

東京都水道局耐震設計ガイドライン

概 要 版

平成 25 年 7 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
第2章 耐震設計の基本.....	2
2. 1 耐震設計の手順.....	2
2. 2 水道施設の重要度に応じた耐震性能の設定	2
2. 3 土質調査	3
2. 4 設計地震動.....	7
第3章 池状構造物の耐震計算法	14
3. 1 総説.....	14
3. 2 静的解析	23
3. 3 動的解析	25
3. 4 耐震性能の照査.....	29

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 2009」（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^よ拠り所となる事項及び留意点を示したものである。

将来は、指針で目標とされる次のような性能設計に基づく高度な設計を見据えていきたい。

- (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。

当面、当局では、本書を活用して耐震設計における動的解析等の経験を蓄積していくこととする。

1. 2 適用の範囲

本書は、主に当局池状構造物を対象とする。

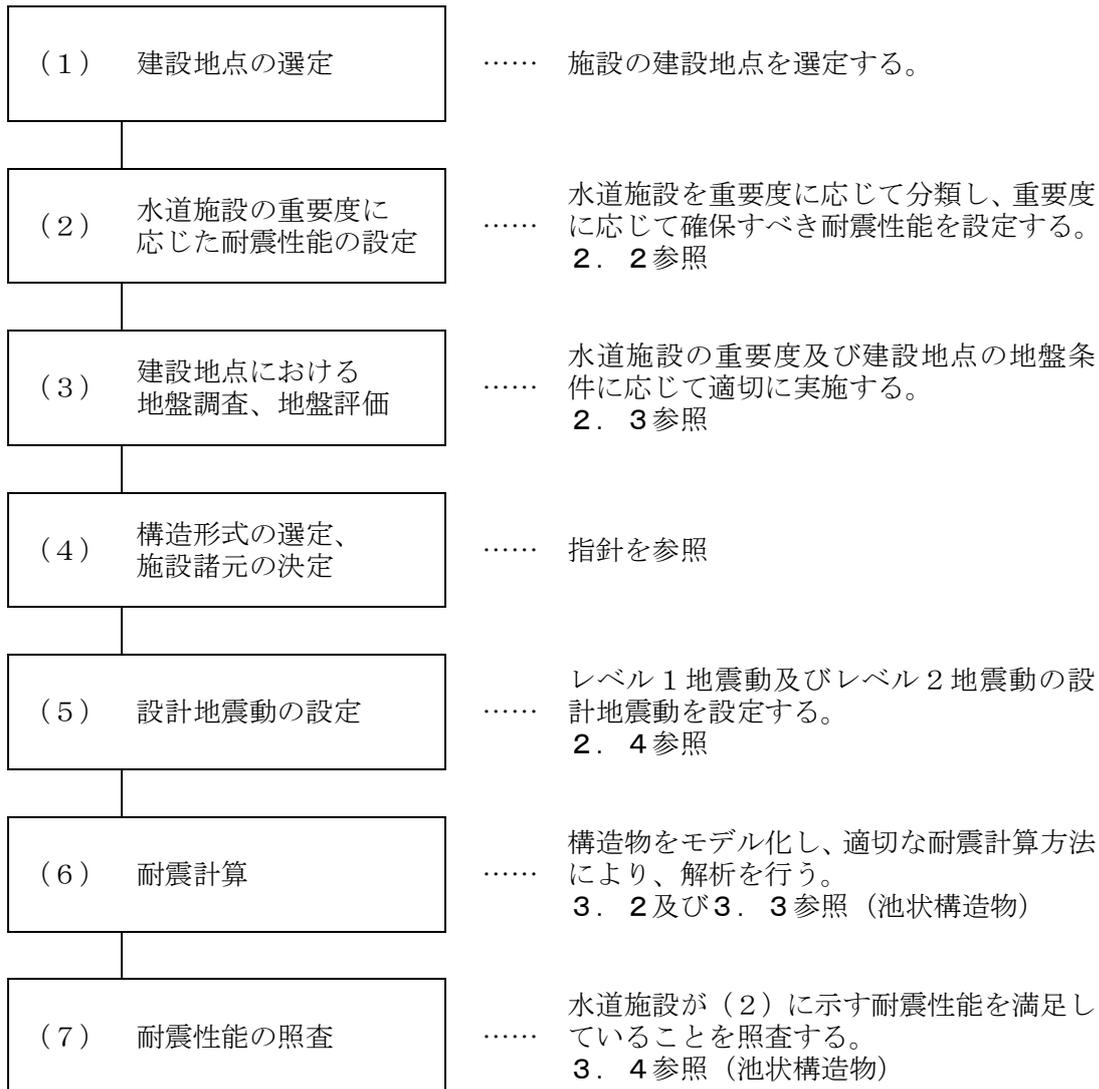
なお、地上水槽、立坑及び暗渠などの池状構造物以外の構造物においても、設計地震動設定の基本的な考え方、動的解析の適用及び各種解析の詳細について、本書を参照することができる。ただし、池状構造物以外の構造物については、固有周期、施設配置状況及び地震被害の特徴が池状構造物と異なることから、その影響を考慮し、本書のほか指針・他基準類を参照の上、設計すること。具体的には、設計地震動設定において構造物の固有周期を考慮すべきこと、解析において「地震の影響」「耐震計算法」及び「耐震性能の照査」は、指針・総論 3.3、3.4.4 から 3.4.6 までを参照すべきことなどが挙げられる。

第2章 耐震設計の基本

2.1 耐震設計の手順

水道施設は、当該施設の重要度に応じて保持すべき耐震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耐震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

なお、既設構造物の耐震診断・耐震補強設計の場合は、図2.1において、「(1) 建設地点の選定」に替えて「(1) 施設の現況調査」、(7) 耐震性能の照査の後に「(8) 補強設計」、「(9) 補強後の耐震計算及び耐震性能の照査」を行う。

2. 2 水道施設の重要度に応じた耐震性能の設定

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耐震性能は、表 2. 1 に示すとおりとする。ランク A である池状構造物は、レベル 1 地震動に対しては耐震性能 1 を、レベル 2 地震動に対しては耐震性能 2 を満たす必要がある。

表 2. 1 重要度に応じた池状構造物の耐震性能

設計地震動	耐震性能		
	耐震性能 1	耐震性能 2	耐震性能 3
	地震によって健全な機能を損なわない性能	地震によって生じる損傷が軽微であって、地震後に必要とする修復が軽微なものにとどまり、機能に重大な影響を及ぼさない性能	地震によって生じる損傷が軽微であって、地震後に修復を必要とするが、機能に重大な影響を及ぼさない性能
レベル 1 地震動	当局池状構造物 (ランク A)		
レベル 2 地震動		当局池状構造物 (ランク A)	

2. 3 土質調査

(1) 地盤の動的特性試験

地盤応答解析（動的解析）を行う場合に必要な動的物性値を次に示す。各種物性値は、それぞれ試験・調査により直接求めることができる。

ア ポアソン比

イ 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)

ウ 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 ($h \sim \gamma$)

(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、間接的に地盤のポアソン比 ν 、ヤング率 E 及びせん断弾性係数 G を求めることができる。

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。

表 2. 2 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		V_s (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	129 $N^{0.183}$	156 $N^{0.183}$	172 $N^{0.183}$
	砂質土	123 $N^{0.125}$	200 $N^{0.125}$	205 $N^{0.125}$
沖積世	粘性土	123 $N^{0.0777}$	142 $N^{0.0777}$	143 $N^{0.0777}$
	砂質土	61.8 $N^{0.211}$	90 $N^{0.211}$	103 $N^{0.211}$

出典：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 V_s を用いる。

(3) 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. 3 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	—		構造計算全般で使用	○	○	
2	層厚	-	m	標準貫入試験 (JIS A 1219)	〃	○	○	
3	自然地下水位	-	m		液状化判定、浮力等	○	○	
4	原位 試験	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	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	排水計画、有効応力解析等	△	△	
8	深度方向の地盤密度	ρ	—	密度検層	地盤の動的解析	△	○	
9	室内 土質 試験	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	○	○
10		含水比	ω		土の含水比試験 (JIS A 1203)	間隙比 e 、飽和度 S_r	○	○
11		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	○	○
12		平均粒径	D_{50}	%	土の粒度試験 (JIS A 1204)	液状化判定	○	○
13		細粒分含有率	F_c	%	細粒分含有率試験 (JIS A 1223)	〃	○	○
14		粘着力 (粘性土)	C	kN/ m ²	土の三軸圧縮試験 (UU) (JGS 0521)	支持力、土圧、斜面安定計算	○	○
15		内部摩擦角 (砂質土)	ϕ	°		〃	○	○
16		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	○	○
17		圧縮指数 (粘性土)	C_c	—	土の圧密試験 (JIS A 1217)	圧密沈下量 (e -log p 曲線)	△*	△
18		体積圧縮係数 (粘性土)	m_v	—		〃	△*	△
19		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)	動的変形特性、地震応答解析	△*	○
20	減衰定数	h	—	繰返し中空ねじり試験 (JGS 0543)	〃	△*	○	
21	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。 ※ (No.17 から No.20 まで) 一次元地盤応答解析で用いる。

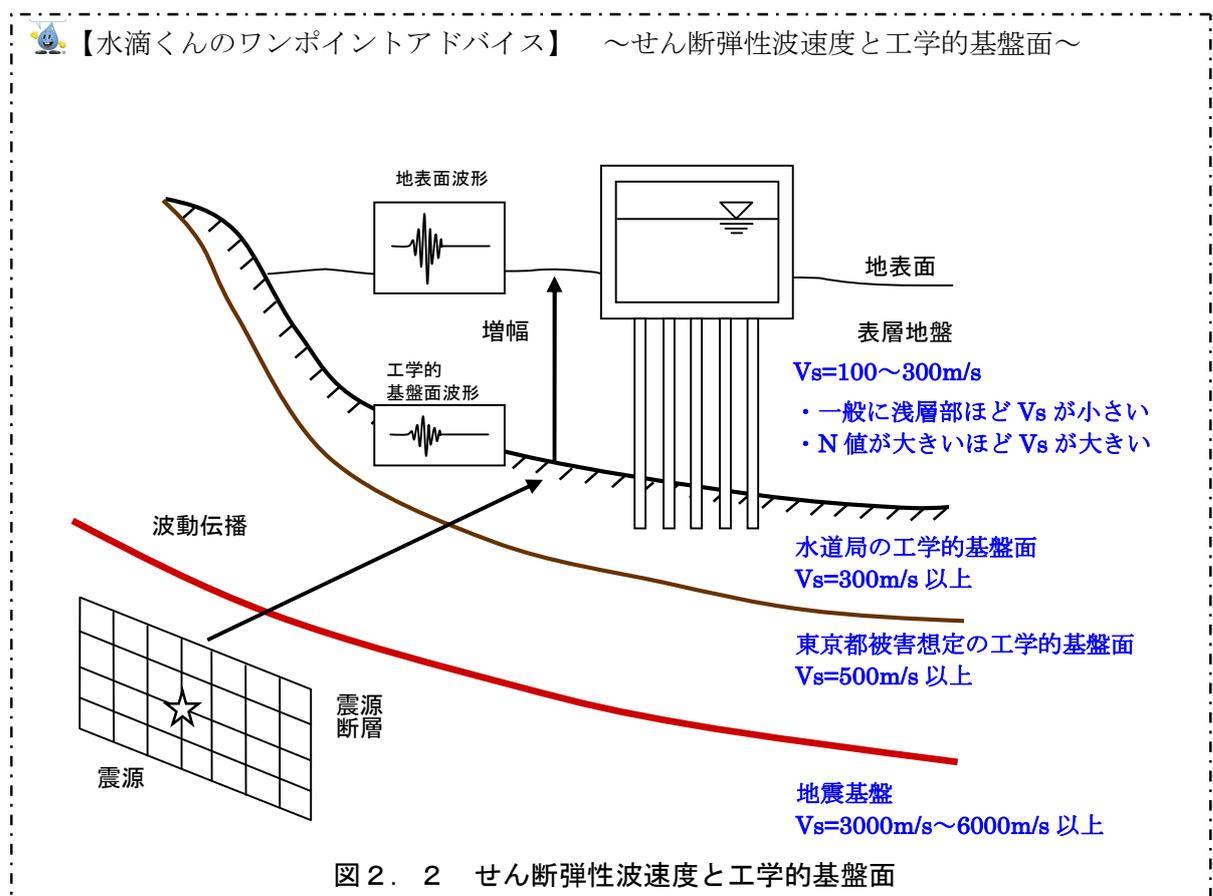
(4) 工学的基盤面の設定

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。

工学的基盤面は、N値 50 以上、せん断弾性波速度がおおむね $V_s \geq 300\text{m/s}$ 以上の連続した地層の上面としてよい。ただし、詳細な地盤調査結果がある場合には、適切に工学的基盤面を設定することが可能であり、個々の地点の地盤特性を勘案して判断する必要がある。

なお、東京都地域防災計画における地震被害想定での工学的基盤面は、 $V_s \geq 500\text{m/s}$ 以上として設定しているため、レベル2地震動で方法2を用いる場合には（2. 4参照）、地質調査の調査深度から工学的基盤面までの地層構造を仮定する必要が生じる場合がある。これは、一般的な設計における地質調査では、支持層（N値 50 以上を目安とし、 $V_s \geq 300\text{m/s}$ 程度の地層）の確認が主目的とされ、 $V_s \geq 500\text{m/s}$ の地層まで確認されることが少ないためである。



(5) 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. 2 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、 T_G を算定する。
- ・ N 値を用いて表 2. 2 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。

【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. 4 設計地震動

(1) レベル1地震動の設定方法

指針では、従来の方法（97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が、当局における水道施設の耐震設計においては、従来の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。

(2) レベル1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. 3示す。

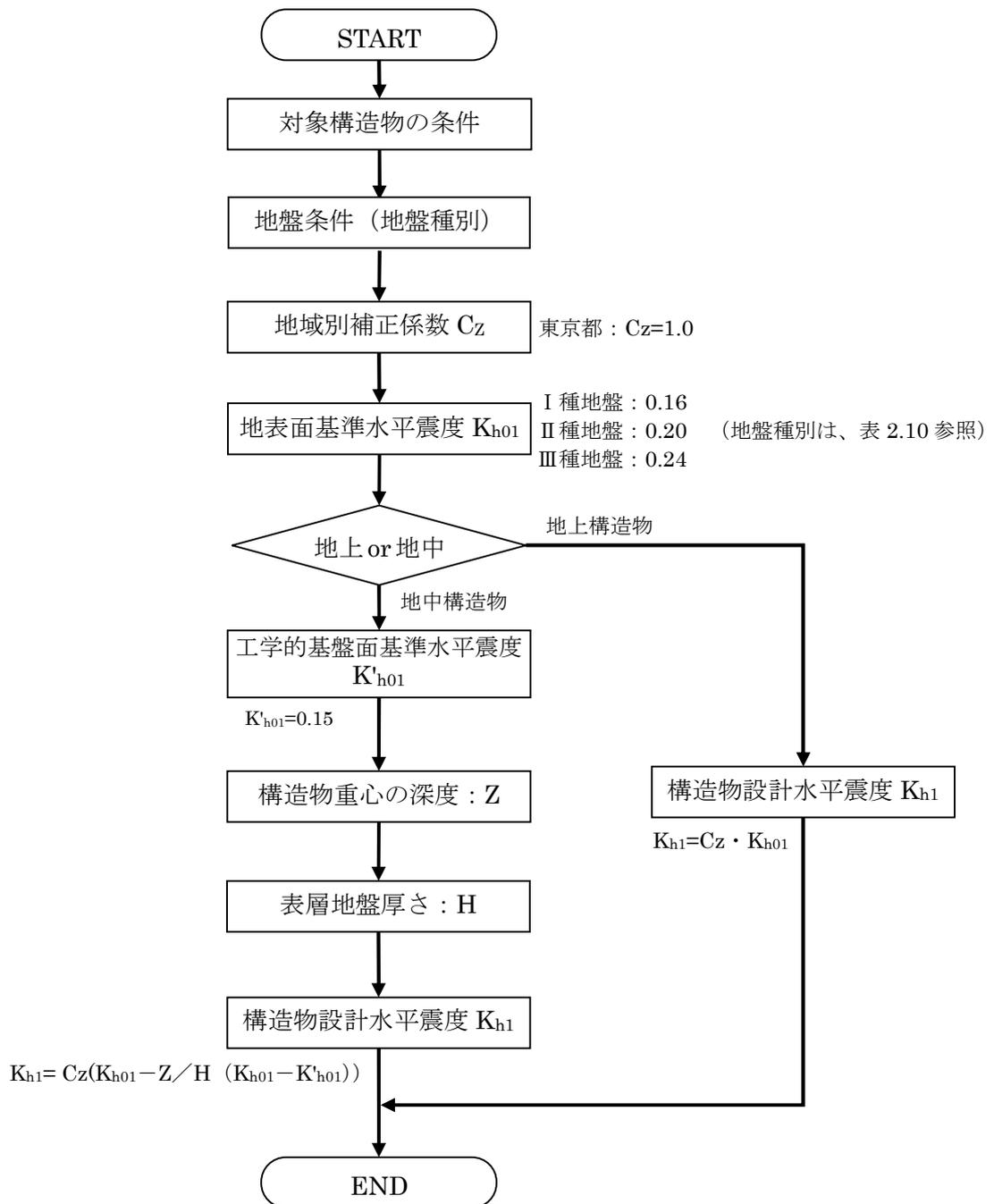


図2. 3 レベル1地震動の設定フロー（静的解析）

(3) 池状構造物の設計震度の求め方（レベル1地震動、レベル2地震動共通）

ア 池状構造物における固有周期算定の省略

池状構造物は、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（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（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・総論 p.59）。

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。両者の影響の違いが明確でない場合、深さ 10m 程度を目安とし、それ以深に設置される池状構造物には応答変位法を適用する。

なお、地中構造物であれば必ず応答変位法を用いるわけではなく、地中構造物と判断される構造物の中で、地震時の地盤変形の影響が支配的な場合に応答変位法を採用する。

(4) レベル2地震動の設定方法

指針では、レベル2地震動の設定として、表2.4に示す4つの方法が示されている。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 方法2、方法3を併用し、3波形以上を用いる。

イ 静的解析 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2.4 レベル2地震動の設定方法(指針の規定)

設定方法	
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。
方法2	地域防災計画等の想定地震動を使用する。
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。
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

(5) レベル2地震動の設定フロー（静的解析）

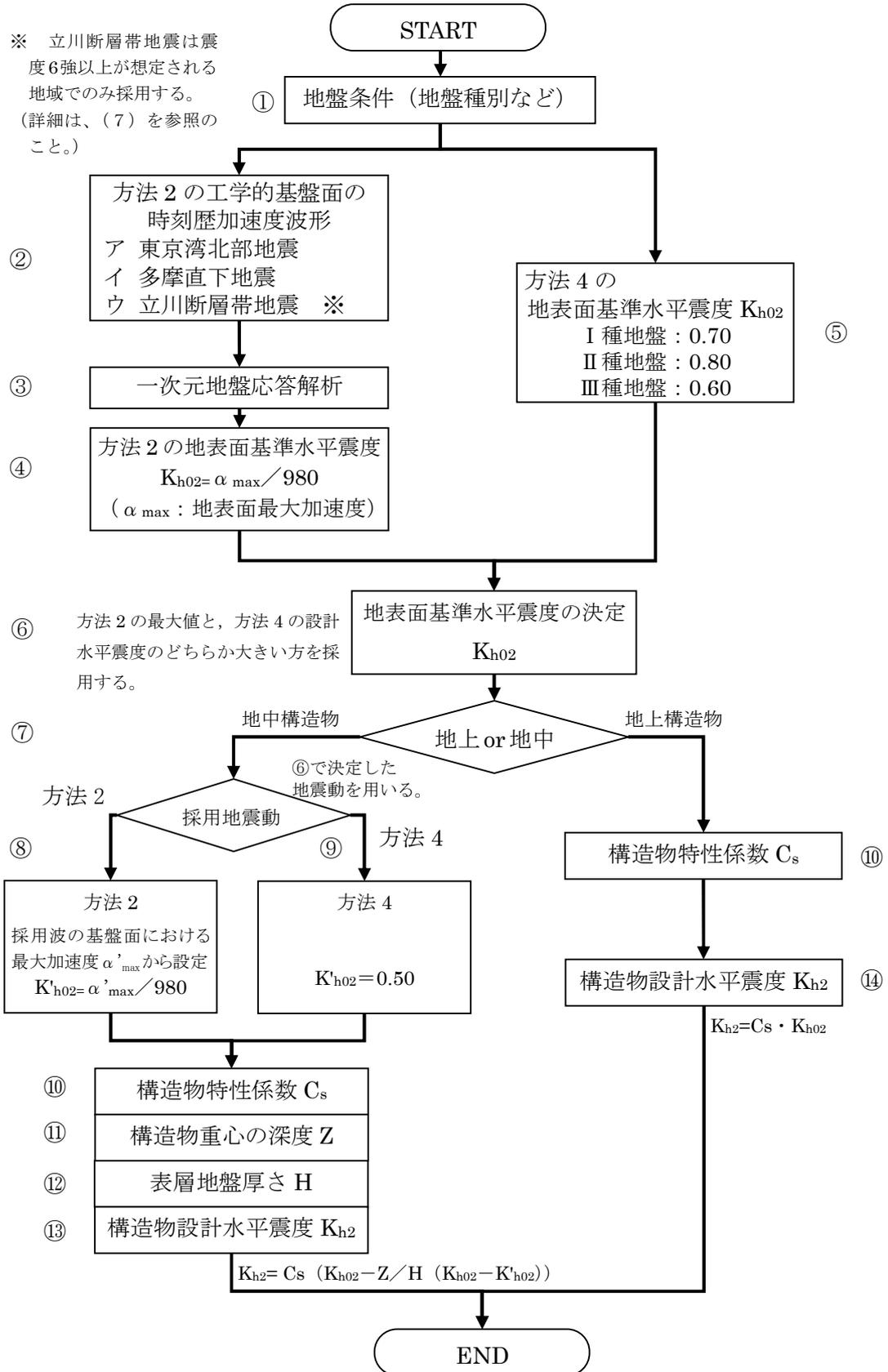


図2. 4 レベル2地震動の設定フロー（静的解析）

(6) レベル2地震動の設定フロー（動的解析）

レベル2地震動の動的解析では、図2.5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。

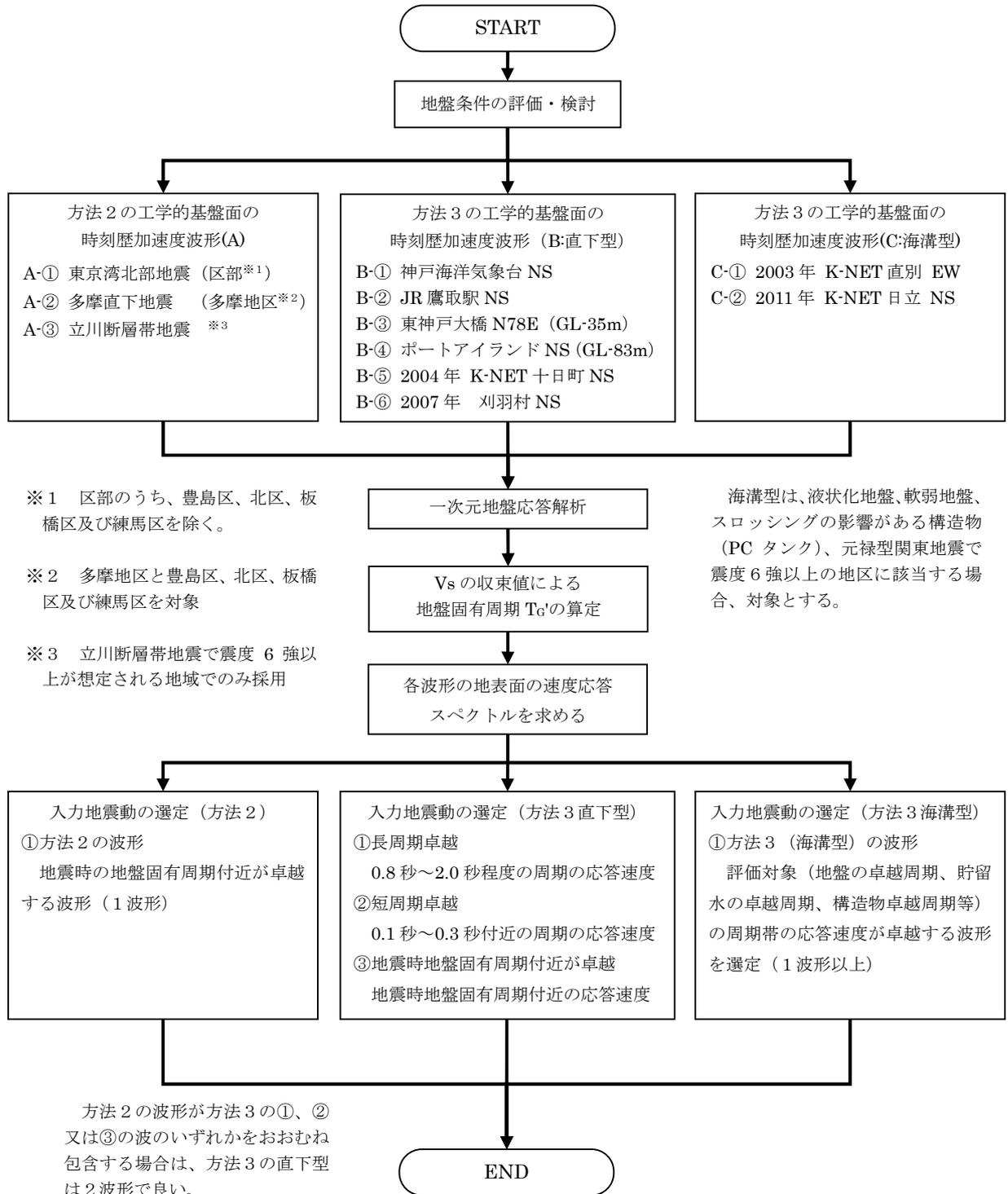


図2.5 レベル2地震動の設定フロー（動的解析）

(7) レベル2地震動・方法2（地域防災計画の想定地震動）

レベル2地震動は、被害想定に示される表2.5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い、影響が大きい波形を選定する。

動的解析では、波形を直接用いる。静的解析では、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。

なお、一次元地盤応答解析において、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。

表2.5 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
東京湾北部地震*	697gal	区部（豊島区、北区、板橋区及び練馬区を除く。）
多摩直下地震*	739gal	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

※ 全てのメッシュで最大加速度が最も大きい波形（ $V_s \geq 500\text{m/s}$ の工学的基盤面における時刻歴加速度波形）

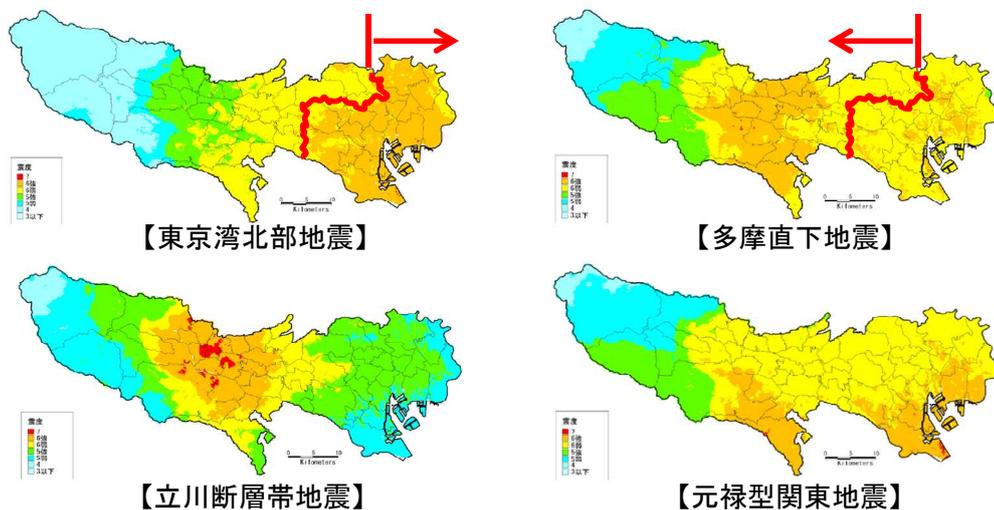


図2.6 各想定地震の震度分布図

東京湾北部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、都内のどのような場所であっても同様の震源が直下で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。）。

立川断層帯地震及び元禄型関東地震は、震源位置が特定されており、震源位置に特徴と意味がある。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。）。

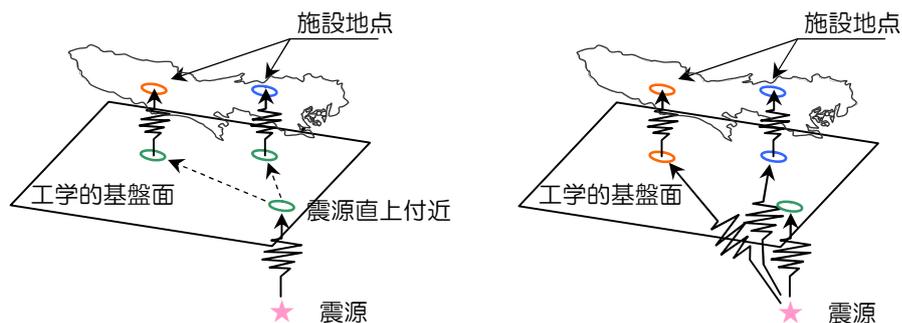


図2.7 各想定地震を設計地震動として用いる場合の定義の概念図

(8) 方法3 (直下型) の採用波形について

方法3 (直下型) では、表2. 6に示す兵庫県南部地震、新潟県中越地震及び新潟県中越沖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 (直下型) で選定される波形は、2波形又は3波形となる。

表2. 6 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

(9) 方法3 (海溝型) の採用波形について

次の条件のいずれかに該当する場合には、方法3 (海溝型) の波形を選定する。

ア 建設地点が液状化するおそれがある地盤や軟弱地盤

イ スロッシングの影響がある構造物 (PC タンク)

ウ 元禄型関東地震で震度6強以上が想定される施設 (図2. 6参照)

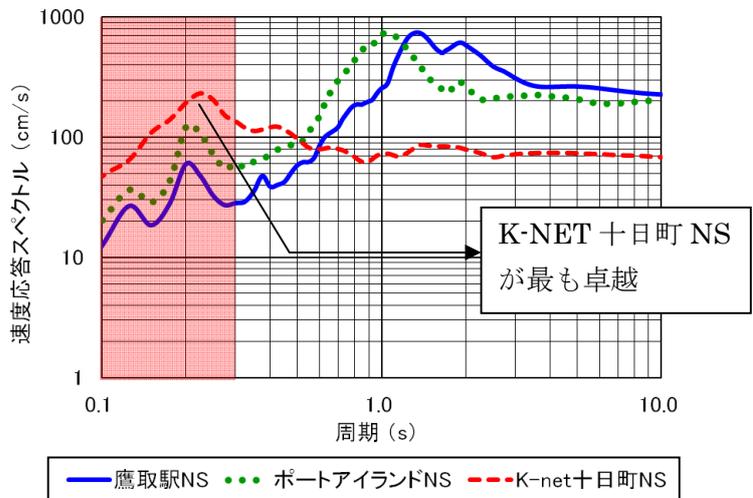
これらに該当しない施設は、海溝型を選定しなくてよい。

方法3 (海溝型) では、表2. 7に示す2003年十勝沖地震及び2011年東北地方太平洋沖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、評価対象 (地盤の卓越周期、貯留水の卓越周期、構造物卓越周期等) の周期帯の応答速度が卓越する波形を選定 (1波形以上) する。

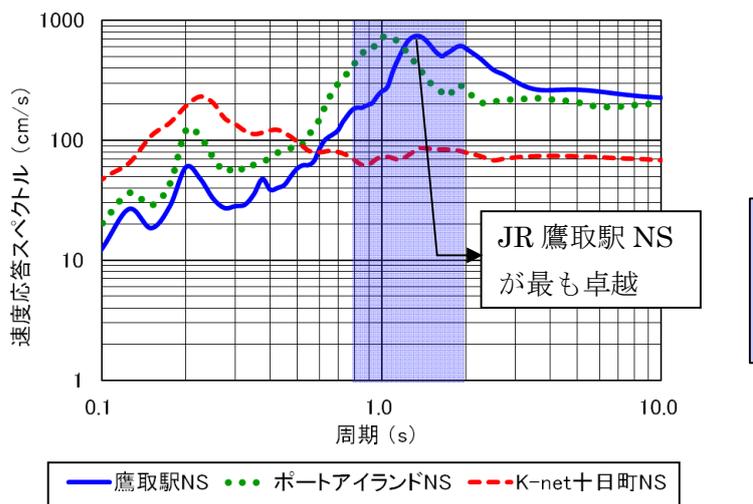
表2. 7 方法3 (海溝型) の入力地震動の波形

	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
C-①	2003年 十勝沖地震	K-NET 直別 EW	海溝型地震で長周期が卓越する強震記録	785 gal	震度6強	地表面
C-②	2011年 東北地方太平洋沖地震	K-NET 日立 NS	海溝型地震で短周期が卓越する強震記録	1,598 gal	震度6強	地表面

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

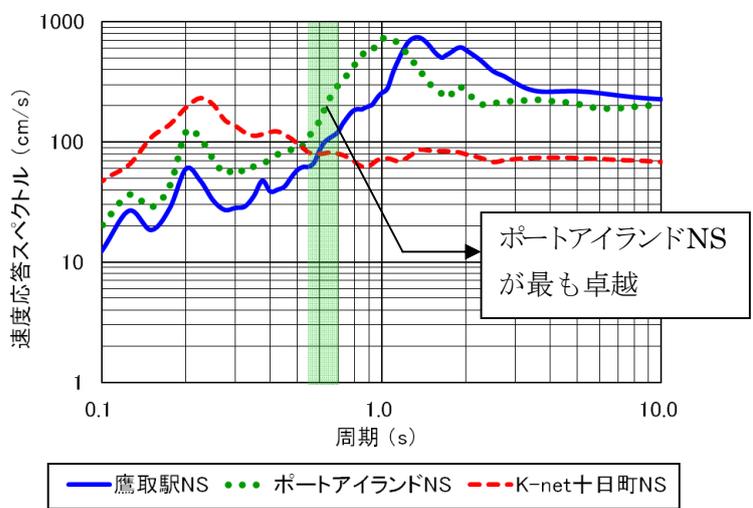


図 2. 8 方法 3 (直下型) の入力地震動の波形の選定例

第3章 池状構造物の耐震計算法

3. 1 総説

(1) 耐震計算法の選択

池状構造物の耐震計算法は、表3.1に示すように当局における設計事例が豊富な静的解析を基本としつつ、特定の施設では動的解析を併用する。新設設計及び耐震補強設計（大規模施設）においては、静的解析で断面設計を行い、動的解析で断面照査を行う。動的解析で耐震性能が確保されない部位は、設計断面を変更し、再度、設計計算を行う。

なお、耐震補強設計の必要性を判断する耐震診断は、静的解析により行う。

表3.1 池状構造物の耐震計算法

設計地震動 (目標耐震性能)	新設構造物	既設構造物		
		耐震診断	耐震補強設計	耐震補強設計 (大規模施設※)
レベル1地震動 (耐震性能1)	静的解析(線形)	静的解析(線形)	静的解析(線形)	静的解析(線形)
レベル2地震動 (耐震性能2)	静的解析(線形) 動的解析(非線形)	静的解析(線形)	静的解析(線形)	静的解析(線形) 動的解析(非線形)

※ 大規模施設：浄水場(施設能力100,000m³/日以上)、給水所(有効容量5,000m³以上)に該当する施設。ただし、上記以外の施設においても、有効容量5,000m³以上の池状構造物に対しては、動的解析による照査を行う。

(2) 当局における池状構造物の耐震設計フロー

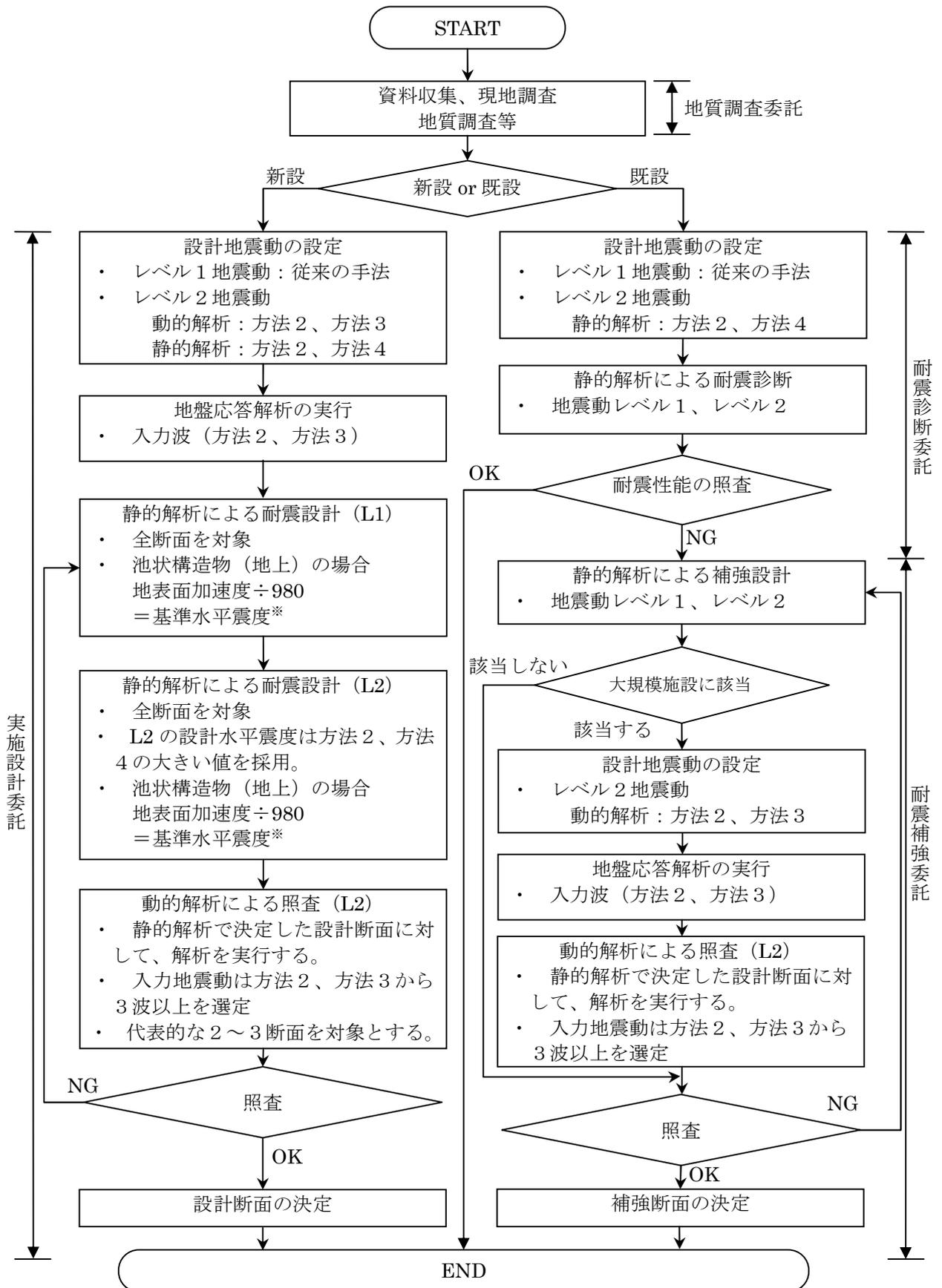
当局における池状構造物の耐震設計フローを図3.1に示す。

当局では、新設設計及び大規模施設の耐震補強設計において動的解析を適用することから、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。

設計断面の設定は、静的解析によるものとし、動的解析により照査を行う手順を基本とする。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、静的解析プロセスに戻り、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、決定した設計断面が満足することを確認するものとする。

なお、当局における動的解析は、2次元FEMモデルを用いることを基本としているため、動的解析において設計断面の変更が生じると、FEMのモデル修正が必要となる。その場合、多大な労力と時間を要することがあるので、動的解析の実施に当たっては、設計断面の変更が生じないような配慮も重要である。

その一例として、静的非線形解析(プッシュオーバー解析)の利用が挙げられる。プッシュオーバー解析は、静的解析であるが、構造物の非線形性を直接考慮できることから、動的解析に近い応答を得られることが多い。そのため、静的線形解析により設定した断面に対して、プッシュオーバー解析による再照査を行い、断面を再設定することで、動的解析での断面変更を最小限にすることが期待できる。



※ 指針・総論 p.125 の記述により池状構造物の固有周期算定が不要

図3. 1 耐震設計のフロー

(3) 当局における耐震設計の標準

当局における設計では、静的解析及び動的解析の標準として、それぞれ表3.2及び表3.3に示す条件を用いることを原則とする。

表3.2 当局における標準（池状構造物の静的解析）(1/2)

分類	項目	東京都における基本	説明等	本編参照
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、埋設深度10mを目安とし、それ以深では応答変位法を採用する。	3.2.3 (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。	3.2.4 (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Csを考慮	構造物の形状・構造形式に応じて適切に設定することを原則とするが、震度法ではCs=0.45、応答変位法ではCs=1.0を用いてもよい。	3.2.4 (2)
	地震時土圧式	修正・物部岡部式を標準	指針総論3.1.6地震時土圧を準用。	3.2.4 (4)
	動水圧式	ウエスタガードの補正式を標準（矩形水槽の場合）	指針総論3.1.7地震時動水圧を準用	3.2.4 (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2002年版（第2版）を準用	3.2.4 (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（2012年、日本道路協会）準拠	3.2.4 (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（2012年、日本道路協会）準拠	3.2.4 (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（2012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。	3.2.4 (5)	

表 3. 2 当局における標準（池状構造物の静的解析）（2/2）

分類	項目	東京都における基本	説明等	本編参照	
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。	3.2.4 (3)	
	地盤変位	レベル1地震動： 地盤変位振幅 U_h を適用		指針・総論 p.195 の U_h 式を用いる。 なお、同式の T_G は、 T_s と読み替える。	3.2.4 (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		指針総論 p.195 の U_h 式を用いる。 なお、同式の T_G は T_G' と読み替える。	
	周面せん断力	レベル1地震動：指針の τ の式を適用		指針総論 p.94 の τ 式を用いる。	3.2.4 (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		指針総論 p.94 の τ 式を用いる。 なお、同式の T_G は、 T_G' と読み替える。	
	動水圧式	矩形水槽： ウエスタガードの補正式を標準		震度法と同様とする。	3.2.4 (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。	3.2.4 (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。	3.2.4 (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（2012年、日本道路協会）準拠	3.2.4 (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 2002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。	3.2.4 (5)	

表 3. 3 当局における標準（池状構造物の動的解析）（1/3）

分類	項目	東京都における基本	説明等	本編参照
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。	3.3.5 (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。	3.3.7 (3) 3.3.7 (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—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、ブレース置換や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—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。	3.3.5 (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	3.3.7 (2)
	入力方法	工学的基盤面（地盤—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。	3.3.7 (2)

表 3. 3 当局における標準（池状構造物の動的解析）（2/3）

分類	項目	東京都における基本	説明等	本編参照
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。	3.3.7 (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。	3.3.5 (1) 3.3.7 (3) 3.3.9 (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。	3.3.7 (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。	3.3.7 (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。	3.3.7 (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。	3.3.7 (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。	3.3.7 (4)

表 3. 3 当局における標準（池状構造物の動的解析）（3/3）

分類	項目	東京都における基本	説明等	本編参照
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。	3.3.7 (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。	3.3.7 (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。	3.3.7 (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。	3.3.7 (8)

(4) 計算条件一覧(例)

計算条件一覧の例を表3.4及び表3.5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3.4 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
	目標耐震性能	レベル1地震動：耐震性能1、レベル2地震動：耐震性能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	$C_s=0.45$
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。)

表 3. 5 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 A
	目標耐震性能	レベル 1 地震動：耐震性能 1、レベル 2 地震動：耐震性能 2
	解析手法	静的解析にて断面設計し、設計断面を動的解析で照査する。
	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、K-NET 日立 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
	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。

3. 2 静的解析

(1) 静的解析の手順

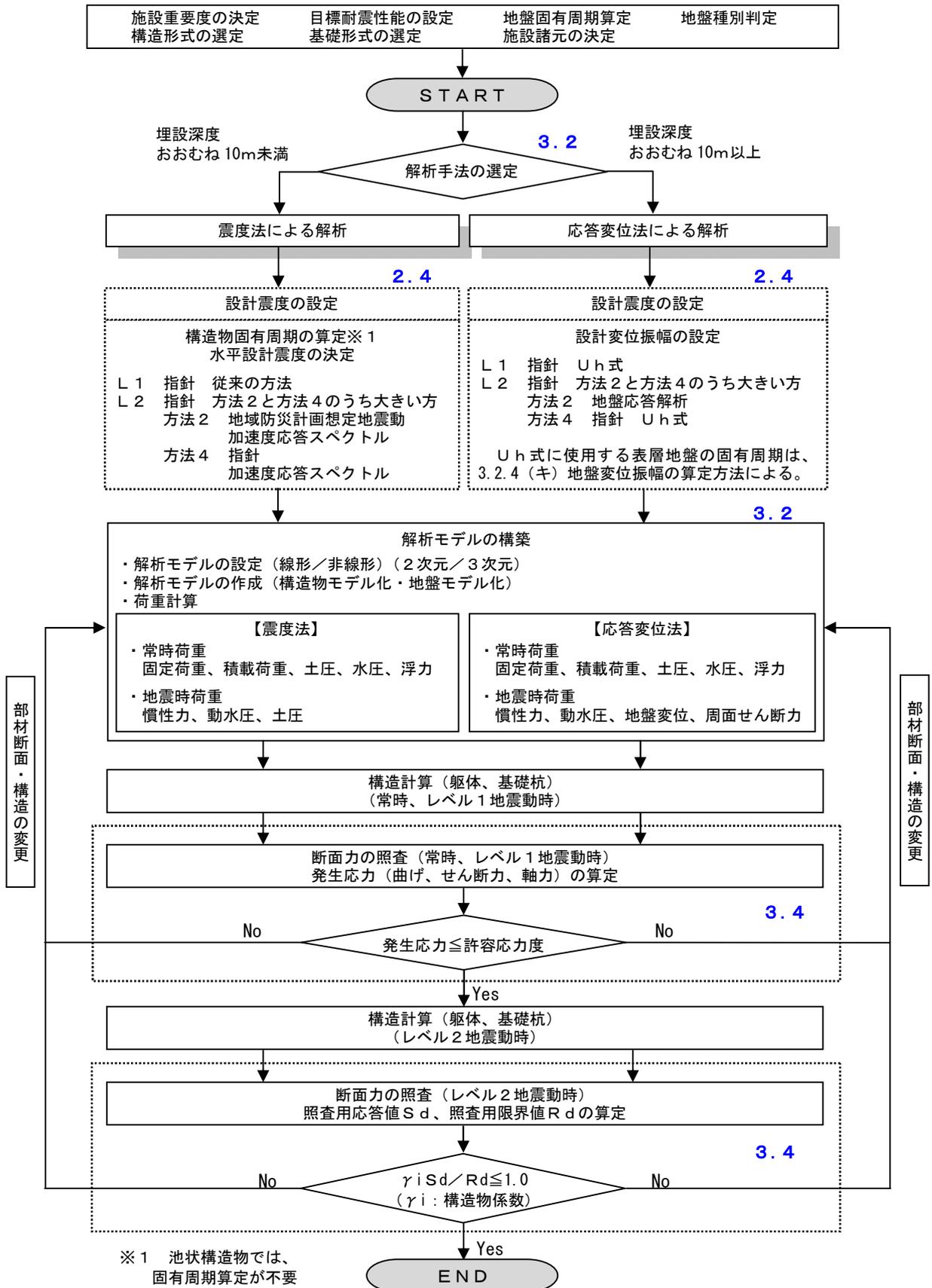
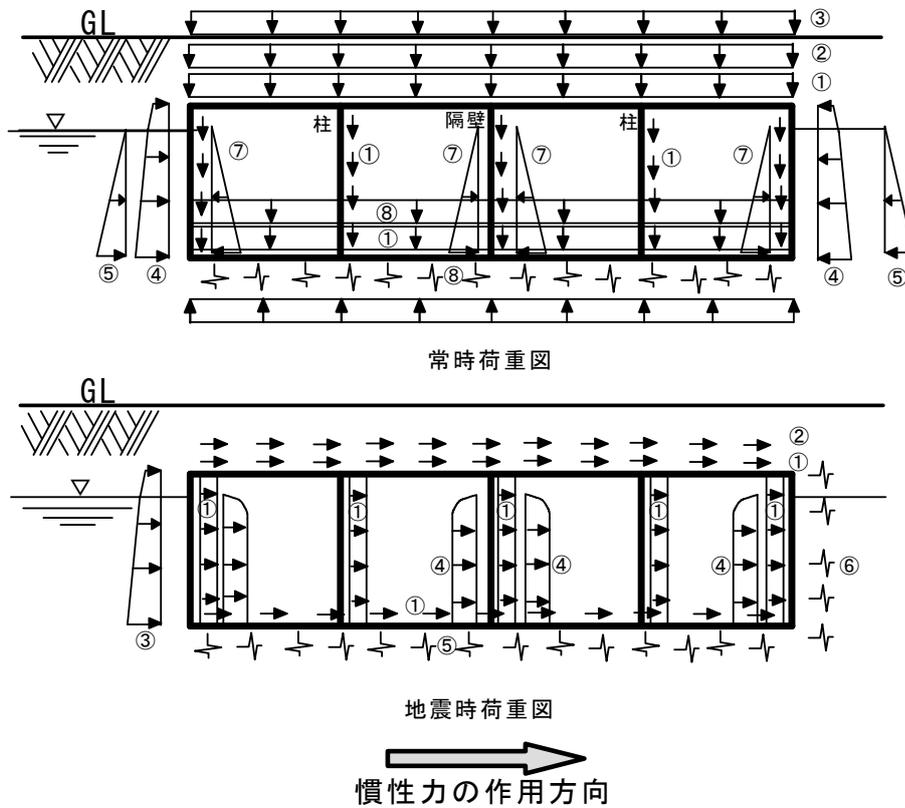


図 3. 2 静的解析の設計フロー

(2) 地震時荷重の取り方 (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24年3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、2002年））

図3. 3 地震荷重のとり方例（震度法）

3.3 動的解析

(1) 動的解析の手順

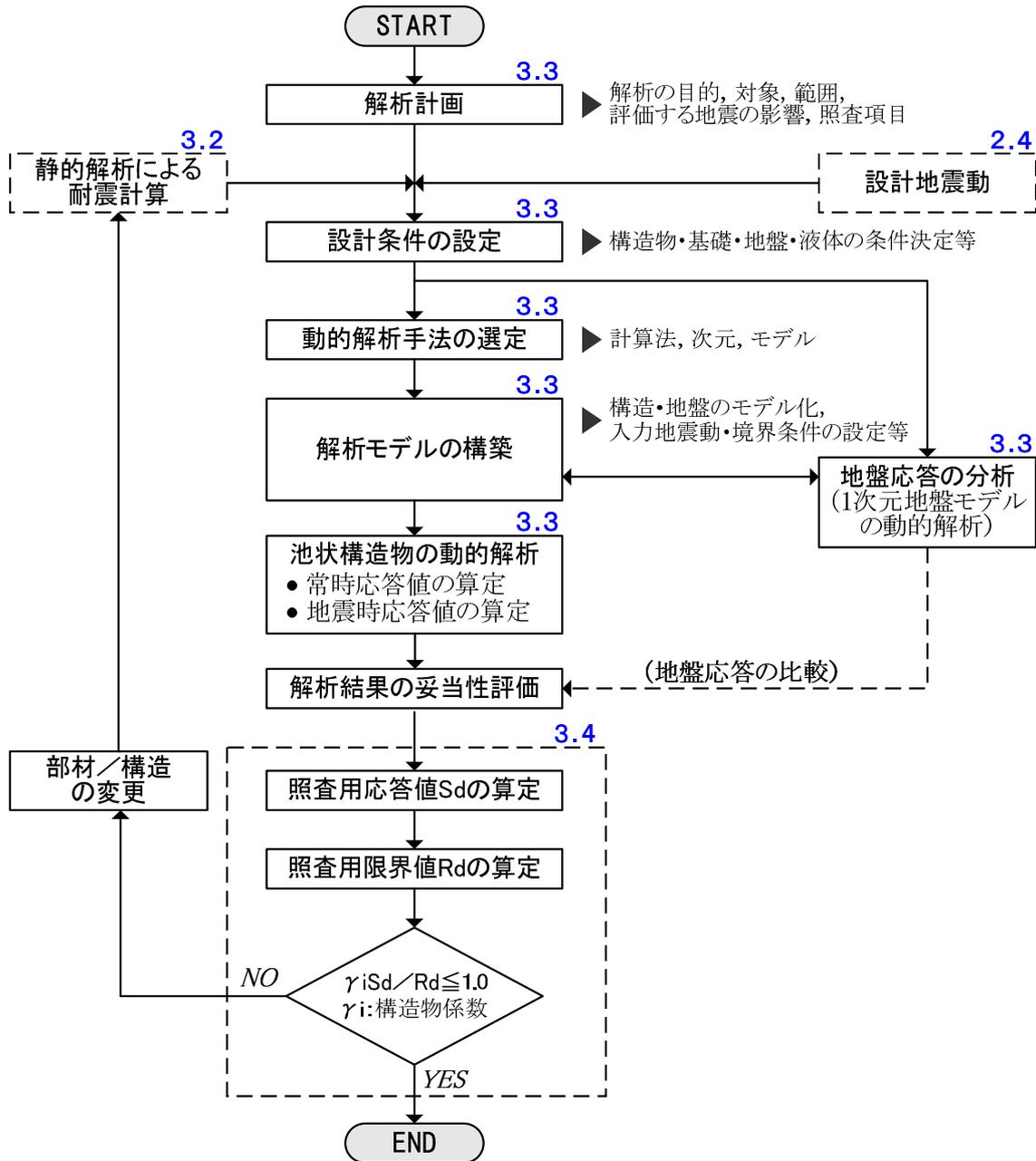


図3.4 動的解析のフロー図

(2) 解析モデル系の種類に関する選定

池状構造物の動的解析を行うに当たり、池状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、当局の池状構造物の動的解析に用いる標準を表3.6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. 6 池状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、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しないと考え、構造物独立モデルを適用する。

(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地震動に対して耐震性能2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。

(4) 解析モデルの構築

当局の池状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3.5に示す。池状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。

各項目の詳細は、本編を参照のこと。

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

地盤-構造物連成系モデルの場合

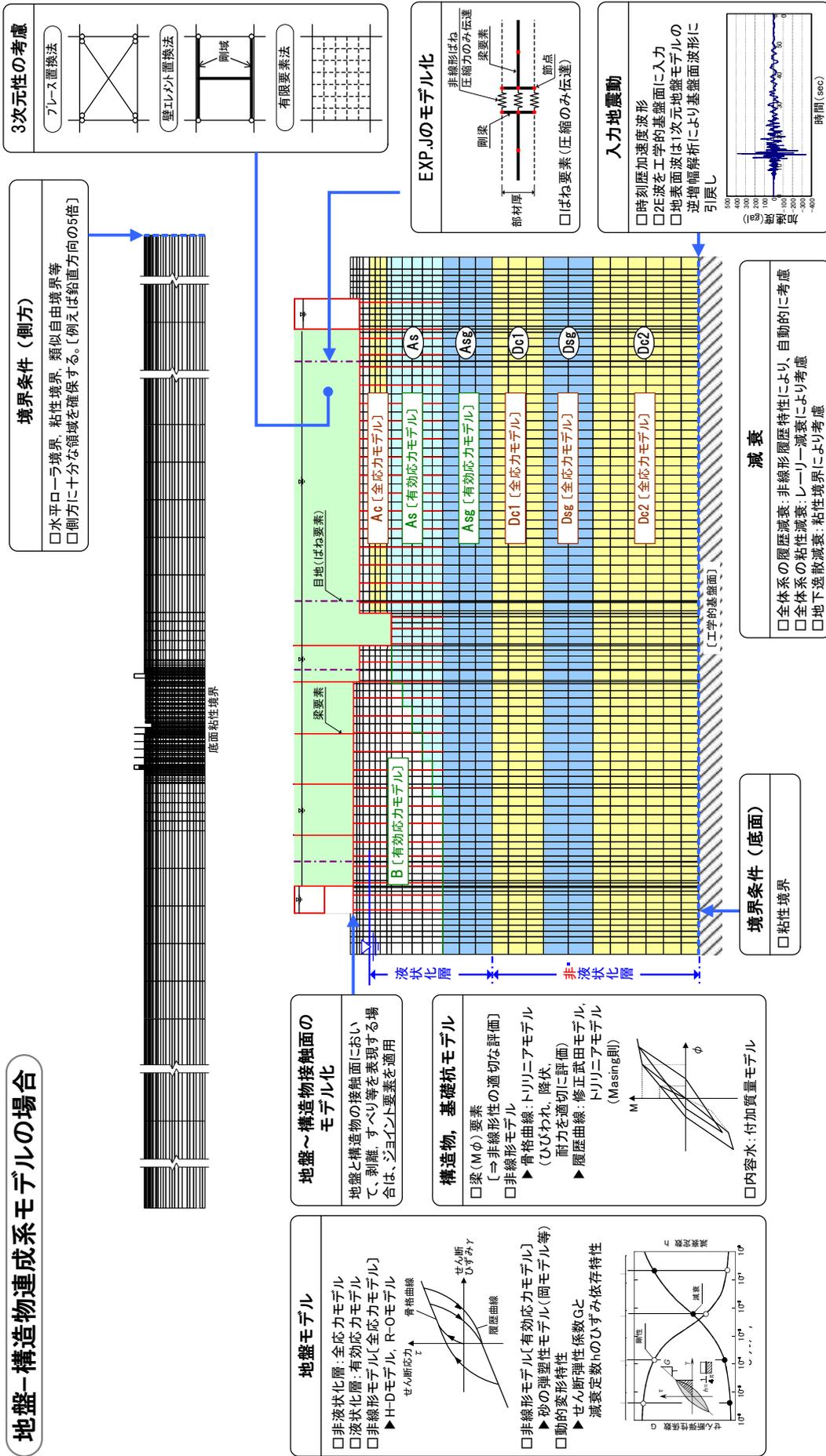


図 3. 5 解析モデルの構築事例 (地盤-構造物連成モデルの場合)

(5) 入力地震動の設定

ア 地震動の種類

池状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において設定され、池状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、表層地盤の影響を受けていない(反射波を含まない) 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

池状構造物の動的解析において、図3.6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。

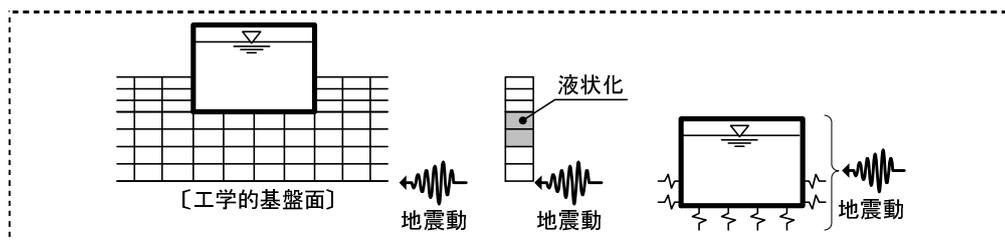


図3.6 地震動の入力方法

【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。

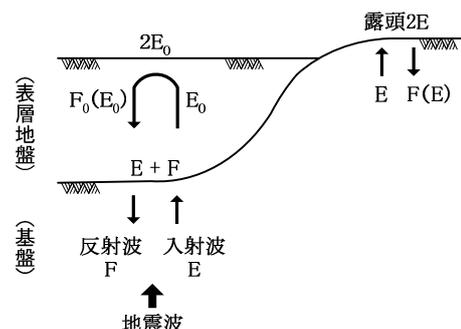


図3.7 入射波 (E)・反射波 (F) について

出典：土木構造物の耐震設計入門 p.35 (土木学会、2002年)

3. 4 耐震性能の照査

(1) 総則

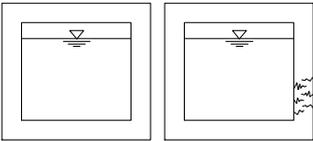
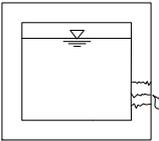
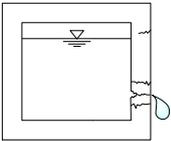
当局施設の耐震性能は、設計地震動と重要度の区分により設定される（2. 2参照）。

各耐震性能に対する限界状態は、次のとおりとする。

- ア 耐震性能1に対する限界状態は、地震によって水道施設の力学的特性が弾性域を超えない範囲で適切に定めるものとする。
- イ 耐震性能2に対する限界状態は、地震によって水道施設の部材に塑性変形が生じるが、施設に重大な影響を与えず、かつ、修復が軽微に行える範囲で適切に定めるものとする。
- ウ 耐震性能3に対する限界状態は、地震によって水道施設の部材に塑性変形が生じるが、施設に重大な影響を与えず、かつ、修復が行える範囲で適切に定めるものとする。

耐震性能の照査は、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耐震性能との関係を表3. 7、図3. 8に示す。設定した耐震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. 7 耐震性能と限界状態、損傷状態、照査用限界値

耐震性能	耐震性能1	耐震性能2	耐震性能3
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			
	無被害又はひびわれは生じるが漏水は生じない。修復の必要ない。	軽微なひびわれから漏水は生じるが地震後に早期に修復可能である。	ひびわれ幅が拡大し、漏水が生じるが施設全体が崩壊しない。修復可能。
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 ≤ 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 …… 限界値は、表中に示すもの以外に、水密性を直接照査するものとしては、許容ひびわれ幅や許容漏水量等がある。

また、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耐震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。

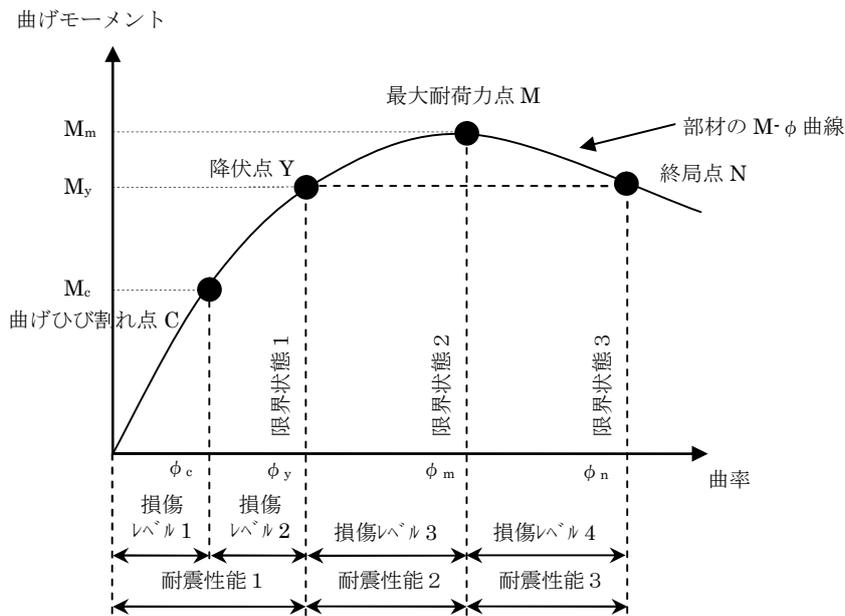


図 3. 8 耐震性能と限界状態、損傷状態との関係

(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。

破壊モードの判定については、指針に明記されていないため、当局施設の新設設計、耐震診断及び補強設計では、表 3. 8 に示すとおり破壊モードの判定を行うものとする。

表 3. 8 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
	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する。
		非線形	塑性ヒンジが発生する箇所	同上