計算を行うこととし、上述した解析により決定した断面を対象として、静的非線形解析（プッシュオーバー解析）により行う。

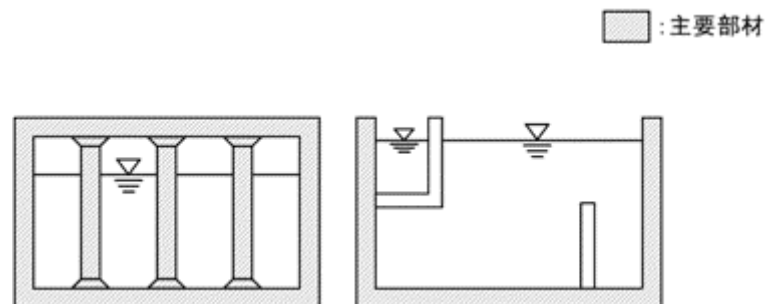


図3.2 動的解析の対象とする主要部材の例

3. 1. 4 耐震計算法の概要

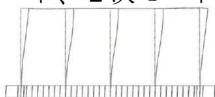
本項では、当局で用いる耐震計算法の概要について述べる。各計算法の詳細については、3. 2 及び3. 3を参照すること。

(1) 動的解析法

ア 解析手法の種類

代表的な動的解析法とその概要を表3. 2に示す。

表3. 2 動的解析法の概要

① 直接積分法	- 運動方程式を数値積分することにより、応答を求める手法 - 直接積分法にも数種類あり、ニューマークのβ法がよく用いられる。
② 周波数応答解析法	- 周波数領域での運動方程式を解いて、時間領域の応答値に変換する方法 - 地盤の剛性や減衰が周波数に依存する複素剛性で表現されるモデルなどの場合に用いられる。
③ モード解析法	固有値解析を行い、モードごと（1次モード、2次モード……）の解析結果を重ね合わせ、地震時応答を得る方法 1次  2次 
④ 応答スペクトル法	固有値解析を行い、周波数成分ごとの解析結果を重ね合わせて、最大応答値を得る方法
⑤ 非線形スペクトル法	- 鉄道構造物等設計標準に記載のある簡便法 - 材料の非線形特性を考慮できる。

イ 手法の選定

動的解析法では、解析方法によって得られる応答の種類が異なり、その種類は、表3. 3及び図3. 3のとおり分類される。

当局施設では、レベル2地震動に対して要求性能2を目標としており、構造物の非線形性を考慮した解析を行う必要があるため、基本的には直接積分法を適用する。

表3. 3 動的解析法によって得られる応答の種類

動的解析法		応答の種類		応答値の種類
		線形	非線形	
時刻歴応答解析法	直接積分法	●	●	時刻歴応答値
	周波数応答解析法	●	—	時刻歴応答値
	モード解析法	●	—	時刻歴応答値
応答スペクトル法		●	—	最大応答値
非線形スペクトル法		●	●	最大応答値

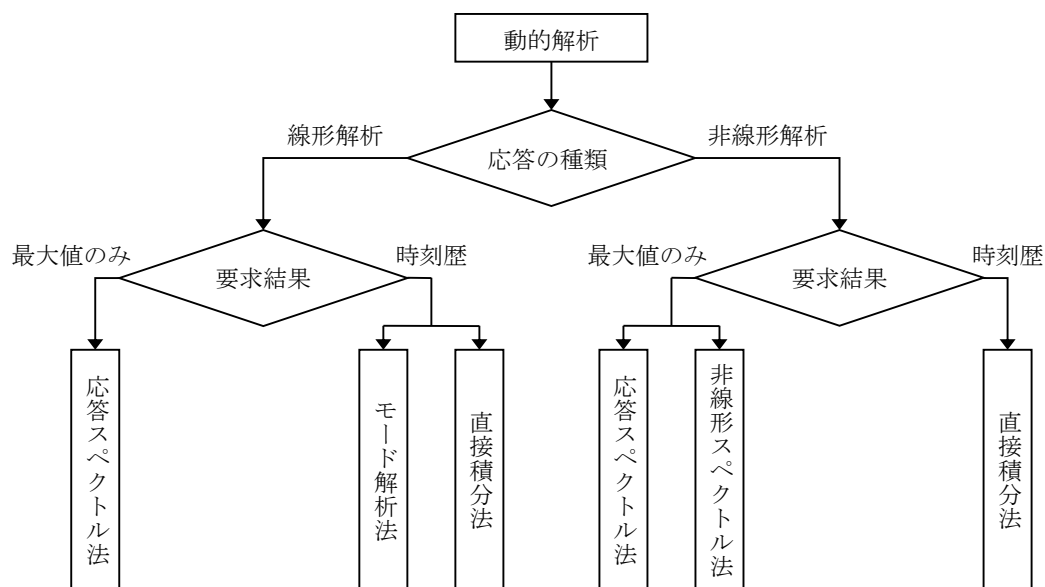
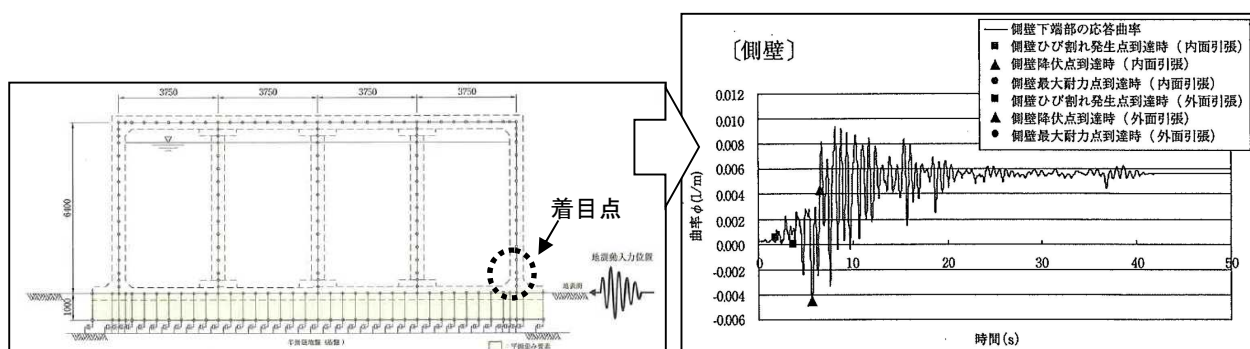


図3.3 動的解析法の分類

ウ 解析の入力・出力のイメージ

直接積分法におけるモデルへの入力と結果の出力のイメージを図3.4に示す。



モデルを作成して時刻歴加速度波形を入力

側壁部における時刻歴の応答曲率を出力

図3.4 直接積分法によるモデル入力と結果出力（イメージ）

(2) 静的解析法

主な静的解析法には、震度法と応答変位法があり、各計算法の特徴は次に示すとおりである。

ア 震度法

(ア) 定義

構造物に対する地震作用を設計震度を用いた静的な荷重に置き換える手法

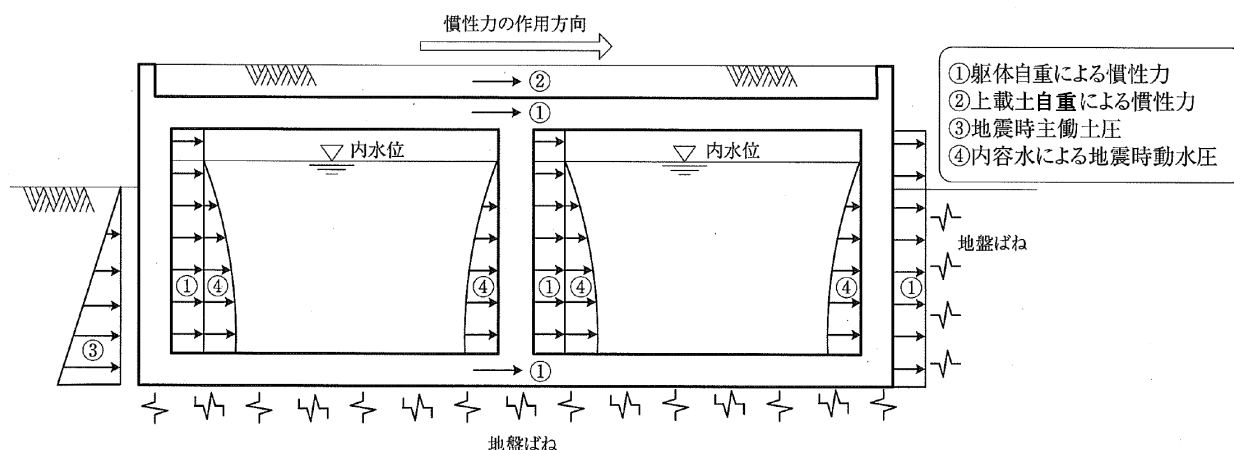


図3. 5 震度法による地震力の作用（イメージ）

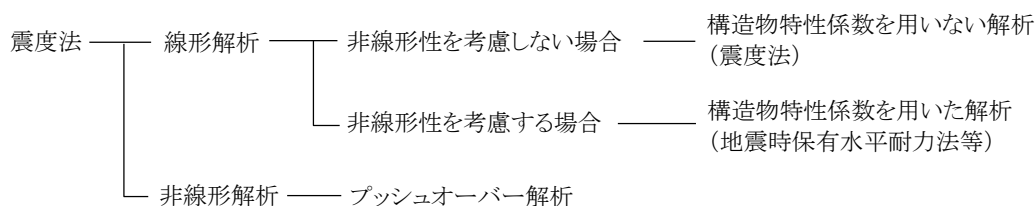
出典：指針・本編 p.123（日本水道協会、2022 年）

物

（イ）適用構造物の目安

- ・ 躯体の一部又は大部分が地上に存在する場合
- ・ 周辺地盤の地震時挙動による影響よりも、地震動による躯体慣性力や動水圧の影響が支配的になる場合

（ウ）解析方法



指針では、プッシュオーバー解析等の非線形解析を適用することを原則とし、各種条件に応じて線形解析を適用してもよいとされている。

※22 年版指針では、原則として構造物特性係数 C_s を用いない ($C_s=1.0$) とされており、本ガイドラインでも指針に準じて線形解析では $C_s=1.0$ を標準とする。

イ 応答変位法

（ア）定義

地震荷重を周辺地盤の地震時応答（変位、せん断応力、加速度など）を基に設定する手法

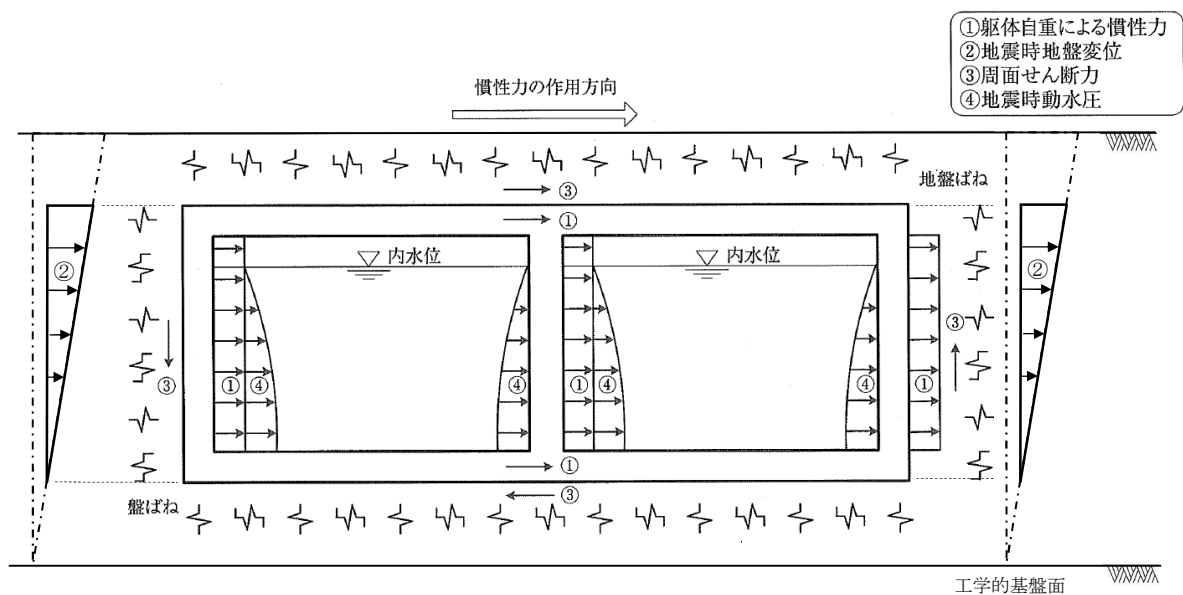


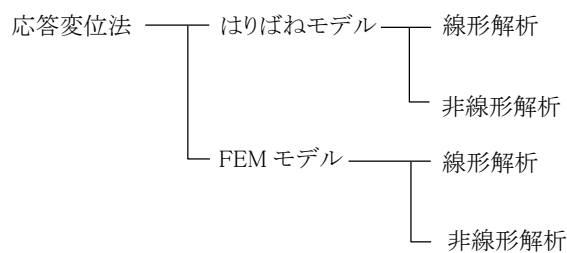
図 3. 6 応答変位法による地震力の作用（イメージ）

出典：指針・本編 p.123（日本水道協会、2022 年）

（イ）適用構造物の目安

- ・ 躯体全体が完全に地中にある場合
- ・ 地震動による慣性力の影響よりも、周辺地盤の地震時挙動に支配される傾向が強い場合

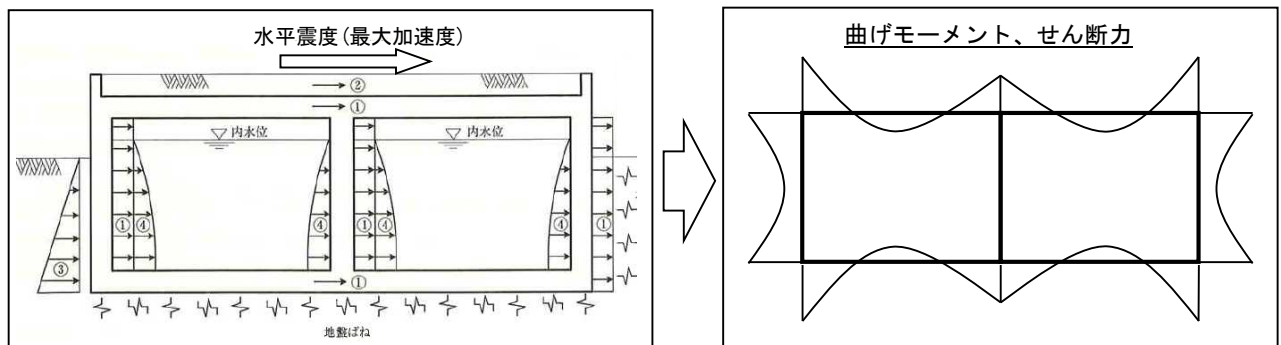
（ウ）解析方法



- ・ 地中構造物は、塑性変形の評価が困難であるため、構造物特性係数 C_s を用いない（線形解析）。
- ・ 97 年版指針の計算例では、剛性 EI の低下を評価して塑性域の計算をしているものがある（非線形解析）。

ウ 解析の入力・出力のイメージ

静的解析におけるモデルへの入力と結果の出力のイメージを図 3. 7 に示す。



モデルを作成して荷重を入力

発生応力度、曲げモーメント、せん断力を出力

図3. 7 静的解析（震度法）によるモデル入力と結果出力（イメージ）

3. 1. 5 当局における耐震設計の標準

(1) 当局における標準

当局における設計では、動的解析及び静的解析の標準として、それぞれ表3. 4及び表3. 5に示す条件を用いることを原則とする。

表3. 4 当局における標準（池状コンクリート構造物の動的解析）（1/3）

分類	項目	東京都における基本	説明等	参照項等
解析手法など	動的解析法	時刻歴応答解析・直接積分法	地震時に時々刻々と変化する構造物や地盤の応答（断面力、変位等）、減衰、非線形性等を適切に評価する。	3.2.5 (3)
	線形／非線形	非線形解析	地震時における構造物の損傷状態、塑性化に伴う地震エネルギー低減、変位（応答、残留）等を適切に評価する。 地震時における地盤のひずみや、それに伴う剛性及び減衰の変化を適切に評価する。	3.2.7 (3) 3.2.7 (4)
	次元	2次元モデル	3次元モデルを適用するのが有効であるが、地盤一構造連成系モデル又は非線形モデルを適用する場合は、解析コードが限定され、その妥当性が十分に確認できないと考える。 なお、3次元性については、有限要素法などにより考慮する。	3.3.5 (2) 3.3.7 (10)
	解析モデル系	地盤一構造連成系モデル	地盤と構造物の加速度、変位等の動的相互作用を適切に考慮する。 池状コンクリート構造物の構造目地や取り合い管路部での相対変位を適切に評価する。 構造物周辺の地形・地盤の変化を適切に評価する。 なお、構造物が工学的基盤面など堅固な地盤にある場合は、構造物独立モデルを適用しても良い。	3.2.5 (1)
入力地震動	種類	時刻歴加速度波形	時刻歴応答解析・直接積分法に用いる地震動	3.2.7 (2)
	入力方法	工学的基盤面（地盤一構造連成系モデル）に 2E（E：入射波）波を入力する。	工学的基盤面上の表層地盤内での地盤や構造物の挙動、地震動の変化等を正確に評価する。 なお、構造物独立モデルを使用する場合は、各構造要素や節点に入力する。	3.2.7 (2)

表 3. 4 当局における標準（池状コンクリート構造物の動的解析）（2/3）

分類	項目	東京都における基本	説明等	参照項等
地盤のモデル化	非線形モデル	非線形法（全応力、有効応力）	地震時に時々刻々と変化する地盤の非線形性（地盤のひずみ及びそれに伴う剛性、減衰の変化等）を適切に評価する。ただし、地震動の引き戻し解析に用いる地盤モデルには等価線形法を用いる。	3.2.7 (3)
	全応力／有効応力モデル	液状化の影響を考慮しない場合： 全応力解析	簡易法（FL 法等）により液状化の可能性がない場合、液状化の可能性があっても施設性能への影響が小さいなどの場合は、有効応力の変化を考慮しない。	3.2.5 (1) 3.2.7 (3) 3.2.9 (1)
		液状化の影響を考慮する場合： 有効応力解析	簡易法（FL 法等）により液状化の可能性があり、かつ施設性能への影響があるなどの場合は、有効応力の変化を考慮し、液状化後の地震時の挙動を適切に評価する。	
	動的変形特性	対象土の動的変形試験へのフィッティングを行うことにより設定	より正確に変形特性を評価する。ただし、やむ終えない場合は、土木研究所の試験結果へのフィッティングを行うことにより設定する。	3.2.7 (3)
	非線形履歴モデル （応力－ひずみ関係）	全応力モデル： R-O モデル、H-D モデル	ランダムな地震による繰り返し応力の時間履歴に対してランダムな非線形履歴（ひずみと応力の関係）を適切に表現する。 左記の方法を改良した修正 GHE モデルなどを適用しても良い。	3.2.7 (3)
		有効応力モデル： 砂の弾塑性モデル	主に液状化の影響を適切に評価することを目的として、有効応力の変化に応じた非線形履歴特性（応力－ひずみ関係）の変化を適切に表現する。	
構造物のモデル化	構造物周辺ばねのモデル化	受動土圧係数を上限とするバイリニア型のばねモデル	構造物独立モデルを適用する場合に適用する。	3.2.7 (3)
	非線形履歴モデル （応力－ひずみ関係）	曲げモーメントと曲率の関係をモデル化 トリリニアモデル、修正武田モデルなどのトリリニアモデルを適用	コンクリートのひび割れ点、鉄筋の降伏点及び部材の破壊点を適切に評価する。	3.2.7 (4)
	コンクリート、鉄筋の応力－ひずみ関係	コンクリート標準示方書に示された応力－ひずみ関係の設定方法を適用	実験結果があれば、それを適用してもよい。	3.2.7 (4)

表 3. 4 当局における標準（池状コンクリート造物の動的解析）（3/3）

分類	項目	東京都における基本	説明等	参照項等
その他	境界条件	側方： 水平ローラー、粘性境界又は 擬似自由境界（繰り返し境 界、等変位境界等）	左記の側方に用いる各境界条件 は、それぞれの課題を踏まえて各耐 震計算に応じた最適な方法を適用 する。 このため、2次元モデルの解析領 域の片側幅を鉛直方向の5倍以上 を確保するなど十分な領域を確保 することが望ましい。	3.2.7 (7)
		底面： 粘性境界	底面の境界条件については、地下 逸散減衰を考慮するため、粘性境界 とする。	
	池内水のモデル 化	付加質量（動水圧）	水と構造物の連成振動（バルジ ング）を考慮しないため、流体要素 でモデル化しない。	3.2.7 (6)
	構造目地のモデル 化	ばね要素（圧縮のみ伝達）	目地部の相対変位及び目地部の 圧縮力を適切に評価する。	3.2.7 (5)
	構造物、地盤の減 衰条件	粘性減衰は、レーリー型の質 量及び剛性比例減衰により 考慮 地盤のエネルギー逸散減衰 は、粘性境界により考慮（地 盤－構造連成系モデルの場 合）	動的解析において、履歴減衰は、 非線形履歴特性により自動的に考 慮される。 構造物独立モデルの場合は、ダッ シュポットにより表現できる。	3.2.7 (8)

表 3. 5 当局における標準（池状コンクリート構造物の静的解析）（1/2）

分類	項目	東京都における基本	説明等	参照項等
静的解析手法	震度法と応答変位法の区分	震度法： 慣性力の影響が支配的 応答変位法： 地盤変形の影響が支配的	両者の影響が不明な場合は代表的な断面に両者を適用した結果に基づいて、安全側の背系となる計算法を選定する。	3.3.3 (1)
	線形／非線形	レベル 1 地震動： 線形解析	レベル 1 地震動に対しては、線形解析を適用する。	3.3.4 (1)
		レベル 2 地震動： 線形解析及び非線形解析	レベル 2 地震動に対しては、線形解析を基本とする。 なお、動的解析による照査を実施する場合には、解析作業の効率化を図るため、非線形解析を行った方がよい。	
	次元	2 次元モデル	2 次元フレームモデルを標準として、3 次元効果が期待できる構造物に対しては、3 次元フレームモデル、3 次元 FEM モデル又は 3 次元効果を考慮した 2 次元モデルを用いる。	3.2.4 (1)
震度法	設計震度の設定	地上構造物： 地表面加速度を設計震度と見なす。	池状コンクリート構造物は固有周期が短く、地表付近に設置されているため、地表面加速度を設計震度と見なす。	2.4.3(4),(5)
		地中構造物※： 地表面の設計震度と工学的基盤面の設計震度から求める。 ※構造物の 3 分の 2 程度以上が地中部にあるものを地中構造物とする。	地上構造物で用いる地表面の設計震度と工学的基盤面の設計震度を直線補完することにより、構造物重心位置の設計震度を求める（指針・総論 p.125 の記述より）。	
	構造物特性係数	構造物特性係数 C_s を考慮せず $C_s=1.0$ を基本とする。	構造物特性係数 C_s を用いて構造物の非線形性を考慮しない。	3.3.4 (2)
	地震時土圧式	修正・物部岡部式を標準	09 年版指針総論 3.1.6 地震時土圧を準用。	3.3.4 (4)
	動水圧式	ウェスタガードの補正式を標準（矩形水槽の場合）	09 年版指針総論 3.1.7 地震時動水圧を準用	3.3.4 (4)
	浮力、揚圧式	最も不利となる水位で算定	下水道施設耐震計算例処理場・ポンプ場編 2015 年版（第 2 版）を準用	3.3.4 (4)
	地盤ばねの算定	地盤反力係数から設定	道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編（2017 年、日本道路協会）準拠	3.3.4 (4)
	直接基礎の計算	原則として、レベル 1 地震動に対して滑動及び支持力を照査	道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編（2017 年、日本道路協会）準拠	3.3.4 (5)
	杭基礎の照査	変位法を適用 レベル 2 地震動では、非線形バネを適用	道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編（2017 年、日本道路協会）に準拠し、レベル 2 地震動では耐力に加えて応答塑性率及び変位を照査する。	3.3.4 (5)

表 3. 5 当局における標準（池状コンクリート構造物の静的解析）（2/2）

分類	項目	東京都における基本	説明等	参照項等
応答変位法	設計震度の設定	躯体の慣性力及び動水圧の算定では、震度法の地中構造物の算定方法により設計震度を算定する。	地表面の設計震度と工学的基盤面の設計震度を直線補完することにより、構造物重心位置の設計震度を求める。	2.4.3(4),(5)
	構造物特性係数	構造物特性係数は考慮せず $C_s=1.0$ を基本とする。	線形解析を用いる場合は、 $C_s=1.0$ を基本とする。 なお、非線形性を考慮する場合は、非線形解析を用いてもよい。	3.3.4 (3)
	地盤変位	レベル 1 地震動：地盤変位振幅 U_h を適用	22 年版指針・参考資料編 p234 を準用。	3.3.4 (4)
		レベル 2 地震動・方法 2：一次元地盤応答解析の地盤変形	レベル 2 地震動の方法 2 による場合は、設計地震動の設定に一次元地盤応答解析を行うため、その結果を採用する。	
		レベル 2 地震動・方法 4：地盤変位振幅 U_h を適用	22 年版指針・参考資料編 p234 を準用。	
	周面せん断力	レベル 1 地震動：指針の τ の式を適用	22 年版指針・参考資料編 p234 を準用。	3.3.4 (4)
		レベル 2 地震動・方法 2：地盤応答解析のせん断応力	レベル 2 地震動の方法 2 による場合は、設計地震動の設定に一次元地盤応答解析を行うため、その結果を採用する。	
		レベル 2 地震動・方法 4：指針の τ の式を適用	22 年版指針・参考資料編 p234 を準用。	
	動水圧式	矩形水槽：ウェスタガードの補正式を標準	震度法と同様とする。	3.3.4 (4)
	浮力、揚圧式	最も不利となる水位で算定	震度法と同様とする。	3.3.4 (4)
	地盤ばねの算定	地盤反力係数から設定	震度法と同様とする。	3.3.4 (4)
	直接基礎の計算	原則として、レベル 1 地震動に対して滑動及び支持力を照査	道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編（2017 年、日本道路協会）準拠	3.3.4 (4)
	杭基礎の計算	応答変位法を適用	下水道施設耐震計算例処理場・ポンプ場編 2015 年版（第 2 版）の線状地中構造物の杭基礎設計の応答変位法を準用する。	3.3.4 (5)

(2) 計算条件一覧

計算条件一覧の例を表3.6及び表3.7に示す。設計条件は、設計者・受託者の双方が確認できるように、本例のように一覧表にとりまとめ、設計計算書に記載するものとする。

表3.6 計算条件一覧の例（動的解析の条件）

項 目	設 定	
耐震設計 の基本条件	重要度	ランク A1
	目標要求性能	レベル1地震動：要求性能1、レベル2地震動：要求性能2
	解析手法	静的解析(L1)及び動的解析(L2)にて断面設計する。
	地盤種別	Ⅱ種地盤
解析手法	動的解析法	時刻歴応答解析法
	数値解析法	直接積分法（ニューマークの β 法、 $\beta=1/4$ ）
線形/非線形	構造物	非線形
	地盤	非線形（全応力）
入力地震動	レベル2地震動 （方法2）※	多摩東部直下地震、立川断層帯地震
	レベル2地震動 （方法3）※	神戸海洋気象台 NS 波
	入力方法	入力位置：工学的基盤面、入力方法：2E
解析モデル	二次元 FEM モデル	地盤－構造物一体モデル
	躯体	はり要素
	内容水	付加質量（動水圧）
	地盤	二次元平面ひずみ要素でモデル化
	境界条件	側方：粘性境界、底面：粘性境界
	三次元効果	二次元平面ひずみ要素でモデル化(別途三次元 FEM モデルで合成評価)
	その他	EXP.J：ばね要素（圧縮のみ伝達）
非線形モデル	躯体	修正武田モデル：トリリニア型履歴特性
	地盤	動的変形特性：地質調査結果から設定
減衰条件	構造物	粘性減衰：Rayleigh 減衰
		履歴減衰：Masing モデル
	地盤	履歴減衰：R-O モデル、弾性塑性モデル 地下逸散減衰：境界条件（下面粘性境界）により考慮
照査項目	曲げ	許容曲率（曲げ耐力）
	せん断	せん断耐力（せん断耐力式は、棒部材の式、ディープビーム式、等価せん断スパンを用いた評価式等を用いる。）

※ 一次元地盤応答解析結果から地盤及び構造物に影響の大きい波形を選定した。

表 3. 7 計算条件一覧の例（静的解析の条件）

項 目	設 定	
耐震設計 の基本条件	重要度	ランク A
	目標要求性能	レベル 1 地震動：要求性能 1、レベル 2 地震動：要求性能 2
	解析手法	静的線形解析
	地盤種別	Ⅱ 種地盤
解析手法	静的解析法	震度法
線形/非線形	構造物	線形
	地盤	線形
入力地震動	レベル 1 地震動	従来の方法
	レベル 2 地震動	方法 2、方法 4 の大きい値を採用（設計水平震度）
	構造物特性係数	$C_s=1.0$
解析モデル	躯体	はり要素
	地盤	地盤ばね
	地震時土圧	修正物部・岡部式
	動水圧	ウエスタガードの補正式
照査項目	曲げ	許容応力度、曲げ耐力
	せん断	許容応力度、せん断耐力（せん断耐力式は、棒部材の式、ディープビーム式等を用いる。）

3. 2 動的解析による耐震計算

3. 2. 1 池状コンクリート構造物への適用目的

当局の池状コンクリート構造物には、動的な影響が大きくなりやすい大規模な構造や被害報告の多い構造目地を複数有する複雑な構造も多い。

また、図3. 8に示すような動的な構造特性（固有周期、非線形特性、減衰特性等）や周辺地盤の特性（固有周期、非線形特性、液状化の影響等）及び設計地震動の特性（振幅特性、周期特性、位相特性、継続時間等）は対象施設によって多種多様である。

そのため、それらの固有の特性を動的解析によりできるだけ忠実に表現し、保持すべき耐震性能をより確実かつ合理的に確保することは、今後、当局の耐震対策にとって非常に重要と考える。

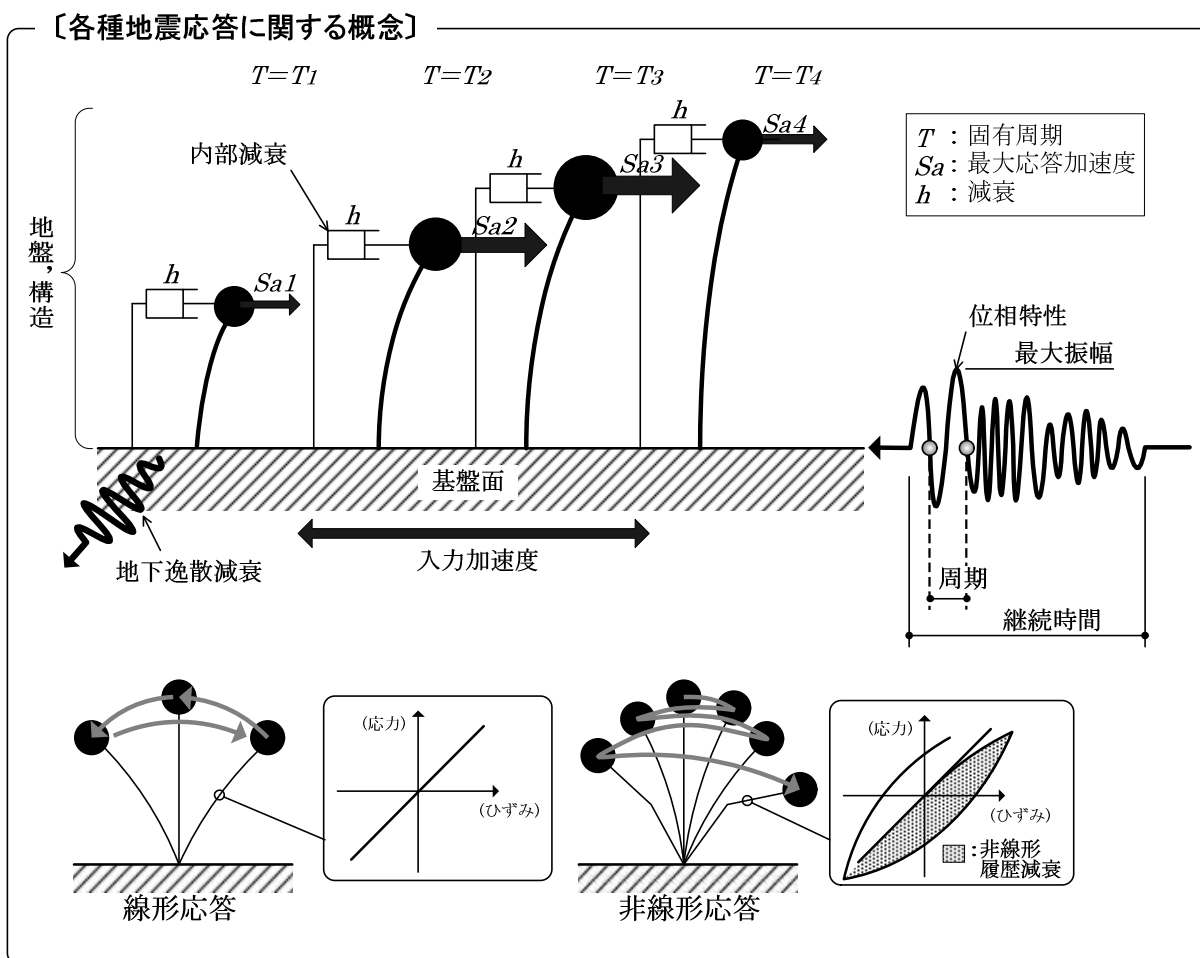


図3. 8 各種地震応答に関する概念

したがって、当局では、池状コンクリート構造物の大規模施設等における新設設計及び耐震補強設計等において、次に示す事項と図3. 9に示す評価を主な目的として動的解析による照査を行うものとする。

【当局での池状コンクリート構造物への動的解析適用の主な目的】

- ① レベル2地震動に対する耐震性能2の照査における構造物や杭の非線形応答の正確な評価
- ② 池状コンクリート構造物における躯体、構造目地、構造物取り合い部管路等の地震時の応答変位と地震後の残留変位の正確な評価
- ③ 次に示す動的な現象の考慮による静的解析の設計結果（照査結果）の検証
 - ・ 規模が大きく表層地盤との接地面積が大きい池状コンクリート構造物における、構造物と周辺地盤の複雑な動的相互作用（振動、変形及び慣性力）。
 - ・ 大規模な浄水場にある浄水施設のように平面・断面規模が大きい池状コンクリート構造物における周辺地盤条件の変化を踏まえた複雑な地震時挙動
 - ・ 給水所や階層構造の浄水施設のように、池高が比較的大きい構造の複雑な地震時挙動
 - ・ 液状化による地盤特性の変化を踏まえた池状コンクリート構造物の地震時挙動

動的解析の主な目的は、レベル1地震動において設定した部材諸元に対して、レベル2地震動における曲げ破壊やせん断破壊の照査を行い、地震時に時々刻々と変化する上記③の影響を詳しく評価することである。

また、上記の①及び②に関する照査は、静的解析において正確に照査できないことから、動的解析での照査項目として重要となる。

そのため、当局では本ガイドラインに沿って、各池状コンクリート構造物の固有条件を正確に捉えて適切に動的解析を実施するものである。

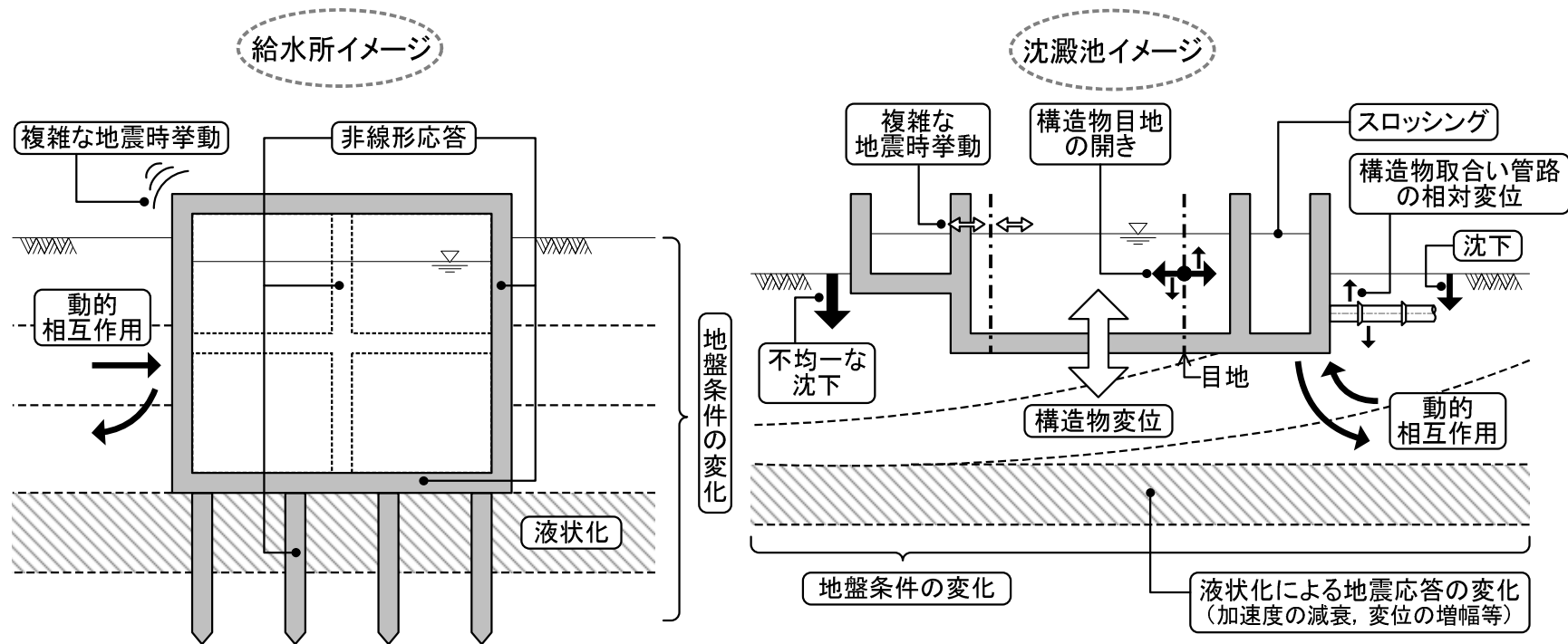


図 3. 9 池状コンクリート構造物の動的解析における主な評価対象

3. 2. 2 動的解析における解析フローの標準

当局での動的解析のフローを図3. 10に示す。

本ガイドラインにおいては、図3. 10に示す各項目について以降（3. 2. 3以降）に説明を行う。

当局の動的解析の適用に当たっては、まず、解析計画として池状コンクリート構造物の新設設計や耐震補強設計等における解析の目的、対象、照査項目等を明確にする。

次に、事前に行う静的解析により設定した構造、部材条件、事前の検討で選定した設計地震動等を基に、動的解析に用いる設計条件の設定を行う。

これらの解析目的、照査項目及び対象施設の設計条件等を踏まえ、各池状コンクリート構造物における最適な動的解析手法の選定と解析モデルの構築を行うものとする。解析モデルの構築に当たっては、並行して地盤応答の分析（1次元地盤モデルの動的解析）を実施し、地盤のモデル化の方針決定（全応力又は有効応力等）やモデル化の妥当性（各種応答値の異常値の有無や解析の収束等）の確認を行うものとする。

そして、池状コンクリート構造物の動的解析を実施し、その結果が妥当なものであれば、照査用応答値と限界値の比較を行い、耐震性能の照査を行う。その結果、保持すべき耐震性能が確保できない場合は、その確保が動的解析により確認できるまで部材や構造を変更し、静的解析及び動的解析による耐震計算を繰り返し実施する。

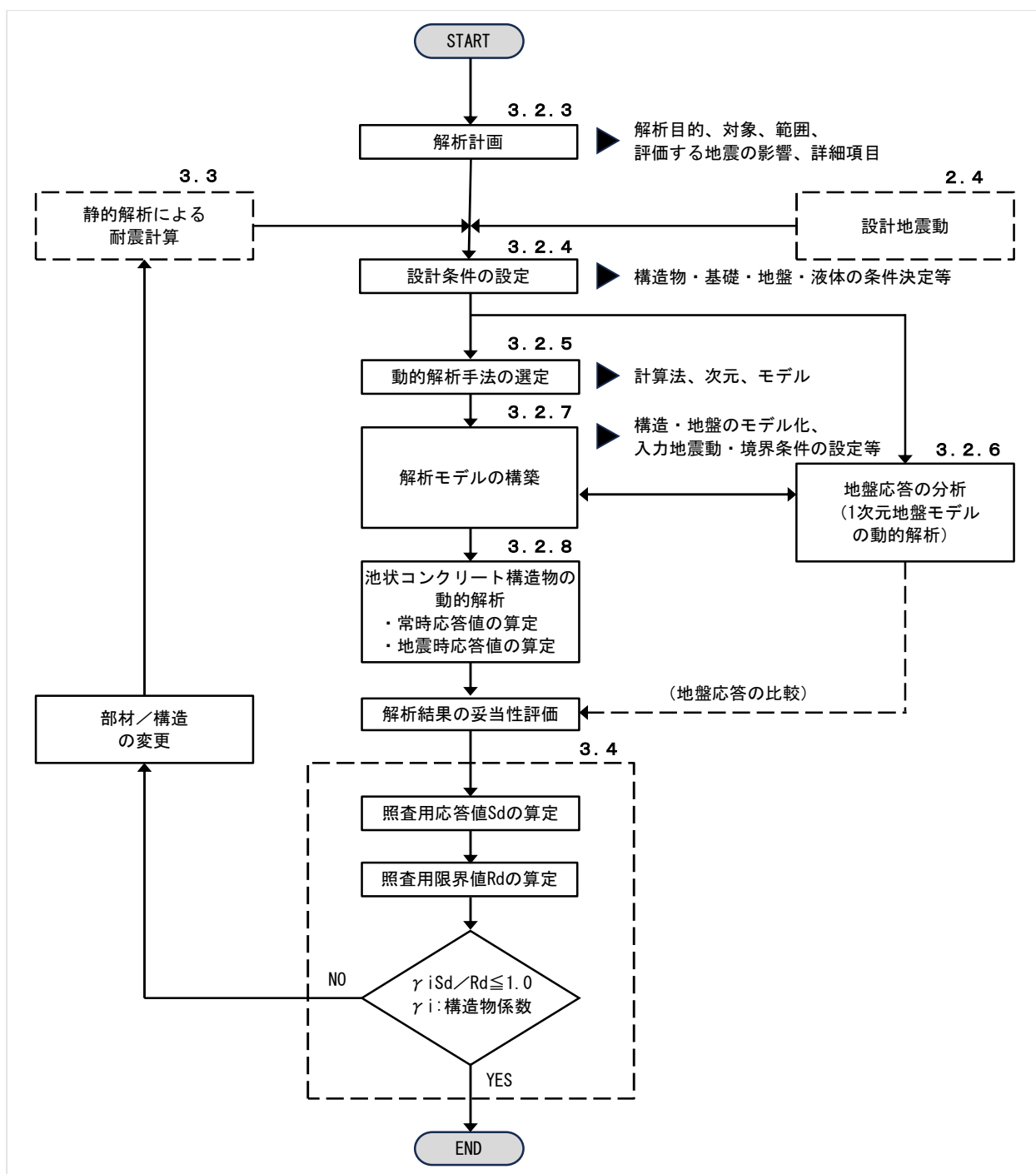


図 3.10 動的解析のフロー図

3. 2. 3 解析計画

動的解析の適用に当たっては、まず、解析計画として構造物や地形・地盤の特性を踏まえ、解析の具体的な目的を明確にする。そして、解析の対象やその範囲、解析において評価する地震の影響及び要求性能の照査項目と照査に必要な応答値を明確にする。

(1) 解析目的の明確化

当局の動的解析の目的は、主に3. 2. 1に示す事項が挙げられる。各耐震計算では、それらも参考に、地震の作用により想定される対象池状コンクリート構造物の被害シナリオをイメージするなどにより、数値シミュレーションを用いて地震時の状況を詳しく推測する目的（何が知りたいか）を明確にする。

(2) 解析の対象や範囲

解析のモデル化の対象や、解析の範囲（モデル化の領域）については、上記（1）の解析目的を踏まえ、各耐震計算において適切に設定する必要がある。それらのイメージを図3. 11に示す。

解析の対象は、対象施設の性能を左右することになるため、地震時の応答値の変化を照査する必要のある構造物、部材、部位などとする。

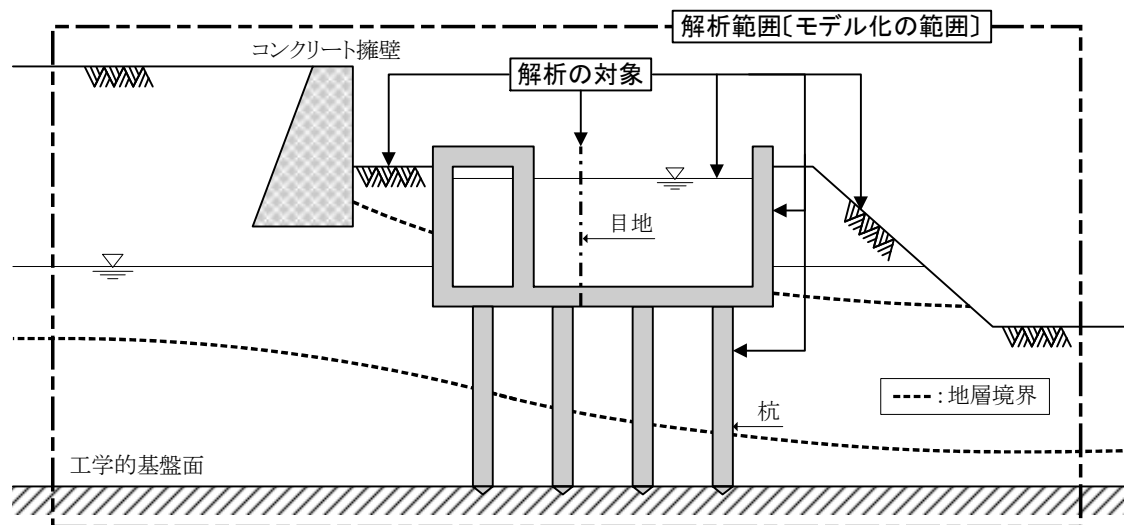


図3. 11 解析の対象や範囲のイメージ

当局の池状コンクリート構造物は、多量の内容水を貯え、地盤との接触面積が大きいなどの特徴を持つことから、地震作用として慣性力のほか、水及び地盤が地震時に池状コンクリート構造物に与える作用（水圧、土圧、変位など）を適切に考慮する必要がある。

そのため、解析の範囲（モデル化の領域）は、図3. 11に示すように対象施設への地震の影響を左右する（又はその可能性のある）地形、地盤、近接構造物等を含めて設定する。

また、周辺斜面の滑り等の影響や地盤の液状化とそれに伴う側方流動などについても必要に応じて評価する必要がある。

（３）照査項目の設定

動的解析における照査項目は、上記（２）に示した解析対象における解析領域内の地震の影響が施設性能に影響し、どのような被害が生じるのかを事前にイメージして設定する。

当局での主な照査項目の例を次に示す。損傷レベルについては３．４．１を参照する。

【全ての対象構造物について照査すべき項目の例】

- ・ 構造部材の曲げによる損傷レベル（ひび割れ、鉄筋降伏及び破壊）、せん断破壊及び破壊モード

【必要に応じて照査すべき項目の例】

- ・ 構造目地部の相対変位（最大応答変位、残留変位、水平及び鉛直）
- ・ 構造物全体の傾斜、沈下及び浮上量（池内水位の評価にも適用）
- ・ 構造部材の変形量（浄水処理設備への影響評価などにも適用）

３．２．４ 設計条件の設定

動的解析に用いる設計地震動、構造・部材条件、周辺の地盤・地形条件、及び地震時の池内運用水位等の設計条件の設定を行う。

当局の動的解析は基本的にレベル２地震時の検討において適用するものであり、レベル１地震時の検討において静的解析に用いた設計条件を確認の上で適用することを基本とする。ただし、次に示す例のように動的解析において新たに設定する条件があることから、それらは各耐震計算において適切に設定する。

【動的解析において設定が必要な解析条件の例】

- ・ 入力地震動の時刻歴加速度波形
- ・ 周辺地形の変化を考慮する場合は、その地形条件（測量図など）
- ・ 地盤の非線形特性の設定に用いる地盤条件（動的変形特性などの土質試験結果）
- ・ 構造物の非線形特性の設定に用いる材料条件（コンクリート、鉄筋など）
- ・ 構造目地部の評価を行う場合は、その形状、止水板の伸縮性能などの構造細目
- ・ 液状化の詳細な評価を行う場合は、液状化地盤の条件（土質試験結果など）

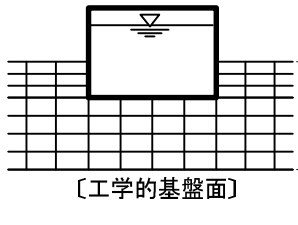
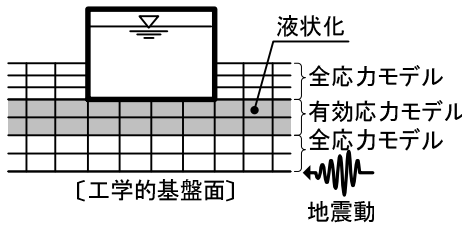
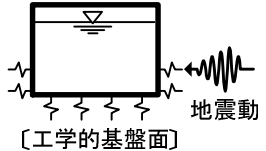
3. 2. 5 動的解析手法の選定

(1) 解析モデル系の種類に関する選定

池状コンクリート構造物の動的解析を行うに当たり、池状コンクリート構造物が地盤と広い範囲で接するなどの理由から、必要に応じて地盤と構造物の動的相互作用の影響を適切に評価することが重要である。

動的相互作用を地盤と構造物との解析モデル系として表現する方法の種類と、当局の池状コンクリート構造物の動的解析に用いる標準を表3. 8に示す。モデル系の種類は、主に構造物と地盤の境界をばねモデルにより表現する構造物独立モデルと、工学的基盤面より浅い位置にある表層地盤全体の地震時挙動を FEM モデルにより表現する地盤－構造物連成系モデルがある。

表3. 8 池状コンクリート構造物のモデル系の種類と当局の標準

解析モデル	当局の標準		構造物モデル	地盤モデル	地盤の非線形特性	イメージ図
地盤－構造物連成系モデル	表層地盤中の施設	液状化の影響を考慮しない施設	はりモデル又は FEM モデル	FEM モデル	全てに全応力モデルを適用	
		液状化の影響を考慮する施設			有効応力モデルを適用	
構造物独立モデル	堅固な地盤中にある施設			ばねモデル	全てに全応力モデルを適用	

当局では、表3. 8に示すように、表層地盤中にある池状コンクリート構造物については、次に示す理由により地盤－構造物連成系モデルを適用することを原則とする。

なお、工学的基盤面と見なせるような堅固な地盤上にあるなど、表層地盤の影響のない池状コンクリート構造物については、地盤と構造物の相互作用の影響は小さく構造部の変位もほとんど問題とならないと考え、構造物独立モデルを適用する。

【地盤－構造物連成系モデル(地盤モデルを FEM モデル)とする理由】

- 当局の動的解析を適用する池状コンクリート構造物は、規模の大きい構造であり、構造目地を有する場合が多く、表層地盤の変位を考慮した構造目地部での相対変位量の評価や、構造物取り合い部における管路と構造物の相対変位量の評価も重要であるため
- 構造物に近接する地形変化（斜面や盛土等）による地震挙動の変化を適切に評価するため
- 本ガイドラインの作成に当たり実施した工学的基盤面上の表層地盤内にある池状コンクリート構造物の検証解析及び事例解析において、構造物独立モデルは地盤－構造物連成系モデルの解析結果と整合せず、基礎杭を中心に危険側の評価を招く場合もあることを確認したため

また、表 3. 8 に示すように地盤－構造物連成系モデルの地盤モデルの非線形特性には、液状化に伴い上昇する過剰間隙水圧による有効応力の変化を表現できない全応力モデルと、それらの変化を考慮できる有効応力モデルの適用が可能になる（図 3. 12 参照）。

なお、一般に、全ての地盤モデルについて全応力モデルを適用する動的解析を全応力解析、地盤モデルの一部（又は全てに）有効応力モデルを適用する解析を有効応力解析という。

当局では、地盤－構造物連成系モデルに用いる地盤モデルには、液状化の可能性のない地盤中にある施設の場合には全応力モデルを適用し、液状化の可能性のある地盤中にあり液状化後の構造部の挙動（加速度応答、構造物全体の変位、構造目地の相対変位等）を詳細に評価する必要がある場合は、その影響を考慮できる有効応力モデルを適用する。適用する際の判断方法の詳細は、3. 2. 9（1）を参照すること。

3. 2. 9（1）では、地盤－構造物連成系モデルへの有効応力モデルの適用に当たり、耐震計算に用いるパラメータが非常に多く、その設定と照査においては豊富な経験と学術的な知見等を必要とする部分もあることなどを踏まえ、液状化によって施設機能に支障が生じると推測される場合に有効応力モデルを適用することとしている。すなわち、例えば事前に実施する一次元地盤モデルの地震応答解析により、液状化による地盤沈下量が 2, 3cm 以内のオーダーであり、施設性能に影響がないと考えられる場合などにおいては、全応力モデルを適用してもよいこととしている。

しかし、地震時における実際の地盤では、次に示すように過剰間隙水圧の変化が生じており、厳密には液状化の発生有無に関係なく、水圧変化を考慮できる有効応力モデルを適用する方が精度が良いことから、理論的には全応力モデルの適用は、あくまでも過剰間隙水圧の変化の影響を無視してよい場合に限られる。そのため、液状化の有無に関係なく、過剰間隙水圧の変化の影響で地盤材料の剛性や強度が変化する軟弱な地盤の変位等を詳しく評価する場合は、有効応力モデルとするのがよいことに留意する。池状コンクリート構造物の動的解析における有効応力モデルの適用による効果は以下のようなものがあげられる。

- ①液状化の発生の有無を評価するだけでなく、液状化に伴う構造物や基礎の変位などによる施設の運用面への影響を評価できる。
- ②液状化の影響による構造物や基礎の変位が許容範囲内であることが確認できれば、液状化の発生を許容した合理的な耐震設計が可能になる場合がある。

③液状化の影響により、地表付近での地震動の増幅が抑えられる場合がある。なお、地震動の増幅が抑えられるかどうかは、事前に有効応力モデルを用いた一次元地盤モデルによる地震応答解析を行い、池状コンクリート構造物に与える影響を確認し判断すればよい。

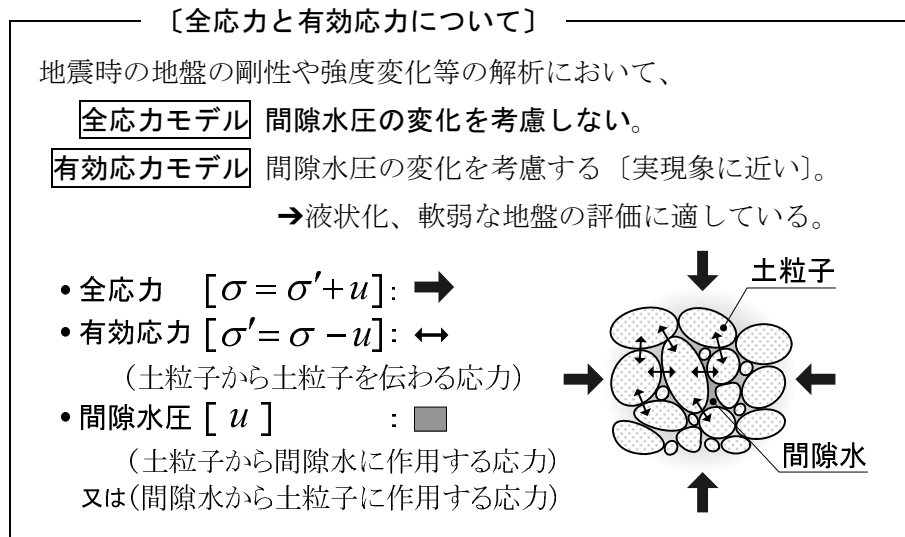


図 3. 1 2 全応力と有効応力について

(2) 解析モデルの次元に関する選定

池状コンクリート構造物は、その構造特性から 3 次元モデルを適用するのが有効である。ただし、動的解析の適用に当たり、地盤－構造物連成系モデルの適用や地盤と構造の非線形性を考慮する場合及び有効応力の変化を適切に考慮する場合は、3 次元モデルを対象とした解析コードが限定され、その解析結果の妥当性が十分に確認できないなど、現状では実務上適用が困難と考える。

当局では、2 次元モデルにより 3 次元モデルと等価なモデルを表現するための方法やその留意点が指針に記載されていることも踏まえ、池状コンクリート構造物の動的解析においては 2 次元モデルを適用する。

(3) 計算法に関する選定

動的な応答値を求める計算法（動的解析の手法）には、時刻歴応答解析法とスペクトル法がある。この中で時刻歴応答解析法には直接積分法、周波数応答解析法、モード解析法がある。

当局の池状コンクリート構造物への動的解析の適用に当たっては、レベル 2 地震動に対して要求性能(復旧性)を照査するために非線形応答を求める必要があること、また、時刻歴に蓄積する変位を評価することを目的とすることから、時刻歴応答解析のうち直接積分法の適用を標準とする。

3. 2. 6 地盤応答の分析（地盤の動的解析）

（１）分析の目的と概要

当局では、池状コンクリート構造物の動的解析を実施するに当たり、最適な地盤－構造物連成系２次元モデルを構築することを目的として、地盤のみを対象とした地震時応答の分析を行う。

地盤応答の分析を行うに当たっては、次に示す事項などを目的として１次元の自然地盤モデルの地震応答解析〔地震動の増幅計算〕を行うものとする。

【地盤応答の分析における主な目的】

- 池状コンクリート構造物周辺の自然地盤における地震応答の把握と池状コンクリート構造物への影響を推測する。
- 設定する地盤モデルの適用により目的とする応答値が得られるか確認する。
- 設定する地盤モデルによる解析が適切に実行（終了）できるか、工学的に説明できない不自然な現象が生じてないか確認する。
- 地盤のモデル化の妥当性（地層分割、要素分割、動的変形特性、非線形特性等）を確認する。
- 土質試験結果が不足するなどの理由により、複数の地盤モデル（案）がある場合などにおいて、安全側となる地盤モデルを確認する。
- 要素シミュレーション（解析に用いる複数のパラメータを試行錯誤しながら変更し、対象地盤の土質試験結果を再現するパラメータを求めるための解析）などにより設定した地盤モデルの適用パラメータが、例えば土質試験結果をうまく再現できているかを確認する。

なお、対象の池状コンクリート構造物が工学的基盤面上にあり、解析モデルを構造物独立モデルとする場合は、ここでの地盤の分析は実施しない。

（２）１次元地盤の地震応答解析〔地震動の増幅計算〕について

１次元地盤の地震応答解析は、図 3. 13 に示すような構造物を含まない１次元の自然地盤モデルを対象として地震応答解析〔地震動の増幅計算〕を行うことにより工学的基盤面上にある表層地盤での応答値を求めるものである。この解析を行うことで、構造物と地盤との動的相互作用は考慮できないものの、設計地震動に対する構造物周辺にある表層地盤での加速度の変化や地盤の任意深さでの変位・せん断応力などを推測でき、地震時の地盤応答が池状コンクリート構造物に与える影響を推測することができる。

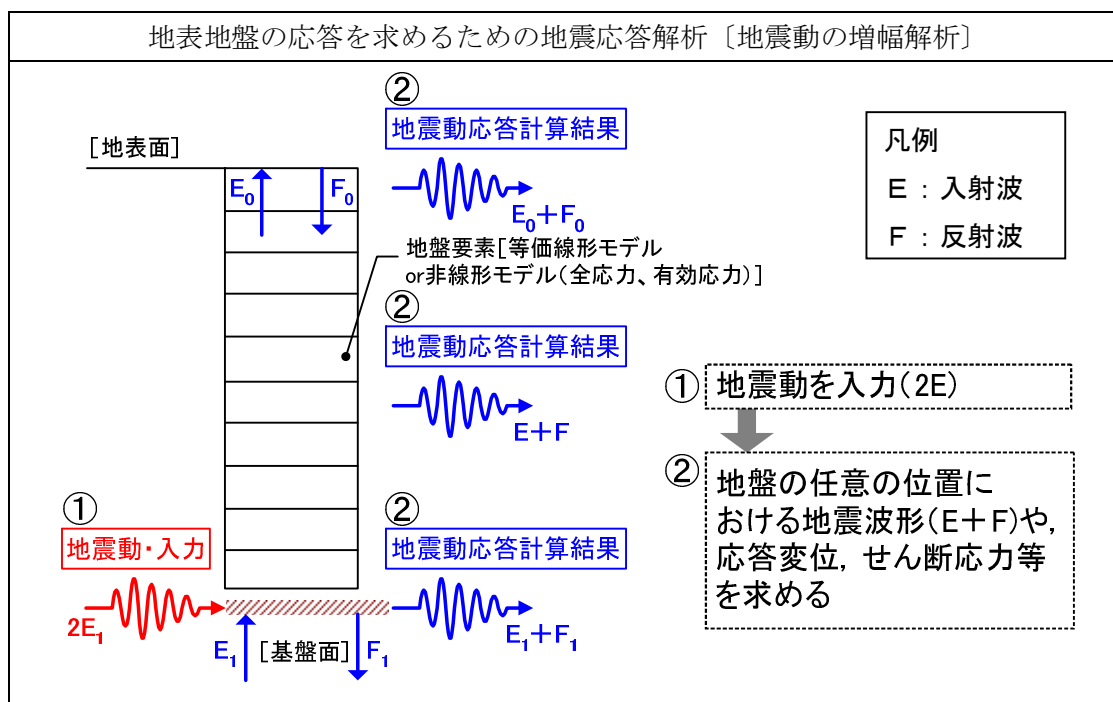


図 3. 1 3 1次元地盤応答解析〔地震動の増幅計算〕のイメージ

(3) 分析方法の標準

ア 分析に用いる地盤モデル、地震動

当局での地盤応答の分析は、対象とする池状コンクリート構造物の耐震性能の評価に用いる地盤モデルのパラメータの設定や妥当性を確認するために行うものであるから、池状コンクリート構造物の動的解析に用いる地盤モデルを対象とする（3. 2. 7参照）。ただし、池状コンクリート構造物の動的解析に用いる2次元モデルにおいて、図 3. 1 4に示すように構造物の周囲における地盤や地形条件が異なる場合は、それぞれの地盤モデルの妥当性を確認するため、また、その違いによる地震応答や不等沈下などの影響を評価するために、これら複数の1次元地盤モデルを対象に地盤応答の分析を行う。

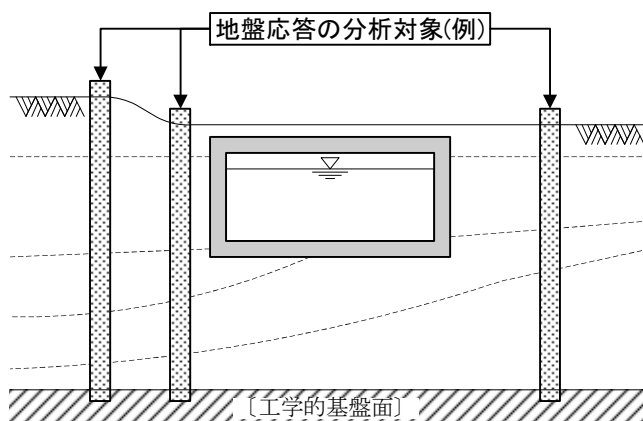


図 3. 1 4 地盤応答の分析対象とする地盤モデルの例

イ 分析方法

当局では、地盤の分析に当たり、1次元地盤の地震応答解析結果から図3.15に示すように、表層地盤での各種応答値（加速度、応答水平変位、残留水平変位、せん断応力、ひずみ、せん断波速度及び有効応力解析の場合は過剰間隙水圧比）に関する最大値の深度分布と、地表面や注目地盤深度部での各種応答値の時刻歴波形や応力－ひずみ関係について出力する。

そして、3.2.6（1）に示した事項などの確認を行う。

また、次に実施する2次元地盤－構造物連成系モデルによる動的解析では、側方境界付近における地盤モデルの地震応答は構造物の挙動の影響が及ばない自然地盤の応答を示すことが求められるため、その検証を行うことなどを目的として、1次元地盤の地震応答解析結果を用いる。

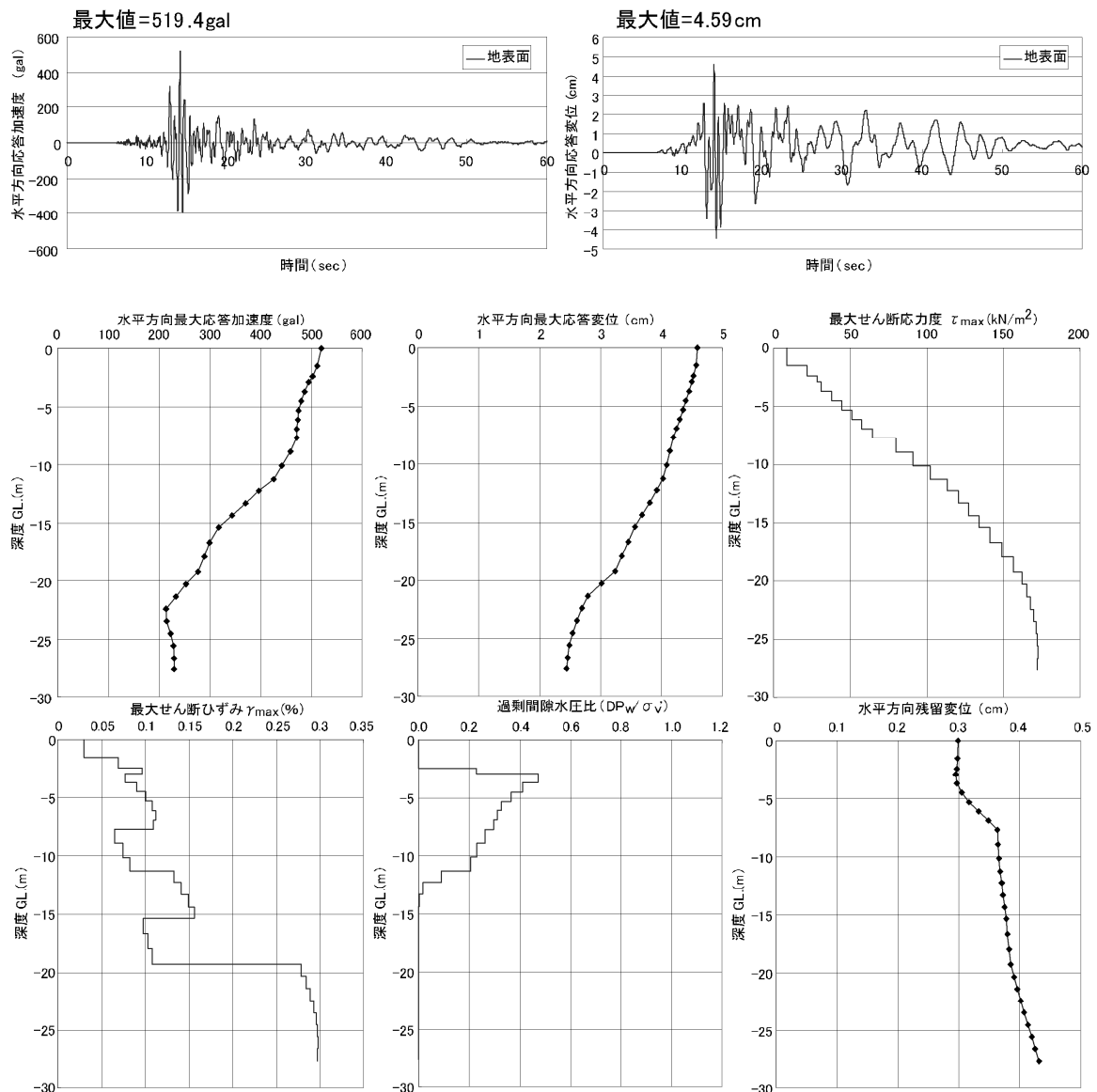


図3.15 1次元地盤の地震応答解析結果〔地震動の増幅計算〕(例)

3. 2. 7 解析モデルの構築

(1) 概要

当局の池状コンクリート構造物の動的解析に適用する解析モデルの構築事例について、地盤－構造物連成系モデルの場合の概要を図3. 16、図3. 17に、構造物独立モデルの場合の概要を図3. 18に示す。

図3. 16、図3. 17及び図3. 18に示すように、池状コンクリート構造物の動的解析においては、地震時の構造物や地盤の挙動特性等を十分に踏まえ、次に示す対象項目について検討を行い、各対象施設に応じた最適なモデルを構築することが重要である。

【解析モデルの構築における主な重要事項】

- 入力地震動の設定
- 地盤のモデル化
- 構造物のモデル化
- 地盤と構造物の接触面のモデル化
- 池内水のモデル化
- 境界条件の設定
- 減衰条件の設定
- 排水条件の設定
- その他詳細なモデル化

本ガイドラインでは、これらの各項目について一般的な手法の概要を説明した上で、当局における標準を示すものとする。

地盤-構造物連成系モデルの場合

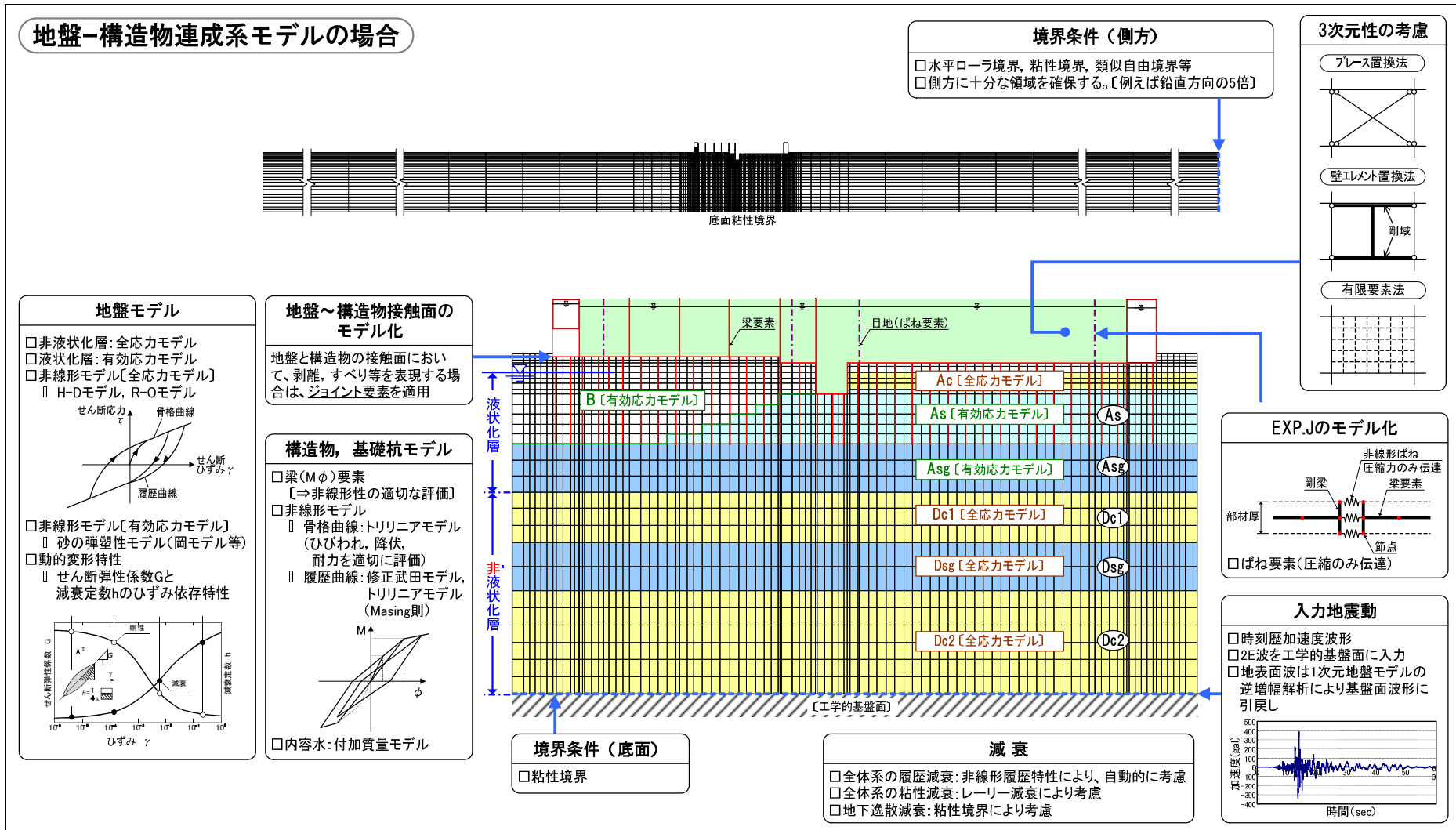


図 3. 1 6 解析モデルの構築事例（地盤-構造物連成系モデルの場合）

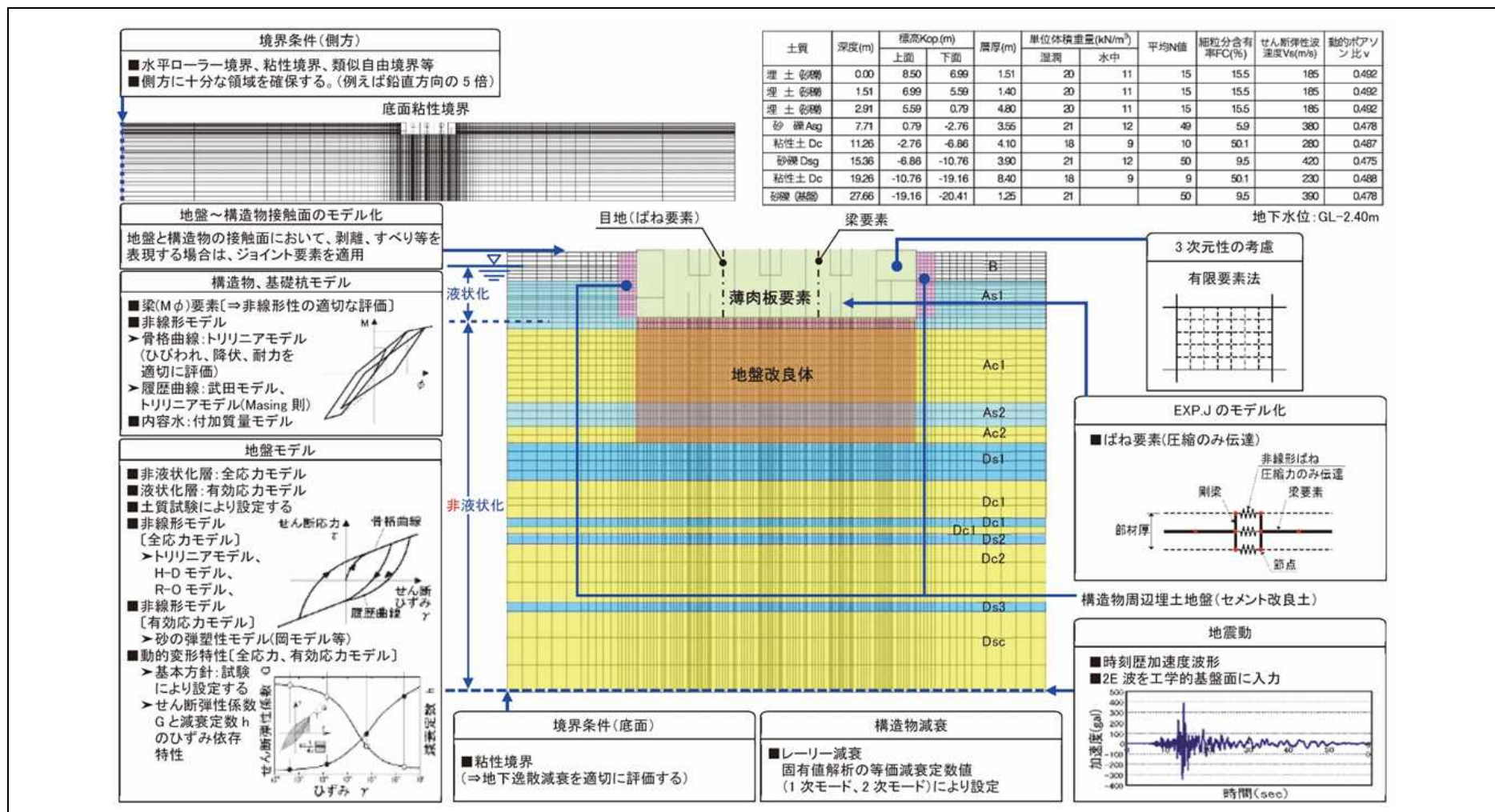


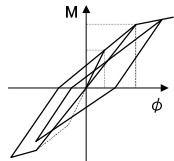
図3. 17 解析モデルの構築事例(地盤-構造連成系モデルの場合)

出典: 指針・設計事例集 p.3)-54 (日本水道協会、2022 年)

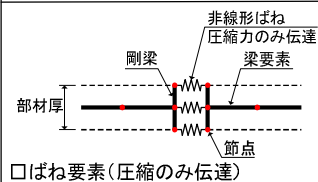
構造物独立モデルの場合〔工学的基盤面上施設〕

構造物，基礎杭モデル

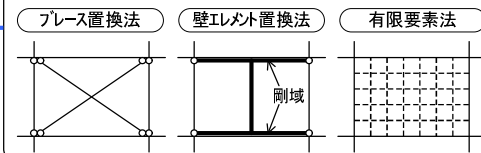
- ☐ 梁 ($M\phi$) 要素〔⇒非線形性の適切な評価〕
- ☐ 非線形モデル
 - ▮ 骨格曲線：トリニアモデル
(ひびわれ，降伏，耐力を適切に評価)
 - ▮ 履歴曲線：武田モデル，
トリニアモデル (Masing則)
- ☐ 内容水：付加質量モデル



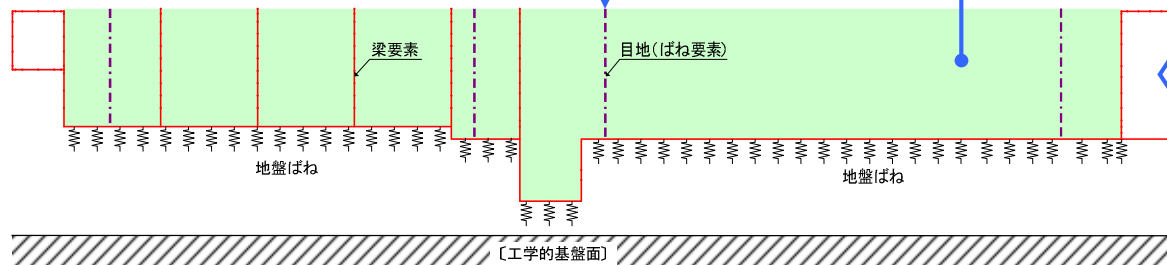
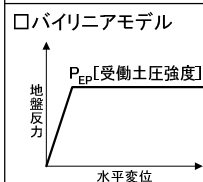
EXP.Jのモデル化



3次元性の考慮

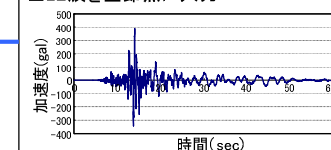


地盤ばね



入力地震動

- ☐ 時刻歴加速度波形
- ☐ 2E波を全節点に入力



減衰

- ☐ 全体系の履歴減衰：非線形履歴特性により、自動的に考慮
- ☐ 全体系の粘性減衰：レーリー減衰により考慮
- ☐ 地下逸散減衰：粘性境界 (ダッシュポット γ^D) により考慮

図 3. 1 8 解析モデルの構築事例 (構造物独立モデルの場合 (工学的基盤面上施設))

(2) 入力地震動の設定

ア 地震動の種類

池状コンクリート構造物の動的解析で扱う設計地震動及び入力地震動を次の(ア)及び(イ)のとおり定義する。

池状コンクリート構造物の動的解析を行う際には、事前の検討で設定した設計地震動から解析モデルに直接入力することができる入力地震動を設定する必要がある。

なお、入力地震動には、時刻歴加速度波形を用いる。

(ア) 設計地震動

本ガイドラインでは、2. 4. 4において設定され、池状コンクリート構造物の耐震計算において解析モデルを構築する前に設定される地震動である。池状コンクリート構造物の耐震計算に適用する各解析モデル及び解析コードとの整合は考慮されていない地震動波形である。

(イ) 入力地震動

池状コンクリート構造物の各解析モデル及び解析コードと整合し、モデルに直接入力することができる地震動（時刻歴加速度波形）であり、設計地震動を必要に応じて変換することで設定する。例えば、設計地震動が工学的基盤面波形 E+F 波の場合、解析モデルに応じて 2E 波などに変換を行い、入力地震動を設定する。

イ 地震動の入力方法

池状コンクリート構造物の動的解析において、図3. 19に示すような1次元地盤 FEM モデルや2次元地盤－構造物連成系モデルでは、工学的基盤面から上方を解析の対象とし、入力地震動は工学的基盤面に与える。

なお、構造物独立モデルとする場合は、地表面での時刻歴加速度波形を各構造要素及び節点に与える。

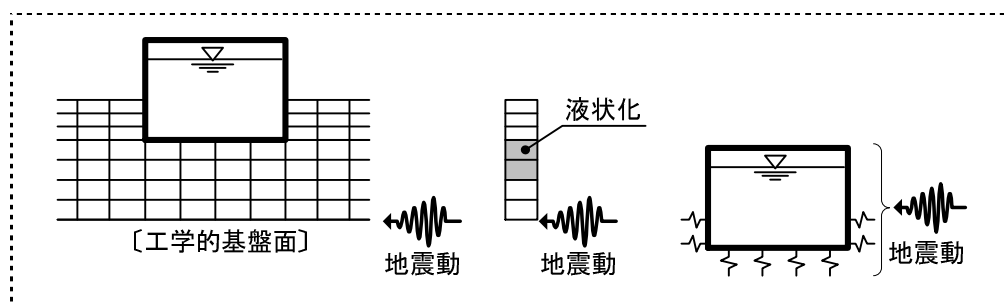


図3. 19 地震動の入力方法

ここで、地盤内で観測される地震動は、図3. 19に示すように、入射波 (E)、反射波 (F) の総和 (E+F) で示される。しかし、池状コンクリート構造物の動的解析において工学的基盤面に入力する地震動は、図3. 20に示す基盤の露頭部分のように表層地盤の影響を受けていない（反射波を含まない）状態の地震動を用いるため、2E 波を用いる。

【入射波 (E)・反射波 (F) について】

地震波は震源から伝播してくる入射波 (E) と表層地盤からの反射波 (F) の和として与えられる。

基盤の露頭部分では、表層地盤からの反射波は存在せず、反射波 (F) は入射波 (E) と同一となり、地震波は $2E$ として与えられる。

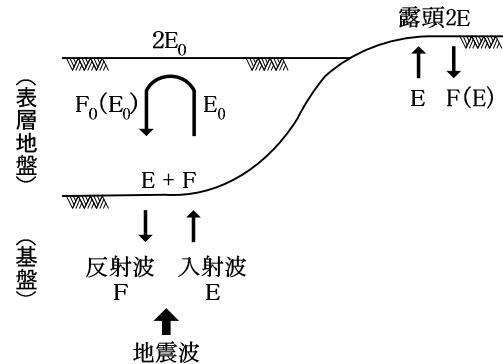


図 3. 20 入射波 (E)・反射波 (F) について

出典：土木構造物の耐震設計入門 p.35 (土木学会、2002 年)

また、構造物独立モデルを適用する場合においても、当局では、構造物が工学的基盤面に位置する場合に構造物独立モデルを適用できることとしているため、地盤を介さず構造物などに直接与える入力地震動については $2E$ 波とする。

このように、当局での池状コンクリート構造物の動的解析に用いる入力地震動は、 $2E$ 波である。これに対して、設計地震動として与えられる地震動が観測記録（例えば、レベル 2 地震動の方法 3 など）である場合、観測点が地表部又は地中部のいずれであっても、その波形は、表層地盤の影響を受けた $E+F$ 波である（観測点の工学基盤面が露頭している場合においては、その観測記録は $2E$ 波として扱うことができる。）。

したがって、設計地震動が $E+F$ 波の場合は、 $2E$ 波への変換を行い動的解析に用いる入力地震動を設定する必要がある。このような地震動の変換を行うに当たっては、地震動の引き戻し解析〔逆増幅計算〕を実施する。

ウ 引き戻し解析〔逆増幅計算〕

地震動の引き戻しには、図 3. 21 に示すような引き戻し解析〔逆増幅計算〕を実施する。ここでは、表層で得られた観測記録 $E+F$ をその地点の 1 次元の表層地盤モデルに入力して、工学的基盤面における入射波 E を計算する。そして、この結果を 2 倍 ($2E$) として用いる。

地震動の引き戻し解析〔逆増幅計算〕は、図 3. 13 に示す 1 次元地盤の地震応答解析〔地震動の増幅計算〕と同様に地盤の動的解析を行うものであり、解析条件として入力する地震動や解析によって求める地震動の位置（工学的基盤面又は地表面）及び種類 ($2E$ 波又は $E+F$ 波) が異なるものである。

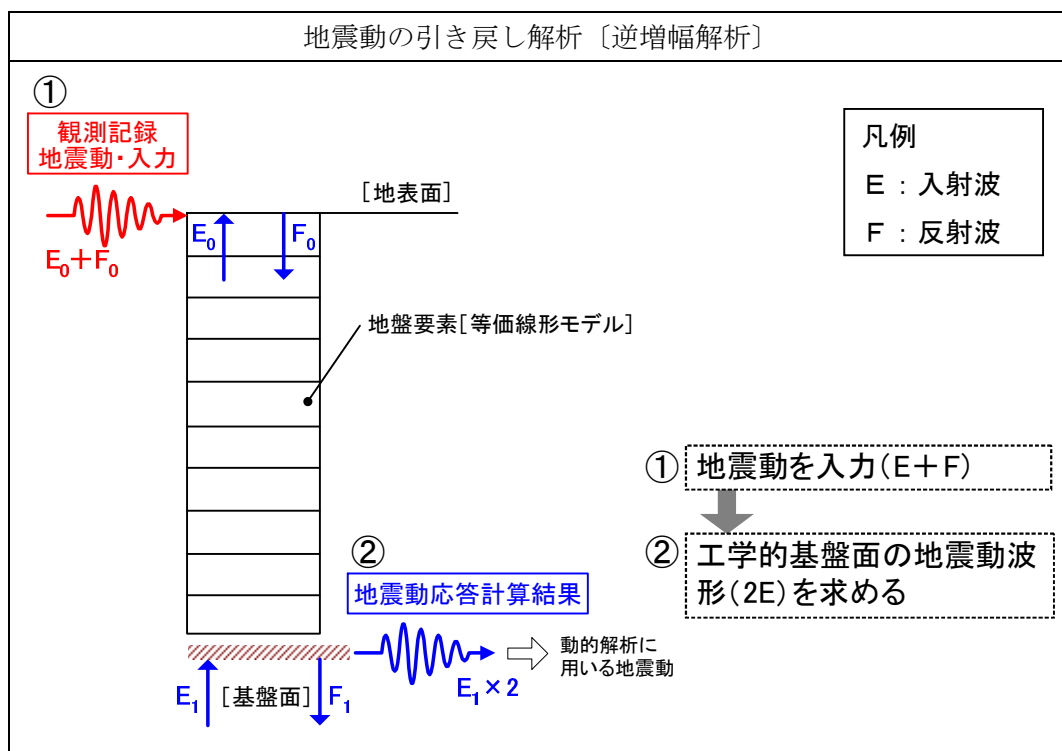


図 3. 2 1 地震動の引き戻し解析〔逆増幅計算〕のイメージ

地震動の引き戻し解析〔逆増幅計算〕は、1次元地盤モデルを対象として、等価線形モデルの適用により行うことを基本とする。等価線形モデルを使用する等価線形解析は、周波数領域（横軸を周波数として地盤の地震時応答の変化を観察・表現する領域であり、現実には体験できない。これに対して時間領域は、横軸を時間として地震時応答の変化を観察・表現する領域であり、現実には体験できる。）での解析であるため、逆解析に対応できる。ただし、等価線形モデルを用いた解析は、特に柔らかい地盤における加速度応答への影響などが大きい場合（一般にひずみが1%程度を超える場合）には、正確な解が得られない場合があることに留意する必要がある。

このことを踏まえ、地震動の引き戻し解析については、その再現精度確保のための研究が行われており、その成果を活かした解析コードが開発されている。そのため、対象とする地震動や地盤の特性に応じて、適切な解析コード及び解析条件を適用するとよい。

一般に等価線形解析に用いられる解析コード（解析プログラム）SHAKEにおいては、解析条件の α （＝最大ひずみ／有効ひずみ。一般には0.65とする。）の調整や、任意の周期成分を調整する方法なども提案されている。

また、同様の目的において周波数依存性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析コードとして、FDELやDYNEQ等がある。

さらに、精度確保を目的として、地表面だけでなく、地中部の地震動観測記録がある場合は、地中部の観測記録と引き戻し解析による同位置での地震動応答を比較するなどの比較検証を行い、再現性の精度を確認するのがよい。

(3) 地盤のモデル化

地盤－構造物連成系モデルを適用する場合の地盤のモデル化では、地盤の各要素に対して、非線形モデルの選択、動的変形特性の設定及び非線形履歴モデルの選定を適切に行うことが重要である。

また、構造物独立モデルを適用する場合の地盤のモデル化では、地盤ばねのモデル化が重要である。

ア 非線形モデルの選択

非線形な地盤材料の応力－ひずみ関係のモデル化（数式化）方法と、その選択に当たっての当局の標準を表3.9に示す。表3.9に示すように、非線形性の扱いは、非線形法と等価線形法とに大別される。

非線形法は、地震の継続時間における地盤の非線形な材料特性の変化を逐一計算する方法である。一方、等価線形法は、比較的簡便な地震応答解析により非線形法と近似な最大応答値を得ることを目的として、地盤の非線形性を等価な線形の関係に置き換え、動的解析の間材料特性を変化させず一定の材料特性（せん断弾性G、減衰h、ひずみ γ は最大応答時の解1個、応力－ひずみ関係が任意の剛性及び減衰に応じて線形の関係）を用いる方法である。

また、非線形法は、有効応力の考慮の違いにより、有効応力モデルと全応力モデルとに大別されるが、等価線形法は、全応力モデルのみである。

非線形法を適用した場合、次に動的変形特性と非線形履歴モデルの設定が必要になる。等価線形法を適用した場合は、次に動的変形特性の設定が必要になる。

表3.9 地盤の非線形モデルの種類と当局の適用用途標準

非線形性の扱い	モデル化の種類	材料特性	設定条件	当局の適用用途標準	
非線形法	有効応力モデル	有効応力の変化に応じて逐次変化	動的変形特性	池状コンクリート構造物の動的解析	液状化を考慮する場合
			非線形履歴モデル	地盤応答の分析	液状化を考慮しない場合
等価線形法	全応力モデル	有効応力の変化が及ばない	動的変形特性	地盤応答の分析 [ただし、地盤の最大応答ひずみが1%程度を上回らない場合] 地震動の引戻し解析	

当局の池状コンクリート構造物の動的解析と地盤応答の分析においては、表3.9に示すように非線形性を詳しく評価することを目的に非線形法を適用することを基本とする。等価線形法は、3.2.7(2)に示すように入力地震動を設定する際の地震動の引戻し解析において適用する。ただし、地盤応答の分析において、地盤の最大応答ひずみが1%程度を上回らないことが確認できる場合には、等価線形法を適用してもよいものとする。

また、当局では、非線形法において、液状化地盤のように有効応力の変化を考慮する必要がある地盤については有効応力モデルを適用し、その必要がない場合は全応力モデルを適用する。

なお、これらのモデル化の選択においては、モデル化の方法（等価線形モデル、全応力非線形モデル又は有効応力モデル）ごとに設定すべきパラメータは異なり、それに応じて必要な試験を行わなければならないこと、解析コードが限定されることなどに注意が必要である。

イ 地盤の動的変形特性の設定

一般に地盤の動的変形特性（せん断弾性係数 G 、減衰定数 h のひずみ依存性）は、図 3.

2 2 に示すように $G/G_0-\gamma$ 、 $h-\gamma$ 関係として整理される。

これら地盤の動的変形特性は、要素シミュレーションなどで対象土の試験結果や土木研究所の試験結果へのフィッティングすることにより設定できるが、当局では、特に柔らかい沖積地盤を中心に原則として対象土の試験結果を用いることとする。

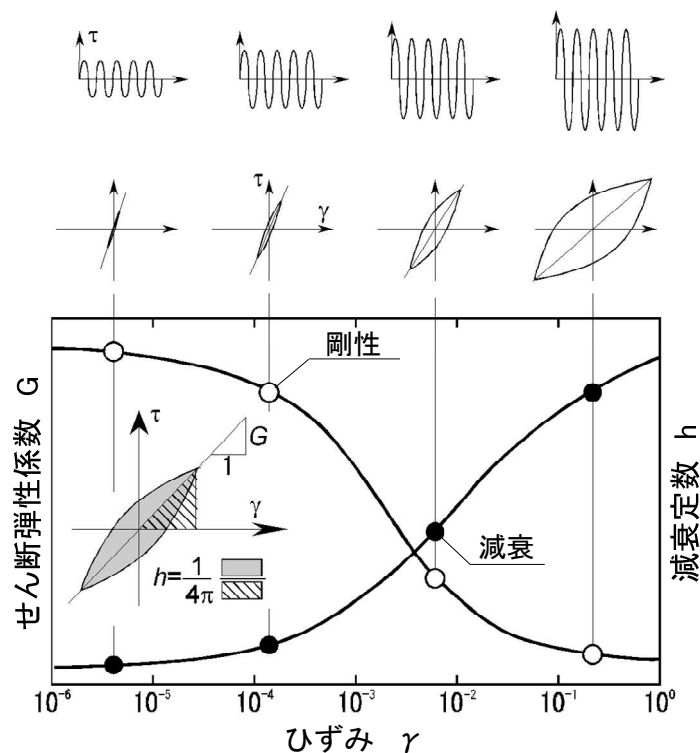


図 3. 2 2 動的変形特性の概念図

出典：地盤の地震応答解析 p.61（鹿島出版会、2010 年）

ウ 非線形履歴モデルの設定

非線形履歴モデルは、非線形法により時刻領域での動的解析を行う場合において、ランダムな地震による繰り返し応力の時間履歴に対して、ランダムなひずみの時間履歴を与える応力—ひずみ関係を設定するものである。そのため、周波数領域での解析である等価線形法ではこのモデル化は必要としない。

(ア) 全応力モデルの非線形履歴モデル（構成側）

全応力モデルの地盤モデルの非線形履歴モデルは、図 3. 2 3 に示す骨格曲線及び履歴曲線から構成される。

当局では、土の非線形（応力－ひずみ関係）履歴特性を表すモデルとして、Ramberg-Osgood モデル（R-O モデル）及び Hardin-Drnevich モデル（H-D モデル）の 2 手法並びにこれらの手法の改良モデルの適用を標準とするが、非線形応答をできるだけ精度良く再現するには、R-O モデルや H-D モデルを改良した修正 GHE モデルなどの適用が望ましい。

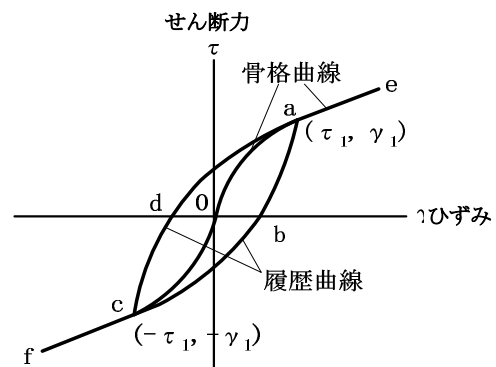


図 3. 2 3 非線形履歴特性の概念図

出典：土木構造物の耐震設計入門 p.43

（土木学会、2002 年）

(イ) 有効応力モデルの非線形履歴モデル（構成側）等

有効応力モデルの非線形履歴モデルは、有効応力の変化に応じて応力－ひずみ関係が変化することを表現する。

当局では、有効応力の変化を考慮した土の非線形（応力－ひずみ関係）履歴特性を表すモデルとして砂の弾塑性モデル（岡モデル等）を適用する。

なお、有効応力モデルについては、この応力－ひずみ関係のモデルだけでなく、透水モデルや間隙水圧モデルが組み合わされて解析が行われる。

Hardin-Drnevich モデル（H-D モデル）

せん断応力とせん断歪みの関係を双曲線関数で表したものである。逐次非線形解析法に適用する場合は、Masing 則により履歴ループを設定した履歴型 Hardin-Drnevich モデルを用いる。このモデルは、パラメータの設定が一般に内部摩擦角のみとできるため、R-O モデルに比べて容易である。

このモデルを改良した減衰特性の再現精度を高くできるモデルとして修正 GHE モデル等がある。

Ramberg-Osgood モデル（R-O モデル）

せん断応力とせん断ひずみの関係を指数関数で表したものである。このモデルは、レベル 2 地震動のような強大な地震力に対しても、地盤の非線形応答を比較的良好に再現できることが実験やシミュレーションによって確かめられており、地盤の非線形解析では原則としてこのモデルを用いることが多い。ただし、H-D モデルに比べ、動的変形特性に関するパラメータが一義的には定まらないため、土質試験結果とのパラメータフィッティングを伴うなどの試行錯誤が必要となり、パラメータの設定が複雑である。

砂の弾塑性モデル（岡モデル等）

このモデルでは、繰返しせん断応力が加わっている間の間隙水圧の変化から有効応力の変化として応力－ひずみ関係を考慮して計算する。実務においては、約 1/100～1/1000 秒毎に、

せん断応力 τ の計算

→間隙水圧モデルによる間隙水圧発生量 Δu の計算

→間隙水圧消散の計算

→有効応力 σ' の変化を考慮した応力－ひずみ関係の再設定（ G 、 γ 、 h ）

→せん断応力 τ の計算

を、透水モデルや間隙水圧モデルが組み合わされて繰り返して行う。

エ 構造物周辺ばねのモデル化

構造物独立モデルにおいては、構造物を支持する周辺地盤を非線形のばねによってモデル化する。一般に、設定するばねは、鉛直ばね、水平ばね及び回転ばねとする。

非線形ばねは、構造物が地盤と接している面の法線方向ばねと接線方向ばねとし、当局

では、地盤ばね係数については、図 3. 2 4 に示すような受動土圧係数を上限とするバイリニア型地盤反力度特性を有するばねを用いるものとする。

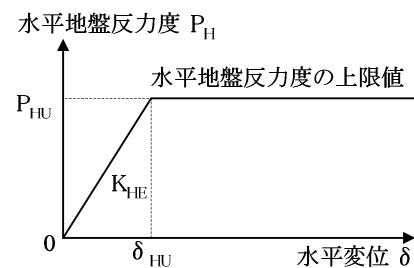


図 3. 2 4 バイリニア型地盤反力度特性

オ 留意点

当局の池状コンクリート構造物が比較的軟弱な地盤や液状化の可能性がある地盤に位置する施設もあり、特にそれらの地盤においては、ひずみ量が大きく、応答加速度、応答変位などの変化も大きくなり、地盤－構造物連成系モデルの動的解析の結果を左右する。

そこで、地盤のモデル化に当たっては、現地採取土による土質試験を実施することを基本とする。

また、当局の動的解析の対象とする池状コンクリート構造物は、平面規模が大きく地層構成が水平成層であっても、特に盛土地盤層については不均一性が大きい場合があるので、構造物の不等沈下量の照査が重要な場合などは、そのような不均一な地盤条件を詳細に調査し、モデル化する必要がある。

なお、地盤のモデル化の妥当性確認は、3. 2. 6 に示した 1 次元地盤モデルの地震応答解析を行い、地層分割、要素分割、動的変形特性、非線形特性などを対象に行うものとする。

要

（４）構造物のモデル化

構造物のモデル化では、構造部材の各要素に対して、非線形履歴モデルの選定及び履歴モデル設定のための鉄筋コンクリート材料の応力－ひずみ関係の設定を適切に行うことが重要である。

ア 構造物の非線形履歴モデルの選定

当局での池状コンクリート構造物の動的解析においては、コンクリートのひび割れ、鉄筋の降伏、部材の破壊を適切に評価することを目的として、構造部材に発生するモーメント（ M ）と曲率（ Φ ）の関係を Tri-linear（トリリニア）モデル、Degrading Tri-linear モデル（修正武田モデル）等のトリリニアな関係として表現できるモデルを適用する。

これらの概要を次に示す。

（ア）Tri-linear（トリリニア）モデル

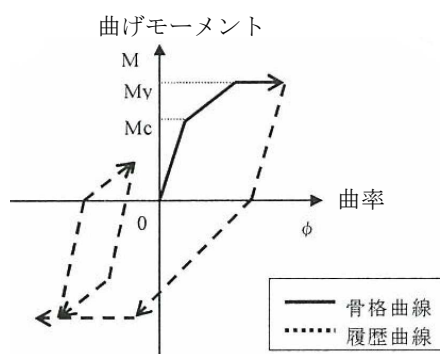


図 3.25 Tri-linear モデル

（イ）Degrading Tri-linear モデル（修正武田モデル）

鉄筋コンクリート部材の曲げ変形に適用する場合が多く、実験に基づいて提案されている。除荷時の剛性低下現象を精度良く表現できるといわれている。

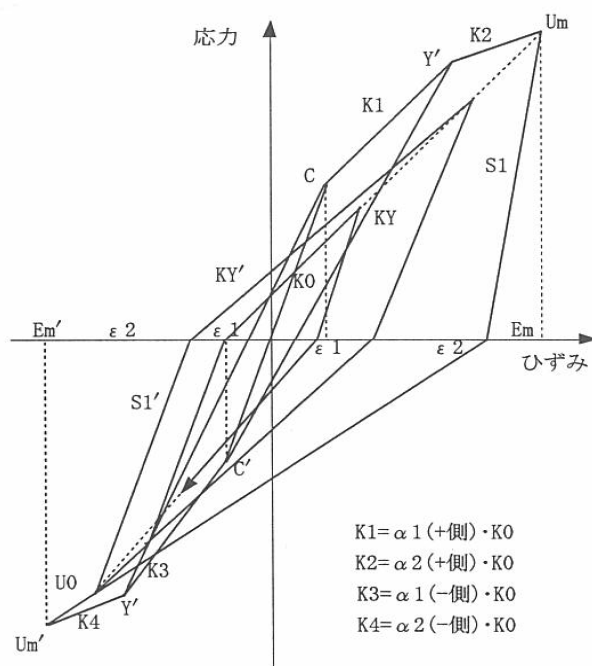


図 3.26 Degrading Tri-linear モデル(修正武田モデル)

出典：TDAPⅢバッチ版使用手引書（アーク情報システム、2013 年）

イ 応力-ひずみ関係の設定

構造物の非線形履歴モデルの骨格曲線の設定に当たっては、 M_u （破壊モーメント）、 M_y （降伏モーメント）及び M_c （ひび割れモーメント）を設定する必要があり、その際に用いる鉄筋コンクリート部材の応力-ひずみ関係については、次に掲げる各項目を標準とする。

（ア）コンクリートの応力-ひずみ曲線

当局では、コンクリート標準示方書に基づき、曲げモーメント及び曲げモーメントと軸方向力を受ける部材の断面破壊の終局限界状態に対する検討においては、一般に図 3. 2 7 に示すモデル化された応力-ひずみ曲線を用いる。ただし、既設構造物でコンクリートの劣化が著しく非線形特性が特異的な場合や帯鉄筋などの拘束効果が大きい部材については、実験値に基づいた応力-ひずみ関係を用いてもよい。

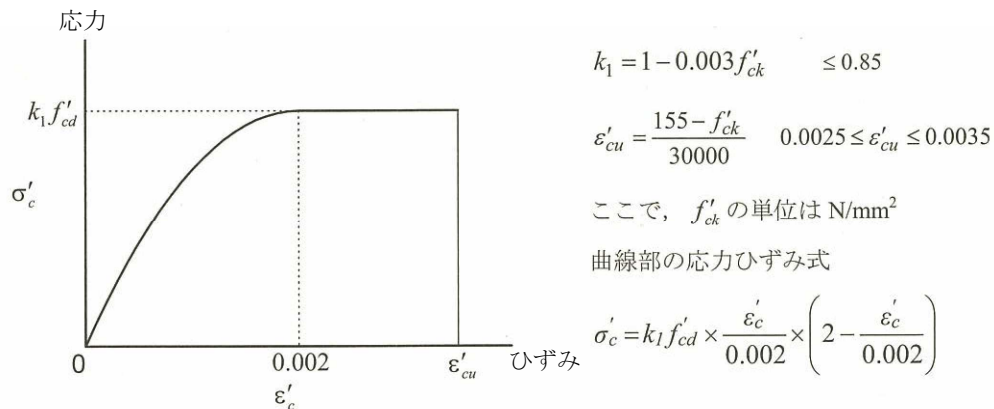


図 3. 2 7 コンクリートのモデル化された応力-ひずみ曲線

出典：コンクリート標準示方書設計編 p.191（土木学会、2022 年）

（イ）鋼材の応力-ひずみ曲線

当局では、コンクリート標準示方書に基づき図 3. 2 8 に示す応力-ひずみ曲線を、構造部材断面の応力度、耐力などの検討に用いる。ただし、既設構造物で鉄筋の劣化が著しく非線形特性が特異的な場合や特殊な材料などについては、実験値に基づいた応力-ひずみ関係を用いてもよい。

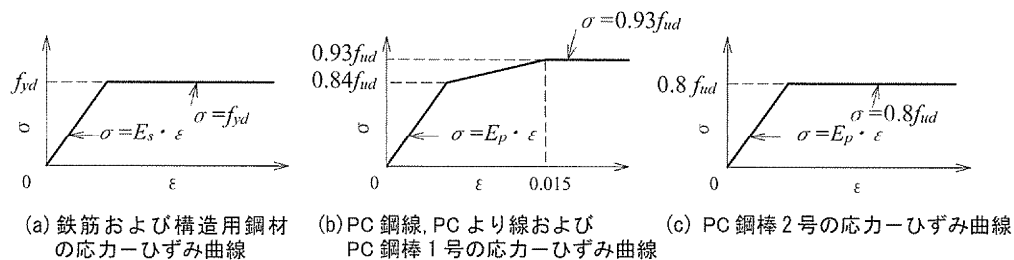


図 3. 2 8 鋼材のモデル化された応力-ひずみ曲線

出典：コンクリート標準示方書設計編 p.192（土木学会、2022 年）

(5) 接触面のモデル化

ア 地盤と構造物の接触面のモデル化

レベル2地震動のような強い地震動が作用した場合には、地盤と構造物の接触面において剥離・すべりなどが発生する場合がある。当局では、このような現象を考慮するために、地盤と構造物の境界にジョイント要素を設ける方法を適用できるものとする。ただし、ジョイント要素の使用により、解析上、応答加速度がその周辺で特異的に大きくなる場合があることから、使用に当たっては挙動の確認が必要である。前述のような不自然な挙動が確認される場合には、ジョイント要素は使用しないものとする。

ジョイント要素の特性は、図3.29に示すようなばね要素の特性で表現される。

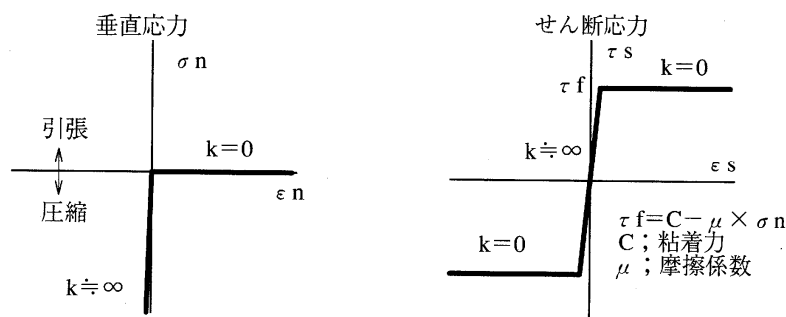


図3.29 ジョイント要素の特性

出典：土木構造物の耐震設計入門 p.173（土木学会、2002年）

イ 構造目地のモデル化

当局が動的解析を適用する池状コンクリート構造物は、構造規模が大きく構造目地が複数ある施設も見られる。

また、構造目地部は、過去の地震被害事例が多い。そのため、地震時における構造目地部の相対変位の照査や、動的な挙動による構造目地部での軸力等断面力の伝達を表現することが重要となる。

そこで、当局では、図3.30に示すように、部材軸方向の引張力と部材軸直角方向のせん断力に対しては抵抗せず、部材軸方向の圧縮力に対しては遊間を超えると圧縮力を伝達する力学モデルを適用する。

目地部の相対変位量は、動的解析により算定することを基本とするが、変位量が数十mmと比較的小さいと予想される場合は、静的解析などで構造物や地盤などの変位量を個別に計算した集計値により算定してもよい。実際の池状コンクリート構造物の被害事例では、目地部の相対変位量が多い場合、目地部のコンクリート接触面において顕著な損傷による漏水被害が確認されていることなどから、相対変位量が多い場合は、目地部におけるコンクリート接触面端部の応力度を評価する必要がある。照査では、コンクリートの支圧応力度を照査指標とすることを基本とするが、鉛直方向の変位量が無視できない場合には必要に応じて曲げ、せん断応力度の照査も行う。

伸縮目地部に発生する鉛直方向の相対変位は、常時における圧密沈下による変位と、地震時における鉛直方向の伸縮目地部の相対変位により構成されると考えられる。

地盤の弾塑性挙動を考慮した一次元地盤モデルによる動的解析のみ行う場合は、地盤の鉛直

方向の絶対変位を伸縮目地の相対変位とみなすことになり、鉛直方向の相対変位と水平方向の相対変位を同値として扱う。

なお、液状化地盤などの場合は、地震後の過剰間隙水圧消散過程における地盤沈下量を圧密解析により求めることができる。

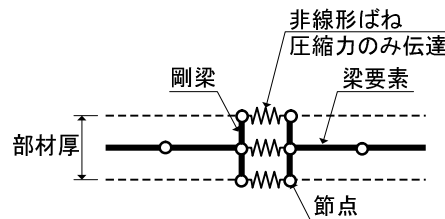


図 3.30 構造目地のモデル化

(6) 内容水のモデル化

内容水のモデル化は、静的に算定した動水圧を付加質量でモデル化する場合と流体要素でモデル化する場合とがある。流体要素のモデル化は、水と構造物との連成振動（バルジングともいう。構造物と内容水が相互に作用し合いながら振動すること。）が生じる場合に有効な手段となる。ただし、当局では、池状コンクリート構造物の対象施設の多くは矩形であり、躯体自体の剛性が大きいことから、バルジングの影響は考慮しない。

よって、内容水のモデル化は、付加質量によるものとする。

(7) 境界条件の設定

地盤—構造物連成系モデルの解析をする場合には、本来半無限的な広がりを持つ地盤を人為的に有限領域に限定することとなるため、モデル化領域の周囲（側方及び底面）に、構造物の応答の影響が及ばない地盤の半無限性や対称性を示す境界条件を設ける必要がある。

実際の地盤では、全方向に地盤震動が伝播^ばし減衰していくが、解析では境界において震動が反射して実際とは違った挙動を示す場合がある。

ア 側方境界の標準

当局では、解析モデル化領域の側方境界については、次の境界をそれぞれの特性に応じて適用することを標準とする。

(ア) 水平ローラー境界

ローラー境界は、反射波の影響があることから、着目したい応答に対して境界の影響が及ばない程度に地盤のモデルを広く取れる場合は、水平ローラー境界を適用してもよい。ただし、水平ローラー境界は鉛直方向の地盤変位を表現できないため、鉛直方向の変位の照査が重要な場合は適用しない。

(イ) 粘性境界

粘性境界は、ダンパーのモデル化により反射波の影響を低減できる。ただし、ダンパーは線形であるため、地盤の非線形性を厳密には表現できない。

(ウ) 擬似自由境界（繰り返し境界、等変位境界）

擬似自由境界は、鉛直方向の変位や非線形性を表現でき、モデル化は容易であるが、波動

境界としての精度が低いと言われている。

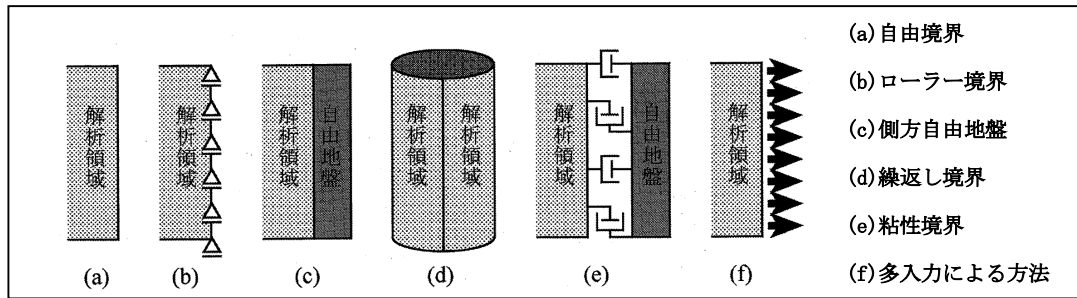


図 3.31 側方境界の種類（例）

出典：地盤の地震応答解析 p.159（鹿島出版会、2010 年）

なお、これらいずれの境界モデルを適用する場合においても課題が指摘されていることから、当局では、解析領域の片側幅を鉛直方向の 5 倍以上又は構造物幅の 10 倍以上確保するものとする。

また、実務においては、解析コードによって適用できる境界条件が限られていることに留意し、境界部での地震応答を 1 次元地盤の解析結果と比較を行うなど、精度を確保するための工夫をするのがよい。

イ 底面境界

解析領域の底面には、完全に剛な基盤面とみなす剛（固定）基盤とする方法と、基盤面から下方への波動の逸散を考慮できる粘性境界を設置する方法の 2 種類の方法がある。当局では、地震動逸散を優先し、2E 地震動波の入力を行うことも考慮して、粘性境界を用いることとする。

（8）減衰条件の設定

減衰とは、一般に地盤や構造物が繰り返し荷重を受けた時に生じる地震エネルギーの散逸現象である。減衰は、動的解析により考慮することができるが、減衰が生ずるメカニズムは複雑であるため、解析上は数種の簡易的な方法でモデル化される。

池状コンクリート構造物に影響する減衰には、構造系としての内部減衰（粘性減衰や履歴減衰）、地盤の履歴減衰、エネルギー逸散減衰等がある。構造系の内部減衰のうち履歴減衰や、地盤の履歴減衰は、それぞれの非線形履歴特性により自動的に考慮される。

よって、実務においては、構造系としての粘性減衰と地盤のエネルギー逸散減衰の設定が重要となる。

ア 構造系としての粘性減衰の設定

当局では、粘性減衰について、振動数特性に応じて質量比例と剛性比例を合わせて考慮するレーリー型の比例減衰等を用いる。

レーリー減衰（Rayleigh 減衰）とは、図 3.32 に示すように、減衰マトリックスが質量マトリックスに比例する項と剛性マトリックスに比例する項の和で表されると仮定した減衰である。

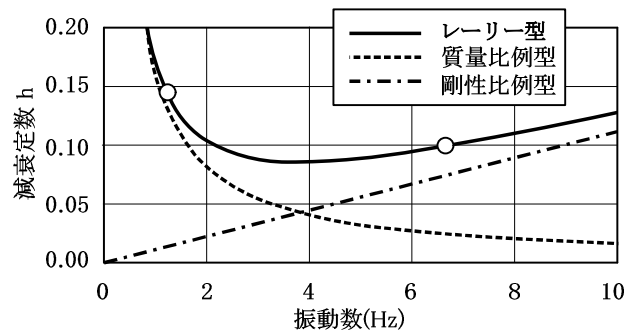


図 3.3.2 レーリー減衰の設定例

出典：土木構造物の耐震設計入門 p.145（土木学会、2002 年）

この設定において、各構造部材の減衰定数を考慮した固有値解析（対象構造物の振動特性として、構造の固有振動数と固有振動モードを求める解析。言い換えれば、この構造は、どのくらいの周波数で、どのように振動するか、を求める解析）により得られた水平振動の 1 次モードと 2 次モードの固有振動数とひずみエネルギー比例型の等価減衰定数とを用いることで、時刻歴応答解析に用いるレーリー減衰係数を算定できる。

なお、構造物の変形が非線形領域に入る場合、塑性化に伴う地震エネルギー吸収が支配的となって粘性減衰は無視できるレベルとなることから、解析上そのものの物理的意味が不明確になる。

よって、粘性減衰を設定するに当たりレーリー型の比例減衰を設定する際の固有値解析に用いる各構造物要素の減衰定数は、塑性化に伴う地震エネルギーの吸収を考慮せず、線形時の減衰定数値を使用するなどの工夫が必要である。

イ 地盤のエネルギー逸散減衰

当局では、地盤底面の逸散減衰を表すために、地盤－構造物連成系モデルを適用する場合には、地盤モデルの遠方境界として粘性境界を用いる。

構造物独立モデルを適用する場合には、構造物下面にダッシュポット（速度によって比例する粘性力によって地震エネルギーを吸収する境界条件）を用いてもよい。

（9）排水条件

有効応力モデルを適用する場合は、地下水の移動として各境界面での排水・非排水条件を適切に設定する必要がある。

当局では、有効応力モデルの適用に当たり地下水の移動を考慮するため、地盤要素（FEM）は排水条件とする。

また、過剰間隙水圧の上昇などに伴う地下水位の上昇を考慮するため、地下水位面についても排水条件とする。ただし、解析領域境界については非排水条件とする。そのため、十分な解析領域を確保する必要がある。

(10) その他詳細なモデル化の方法について

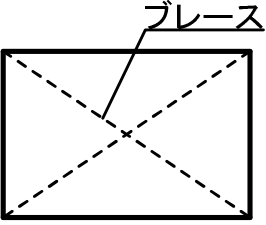
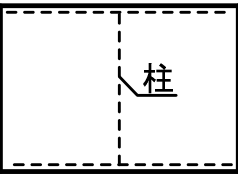
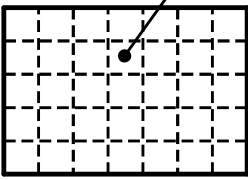
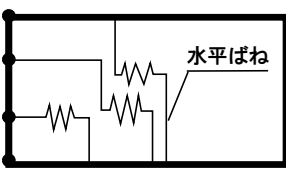
ア 2次元モデルにおける3次元性の考慮方法について

池状コンクリート構造物は、3次元的に見ると導流壁の存在等により構造全体系のせん断剛性が大きい施設が多く、耐震計算時に、その特徴の考慮の有無によって、応答値が大きく変わり、照査結果に影響が及ぶ。

3次元効果を積極的に考慮する場合は、3次元モデルを採用するのがよい。しかし、3次元効果と壁部材の非線形性を同時に考慮できる解析コードは、現時点では必ずしも標準化されていない。また、解析の実施に当たっては高度な知識が要求され、計算機負荷も大きい。このようなことから、解析モデルについては、3次元モデルと等価な応答が得られる2次元モデルを適用してよい。この方法は2次元モデルの面内方向の耐震壁や導流壁などを、板要素や等価な剛性を与えたブレース部材に置換するモデルなどが用いられる。

なお、施設の規模（容量）を踏まえて高度な解析法を適用する場合は、経済性を考慮した設計を行うことを目的としていることから、適切に3次元効果を見込むこととする。その場合、解析精度の高いFEMやばね置換により3次元効果を見込むこととする。上記の施設以外であっても、構造条件や設計条件によって、著しく不経済となる場合は、3次元効果を考慮しても良い。その場合は、表3.10に示す方法等により、3次元性を適切に考慮するものとする。

表3.10 2次元モデルにおける3次元性の考慮方法

	ブレース置換法	壁エレメント置換法	有限要素法	ばね置換法
モデル化				
特徴	壁を、せん断剛性が等価なブレースに置換し、モデル化する。 壁（ブレース）に大きな軸力が発生するような場合には、精度が悪くなる傾向にあることに留意する必要がある。 ブレースの剛性は、既往の理論式の適用が可能である。	壁を、せん断剛性と曲げ剛性が等価な柱に置換し、モデル化する。 壁が比較的大きな鉛直荷重を受ける様な場合には、精度が悪くなる傾向にあることに留意する必要がある。 柱の剛性は、既往の理論式の適用が可能である。	壁による拘束効果を、板要素(FEMモデル)の配置により考慮したモデル。 最も精度が良いと考えるが、板要素の剛性設定は3次元モデルとの変位量の比較計算等を必要とすることなどに留意する必要がある。	壁による拘束効果を、分担高さを考慮した面内方向のせん断ばね要素の配置により考慮したモデル。 比較的精度が良いと考えるが、ばね値の設定は3次元モデルとの変位量の比較計算等を必要とすることなどに留意する必要がある。

イ 構造物取り合い管路部の評価を行うためのモデル化について

過去の地震被害事例の多い構造物と管路との取り合い部の耐震性の評価には、地盤と構造物との相対変位量が大きな影響を及ぼす。そのため、地盤と構造物の接触面における剥離や滑動現象による影響を考慮する必要がある。

そこで、当局では、この評価を行う場合には、取り合い部付近における地盤と構造物の接触面には、剥離や滑動現象を考慮できるジョイント要素等を配置する。

構造物と取り合い管路との相対変位量の算定は、地盤－構造物連成系モデルを用いた動的解析により算定することを基本とするが、変位量が数十 mm と比較的小さいと想定される場合は、静的解析などで構造物や地盤などの変位量を個別に計算した集計値により算定してよい。実際の池状コンクリート構造物の被害事例では、構造物と取り合い管路との相対変位量が多い場合、構造物の管路貫通部の損傷による漏水被害が確認されていることなどから、相対変位量が多い場合は、管路貫通部における伝達力による構造物の発生応力を評価する。

鉛直方向の構造物と埋設管路との接続部に発生する相対変位は、常時における圧密沈下による変位と、地震時における鉛直方向の構造物と埋設管路との相対変位で表され则认为られる。

地盤の弾塑性挙動を考慮した一次元地盤モデルによる動的解析のみ行う場合は、地盤の鉛直方向の絶対変位を構造物と埋設管路の相対変位とみなすことになり、鉛直方向の相対変位と水平方向の相対変位を同値として扱う。

なお、液状化地盤などの場合は、地震後の過剰間隙水圧消散過程における地盤沈下量を圧密解析により求めることができる。

ウ 2次元地盤－構造物連成系モデルにおける杭のモデル化について

2次元地盤－構造物連成系モデルを用いた動的解析において、地盤の過大な変形により杭に異常な断面力が発生する場合などにおいては、地盤要素と杭要素の構成節点を分け、それらをばね要素で接合する方法などがある。また、液状化による地盤変状の評価が重要な場合や、杭損傷後の池状コンクリート構造物の変位及び構造目地部の変位の評価が重要な場合は、杭の影響を無視したモデル（構造物単独系モデル）での解析を追加実施するのがよい。

なお、杭基礎の耐震計算法は、図 3. 33 に示す耐震計算フローに示すように、上部構造物の慣性力の影響、地盤変形の影響及び液状化の影響などを適切に考慮し、設定することが特に重要である（詳細は、指針・参考資料編 p.312（参考資料 3-12 基礎の耐震計算上の留意点）参照）。

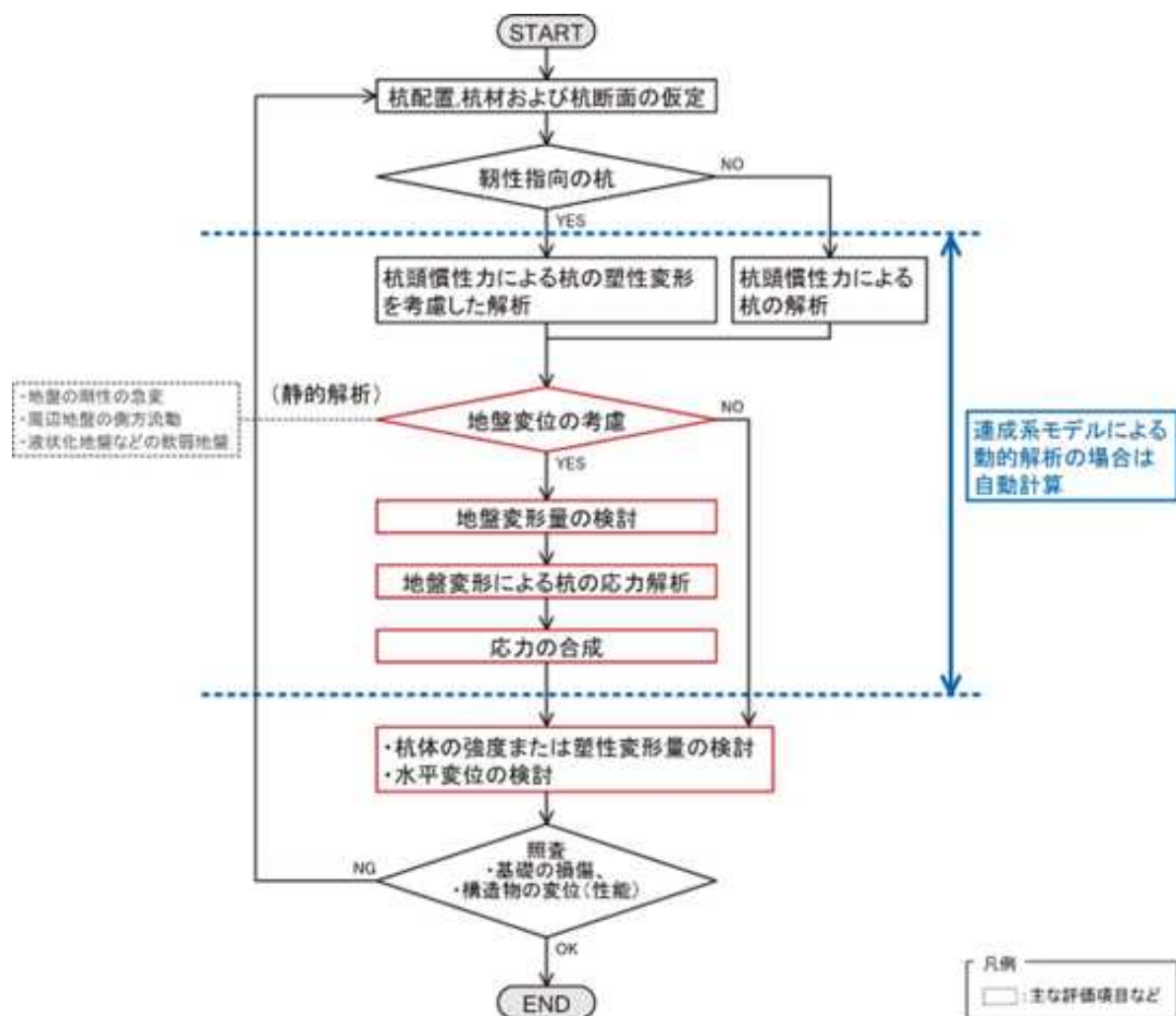


図3. 3 3 杭の耐震計算フロー

出典：指針・参考資料集 p.313（日本水道協会、2022 年）

地盤－構造物連成系モデルを用いた動的解析では、これらの影響を自動的に考慮することができる。一方、静的解析などではこれらの影響を自動的に考慮できないことから、図3. 3 3（杭の耐震計算フロー）に示すように、杭周辺地盤の地盤変位の影響などを適切に評価し、最適な方法で耐震計算を実施する。これらの影響の評価は、それぞれの設計において検討する必要があるが、池状コンクリート構造物等は比較的アスペクト比が小さく、上部構造物の慣性力の影響が小さい傾向にあるため、その特徴に適した評価をするように留意しなくてはならない。

なお、地盤の応答変位を考慮するか否かの判断については、事前に上部構造物の慣性力の分析や、一次元地盤モデルによる地震応答解析により検討することが望ましい。鉄道構造物等設計標準・同解説等の基準類によると、地盤の応答変位が大きくなる軟弱地盤を判断する目安として、地盤の固有周期、N 値、層厚による判定や、地盤のひずみが大きくなる地盤剛性が急変する地盤を判断する目安として、地盤各層上下のせん断波速度の比などによる条件が示されている。

3. 2. 8 池状コンクリート構造物の動的解析

池状コンクリート構造物の動的解析は、2次元の地盤－構造物連成系モデル又は構造物独立モデルを用いた上で、常時応答値を初期値とした動的解析を行い、地震時応答を求める。

また、その結果については、複数の応答値を対象に異常値の有無や収束状況について確認するなど、妥当性の評価を行う。

(1) 常時応答値の算定

常時の応答値の算定は、地震直前の池状コンクリート構造物の状態（初期状態）を設定するものである。

当局における池状コンクリート構造物の動的解析による応答値の算定に当たっては、荷重（応力）とひずみの関係が曲線となる非線形モデルを適用することから、地震前の常時の状態についても、同じ非線形モデルの条件下においてどのような応力・ひずみ状態であるのかを求める必要がある。そのため、動的解析と同じ非線形モデルを用いて常時の荷重を考慮した解析を行い、各構造物要素や地盤要素における地震前の応力やひずみなどを求め、それを動的解析に用いる初期値として設定する。

常時の作用としては、自重、水圧（構造物の内部水及び地下水）、静止土圧及び上載荷重（覆土、工作物、群衆荷重など）がある。

常時の解析では、基本的には動的解析と同じ構造モデル及び地盤モデルを適用する。ただし、常時の解析と地震時の解析では扱う荷重が異なる（例えば、動的解析では自重や静止土圧は考慮しない）ことや、例えば、先端支持杭の場合において、常時の解析では杭先端を固定条件とするが、地震時の動的解析では固定条件としないなど、必要に応じて解析モデルの変更が必要になる。

また、解析コードによっては、境界条件が異なる場合があることに注意が重要である。

なお、常時の解析の結果についても不自然な応力や変位が生じていないか、妥当性の確認も重要である。

(2) 地震時応答値の算定

当局においては、照査用に用いる地震時の応答値のみでなく、解析の妥当性の確認や、地震時の地盤と構造の挙動を分析することも目的として、次に示す応答値（図3.34にそのイメージを示す。）について、出力・評価するものとする。

【当局の応答値の確認（結果出力）対象】

- モデル全体の地盤最大応答分布図（加速度、速度、変形、せん断ひずみ及び過剰間隙水圧比）
- モデル全体の時刻歴図（変形及び過剰間隙水圧比）
- 地盤及び躯体における時刻歴応答解析結果（着目点の加速度、速度、変位、過剰間隙水圧比及び応力ひずみ関係）
- 躯体最大応答分布図（曲げ、曲率、せん断力、軸力及び変位）

そして、これらの妥当性確認により、不自然な応答が見られたり、応答の収束が確認できない（計算時間内で最大値、最小値が確認できない）などの場合には、解析モデルの見直しや解析時間、計算法の見直しなどを行うものとする。

なお、池状構コンクリート造物の動的解析においては、その計算結果が膨大になることが多いため、あらかじめ計算結果の妥当性の確認方法と対象とする着目点とを設定しておくといよい。

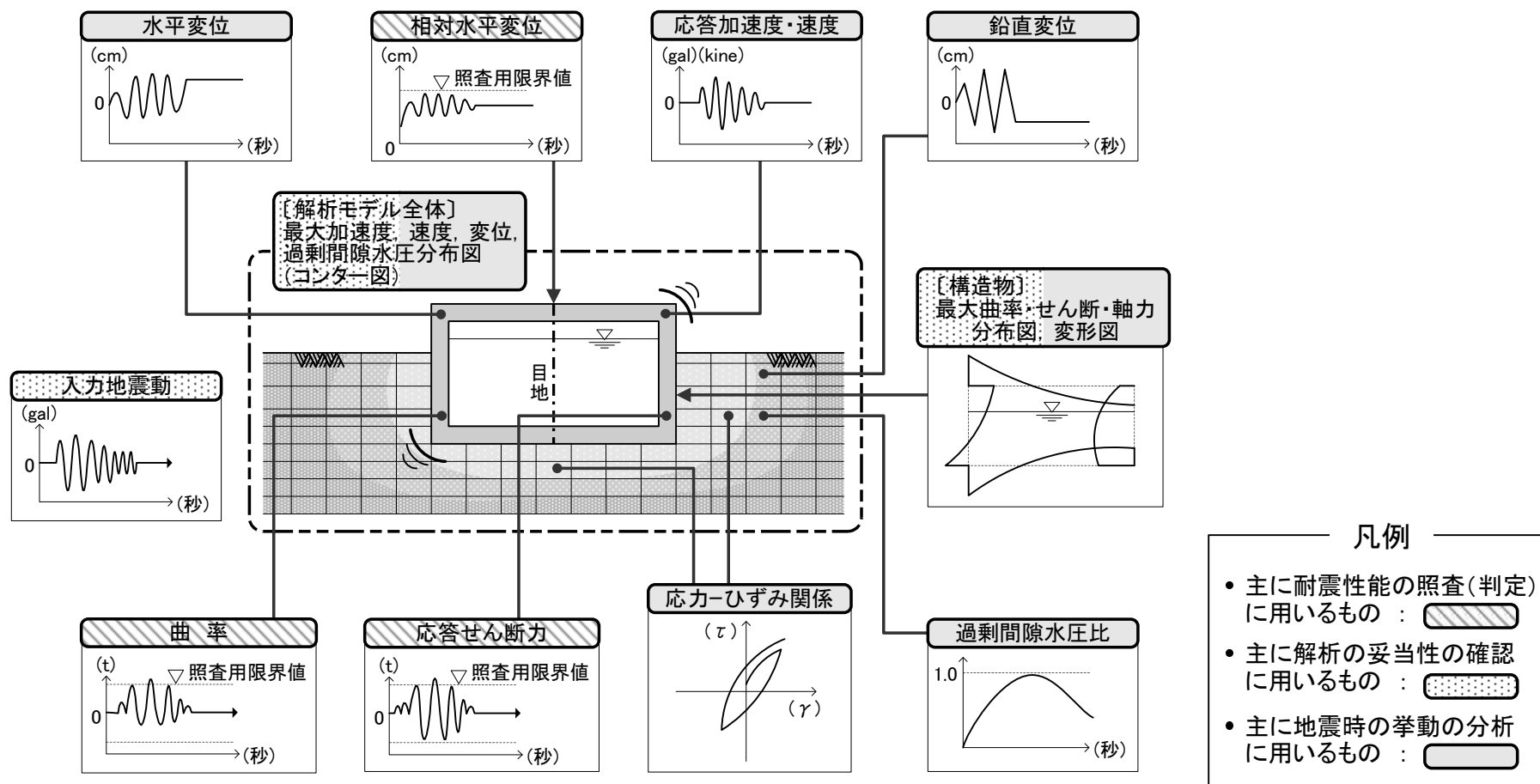


図 3. 3 4 池状コンクリート構造物の動的解析での出力・評価すべき応答値の例

3. 2. 9 池状コンクリート構造物の動的解析における当局の留意点

(1) 有効応力モデルの適用について

ア 有効応力モデル適用の留意点

本ガイドライン（平成 25 年 7 月）の作成に当たり実施した検証解析により得られた知見等も踏まえ、池状コンクリート構造物への有効応力モデルの適用に当たっては、次の事項に留意すること。

【有効応力モデル適用の留意点】

- 有効応力モデルを用いて構造物の変位を求めるに当たっては、精度上の観点から、構造物の変位量はオーダ的な評価（mm レベル、cm レベル、m レベル等の単位レベルの評価）とするのが望ましい。
- 解析条件の設定に当たっては、非排水繰り返し三軸試験や動的変形特性試験等の土質試験を実施することを原則とする。
- 液状化による地盤変状などの影響は、主要な地震の揺れの後も継続することから、有効応力モデルを適用した地震継続時間の動的解析において各種応答値が安定していない場合は、動的解析結果の後に液状化後の過剰間隙水圧の消散に伴う変形解析（圧密解析）を実施し、応答値の評価を行う必要がある。

イ 当局での有効応力モデル適用の判断についての考え方

過去の池状コンクリート構造物の地震被害事例によると、池状コンクリート構造物本体はアスペクト比（3.3.3 参照）が小さいこともあり、基礎や周辺地盤に液状化が生じても構造物全体の変位は比較的小さく、施設性能に及ぶ被害は生じにくいようである。しかし、構造物取り合い管路においては、構造物と周辺地盤との間に顕著な相対変位が発生することにより、施設性能に及ぶ甚大な被害が生じているようである。このような液状化時の施設の状況を、有効応力解析の適用により詳しくかつ具体的に表現できれば、施設性能に応じたより合理的な液状化対策を提案できる。

例えば、FL 値の評価では大規模な液状化対策が必要となっても、有効応力解析の適用により、液状化が生じても施設性能への影響はほとんどなく液状化対策は必要ないとの結果を導ける可能性がある。このような状況を踏まえ、当局での有効応力モデルを適用した動的解析の実施判断に関する基本的な考え方を図 3. 35 に示す。

当局では、図 3. 35 に示すように、まず FL 法などの簡易的な評価により液状化の可能性がある場合は、1 次元地盤の有効応力モデルを用いた地震応答解析と過剰間隙水圧消散による変形解析（圧密解析）を実施し、液状化の範囲や液状化時・液状化後の地盤の変位量（水平・鉛直、応答・残留）を詳しく評価する。その結果、例えば、次に示すように施設性能への影響がほとんどないと判断できれば、2 次元モデルの池状コンクリート構造物の動的解析には有効応力モデルを適用しない。

【液状化の影響が施設性能に与える影響がほとんどないと判断できるケース 例】

- 液状化による地盤の沈下等の塑性変位量が 2、3 cm 以内に対して、解析対象の構造物が給水所など主に水道水の貯留機能を求められる施設であり、構造物の変位に対する許容値が比較的大きい場合
- 液状化による地盤の沈下等の塑性変位量が 2、3 cm 以内に対して、構造目地や構造物取り付け管路の許容変位量が十分に大きい場合
- 地盤の地震応答（加速度、変位等）が、全応力解析とほとんど同じ傾向を示す場合

施設性能への影響があると判断する場合は、液状化の発生を防止する対策を検討するステップに移行し、以降の動的解析に全応力モデルを適用するか、液状化の発生を許容することを前提として施設への影響を直接定量的に評価するために地盤－構造物連成系モデルによる有効応力モデルを用いた動的解析及び圧密解析を行うものとする。

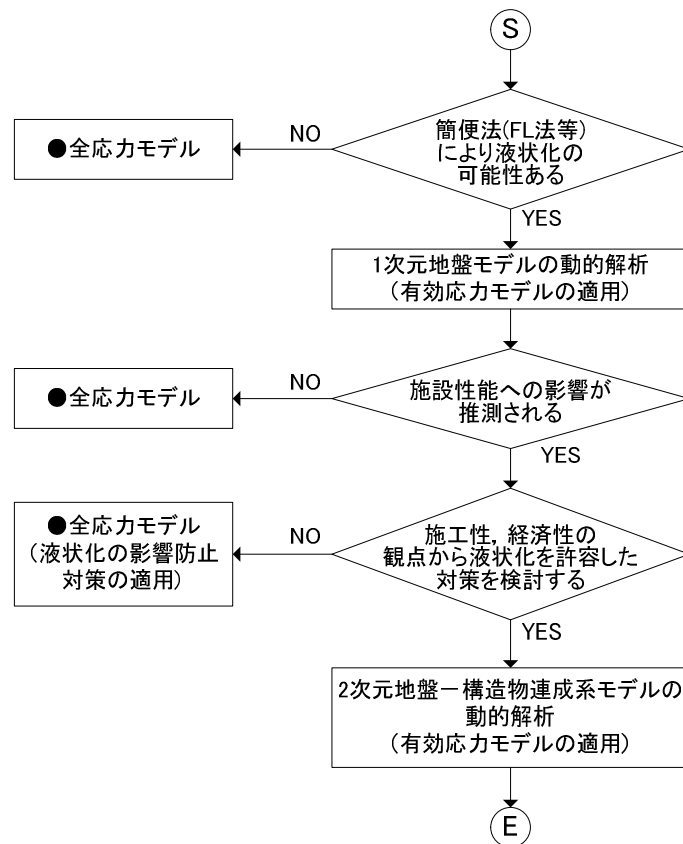


図 3. 3 5 池状コンクリート構造物への有効応力モデルの適用判断手順

(2) 要素シミュレーションについて

要素シミュレーションとは、解析に用いる複数のパラメータを試行錯誤に変更し、対象地盤の土質試験結果を再現する解析のことであり、複数のパラメータを同時に設定する際に用いる。

地盤モデルに非線形法を適用し、全応力モデル又は有効応力モデルを適用する場合には、各種パラメータの設定において、次の要素シミュレーションを実施する必要がある。

【全応力モデル、有効応力モデルの設定における要素シミュレーションの対象】

- R-O モデルに用いるパラメータを動的変形試験結果に整合するよう設定

【有効応力モデルの設定における要素シミュレーションの対象】

- 砂の弾塑性モデルに用いるパラメータを動的変形試験結果及び液状化試験結果に整合するよう設定

また、特に有効応力モデルの適用に当たっては、多くのパラメータを扱う必要がある。その主な留意点を次に示す。

【要素シミュレーション留意点】

- 有効応力モデルにおいて地盤や構造物の変位量を詳しく評価する場合においては、液状化強度曲線だけでなく、応力-ひずみ関係や有効応力経路、ひずみの時刻歴などの土質試験結果とのフィッティングが重要となる。
- これらのフィッティングでは、動的変形特性も同時にフィッティングする必要があるが、これら全てのフィッティング精度の確保が一般には非常に難しいことから、解析者の工学的判断が重要となる。
- 工学的判断の方法としては、複数のフィッティングケースにより設定した複数のパラメータセットによる1次元地盤モデルの地震応答解析を実施し、例えば安全側の評価値が得られるようにするなど適切なパラメータセットを選定するなどの方法が考えられる。

3. 3 静的解析による耐震計算

3. 3. 1 池状コンクリート構造物への適用目的

静的解析では、従来から広く利用されており、比較的分かりやすい解析手法である。しかし、地震時における構造物の動的挙動の再現性が低いため、地震応答が複雑な場合は必ずしも安全側の耐震設計にならないことや、過大な構造断面になりがちであり、経済的に不利となる場合もある。

静的解析の適用については、3. 1. 2を参照する。

3. 3. 2 耐震計算の手順

静的解析は、設計地震動、解析手法及び解析モデルを設定し、部材断面及び配筋を決定していく。既設構造物の場合は、実際の構造物断面をモデル化するが、新設の構造物の場合は、部材断面形状、配筋等を初期段階に想定することになり、ある程度経験則により仮定断面を造り、トライアル計算で変更していくこととなる。

静的解析法による設計フローは、図3. 3 6のとおりである。

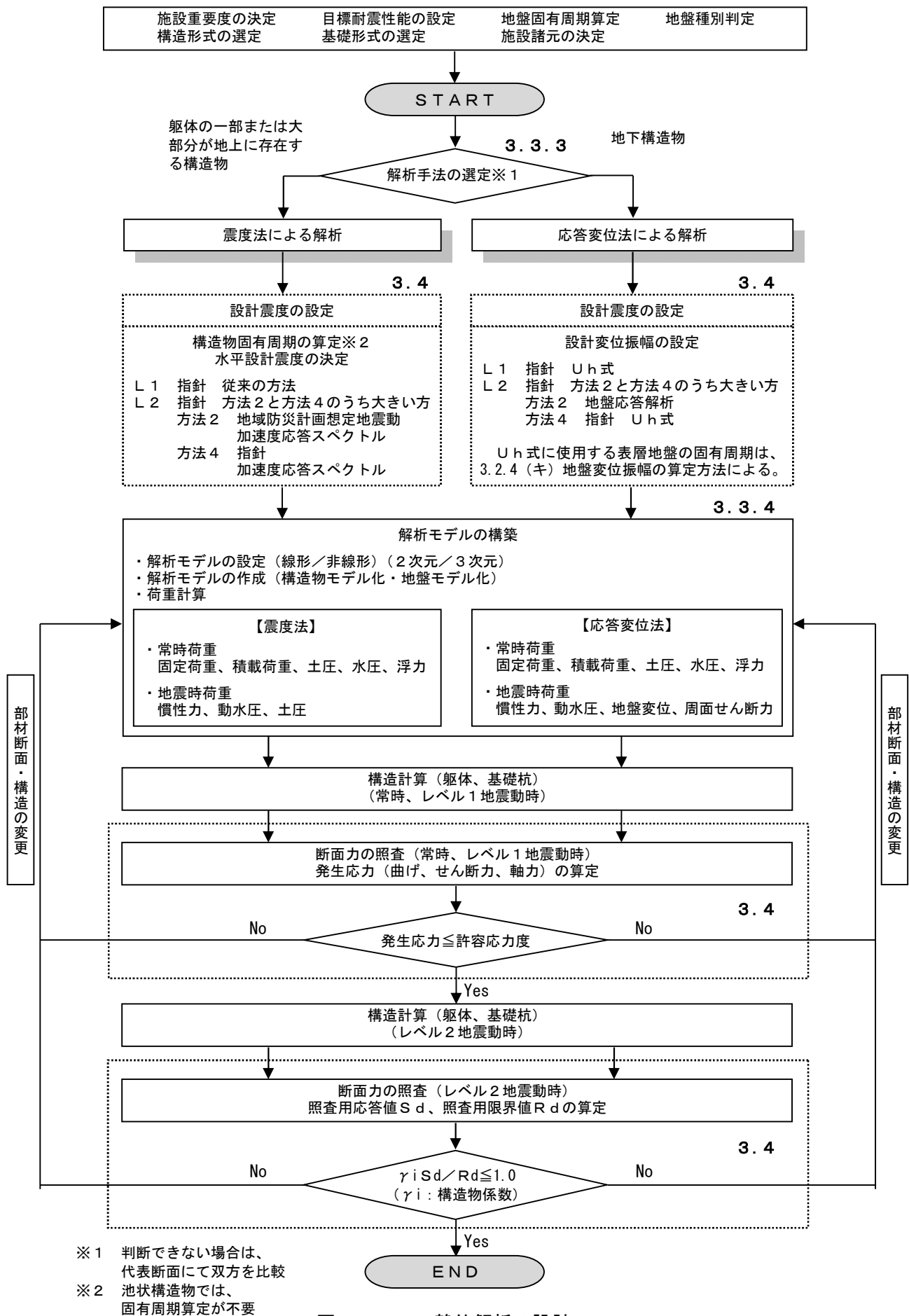


図 3. 3 6 静的解析の設計フロー

3. 3. 3 解析手法の選定

静的解析における耐震計算法は、次の区分を参考に、構造物本体の特性、設置状況等を考慮して選定する。

(1) 震度法と応答変位法の区分

一般的に池状コンクリート構造物の躯体の一部または大部分が地上に存在する構造物の地震時挙動は、地震動による慣性力や動水圧の影響が大きい^くため、単純な構造では静的解析による耐震計算は震度法による。一方、躯体が完全に地中にある構造物の地震時挙動は、地震動による周辺地盤の応答変位やせん断応力の影響が大きい^くため、静的解析による耐震計算は応答変位法を基本とする。ただし、地表付近に建設されることが多い池状コンクリート構造物のようにアスペクト比が小さく（平面規模に比べて鉛直高さが小さく）、構造系全体の水平せん断剛性が比較的大きい場合には、一般に地盤の変位による影響が小さい^{ため}地上構造物と同様に震度法を適用する。アスペクト比の目安は、指針参考資料 3-7「池状構造物【地上構造物】の曲げ・せん断照査における耐震計算法の特徴比較（適用にあたっての目安）」を参考に、奥行きLと高さHの比（ L/H ）が 2.5 以上の場合に「アスペクト比が小さい構造物」とする。

なお、地震時慣性力と地盤変形のどちらが卓越するものかについて事前に判断できない場合には、指針参考資料 3-6「池状構造物【地下構造物】の曲げ・せん断照査における耐震計算法の特徴比較（適用にあたっての目安）」を参考に決定するほか、代表的な断面に対して応答変位法と震度法それぞれで計算を行い、厳しい結果となる耐震計算法を採用することが考えられる。

しかし、当局の池状コンクリート構造物の場合、容量 2,000m³ 以上は動的解析の対象としており、静的解析は小規模施設への適用がほとんどとなる。小規模な池状コンクリート構造物は立体的な剛性が高いため、地盤変状の影響が大きくなる軟弱地盤（液状化地盤）にある地下構造物や、基礎形式が基礎杭の耐震計算を行う場合のみ応答変位法を適用し、それ以外の場合は基本的に震度法を適用する。

3. 3. 4 解析モデルの構築

(1) 解析モデルの設定

ア 線形解析、非線形解析の選択

線形解析と非線形解析との選択は、原則 3. 1. 2 に従う。その他、プッシュオーバー解析等の静的非線形解析は、危機耐性を考慮した耐震計算を行う場合にも用いられる。

イ 2次元、3次元モデルの選択

池状コンクリート構造物は各部材が3次元に接合されて構成される場合が多いので、3次元的な応力伝達を把握するには3次元の解析モデルとするのがよいが、当局では、鉛直断面の2次元解析モデルを用いることを標準とする。

解析モデルは、その断面が矩形やそれに近い形状の場合は、ある奥行幅をもつ2次元モデルでモデル化すると、一般的には安全側の応答値が得られる。ただし、3次元的效果が有効に働く構造形態（耐震壁や導流壁等が設置されている場合など）では、3次元效果を考慮することが有効であり、3次元モデル又は2次元モデルの耐震壁や導流壁などを、板要素や等価なブレースに置換するモデルなどでモデル化する（3. 3. 7（10）参照）。

2次元モデルは、一般的に構造部材をはり要素等の線材要素を用いてモデル化し、地盤は構造物を支持する地盤ばね又は平面ひずみ要素等の連続体要素を用いてモデル化する。

(2) 震度法を用いた耐震計算

ア 耐震計算手順

震度法による耐震計算は、設計水平震度を諸条件から算定し、荷重計算を行い、構造物のモデルに荷重を作用させ、断面力を算定する。震度法における手順を図3. 37に示す。

- ① 設計上の基盤面を設定し、地盤の固有周期を算定し、地盤種別より水平設計震度の算定を行う。震度法に用いるレベル2地震動では、この方法で選定した水平設計震度（方法4（97年版指針の設計地震動））を標準とする。
- ② 各構造形式に適した構造物のモデルを作成する。このとき常時荷重に対して、経験的に部材断面を設定する。
- ③ ①、②より地震時荷重（慣性力、動水圧及び土圧）、地盤ばね及び杭ばねの算定をする。
- ④ 常時荷重による発生断面力を初期状態として地震時荷重を載荷し、地震時断面力を求める。

地震時断面力の照査結果により照査基準を満足しない場合は、部材断面及び形状を見直し、②に戻り、再度耐震計算を行う。

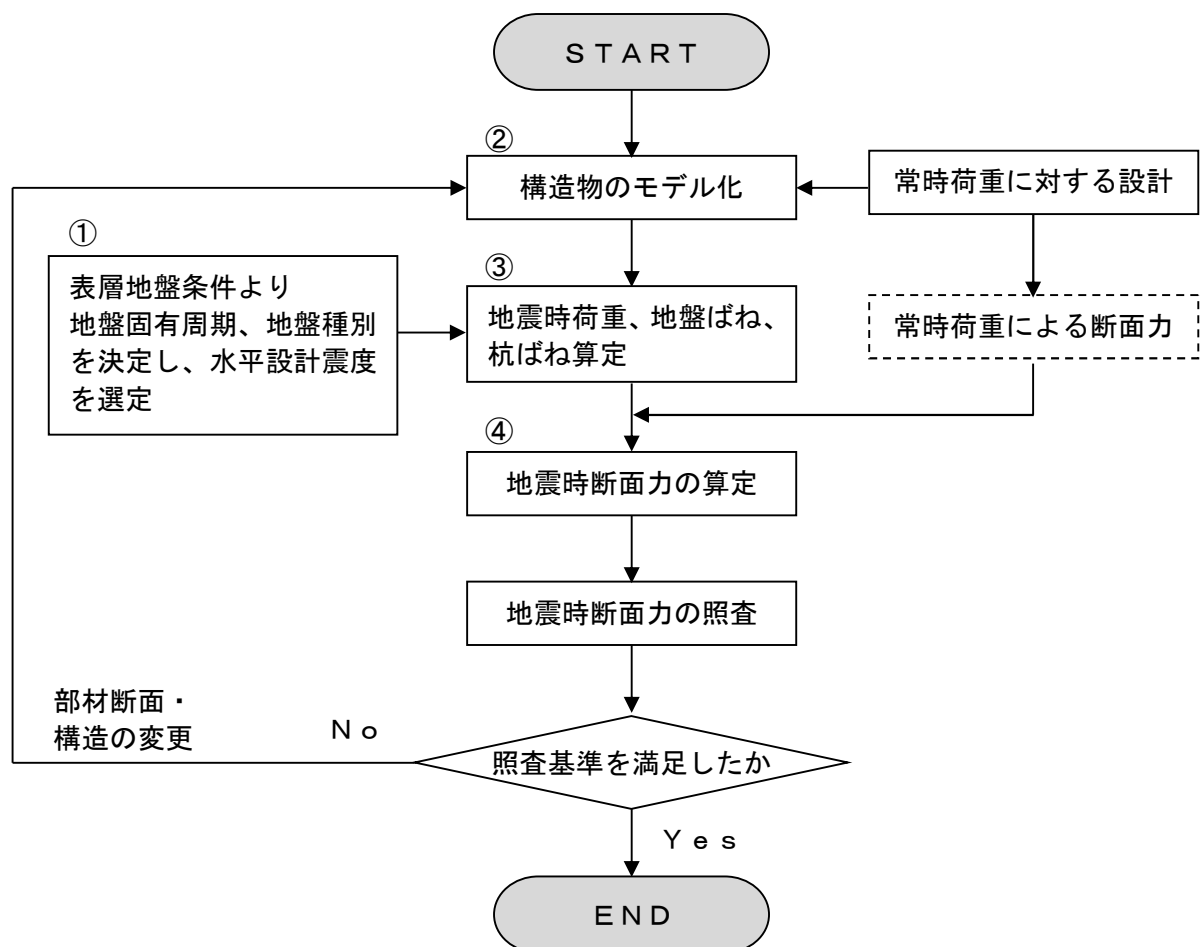


図3. 37 震度法の耐震計算手順

イ 線形解析及び非線形解析の詳細

(ア) 非線形性を考慮した線形解析

震度法を適用した線形解析は、構造物特性係数 $C_s=1.0$ を用いた震度法によることを標準とする。

なお、構造物特性係数 C_s の一般的な考え方を以下に示す。図 3. 38 に示すように、底面を固定した鉄筋コンクリート (RC) 部材に水平荷重を段階的に作用させると、作用力に応じて非線形性を示す。すなわち、段階的にコンクリートの引張ひび割れの発生後 (P_c)、引張側の鉄筋が降伏し (P_y)、圧縮側コンクリートの圧縮破壊 (最大耐荷力点 P_u) に至り、軟化挙動を示すようになる。軟化開始後、作用荷重が降伏耐力相当の荷重状態にまで低下した状態を、じん性限界状態として終局変位 (δ_n) と定義する。

このような非線形挙動による剛性低下により、RC 部材は地震力に対して変形しやすくなるが、この変形により地震力を吸収し、作用荷重は低下する。部材を線形弾性体とした解析では、これらの挙動を考慮できないが、代わりにエネルギー一定則の考え方に基づいて構造物特性係数 C_s を求め、これにより設計震度の低減を考慮することができる (設計震度の設定は、2. 4. 3 参照)。

構造物特性係数 C_s を用いた震度法は、この低減された設計震度を用いることで構造物の非線形性を考慮し、地震時断面力を求めるものである。

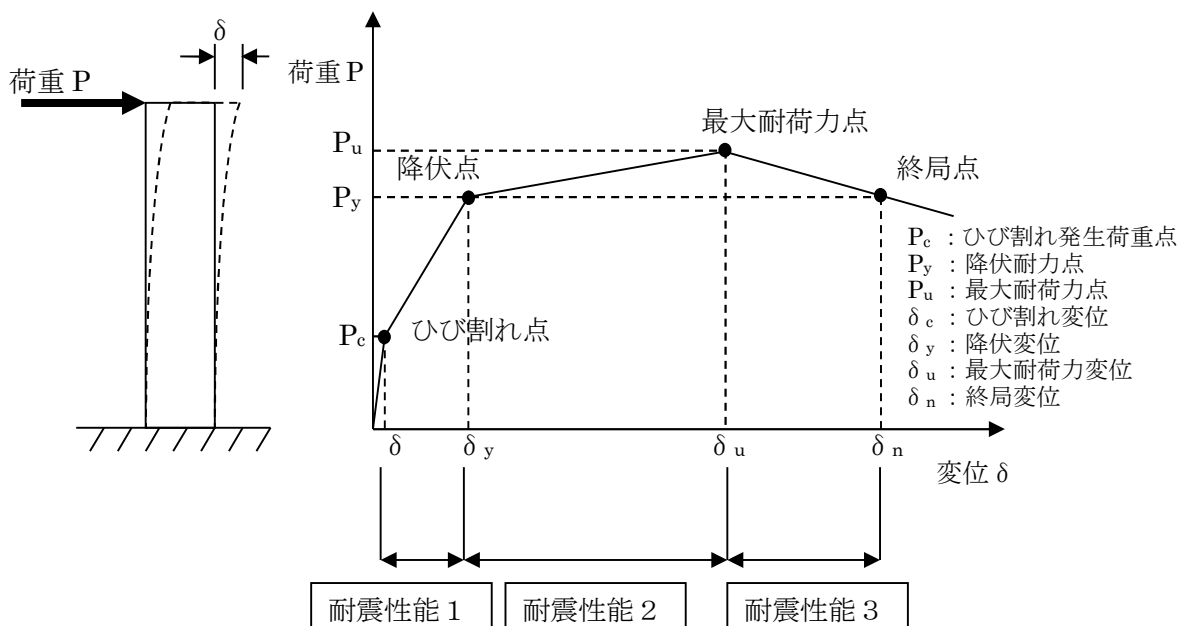


図 3. 38 RC部材の非線形特性概念図

💧【水滴くんのワンポイントアドバイス】 ～エネルギー一定側～

RC 部材に水平力を与え続けると非線形を示すことは、先に示したとおりである。ここで、先に示した図 3. 38 の縦軸を水平震度に置き換えてみる (図 3. 39)。ここでは、議論を簡単にするためにコンクリートのひび割れ過程は無視し、鉄筋の降伏までを弾性域とする。

仮に部材が線形弾性体であるとすれば、水平震度 K と変位 δ の関係は図 3. 39 に示すように水平荷重に対して原点 O から直線的に増加し、点 A に至る。ところが、先に示したように RC 部材は非線形性を示すため、実際には $O \rightarrow C \rightarrow D$ のような過程を経ることが予測される。ここで、構造部材が受ける地震力によるエネルギーは、荷重 (震度) - 変形関係の積分値、すなわち弾性応答であれば $\triangle OAB$ の面積であると考ええる。そして、このエネルギーは部材の線形、非線形を問わず同一であると考ええる。

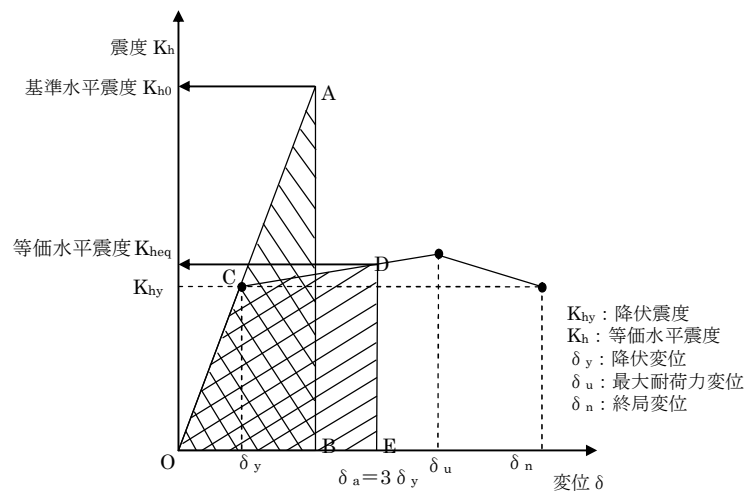


図 3. 39 RC部材の水平震度－変位関係の模式図

この考え方により、図 3. 38 に示すような非線形モデルにおける荷重－変形関係を想定し、 $\triangle OAB$ の面積に等しい面積を有する $\square OCDE$ を求めることができる。図 3. 39 において、点 A の時の水平震度を基準水平震度 K_{h0} とする。 $\triangle OAB$ の面積と $\square OCDE$ の面積は等しいから、両者のエネルギーは等しいことになり、同じ地震力に対して部材に作用する水平震度は図中に示す等価水平震度 K_{heq} であることになる。そして、解析としては、この等価水平震度に対して発生する変形量が許容値以下であればよいと考える。このような考え方がエネルギー一定則と呼ばれるものである。

参考文献：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 p.132 (日本道路協会、平成 29 年)

(イ) 非線形解析（プッシュオーバー解析）

a 概要

プッシュオーバー解析は、静的作用を漸増載荷（作用荷重を n 分割して段階的に載荷）して非線形な荷重－変位曲線を求める解析であり、部材の破壊形態の確認や設計応答値を算定する手法として有効である。構造部材の非線形性の設定は、曲げモーメント M －曲率 ϕ 関係によるもの、部材をファイバー要素で表現するもの、FEM による非線形解析によるもの等がある。

水密性が要求される部材では、コンクリート表面への軽微なひび割れが生じるものの、漏水や浸入水が発生せず、機能低下に至らないことを部材のひび割れ状況として照査する。ひび割れ状況の照査指標としては、曲げ、せん断によるひび割れの幅、深さ、発生箇所等があり、鉄筋コンクリートの材料非線形性を考慮した有限要素法（FEM）である材料非線形解析によって算定することができる。

材料非線形解析では、平面要素やソリッド要素、ファイバー要素、積層シェル要素などのモデルに、コンクリートや鉄筋の構成則を適用することにより、ひび割れを反映する。ただし、材料非線形解析では種々の構成則が提案されており、解析上の難易度も高く、設計実務における適用実績が乏しい。また、現状ではひび割れの状況を解析により評価することは困難であることから、耐震工法指針では最大耐荷力点以下であることを照査するものとしている。さらに、解析によって出力された結果の解釈には、高度な知見が必要になる。

以上を鑑み、当局では耐震工法指針 p.131 のみなし規定である最大耐荷力点での照査を採用し、解析モデルは、通常の耐震計算で用いられる構造物単独や構造物と地盤の連成解析におけるモデル化の難易度や要する時間を考慮し、 M － ϕ モデルを標準とする。

b 部材の破壊形態の確認

部材の破壊形態の確認では、通常構造物が破壊に至るまで段階的に地震時荷重を増加させ、地震力による破壊挙動を評価する。解析手順として、漸増載荷の各荷重段階に対応する各部材の損傷レベルと基準点（例えば構造物端点）の変位との関係をプロットすることで、損傷しやすい箇所の特定制と損傷に至るまでの部材の耐力を確認できる。

なお、プッシュオーバー解析は、各部材の破壊形態を詳細に評価するため、通常は終局状態まで解析を行う。

c 設計応答値の算定

設計応答値の算定では、漸増載荷の各荷重段階に対応する震度と基準点（例えば構造物端点）の変位との関係をプロットすることで、震度－変位関係を得て、先に示したエネルギー－一定則の考え方を適用することにより構造物の有するじん性を考慮した等価設計震度の算出を行う（図 3. 4 2 参照）。

d 計算例

一例として、図 3. 4 0 に示すような配水池を対象とした計算結果を示す。

このモデルがⅡ種地盤上あるとして、基準設計震度を $K_{h0}=0.80$ とする。構造物に作用する地震時水平力は、自重慣性力、動水圧及び地震時土圧であり、これを適切な震度（例えば基準水平震度 $K_{h0}=0.80$ ）まで 1,000～10,000 ステップに分けて段階的に載荷させる。

載荷時の変形分布は図 3. 4 1 のようになるが、この左側壁における頂底部（点 A 及

び点 B) の相対変位 δ と水平震度との関係を示すと図 3. 4 2 のようになる。

エネルギー一定則に基づけば、 $K_{h0}=0.80$ に相当する等価水平震度 K_{heq} は、 $K_{heq}=0.34$ である。

また、図 3. 4 2 に各部材の損傷状況を示した。これは、左側壁頂底部が変形する過程において、各部材がどの段階で降伏及び最大耐荷力に至るかを表している。この例では、等価設計震度 $K_{heq}=0.34$ に至るまでに降伏する部材はあるものの、最大耐荷力に至る部材はない。したがって、対象構造物の耐震性に関する要求性能を耐震性能 2 とすれば、耐力上の問題はないことになる。

なお、この例では、基準水平震度 $K_{h0}=0.80$ 、等価水平震度 $K_{heq}=0.34$ であることから、全体系の構造物特性係数 C_s は、 $C_s=K_{heq}/K_{h0}=0.34/0.80=0.425$ である。

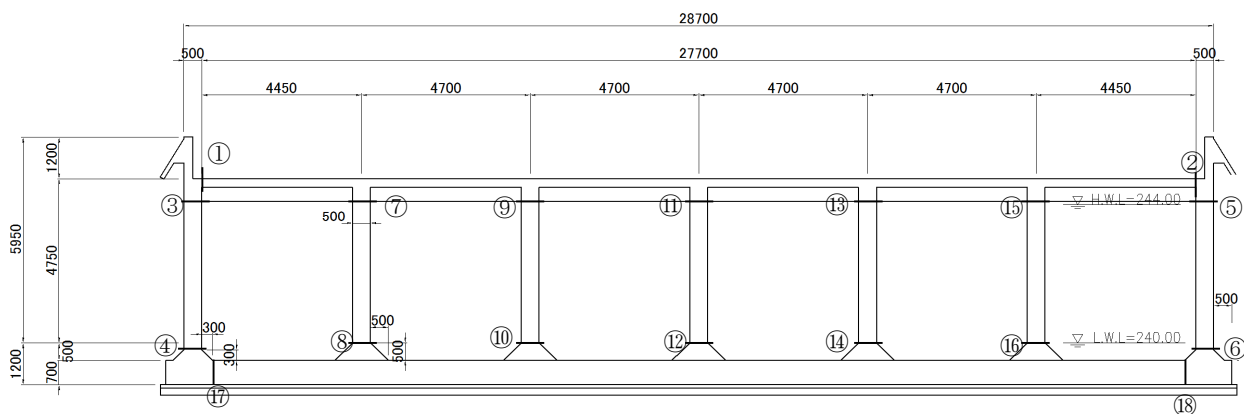


図 3. 4 0 対象構造物例

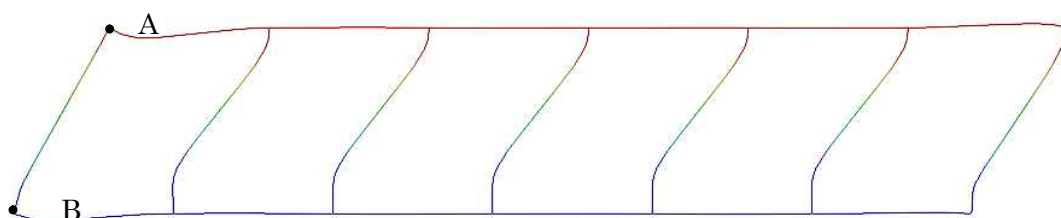
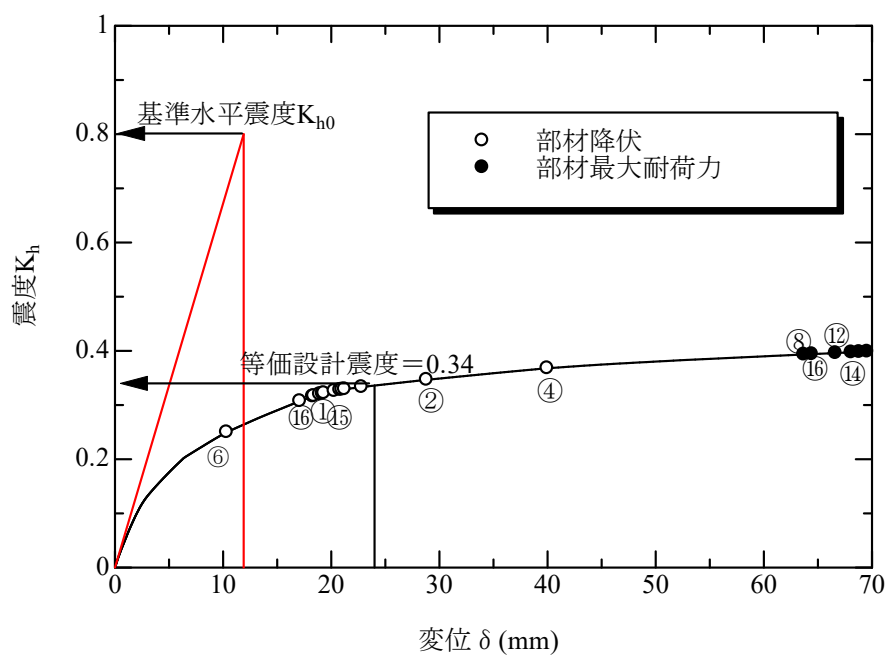


図 3. 4 1 変形モード図



(変位 δ は A 点、B 点の相対変位量)

No.	部材の損傷発生時の震度	
	降伏時	最大耐荷力時
①	0.316	0.423
②	0.347	0.399
③	-	-
④	0.368	0.477
⑤	0.454	0.623
⑥	0.250	0.404
⑦	0.326	0.398
⑧	0.320	0.393
⑨	0.333	0.403
⑩	0.329	0.399
⑪	0.329	0.401
⑫	0.321	0.396
⑬	0.328	0.401
⑭	0.322	0.396
⑮	0.317	0.397
⑯	0.307	0.394
⑰	0.408	0.535
⑱	0.508	-

図 3. 4 2 震度－相対変位関係と損傷の進行過程

(3) 応答変位法を用いた耐震計算

ア 耐震計算手順

応答変位法は、地震時の地盤応答変位を地震時土圧として地盤ばねを介して直接作用させる手法であり、耐震計算手順を図 3. 4 3 に示す。

- ① 設計上の基盤面を設定し、基盤の時刻歴波形や速度応答スペクトルを用いて地震時の地盤変位、地盤剛性、周面せん断力、加速度等を算出する。

速度応答スペクトルは、レベル 1 地震動では指針の U_h 式を、レベル 2 地震動の方法 2（地域防災計画の想定地震動）では地盤応答解析で、レベル 2 地震動の方法 4（97 年版指針の設計地震動）では指針の U_h 式にて算定する。

- ② 常時荷重によって設計された構造物に基づき構造物モデルを作成する。
- ③ ①及び②から地震時荷重（地盤変位荷重，周面せん断力，慣性力及び動水圧）、地盤ばね及び杭ばねの算定をする。
- ④ 常時荷重による発生断面力を初期状態として地震時荷重を載荷し、地震時断面力を求める。

地震時断面力の照査結果により、照査基準を満足しない場合は、部材断面及び形状を見直し、②に戻り、再度耐震計算を行う。

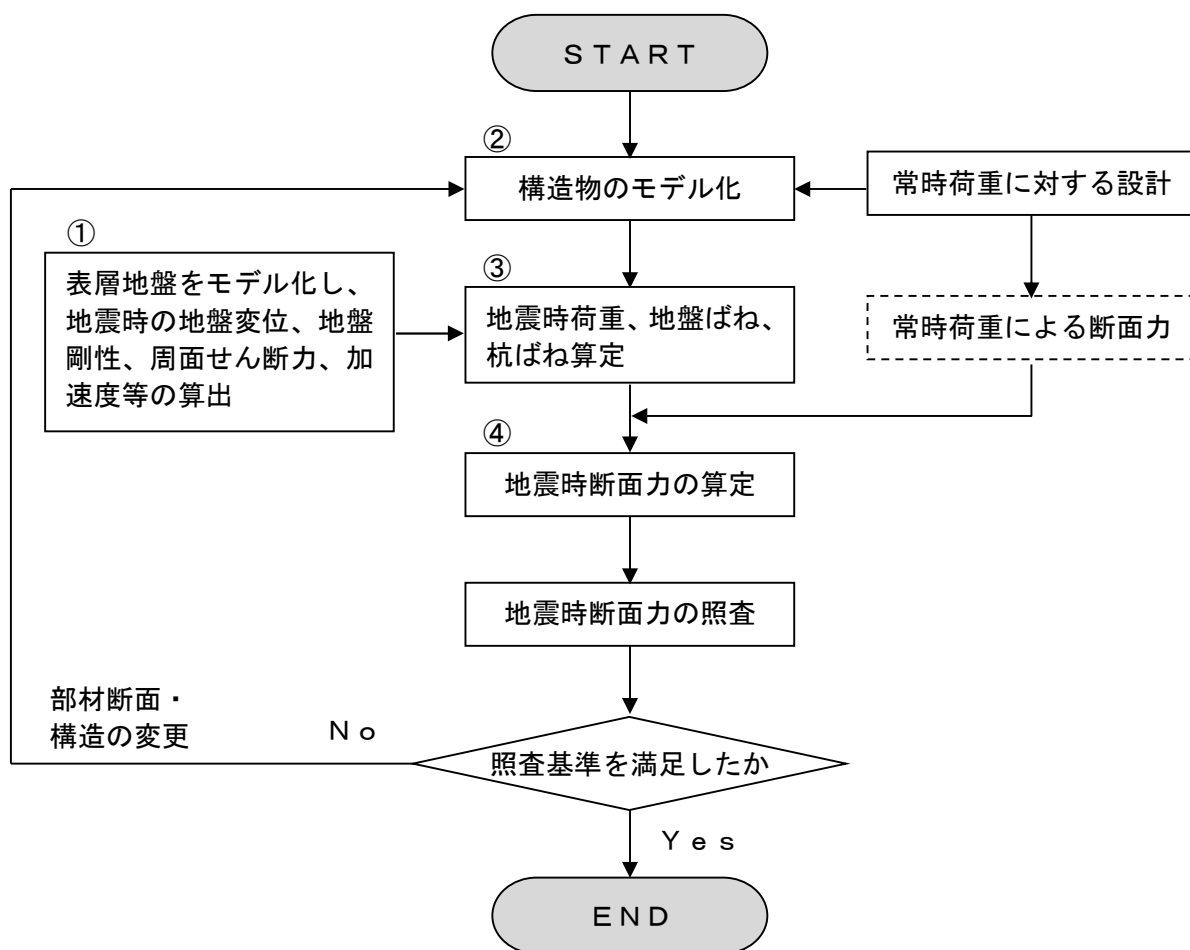


図 3. 4 3 応答変位法の耐震計算手順

イ 構造物に作用する地震荷重

応答変位法による構造物の解析では、図3.44に示すように、構造物に作用する地震時荷重は、①躯体の自重による慣性力、地震時土圧（②地震時地盤変位×地盤ばね）、③周面せん断力及び④地震時動水圧を考慮する。

なお、応答変位法では、次の項目が現状の課題と考えられる。

（ア）地盤ばねの設定

応答変位法における地震時土圧は、地盤ばねと地盤変位を乗じて入力するため、地盤ばねの設定を行う必要がある。通常は、道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編 p.223（日本道路協会、2017年）に示される簡易な手法を用いるが、FEMにより算出する手法も見られる（駐車場設計・施工指針 同解説 p.165（日本道路協会、平成4年11月））。ただし、構造物が完全な矩形の場合にはこれらの手法を適用できるが、構造形状が複雑な場合の地盤ばね算出法は明確になっているとは言えないので、注意が必要である。

（イ）地震時応答変位

レベル2地震動の方法4（97年版指針の設計地震動）では、簡易式により地盤変位を求めるが、レベル2地震動の方法2（地域防災計画の想定地震動）では、地盤の地震応答解析によることとしている。このとき、地層の条件（構造物の面的方向に配慮した互層地盤層厚のモデル化又は線形地盤か非線形地盤かの取扱い）の設定によっては、結果が大きく異なる可能性もあり、適用に際しては注意が必要である。

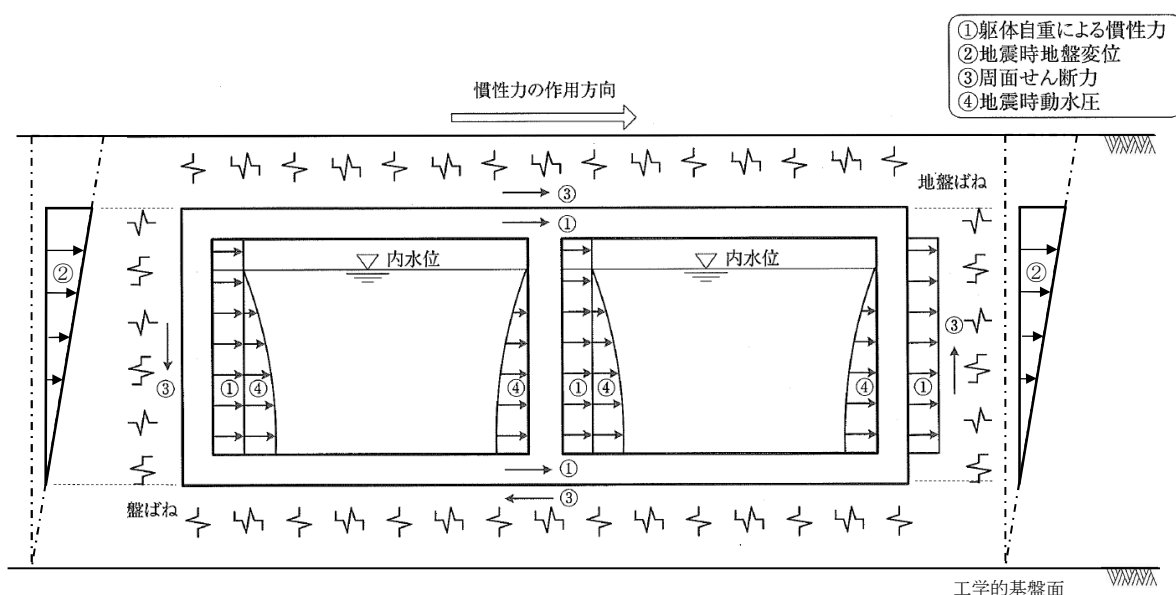


図3.44 応答変位法の考え方

出典：指針・本編 p.125（日本水道協会、2022年）

ウ 線形解析及び非線形解析の詳細

（ア）線形解析

線形解析では、弾性体における応力・変形の重ね合わせの原理が適用できる。この場合は、常時の荷重によって生じる応力・変形と地震時に生じる増分応力・増分変形とを別々に求め、

両者の結果を単純に重ね合わせて地震時の応力・変形とすることができる。

地震時は単純に図 3. 4 4 に示す作用力、地盤ばねを解析モデルに作用させ、応力及び変形を計算する。

なお、地震時の地盤変位や周面せん断力は、正確には、表層地盤の地震応答解析により得られた応答値に基づいて設定するのが望ましい。

(イ) 非線形解析

応答変位法の場合、構造物の非線形性は、地盤の影響が支配的であるため、構造物特性係数は考慮せず、 $C_s=1.0$ とする。応答変位法における構造物の非線形性は、曲げモーメント M －曲率 ϕ 関係に基づき、非線形特性を考慮する。

非線形モデルは、曲げモーメント M －曲率 ϕ 関係で表すトリリニア型のモデルとする (図 3. 4 5)。

解析は、作用が見込まれる荷重 (慣性力、動水圧、地盤変位荷重、周面せん断力等) を n 分割し、これらを段階的に加算しながら、曲げモーメント M －曲率 ϕ 関係をトレースして行う (荷重増分による方法)。

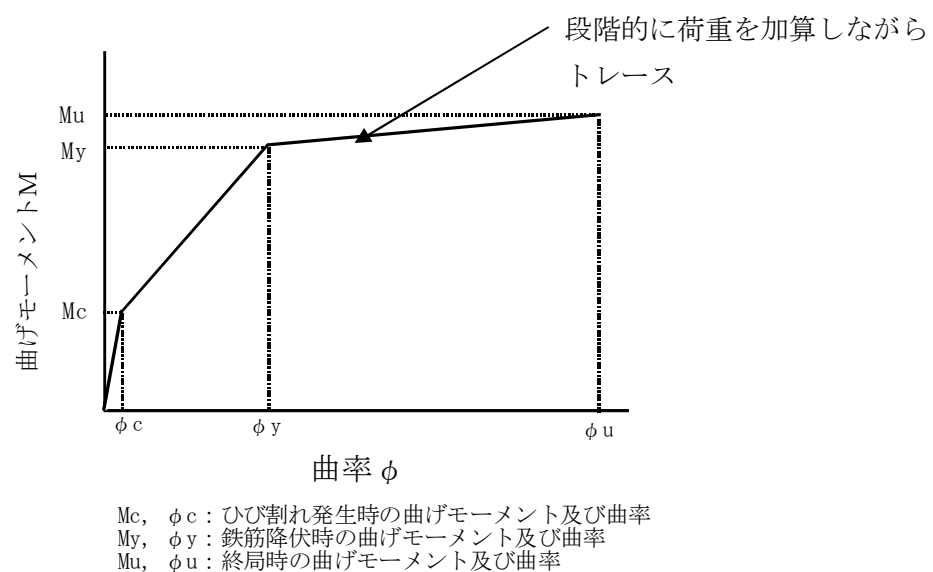


図 3. 4 5 部材の非線形特性

出典：指針・本編 p.75 (日本水道協会、2022 年)

(4) 荷重計算

ア 荷重組合せの設定

荷重組合せの選択は、各構造物の運用状況等に基づいて行う。

通常は満水時及び空水時の検討を行うが、複数の池が連続しており洗浄を行っている池が常に存在するろ過池のような場合は、1池空水時のケースも加える。

また、当局においては、長期間にわたり構造物を建設していくことが多いため、(イ)に示す建設状態についても考慮し、設計を行う。

(ア) 荷重組合せの基本

荷重の組合せは、表3. 11を基本とする。地下式配水池の耐震診断において空水時の照査を行わない場合には、一般的に水位が低い場合に土圧が卓越した計算を省略し危険側の診断となる場合があるため、満水時に加えて実運用上の最低水位での検討を行う。

表3. 11 荷重組合せの基本

解析対象	地震動	荷重の組合せ
配水池、沈澱池等 (池数が少数)	レベル1地震動	満水、空水及び片側空水
	レベル2地震動	満水、実運用上の最低水位※
ろ過池、活性炭吸着池等 (池数が多数)	レベル1地震動	満水、空水及び1池空水
	レベル2地震動	満水及び1池空水

※地下構造物の耐震診断を行う場合

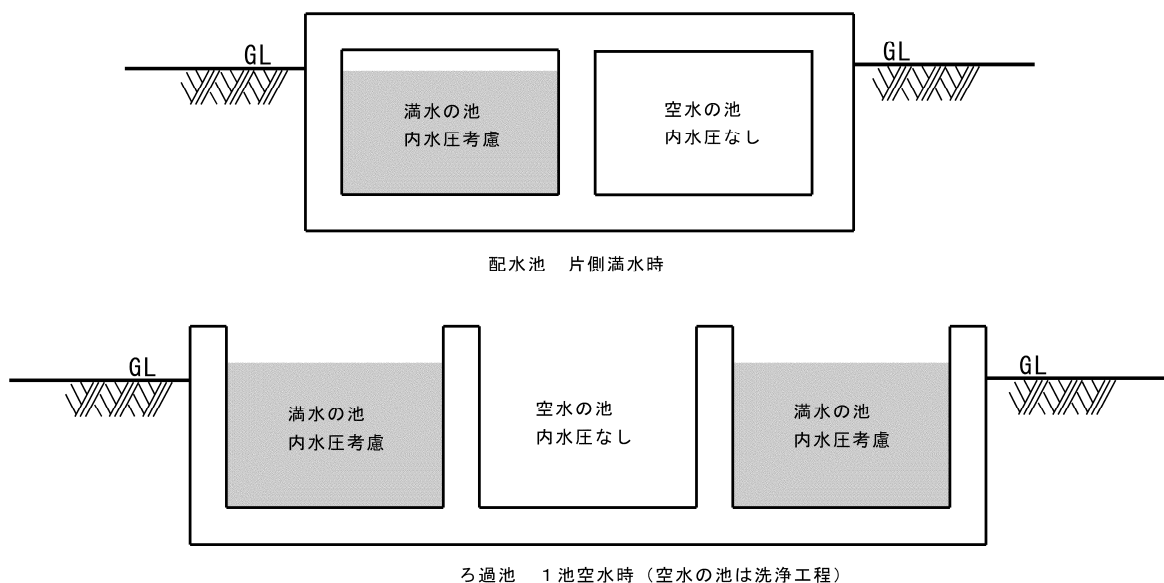


図3. 46 荷重組合せ例

(イ) 建設状態別の荷重

荷重計算時に考慮すべき建設状態は、次による。

- a 建設完了時 : 構造物の建設が全て完了し、通常に稼働している状態（「完成状態」という。）
- b 増設時 : 隣接して新設構造物を増設するために掘削され、片側土圧又は土圧撤去に伴う片側水圧となっている状態（「増設状態」という。）

地下部分のある構造物において、増設時の施工に伴う地下水位の低下を考慮し、設計用計画地下水位の設定が必要となる。

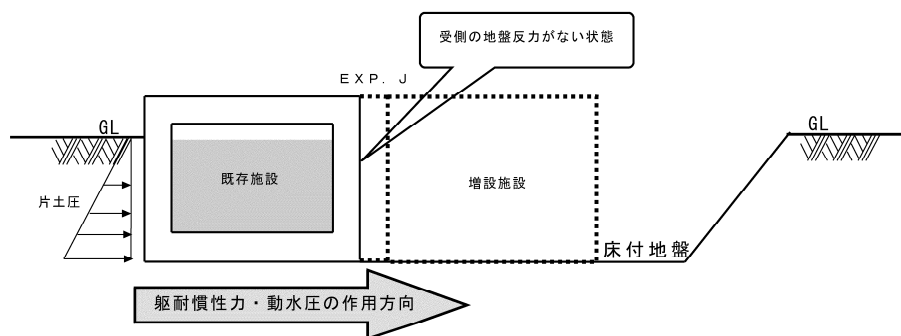


図3.47 増設状態の模式図

イ 解析で考慮する地震の影響

静的解析による耐震計算では、地震動の影響、液面揺動、地盤の液状化及び側方流動を適切に考慮する。

(ア) 地震動の影響

地震動の影響（地震作用）は、構造物の自重等に起因する慣性力、地盤変位に起因する荷重、地震時土圧及び地震時動水圧、さらに必要に応じ浮力又は揚圧力を考慮する。

池状コンクリート構造物の耐震計算では、水平方向の地震動の影響のみを考えておけば、十分に耐震性のある構造物を建設できることから、鉛直方向の地震動は原則として考慮しない。

(イ) 液面揺動

液面揺動は、内容水の固有周期、地震動の周期特性等と密接な関係がある。一般に、大規模貯水構造物類における液面揺動の固有周期は、数秒以上の長周期となる。自由液面のある水槽において、地震時に液面の自由振動が大きく誘起されると、越流、屋根や傾斜装置等の池内設備への波圧、水位計の計測エラーによる施設運用上の不具合等の影響が生じる。

水道施設の池状コンクリート構造物への適用としては、大規模な円形水槽を除き、一般的に固有周期が比較的短いことから、水面が自由振動（揺動、スロッシング）を起こした時に生ずる動水圧作用の二次的な影響が小さいと考えられるため、液面揺動を無視する。

液面揺動の影響を考慮するケースとしては、池状コンクリート構造物が大規模で、その附属設備（傾斜装置、汚泥かき寄せ機、集水トラフ等）に与える影響が大きい場合や、内容水の越流による周辺機械・電気設備への影響があるなどの場合があり、必要に応じて考慮する。

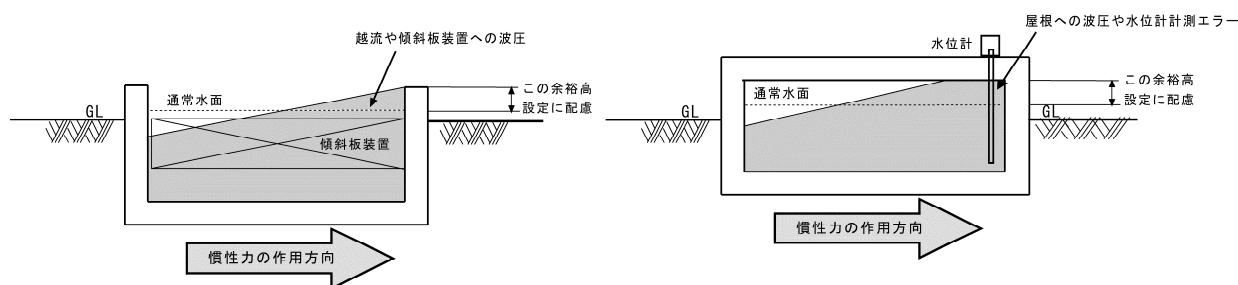


図3.48 液面揺動の例

(ウ) 地盤の液状化と側方流動

構造物を建設する地盤が地震時に液状化し、地表面の沈下、側方流動等の変状が予測される場合には、構造物の移動、傾斜、浮き上がり等の変位・変形が構造物の各種機能（貯留機能、浄水処理機能、通水機能等）に大きな影響を与える可能性があるため、必要に応じてこれらの影響を適切に考慮する。

地盤の液状化の有無と側方流動の考慮の有無は、指針に基づき判定し、地盤の液状化の可能性がある場合は、構造物－地盤連成モデルを用いた動的解析（有効応力解析）の適用を検討する。静的解析を行う場合は、一次元地盤の地震応答解析などにより、地盤変位量や加速度応答値などの各種地盤応答値を求め、その地盤応答値を解析モデルに静的に作用させる。

（詳細は、指針・参考資料編 p.315（参考資料 3-13 液状化判定と評価）参照）

ウ 慣性力の設定方法

慣性力は、構造物の自重及び勾配コンクリート、覆土等の固定荷重に設計水平震度を乗じて算定する。

エ 地震時土圧の設定方法

静的解析による耐震計算に用いる地震時土圧式は、修正物部・岡部式を用いる。（詳細は、09 年版指針・総論 p.63（3.1.6 地震時土圧）参照）

オ 地震時動水圧の設定方法

動水圧の主な算定式には、矩形水槽では実用的な計算式として、ウエスタガード原式に池幅と水深を考慮し、補正係数を乗じたウエスタガードの補正式を用いる。

（詳細は、09 年版指針・総論 p.67（3.1.7 地震時動水圧）参照）

カ 浮力又は揚圧力設定方法（下水道施設耐震計算例 処理場・ポンプ場編（第 2 版）p. 66（日本下水道協会 2015 年版）参照）

(1) 設計用計画地下水位の想定

設計用計画地下水位は、下記の 2 種類が想定される。

WL₁：地質調査等から得られる現在水位

（明らかに現在水位から水位上昇が予測される場合はその上昇水位とする）

WL₂：増設工事により低下が予測される水位（WL₂=底版下端）

(2) 浮力に対する安全性の確認

構造物に作用する揚圧力は原則として、最も不利となる水位（WL₁）による浮力とする。

浮力に対する安全性の確認は、以下の式により行う※1。

※1：構造物の断面検討時における地下水圧の算定は、地震時においても（1）の設計用計画地下水位を用いるものとする。

$$F_s = \frac{W}{U} = \frac{W + W_f}{V_w \times \gamma_w + V_l \times \gamma_l}$$

ここに、

F_s : 安全率 (常時、レベル 1 地震動 ≥ 1.20 、レベル 2 地震動 ≥ 1.00)

$\bar{W}$: 浮力抵抗力 $= W + W_f$ (kN)

U : 浮力 (kN)

W : 構造物本体の重量 (kN)

水槽の水位は、レベル 1 地震動では空水、レベル 2 地震動では満水とする

W_f : 構造物の側壁面での液状化層を除く部分の常時摩擦抵抗力 (kN)

単位摩擦力度は砂質土の場合 $5 \text{ N (kN/m}^2) \leq 200$ 、粘性土の場合 C または $10 \text{ N (kN/m}^2) \leq 150$

V_w : 構造物本体の非液状化層の地下水位以下の部分の体積 (kN/m³)

γ_w : 水の単位体積重量 (kN/m³)

V_l : 構造物本体の液状化層の位置にある部分の体積 (m³)

γ_l : 液状化した泥土の単位体積重量

(= 液状化層の湿潤単位体積重量 $16 \sim 20 \text{ kN/m}^3$)

キ 地盤変位振幅の算定方法 (応答変位法に使用)

(ア) レベル 1 地震動

参考資料編 p.234 (参考資料 3-4 地下構造物の設計速度応答スペクトルに基づく応答変位法) に準じて次に示す式により設定する。

$$U_h(x) = \frac{2}{\pi^2} S_v \cdot T_s \cdot K'_{hl} \cos \frac{\pi x}{2H}$$

ここに、

$U_h(x)$: 地表面からの深さ x (m) における地盤の水平変位振幅 (m)

x : 地表面からの深さ (m)

S_v : 基盤地震動の単位震度当たりの速度応答スペクトル (m/s)

09 年版指針・総論 p.196 (1.3.6 地中構造物の応答変位法による設計に用いる設計地震動 図-1.3.4)

T_s : 地震時の表層地盤の固有周期 (s) ($T_s = 1.25 \cdot T_G$)

K'_{hl} : 基盤面の設計水平震度 (= 0.15 : 09 年版指針・総論 p.193)

H : 表層地盤の厚さ (m)

なお、 T_G は、初期剛性 (平常時の初期 S 波せん断速度 V_s) から算出する (常時の) 地盤固有周期である。初期 V_s を求めるに当たり、PS 検層等の土質調査を行わなかった場合は、表 2. 11 のせん断ひずみ 10^{-6} 欄により N 値から求める。

(イ) レベル 2 地震動

方法 2 (地域防災計画の想定地震動) による場合は、一次元地盤応答解析結果を用いる。求める方法は、2. 4. 4 (5) 及び (6) を参照すること。このとき、初期 V_s の設定方法は、PS 検層等の土質調査を行って初期 V_s を求めた場合はその結果を用い、PS 検層等の土質調査を行わなかった場合は表 2. 11 のせん断ひずみ 10^{-6} 欄により N 値から求める。

方法 4 (97 年版指針の設計地震動) による場合は、指針参考資料編 p.234 (参考資料 3-4

地下構造物の設計速度応答スペクトルに基づく応答変位法)に準じて次に示す式により設定する。

$$U_h(x) = \frac{2}{\pi^2} S_v' \cdot T_G' \cos \frac{\pi x}{2H}$$

ここに、

S_v' : 基盤地震動の速度応答スペクトル (m/s)

09 年版指針・総論 p.197 (1.3.7 地中構造物の応答変位法による設計に用いる設計地震動 図-1.3.5) 参照

T_G' : 地震時の表層地盤の固有周期 (s)

方法 2 の一次元地盤応答解析の V_s の収束値から求めた T_G' を適用

ク 地震時周面せん断力の算定方法 (応答変位法に使用)

(ア) レベル 1 地震動

レベル 1 地震動の場合、地表面からの深さ Z における周面せん断力 τ は、指針参考資料編 p.234 (参考資料 3-4 地下構造物の設計速度応答スペクトルに基づく応答変位法式-参 3-42) を参考として次の式により算出する。

$$\tau = \frac{G_D}{\pi \cdot H} S_v \cdot T_s \cdot K'_{hl} \sin \frac{\pi Z}{2H}$$

ここに、

τ : 地表面からの深さ Z (m) における単位面積当たりの地震時周面せん断力 (kN/m²)

G_D : 表層地盤のせん断剛性 (kN/m²)

$$G_D = \rho V_s^2 = \gamma V_s^2 / g$$

V_s : 表層地盤のせん断弾性波速度 (m/s)

キ 地盤変位振幅の算定方法に準じる。

ρ : 地盤密度

γ : 地盤の単位体積重量 (kN/m³)

g : 重力加速度 (m/s²)

S_v : 基盤地震動の単位震度当たりの速度応答スペクトル (m/s)

09 年版指針・総論 p.196 (1.3.6 地中構造物の応答変位法による設計に用いる設計地震動 図-1.3.4) 参照

T_s : 地震時の表層地盤の固有周期 (s)

キ 地盤変位振幅の算定方法に準じ、 $T_s = 1.25 \cdot T_G$ とする。

K'_{hl} : 基盤面の設計水平震度 (=0.15 : 指針・総論 p.193)

H : 表層地盤の厚さ (m)

(イ) レベル 2 地震動

方法 2 (地域防災計画の想定地震動) による場合は、一次元地盤の地震応答解析結果を用いる。求める方法は、2. 4. 4 (5) 及び (6) を参照のこと。

方法 4 (97 年版指針の設計地震動) による場合は、次の式により算出する。

$$\tau = \frac{G_D}{\pi \cdot H} S_v' \cdot T_G' \cdot \sin \frac{\pi Z}{2H}$$

ここに、

S_v' : 基盤地震動の速度応答スペクトル (m/s)

09 年版指針・総論 p.197 (1.3.7 地中構造物の応答変位法による設計に用いる設計地震動 図-1.3.5) 参照

T_G' : 地震時の表層地盤の固有周期 (s)

キ 地盤変位振幅の算定方法 (イ) に準じる。

ケ 地盤ばねの設定方法

地盤ばねの算定は、道路橋示方書・同解説IV下部構造編 p.284 (日本道路協会、2017 年) に準拠して算定する。応答変位法に用いる地盤反力度 (土圧強度) は、次の式により算定する。

$$k = p / \delta$$

ここに、

k : 地盤反力度 (kN/m^3)

p : 地盤反力度 (土圧強度) (kN/m^2)

δ : 地盤変位 (m)

(5) 基礎の耐震計算

ア 耐震計算の方法

基礎の耐震計算の基本は、表 3. 1 2 による。

表 3. 1 2 基礎の耐震計算

解析手法 種別	基礎種別	当局における基本	方針根拠等
震度法	直接基礎	原則として、レベル 1 地震動に対して滑動、転倒及び支持力の照査を行う。	計算方法は、道路橋示方書に準拠する。
	杭基礎	応答変位法により杭の耐力照査を行う。 レベル 2 地震動では、非線形ばねを適用する。	計算方法は、道路橋示方書に準拠する。 レベル 2 地震動では、耐力に加え、塑性率及び変位を照査する。 (道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編 10.9 (日本道路協会、平成 29 年 3 月) 参照)
応答 変位法	直接基礎	原則として、レベル 1 地震動に対して滑動及び支持力の照査を行う。	計算方法としては、道路橋示方書に準拠
	杭基礎	応答変位法により杭の耐力照査を行う。	下水道施設の線状地中構造物における杭基礎設計の応答変位法を準用する。(下水道施設耐震計算例(処理場・ポンプ場編(日本下水道協会、2015 年))参照)

イ 荷重の取り方

通常、地震時においては、躯体、内容水の慣性力及び動水圧に対して、基礎の支持力、転倒及び滑動の検討を行うが、当局の池状コンクリート構造物は、地中深く設置することが多いので、地震時土圧及び浮力を考慮して検討する必要がある。

また、地形や地盤条件により側方流動の発生が予想される場合は、これを考慮しなければならない。ただし、側方流動の発生時は、地震動の主要動が終了していると考えられることから、流動化の影響と慣性力は、同時に作用させなくてよい。

なお、杭基礎照査におけるレベル 2 地震動の設計水平震度は、 $C_s=1.0$ として作用させる。受働側の地盤反力度を考慮した荷重の取り方例を図 3. 4 8 に示す。

地震時地盤反力度については、道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編 p.232 (10.3 荷重分担) (日本道路協会、平成 29 年 3 月) に示すフーチング根入れ部の地盤抵抗を考慮する杭基礎に準拠する。このとき、池状コンクリート構造物周辺の地盤が良質で、かつ、周辺の埋戻土をフーチング上面まで十分締め固めることで設計上受働側の抵抗が期待できる場合は、この抵抗を考慮して設計を行う。通常、杭基礎は、水平荷重に対して杭のみで抵抗するのが一般的であるが、当局の池状コンクリート構造物の場合、地中深く、かつ、大規模なものが多いため、地震時における土圧の影響も大きいことから、このようなことも考慮して設計をする。なお、フー

チング根入れ部前面の水平抵抗の求め方は道路橋示方書Ⅳ下部構造編 p.416 (12.8 特殊な条件における杭基礎の設計) (日本道路協会、平成 24 年 3 月) に記載されており、現行版からは削除されている。

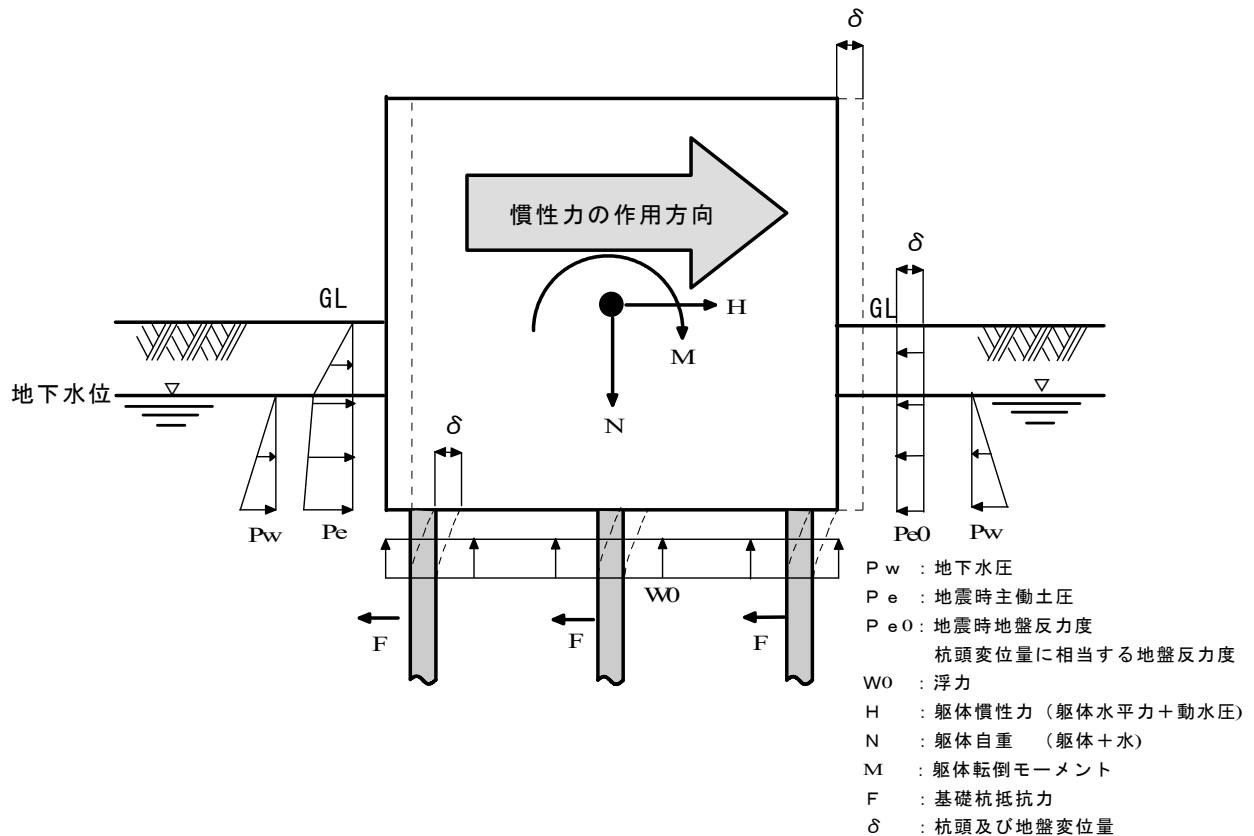


図 3. 4 9 基礎杭設計の荷重図例

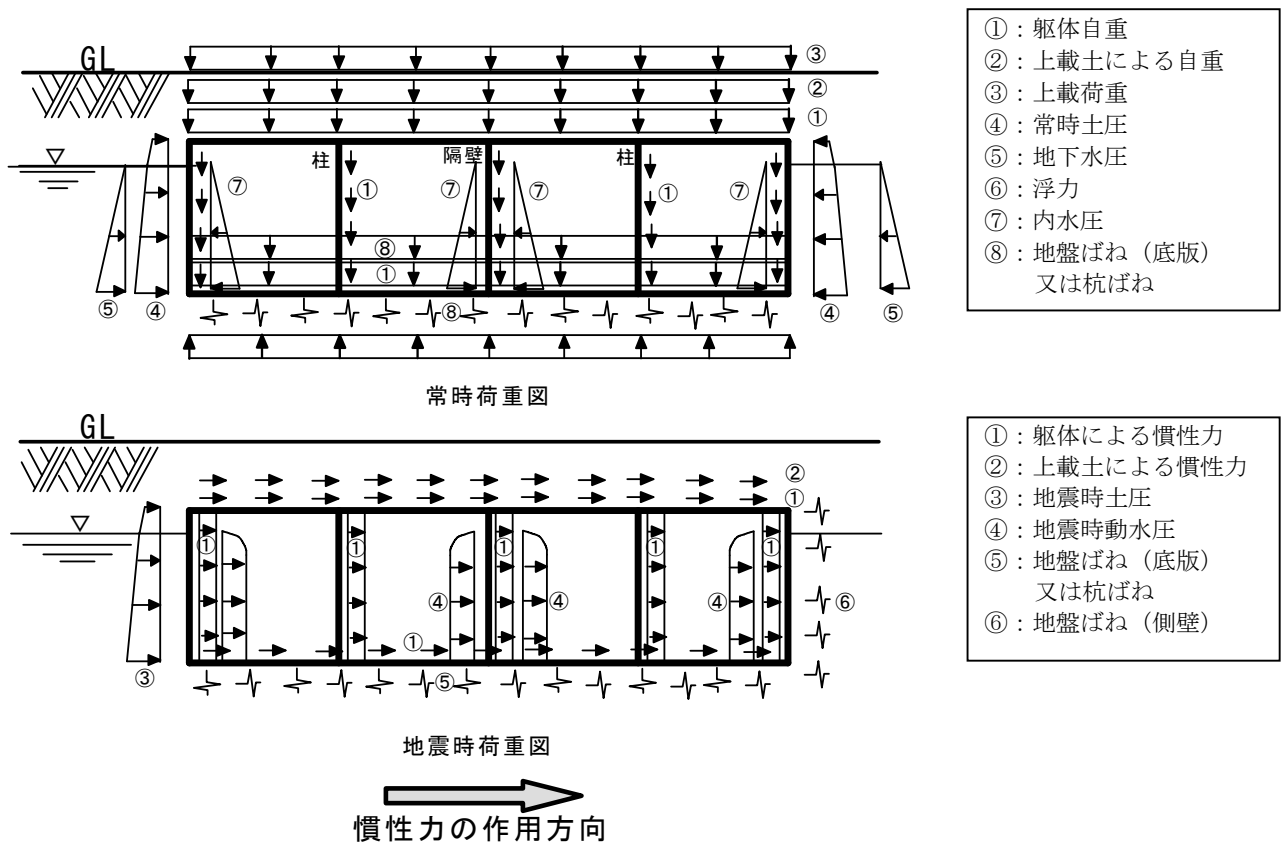
ウ 留意点

池状構造物の特徴として、内容水を貯える水槽と、これに附帯する共同溝（水渠）、連絡管路等の附帯物との変位差が水道システム全体の機能に影響を与えることが挙げられる。このため、設計に当たっては、池状構造物と共同溝（水渠）、管路等との挙動の違いも十分考慮する。

図 3. 4 9 に示す変位量 (δ) については、構造物の形状や、接続される主要構造物（水渠、配管、管廊等）への影響（EXP.J への影響）を考慮して設定する。

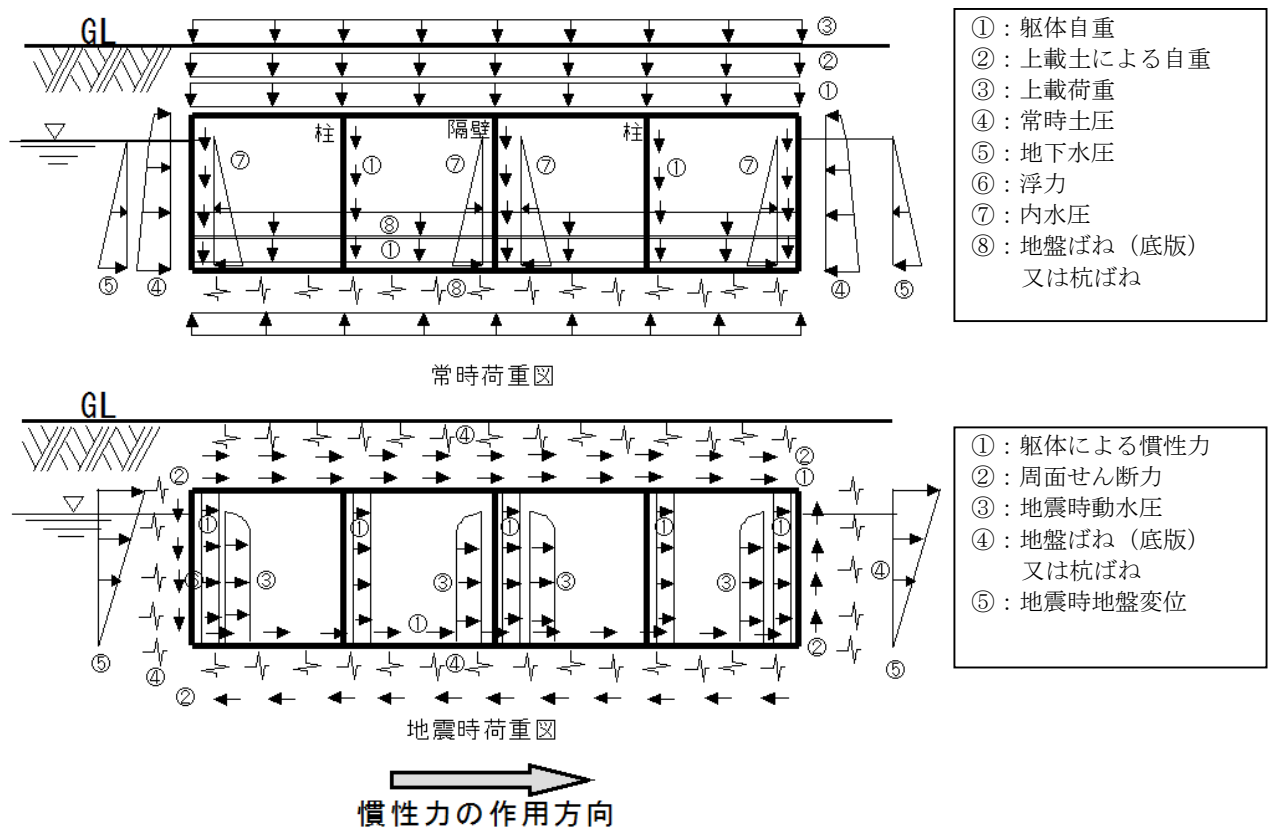
また、やむを得ず異種基礎を併用する場合又は異種基礎間に伸縮目地があるなどの場合は、基礎の種類の違いによる地震時の応答の違いを前もって動的解析等により検討することが重要である。

(6) 地震時荷重のとり方（例）



・土圧	修正・物部岡部式を採用
・動水圧	ウエスタガード式を採用
・地盤ばね、杭ばね	道路橋示方書・同解説Ⅳ下部工編（日本道路協会、平成 29 年 11 月）の式を採用
・浮力	地震時は、非液状化層、液状化層で区分して浮力を算定 （下水道施設耐震計算例 処理場・ポンプ場編（第 2 版）（日本下水道協会、2015 年））

図 3. 50 地震荷重のとり方例（震度法）



・ 地震時地盤変位	レベル1 地震動	： 3. 3. 4 (4) キ 地盤変位振幅の算定方法による。
	レベル2 地震動	{ 方法2※：地盤応答解析の地盤変形を採用する。 方法4※：3. 3. 4 (4) キ 地盤変位振幅の算定方法による。
・ 動水圧	震度法と同様	
・ 地盤ばね、杭ばね	震度法と同様	
・ 周面せん断力	レベル1 地震動	： 3. 3. 4 (4) ク 地震時周面せん断力の算定方法による。
	レベル2 地震動	{ 方法2※：地盤応答解析によるせん断応力を用いる。 方法4※：3. 3. 4 (4) ク 地震時周面せん断力の算定方法による。
・ 浮力	震度法と同様（下水道施設耐震計算例 処理場・ポンプ場編（日本下水道協会、2015年）の方法参照）	

※ 方法2：地域防災計画の想定地震動、方法4：97年版指針の設計地震動

図3. 5.1 地震荷重のとり方例（応答変位法）

(7) 解析モデル作成時の留意点

ア セン断力の位置及び剛域、ハンチ

当局の池状構造物の構造解析は、ラーメン形式であることから、コンクリート標準示方書 p.125 (5.2 ラーメンの構造解析) (土木学会、2022 年) に従う。

(ア) セン断力の照査位置

部材端の断面の検討に用いるせん断力は、柱に対して、はりの上下面におけるせん断力とし、はりに対しては柱前面から柱前面断面の部材高さの 2 分の 1 だけ離れた位置のせん断力とする。ただし、断面計算において、ハンチは 1 対 3 より緩やかな部分を有効とする。

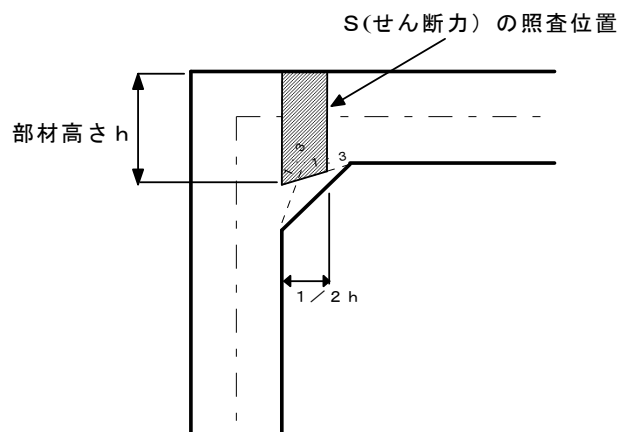


図 3. 5 2 セン断力の照査位置

(イ) 剛域の設定

解析に当たっては、節点部及びハンチ部に剛域を考慮することを原則とする。

- ハンチがない場合には、部材端から部材高さの 4 分の 1 入った断面より内部を剛域とする (図 3. 5 3 (a))。
- 部材がその軸線に対して 30° 以上傾斜するハンチを持つ場合には、部材高さが 1.5 倍となる断面より内部を剛域とする。ただし、ハンチの傾斜が 60° 以上の場合は、ハンチの起点から部材高さの 4 分の 1 入った断面から内部を剛域と考えるものとする (図 3. 5 3 (b))。
- 左右のハンチの差により b で定めた点が 2 点以上となる場合には、剛域が大きくなる方の点を選ぶ。

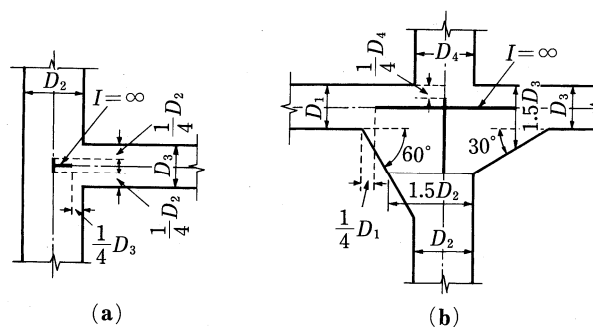


図 3. 5 3 剛域

出典：コンクリート標準示方書 p.128 (土木学会、2022 年)

(ウ) ハンチの取扱い

構造物の隅角部にハンチを設ける場合は、ハンチ部の断面の検討において部材の有効高さ、ハンチを考慮してよい。この場合の部材高さは、1対3より緩やかな傾きの部分だけを有効高さとする。

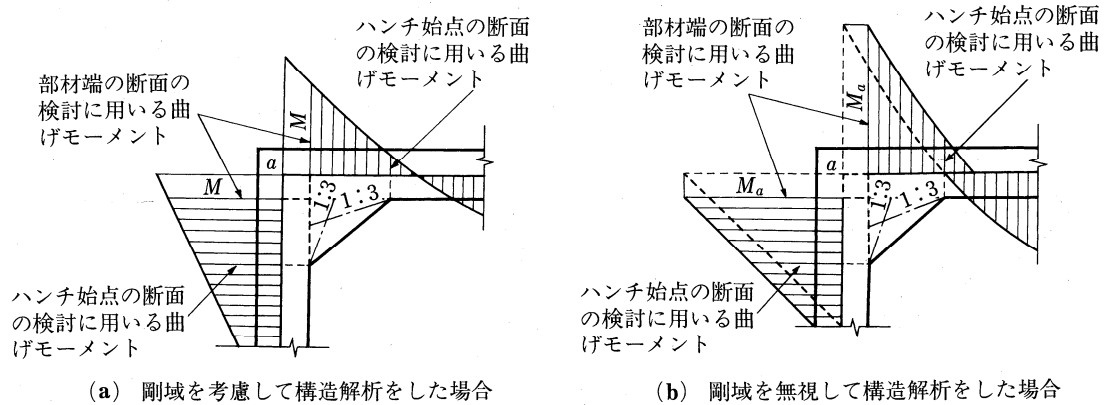


図3. 5 4 部材端の断面の検討に用いる曲げモーメント

出典：コンクリート標準示方書 p.125（土木学会、2022 年）

イ ディープビームの場合のせん断耐力の照査

ディープビーム機構（単純ばり $I/h < 2.0$ 、 I ：はりのスパン、 h ：はりの高さ）によってせん断耐荷力が発揮される場合は、設計せん断圧縮破壊耐力に対する照査を行ってもよい。詳細は、コンクリート標準示方書 p.120（3.5 ディープビーム）（土木学会、2022 年）を参照のこと。

ウ 等価せん断スパンを用いたせん断耐力の算定

分布荷重が作用する両端固定の部材は、曲げモーメント分布よりせん断スパンを設定し（等価せん断スパン）、棒部材またはディープビームとしてせん断耐力を算定すること。

なお、一般には棒部材のせん断耐力式の方が安全側の値となるため、新設時にはディープビームの検討を省略し、棒部材のせん断耐力式を採用してよい。

詳細は、コンクリート標準示方書 p. 195～197（2.4.3 せん断力に対する照査）（土木学会、2022 年）を参照のこと。

3. 4 性能の照査

3. 4. 1 総則

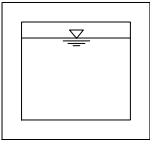
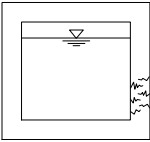
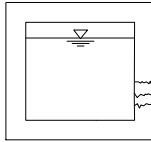
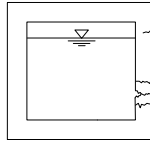
当局施設の要求性能は、設計地震動と重要度の区分により設定される（2. 2 参照）。

各要求性能に対する限界状態は、次のとおりとする。

- （1）使用性を満足する限界の状態である限界状態 1 は、水密性および水道施設としての機能が損なわれていない限界の状態とする。
- （2）復旧性を満足する限界の状態である限界状態 2 は、局所的にわずかに水密性が損なわれ、部分的に水道施設としての機能低下が生じるが、速やかに機能回復できる限界の状態とする。
- （3）安全性を満足する限界の状態である限界状態 3 は、人命、周辺施設などに重大な影響を及ぼさず、機能の早期回復が可能な限界の状態とする。

性能の照査は、設計地震動によって施設の各部材に生じる損傷状態が設定した当該部材の限界状態を超えないことを照査することにより行う。限界状態、損傷状態及び照査用限界値と要求性能との関係を表 3. 13、図 3. 55 に示す。設定した要求性能及び対象とする地震動に応じて、照査用限界値を定めるものとする。

表 3. 13 要求性能と限界状態、損傷状態、照査用限界値

要求性能	使用性	復旧性	安全性
限界状態 *1	限界状態 1 (降伏耐力以下)	限界状態 2 (最大耐荷力以下)	限界状態 3 (終局変位以下、せん断耐力以下)
損傷状態	  表面ひび割れ等の軽微なひび割れが生じる場合があるが、水密性が維持できる状態。	 貫通ひび割れが生じ、水密性が損なわれる場合があるが、一部のひび割れ補修や止水版の設置などにより修復できる状態。	 貫通ひび割れからの漏水が継続的に生じ、水密性が大きく損なわれる場合があるが、漏水に伴う二次災害は生じない状態。ひび割れ補修や部材の取り換えなどにより修復できる状態。
レベル 1 地震動	ランク A	—	—
レベル 2 地震動	—	ランク A	—
照査用 限界値 *2	静的 解析	応力度 ≤ 許容応力度	断面力(曲げ) ≤ 最大曲げ耐力 断面力(せん断) ≤ せん断耐力
	動的 解析	曲率 ≤ 降伏曲率 断面力(せん断) ≤ せん断耐力	曲率 ≤ 最大耐荷力点の曲率 断面力(せん断) ≤ せん断耐力

*1：限界状態 …… 限界状態は、構造物を構成する各部材の損傷状態が各部材の限界状態に収まることを照査することによって評価してよい。

*2：照査用限界値 …… 伸縮目地の照査に関しては、止水板などの止水構造が保証する止水可能な変形量などがある。ここで、各構成部材の照査用限界値は、構造物全体系で統一する必要はなく、構造物全体系としての要求性能に応じて構成部材ごとに異なった限界値を定めてよい。

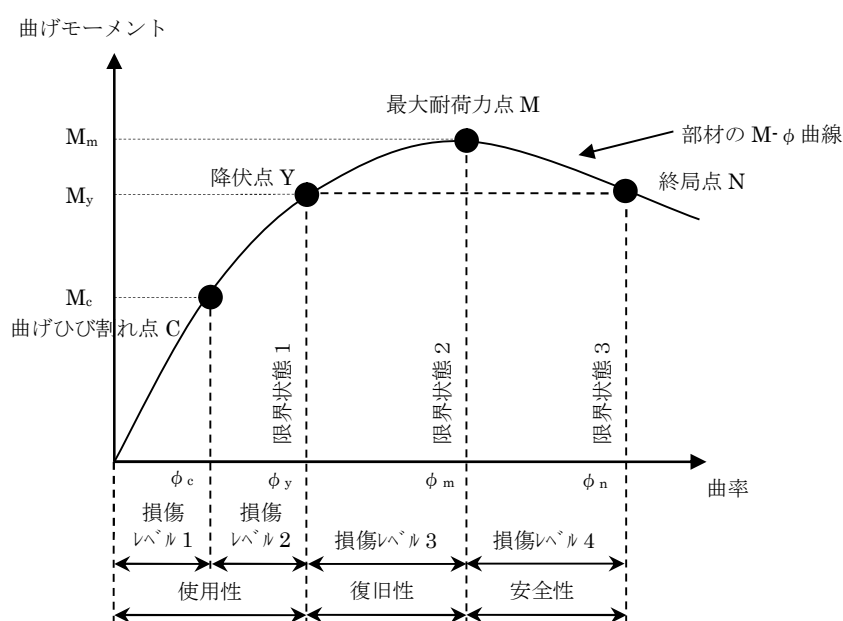


図 3. 5 5 要求性能と限界状態、損傷状態*1 との関係

*1：損傷状態は次の 4 つのレベルに区分される。（指針参考資料 1-7 p.87 参照）

損傷レベル 1：曲げひび割れ発生前の無損傷の状態

損傷レベル 2：曲げひび割れ発生後、鉄筋初降伏に達する前の損傷状態

損傷レベル 3：鉄筋降伏経過後、最大耐力点に達する前の損傷状態

損傷レベル 4：曲げ耐力点経過後、初降伏荷重を保持できる状態の損傷

3. 4. 2 限界値の設定方法

（1）部材の限界状態

各部材の限界状態は、表 3. 1 4 に示すとおりとする。

表 3. 1 4 各部材の限界状態

水道施設	部材	限界状態 1	限界状態 2	限界状態 3
池状コンクリート構造物	本体工部材	構造物を構成する部材が概ね弾性変形状態にあり、コンクリートの表面に軽微なひび割れが発生するものの、水密性が維持できる状態。	構造物を構成する部材の一部が塑性化するものの最大耐力点まで達しない状態であって、コンクリートに貫通ひび割れが生じ、水密性が損なわれる場合があるが、ひび割れ補修などにより修復できる状態。	構造物を構成する部材の多くが塑性化し、コンクリートの貫通ひび割れから漏水が継続的に生じて水密性が大きく損なわれる場合があるが、構造物全体として鉛直荷重を支持できる状態。加えて、構造物からの漏水による二次被害が生じず、部材の取り換えなどを伴うものの、修復できる状態。
	基礎工	基礎が塑性化せず、沈下、浮上および傾斜等の変状が生じずに、地震後も継続しうでる状態。	構造物の沈下、浮上及び傾斜が生じる場合があるが軽微であり、基礎（地盤、杭）の復旧工事を必要とせず、構造部材などの応急復旧により修復できる変位の状態。	基礎の多くが塑性化するが、基礎全体として鉛直荷重を支持でき、塑性化に伴う転倒や崩壊および越流水による二次被害は生じない状態。さらに、構造物基礎（地盤、杭）の復旧工事を必要とせず、構造部材などの応急復旧並びに本復旧により早期に修復できる状態。

(2) 限界状態 1 の照査用限界値

限界状態 1 の照査用限界値は、許容応力度設計法に基づき、鉄筋コンクリートの許容応力度により設定する。地震時の許容応力度には、常時の許容応力度を 1.5 倍割増して用いるものとする。

(3) 限界状態 2 の照査用限界値

限界状態 2 の照査用限界値は、限界状態設計法に基づき、曲げ損傷について最大曲げ耐力又は最大耐荷力点の曲率を、せん断破壊についてせん断耐力を設定する。

せん断耐力の算定には、コンクリート標準示方書に示される「棒部材のせん断耐力式」を用いる。ただし、部材条件や荷重条件等によって、同式ではせん断耐力が過小評価される場合があるため、条件に応じて適切なせん断耐力式を適用する必要がある。

3. 4. 3 照査方法

(1) 耐震性能

ア 曲げ損傷

曲げ損傷に対する照査は、次式により判定する。

$$\gamma_i \cdot \frac{S_d}{R_d} \leq 1.0$$

ここに、

S_d : 照査応答値 (発生曲げモーメント M_d 、発生曲率 ϕ_d)

R_d : 照査限界値 (最大曲げ耐力 M_{ud} 、最大耐荷力点における曲率 ϕ_{md})

イ せん断破壊

せん断破壊に対する照査は、次式により判定する。

$$\gamma_i \cdot \frac{V_d}{V_{yd}} \leq 1.0$$

ここに、

V_d : 設計せん断力

V_{yd} : せん断耐力

γ_i : 構造物係数

(2) 破壊モードの判定

部材の破壊モード (破壊形態) には主に、曲げ破壊モードとせん断破壊モードがある。地震の影響により被害を受けても、脆性的な破壊を防止するとともに、部材のじん性を確保するためには、せん断破壊モードを回避して曲げ破壊モードとすることが重要である。

当局施設の新設設計、耐震診断及び補強設計では、表 3. 15 に示すとおり破壊モードの判定を行うものとし、判定方法については指針・参考資料編 p. 306「参考資料 3-10 鉄筋コンクリート部材の破壊モードの判定方法」を参照する。また、破壊モード判定については危機耐性

への対応（3. 5）についても参照のこと。

表 3. 1 5 破壊モードの判定の扱い方

区分		判定位置		破壊モード判定の扱い
新設設計		線形	部材端部	破壊モード判定を実施し、曲げ破壊モードとなることを確認する。
		非線形	塑性ヒンジが発生する箇所	同上
既設	耐震診断時	線形	部材端部	同上
		非線形	塑性ヒンジが発生する箇所	同上
	補強設計時	線形	部材端部	破壊モード判定を実施する。破壊モードに対する補強については、施設の重要度、構造特性、施工性、経済性などから総合的に判断し、実施の有無や実施時期を判断*1する。
		非線形	塑性ヒンジが発生する箇所	同上

*1：破壊モードの補強判断 … 破壊モードがせん断破壊モードの場合、曲げ破壊モードとなるよう補強を行うことが望ましい。ただし、実際には大規模な設備の移転が必要となる場合や、工事中の運用停止が困難な場合、補強費用が高額となる場合などがあり、そのような場合には施設の重要度、構造特性、施工性及び経済性等を踏まえて対策実施の可否や実施時期を判断することが望ましい。なお、指針・参考資料編 p.306 には、「池状コンクリート構造物に多い壁式構造では、柱や梁などの棒部材で構成されるラーメン構造に比べて不静定次数が高く、一般に構造系全体の脆性的な破壊は生じにくい。」と記述されており、これも参考にするとよい。

（3）安全係数

照査に用いる安全係数と材料修正係数の標準値を表 3. 1 6 に示す。損傷状態に応じて、適切に使い分ける。

なお、本表は、09 年版指針・総論 p.120（表-3.4.3 標準的な部分安全係数の例）を基に、当局の標準として設定したものである。

表 3. 1 6 照査に用いる安全係数と材料修正係数

損傷状態		材料係数 γ_m		部材係数 γ_b	構造解析係数 γ_a	荷重係数 γ_f	構造物係数 γ_i	鉄筋強度の材料修正係数 ρ_m
		コンクリート γ_c	鋼材 γ_s					
曲げ損傷	応答値	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	限界値	1.3	1.0	1.0	—	—	1.0	1.0
せん断破壊	応答値	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	線形解析：1.0 非線形解析：1.2
	限界値	1.3	1.0	コンクリート：1.3 鉄筋：1.1	—	—	1.0	1.0

3.5 危機耐性への対応

3.5.1 本ガイドラインにおける危機耐性の位置付け

(1) 危機耐性の定義

危機耐性是指針において新たに導入された水道施設に求められる要求性能の一つである。指針では、「安全性で定義した事象を超えて安全性が損なわれた場合に、水道施設が危機的な状況に至る可能性を小さくする性能」と定義されている（図3.56）。すなわち、耐震設計においては、設定したレベル1地震動やレベル2地震動に対して、これらの地震動に対する使用性、復旧性及び安全性を確保するように設計するが、レベル2地震動を超えるような想定外事象に対しては危機耐性を確保することで、危機的な状況を回避することが求められている。

指針では、水道施設の危機的な状況として、次のような状況が例示されている。

- | |
|------------------------------------|
| ① 水道施設の被害及びそれによる二次災害によって人命が脅かされる状況 |
| ② 運搬給水等も含めて、飲料水の供給が停止する状況 |
| ③ 給水が長期間停止する状況 |

事象	設計で設定する地震動、津波、風水害		要求性能の安全性で定義した事象を超える事象
	レベル1	レベル2	
施設の対応	従来の耐震設計や浸水対策で安全性、復旧性や使用性を確保		危機耐性による対応

図3.56 危機耐性の概念

(2) 危機耐性で考慮すべき対象事象

危機耐性における被災シナリオの検討対象災害は地震、津波、風水害及びこれらの複合災害が想定される。水道施設の設計においては、地震以外のこれらの事象についても危機耐性に対する検討が必要となる。一方、本ガイドラインは構造物の耐震設計に関する指針を定めたものであり、津波や風水害等への検討はその範疇を超えることから、本ガイドラインでは地震による影響のみを対象とし、それ以外の災害は別途検討する（表3.17）。なお、地震により生じる液状化に伴う地盤変状は、危機耐性で考慮すべき事象に含むものとする。

表3.17 危機耐性で考慮すべき事象と本ガイドラインの対象

主な災害事象	本ガイドラインの対象
地震（地盤変状含む）	対象
津波	別途検討
風水害	別途検討
土砂崩れ	別途検討
大規模停電	別途検討
上記の複合災害	別途検討

(3) 本ガイドラインで記載する範囲

本ガイドラインでは、指針で示されている危機耐性への対応段階(図3. 57)のうち、個々の施設での対応範囲のみを対象とし、事業全体での対応や浄水場、配水場など施設全体での対応が必要な範囲は別途検討する。

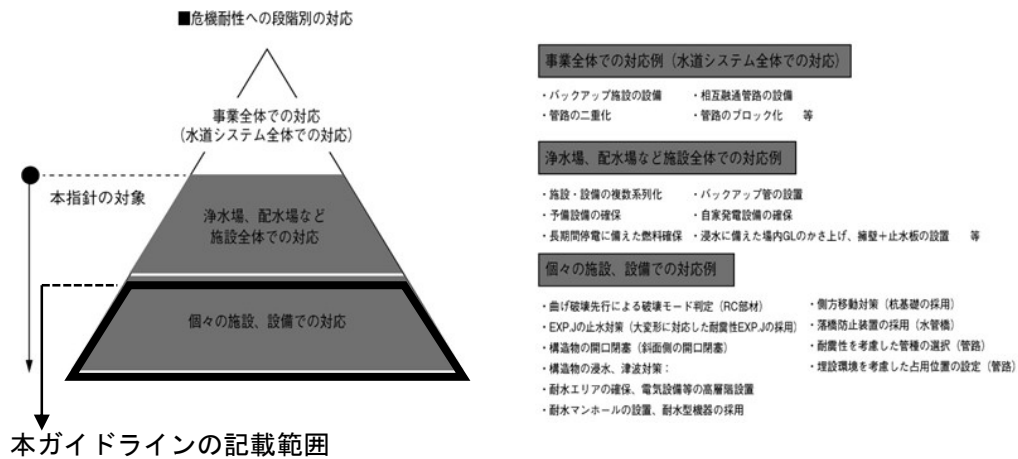


図3. 57 本ガイドラインで記載する危機耐性の範囲

出典：指針・総論 p. 30（日本水道協会、2022年）に加筆

3.5.2 危機耐性に関する設計手順

(1) 検討フロー

本ガイドラインに基づく新設設計又は耐震診断・耐震補強設計では、図3. 58に示す検討フローに基づき危機耐性に関する検討を行う。

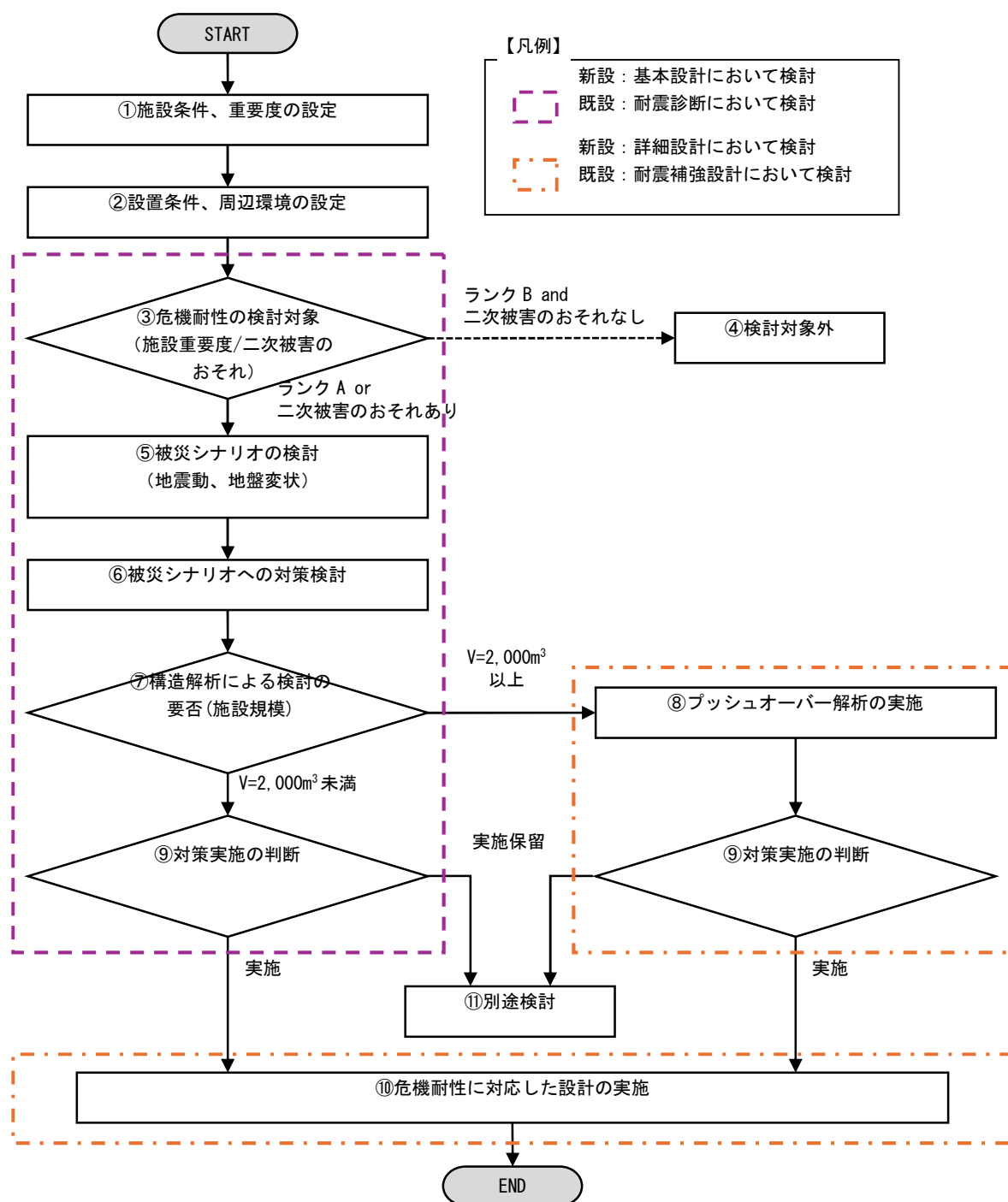


図 3. 58 危機耐性に関する検討フロー

① 施設条件、重要度の設定

対象施設における施設条件及び重要度を設定する。

② 設置条件、周辺環境の設定

施設の設置条件及び周辺環境（地盤・河川沿い・山腹周辺等）を設定する。

③ 危機耐性の検討対象 / ④ 検討対象外

本ガイドラインでは、施設重要度のランクと施設が破損した場合の二次被害のおそれの有無に応じて、危機耐性の検討対象施設か否かを判断する。施設重要度がランク A の施設及び、ランク B の施設のうち重大な二次被害（住民の人命や財産、周辺の生活環境等への重大な被害）を生ずるおそれが高いものは、危機耐性の検討対象とする。それ以外のランク B の施設は危機耐性の検討対象外とする。

なお、当局では原則として全ての施設をランク A1 と位置付けているため、全ての施設が検討の対象となる。

⑤ 被災シナリオの検討

被災シナリオの検討では、設計事象（想定）を超える地震動・地盤変状について、過去の被災事例等を踏まえて、対象施設で考えられうる被災の状況や施設機能への影響を検討する。検討に当たっては、指針・参考資料編の「参考資料 1-8」、指針・設計事例編の「構造物事例 1」や「構造物事例 6」などが参考になる。

⑥ 被災シナリオへの対策検討

設定した被災シナリオに対して、その被災自体を生じさせない、または被災により生じる被害を低減するための対策を検討する。対策については、過去の設計事例を参考にするほか、施設の立地条件や周辺環境等を考慮して検討する。詳細は 3. 5. 3 を参照のこと。

⑦ 構造解析による検討の要否

⑥ で設定した被災シナリオに対して、構造解析（プッシュオーバー解析）による検討が必要な場合と、構造解析による検討を必要としない場合に区分する。区分の判断については、施設が被災した場合の影響度合いや建設場所などの条件によって施設個々で判断されるべきだが、当局では設計実務における煩雑さを考慮し、原則として高度な解析（動的解析）の適用区分にあわせて、有効容量 2,000m³ 以上の施設を検討の対象とする。

なお、条件を踏まえた設計者の判断により、2,000m³ 未満の施設であっても、プッシュオーバー解析による検討を行うことは妨げない。

⑧ プッシュオーバー解析の実施

プッシュオーバー解析を実施し、損傷過程や変形状態を確認するとともに、設計地震力に対する裕度を把握する。

⑨ 対策実施の判断

⑥ 及び ⑧ の検討結果を踏まえて、危機耐性に関する対策の実施の要否を判断する。

なお、複数の被災シナリオが想定される場合はそれぞれの被災シナリオに対する対策について実施の要否を判断する。

対策実施の判断については、初めに、危機耐性への段階別の対応（図 3. 5 7）として、事業全体での対応、浄水場や給水所など施設全体での対応を検討する。個々の施設での

対応の要否の判断では、当局における対象施設の重要性や影響度、対策費用、事業期間等を考慮して個別に検討することとする。

⑩ 危機耐性に対応した設計の実施

実施対象となる対策に関する詳細設計を実施する。

⑪ 別途検討

実施対象外となった対策については、耐震設計における危機耐性の対応を行わないこととし、事業全体や施設全体で二重化やバイパス化等の対応を別途検討する。

(2) 構造解析による危機耐性の検討

構造解析による危機耐性の検討では、指針・参考資料編の「参考資料 1-7」に基づき、プッシュオーバー解析（静的非線形解析）を用いた検討を行う。

プッシュオーバー解析では、損傷状態が限界状態 3 を超過し、安全限界を超える変形状態までの損傷過程を確認するとともに、設計地震動に対する構造物が保有する裕度や変形状態等の把握を行う。解析結果を踏まえて、損傷過程に応じた構造物の破損に関する被災シナリオや危機耐性に対する対策の検討を行う。

プッシュオーバー解析は二次元モデルで行うことを標準とし、その際の検討断面は動的解析における検討断面と同様の主要断面とする。

プッシュオーバー解析による解析結果は次のア及びイに示す事例を参考に整理する。

ア 損傷過程と設計地震動に対する裕度の確認

プッシュオーバー解析における損傷過程と設計地震動に対する裕度の確認例を図 3. 5 9 に示す。構造物の安全限界（図中の f）である変形状態（層間変形角 1/100）を超え、頂板の水平変位が 1.5 倍となる段階（図中の g）まで変形させ、対象施設の損傷過程（構造物がどのように崩壊するのか、どこの部材が弱点となるか）を確認する。

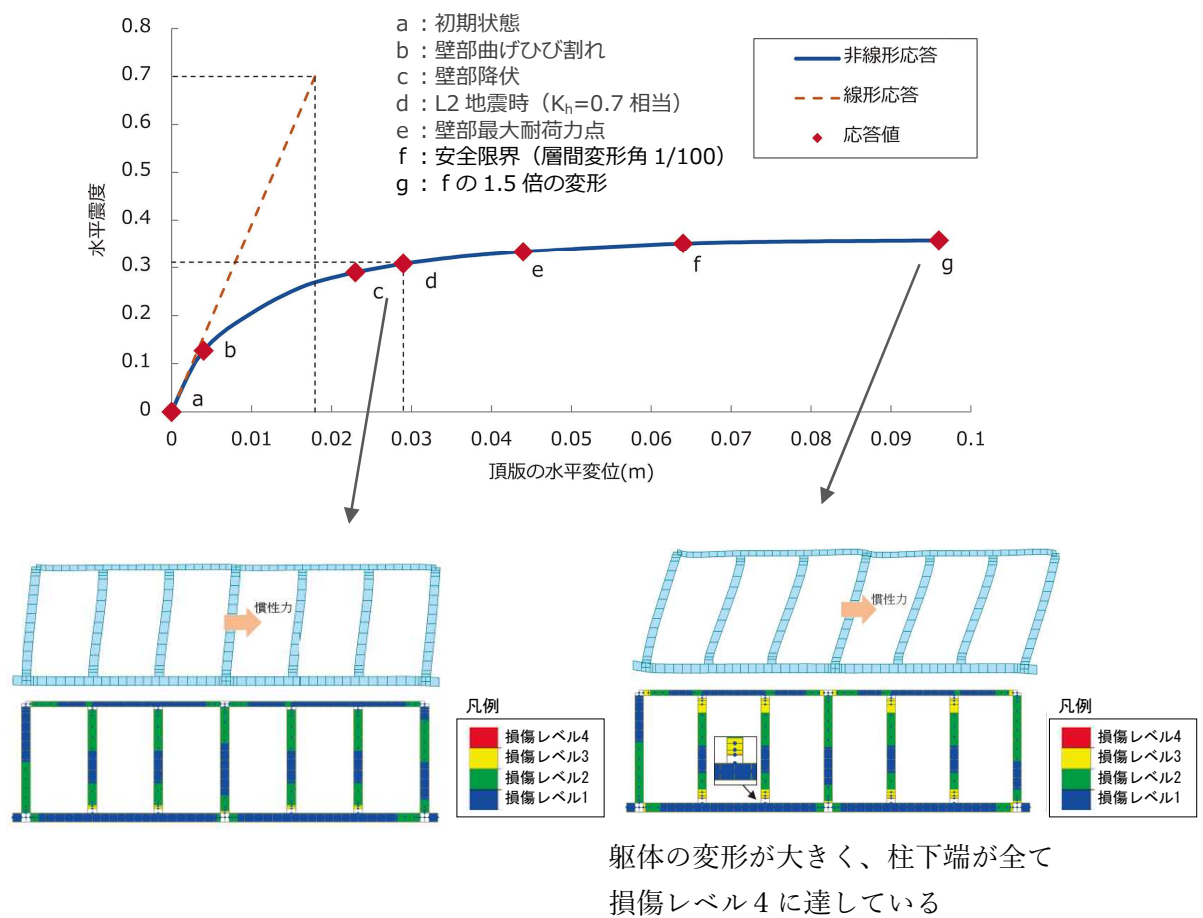


図3. 59 損傷過程と設計地震動に対する裕度の確認例

出典：指針・参考資料編 p. 91（日本水道協会、2022 年）に加筆

イ 変形状態・損傷状態の確認

前項アの損傷段階（g）における変形状態及び損傷状態の確認例を図3. 60に示す。この例では、すべての柱の下端において復旧性を超過して損傷レベル4に達し、構造物の変形が大きくなり構造物全体の安定性が保持されていない状態である。この結果から、設計事象を超えた地震動の作用によって大きな変形が生じた場合に、構造物がどのように崩壊し、どの部材が弱点となるかを確認する。

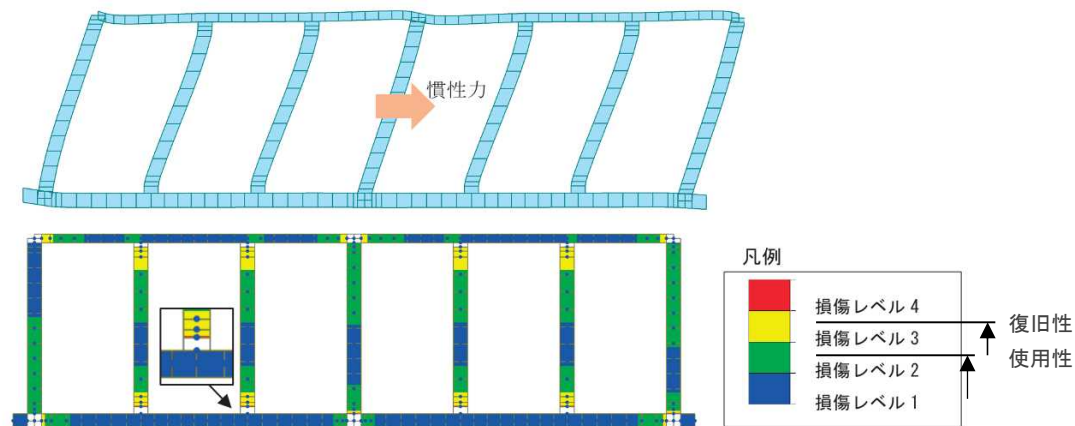


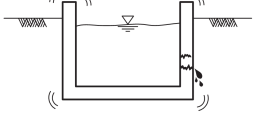
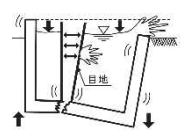
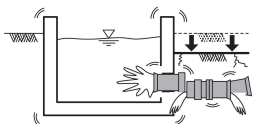
図3. 60 プッシュオーバー解析による変形状態の確認例

出典：指針・参考資料編 p.83（日本水道協会、2022 年）に加筆

3.5.3 被災シナリオに対する危機耐性への対策例

被災シナリオに対する危機耐性への対策例を表3. 18に示す。設計に当たっては本表のほか、指針・参考資料編の「参考資料 1-5」、指針・設計事例編の各事例を参考に、施設の特長や設置環境等を踏まえて適切に検討する。

表3. 18 被災シナリオに対する危機耐性への対策例

被災シナリオ	被害概要	対策例
地震作用による構造物の耐力超過 	大きな地震作用（揺れ、地盤変位）により、浄水場・配水場等の構造物が損傷する。 せん断破壊の発生による構造物の破損が生じる。	構造物の変形性能に対する裕度の確保 曲げ破壊モードの確保（せん断補強鉄筋の適切な配置）
地震作用による構造物の変形の増大 	目地部の損傷による漏水、構造部材にひび割れ、構造物に変形が発生する。	構造物の一体化（EXP. J を設置しない） 耐震性 EXP. J の採用
地盤変状による構造物取合い管路の脱管 	大きな地震作用により地盤変状が発生し、構造物取合い管路が破断。流出水により池内水位の急激な低下が発生する。	伸縮可とう管の設置（偏芯量の裕度の確保）

出典：指針・設計事例編 p. 3)-22、26、27（日本水道協会、2022 年）を基に作成