

〇〇浄水場非線形動的解析構造計算書

平成〇〇年〇月

2 設計条件

本構造物の耐震診断は、地震時においてRC施設が保有すべき耐震水準を満足するか否かを確認する。

2.1 適用基準類

本診断で準拠した基準図書を次に示す。

- 1) 水道施設耐震工法指針・解説 2009年版 (社)日本水道協会
- 2) 水道施設耐震工法指針・解説 2009年版 設計事例集 (社)日本水道協会
- 3) コンクリート標準示方書 [設計編] 2012年制定 土木学会 (社)
- 4) 下水道施設耐震計算例 -処理場・ポンプ場編- 2002年版 (社)日本水道協会
- 5) 道路橋示方書・同解説 IV下部構造編 平成24年 (社)日本道路協会
- 6) 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編 平成24年 (社)日本道路協会
- 7) 水道用プレストレストコンクリートタンク設計施工指針・解説 1998 (社)日本水道協会
- 8) 鉄道構造物等設計基準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物 平成12年 鉄道総合技術研究所
- 9) 最新地中・基礎構造の耐震設計 九州大学出版会

2.2 施設概要

施設名称	〇〇浄水場		
場所	〇〇県〇〇市		
建設年度	〇〇年〇〇月		
構造概要	構造物の形状	池状構造物	地上水槽
		壁構造	
	構造種別	鉄筋コンクリート造	
	基礎種別	杭基礎	
	寸法	〇〇m×〇〇m	

2.3 一般形状図及び検討断面

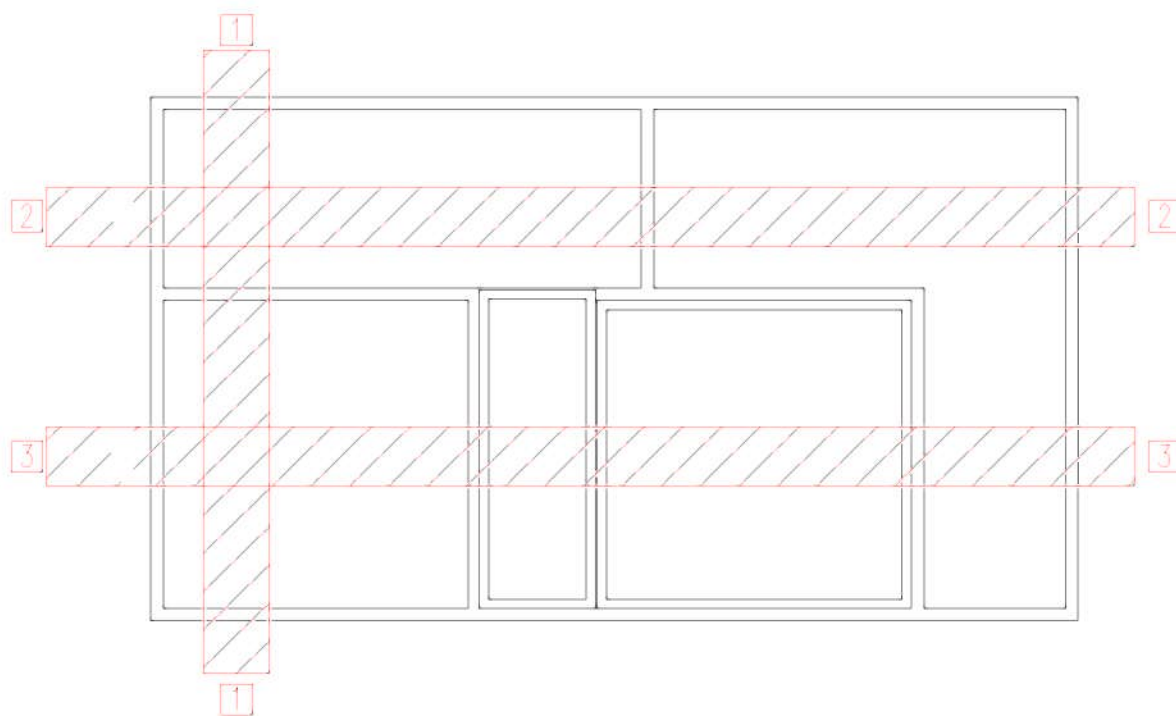


図-2.3.1 平面図

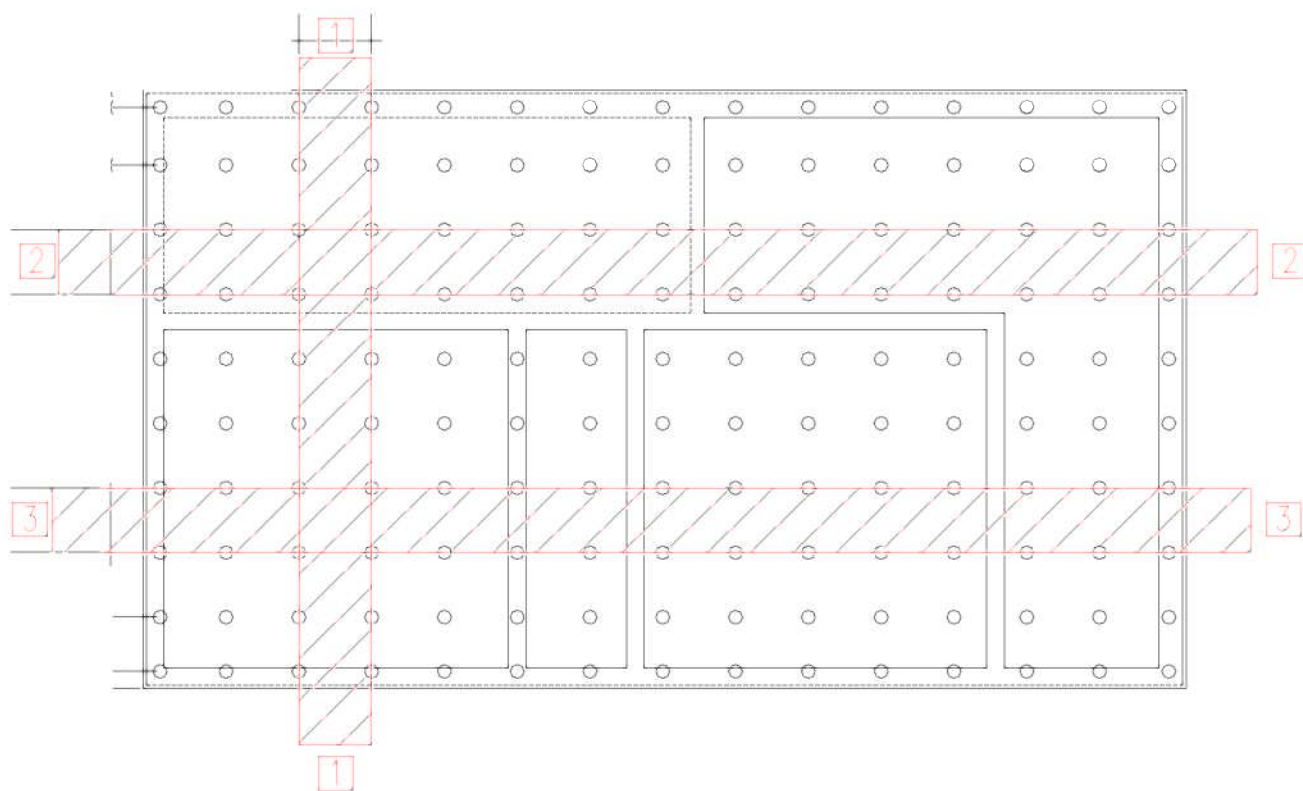


図-2.3.2 杭伏図

2.6 耐震計算法

建造物の耐震診断は、地震時に発生する躯体断面力に対して、既存施設の躯体に基準値を満たす十分な強度あるいは耐力があるかを照査(断面照査)することにより行う。

断面照査により十分な強度あるいは耐力があると判断された場合、その建造物は耐震性を有すると判断する。

(1) 計算手順

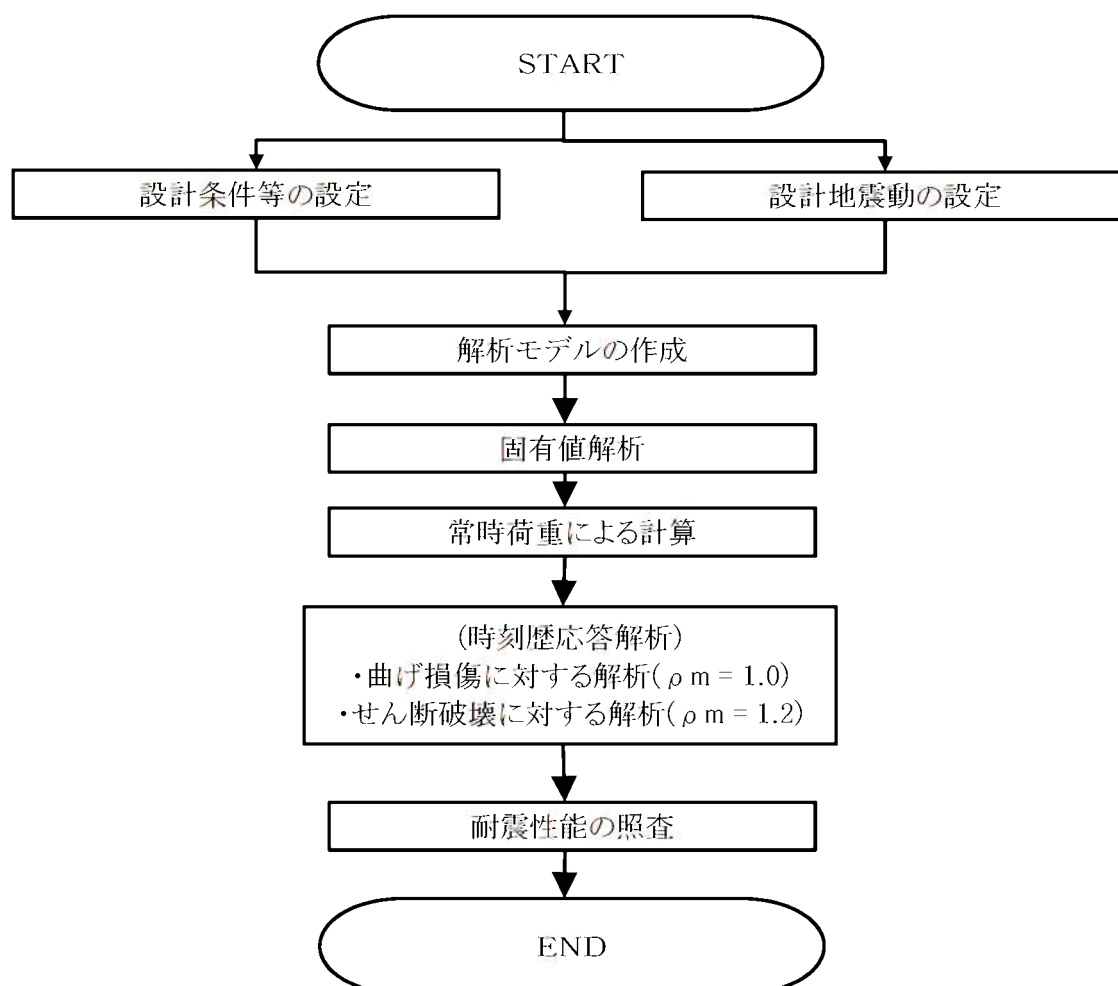


図-2.6 設計フロー

(2) 使用プログラム

Engineer's Studio Ver4 (株)フォーラムエイト

(3) 解析方法

解析方法は動的解析を用いる。

採用	耐震設計手法
	震度法
	応答変位法
●	動的解析による照査

2.7 地盤条件

設計水平震度を求めるために、地盤種別の算定を行う。

1) 地盤種別の算定方法 [水道施設耐震設計指針・解説 I 総論 p. 61]

耐震設計上の地盤種別は、原則として式2.7.2で算出される地盤の固有周期 T_G を基に区別することとする。地表面が基盤面と一致する場合は、I種地盤とする。

$$\text{地盤の固有周期 } T_G = 4 \sum (H_i / V_{si}) \dots\dots\dots(2.7.2)$$

H_i : i番目の地層の厚さ m

V_{si} : i番目の地層の平均せん断弾性波速度 m/s

表-2.7.2 地盤のせん断弾性波速度

堆積時代別土質		V_s (m/s)		
		10^{-3}	10^{-4}	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	$61.8N^{0.211}$	$90N^{0.211}$	$103N^{0.211}$

表層地盤ではせん断ひずみが 10^{-3} レベルの値を用い、基盤においては 10^{-6} レベルの値を用いる。

地盤種別検討書より、当施設はIII種地盤とする。

2.8 使用材料および材料特性

1)鉄筋コンクリート

		全部材
設計基準強度	σ_{ck} [N/mm ²]	21
ヤング係数	E_c [N/mm ²]	23500

2)鉄筋

種 別		SD295A
ヤング係数	E_s [N/mm ²]	200000

3)杭 PHC杭φ400

種 別		B種
外 径	D[mm]	400
厚 さ	t[mm]	65
コンクリート設計基準強度	σ [N/mm ²]	80
有効プレストレス	σ_{ce} [N/mm ²]	8
PC鋼材断面積	A_p [mm ²]	640
PC鋼材種別	[本数]	φ10×10本
PC鋼材配置半径	r_p [mm]	168

2.9 材料強度

1)鉄筋コンクリート

単位:[N/mm²]

コンクリートの種類	21
設計基準強度(f'_{ck})	21

2)異形鉄筋

単位:[N/mm²]

種 別	SD295A	
引張強度	引張荷重	440以上
	降伏点強度(f_{sy})	295

※せん断応答値解析時は、材料修正係数1.2を乗じる

せん断解析用

単位:[N/mm²]

種 別	SD295A	
引張強度	引張荷重	528以上
	降伏点強度(f_{sy})	354

3)PHC杭PC鋼材

単位:[N/mm²]

種 別	ϕ 9.0	ϕ 10.0
引張強度	引張強度	1420
	降伏強度	1275

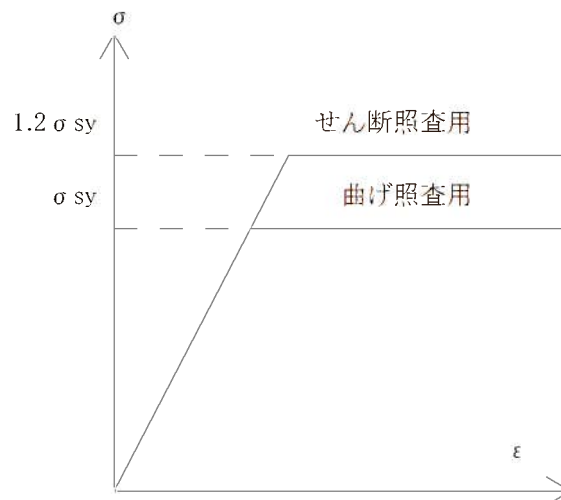
※せん断応答値解析時は、材料修正係数1.2を乗じる

せん断解析用

単位:[N/mm²]

種 別	ϕ 9.0	ϕ 10.0
引張強度	引張強度	1704
	降伏強度	1530

材料修正係数 ρ_m については、鉄筋の特性値に応じた非線形な荷重-変位曲線を評価できるので、耐震計算に用いる鉄筋強度と実強度の差による応答せん断の増加を考慮し、鉄筋の材料修正係数 $\rho_m=1.2$ を考慮した鉄筋強度特性値を適用する。



2.10 安全係数

[水道施設耐震設計指針・解説 I 総論 p. 120]

項目		曲げに 対する照査	せん断に 対する照査
材料係数	コンクリート γ_c	1.0	1.3
	鉄筋 γ_s	1.0	1.0
部材係数 γ_b	曲げ・軸力		1.0
	せん断 耐力	コンクリート	1.0
		鉄筋	1.1
構造解析係数 γ_a		1.0	1.0
荷重係数 γ_f		1.0	1.0
構造物係数 γ_i		1.0	1.0
材料修正係数 ρ_m		1.0	1.2

2.11 減衰定数

[道路標準示方書・同解説 V 耐震設計編 p. 126]

[最新地中・基礎構造の耐震設計 p. 201]

減衰の種類		Rayleigh減衰
減 衰 定 数	コンクリート 部材要素	2%
	杭ばね要素	5%
	側壁地盤 ばね要素	5%

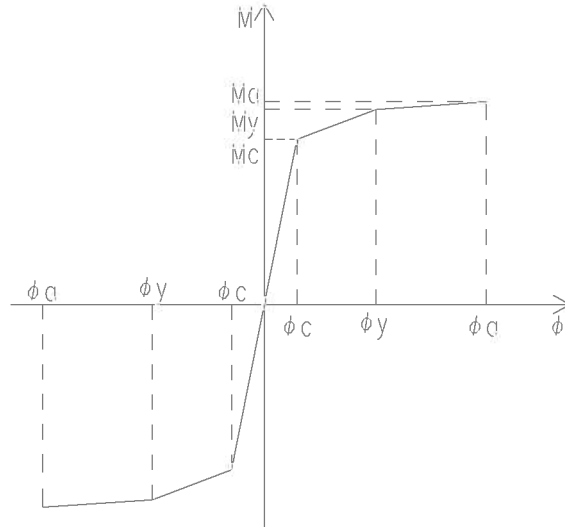
表-2.11 各構造要素の減衰定数の標準値

構造部材	線形部材としてモデル化する場合		非線形履歴によるエネルギー吸収を 別途考慮するモデルを用いる場合	
	鋼構造	コンクリート構造	鋼構造	コンクリート構造
上部構造 (ケーブル: 0.01)	0.02	0.03	-	
弾性支承	0.03 (使用する弾性支承の実験より 得られた等価減衰定数)		-	
免震支承	有効設計変位に対する等価減衰定数		0	
橋脚	0.03	0.05	0.01: コンクリートを充てんしない場合 0.02: コンクリートを充てんする場合	0.02
基礎	0.1: I種地盤上の基礎及び II種地盤上の直接基礎 0.2: 上記以外の条件の基礎		-	

2.12 躯体の非線形性

構造物の非線形性をM- ϕ 特性を用い考慮し、下記に示す。

部材	骨格	内部履歴	軸力
躯体, 杭体	トリリニア対称型	Takeda型	常時荷重



M_c : ひび割れモーメント
 M_y : 降伏モーメント
 M_a : 終局モーメント
 ϕ_c : ひび割れ曲率
 ϕ_y : 降伏曲率
 ϕ_a : 終局曲率

図-2.12.1 トリリニア対称型骨格図

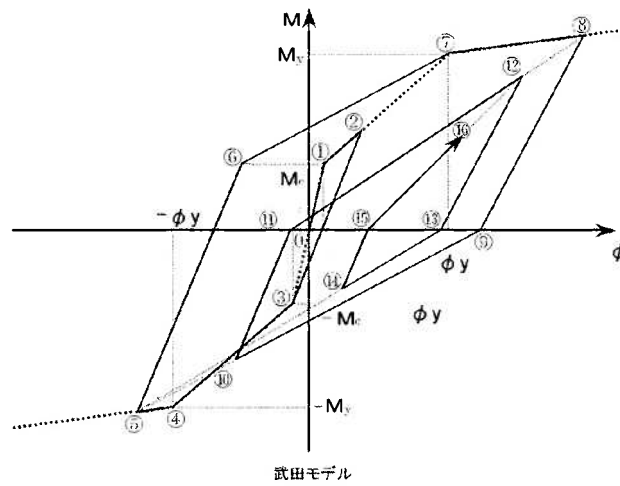


図-2.12.2 トリリニア Takedaモデル 内部履歴図

2.15 設計地震動の設定

レベル1及びレベル2地震動に対するそれぞれの選定方法を以下に示す

[水道施設耐震設計指針・解説 I 3.1.9 P.37, 39]

レベル1地震動	水道耐震指針「総論解説編Ⅲ」に示す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。(表-2.15.1)
レベル2地震動	方法2、方法3より選定する。(表-2.15.2)

表-2.15.1 レベル1地震動設定方法

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
従来の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、「総論解説編Ⅲ」に示す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。ただし、構造物の非線形性を考慮する場合には、当該地点と同様な地盤条件における観測記録で、「総論解説編Ⅲ」の設計震度と同等と見なせる時刻歴加速度波形を用いる ^{※1} 。	建設地点の地盤条件及び構造物の固有周期を用い、「総論解説編Ⅲ」に示す設計震度を用いる。
経済性照査を用いて設定する場合	① 複数の設計震度を用いて、静的解析にて解析モデル（設計断面）を複数設定する。 ② 震源断層を想定した地震動評価による建設地点の地震動や、建設地点と同様な地盤条件で観測された強震記録の中で、震度5弱～震度6強程度を観測したものから、複数の大きさの地震動を抽出する。 ③ ①で設定した解析モデルを対象に、②で抽出された複数の地震動の時刻歴加速度波形を入力した動的解析を行い、建設費及び地震による被害等を指標とし、経済性照査を行う。 ④ ③の結果を用いてトータルコストが最小となる弾性限界を決め、これに基づいてレベル1地震動の設計震度とする ^{※2} 。	① 複数の設計震度を用いて、静的解析にて解析モデル（設計断面）を複数設定する。 ② 震源断層を想定した地震動評価による建設地点の地震動や、建設地点と同様な地盤条件で観測された強震記録の中で、震度5弱～震度6強程度を観測したものから、複数の大きさの地震動を抽出する。 ③ ①で設定した解析モデルを対象に、②で抽出された複数の地震動の応答スペクトルを用いた静的解析を行い、建設費及び地震による被害等を指標とし、経済性照査を行う。 ④ ③の結果を用いて、トータルコストが最小となる弾性限界の大きさを決め、これに基づいてレベル1地震動の設計震度とする ^{※2} 。

※1 ランクBの動的解析において、「構造物の非線形性を考慮する場合には、当該地点と同様な地盤条件における観測記録で、「総論解説編Ⅲ」の設計震度と同等と見なせる時刻歴加速度波形を用いるが、その場合、地表面最大加速度がレベル1地震動の一般的な水平震度の0.2に相当する記録を同等と見なすものとする。

※2 弾性限界とレベル1地震動の設計震度を同義としていないのは、ランクBにおいて軽微な損傷を許容していることによるものである。

表-2.15.2 レベル2地震動設定方法

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
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、工学的基盤面の時刻歴加速度波形、あるいは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。	「総論解説編Ⅲ（97年版指針再掲部）」の設計応答スペクトルまたは、それに適合した時刻歴波形を用いる。

レベル1及びレベル2地震動の入力波形は以下のように設定する。

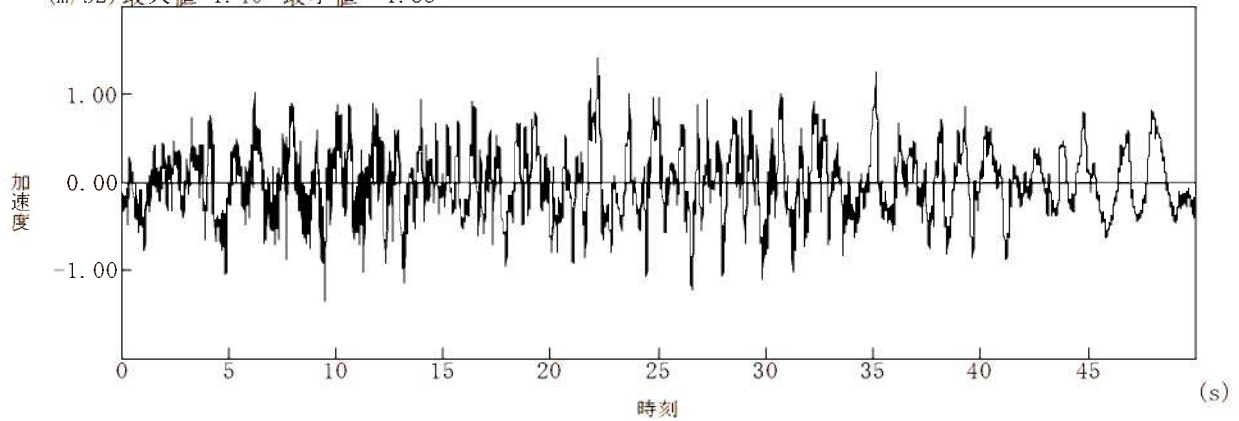
- レベル1地震動: III種地盤強震記録
- レベル2地震動: ①中央防災会議における想定地震
- ②中央防災会議における想定地震
- ③ EW観測波

・レベル1地震動入力波形

III種地盤強震記録(1983年日本海中部地震津軽大橋周辺地盤)

入力地震動加速度波形図

(m/s²) 最大値=1.40 最小値=-1.35

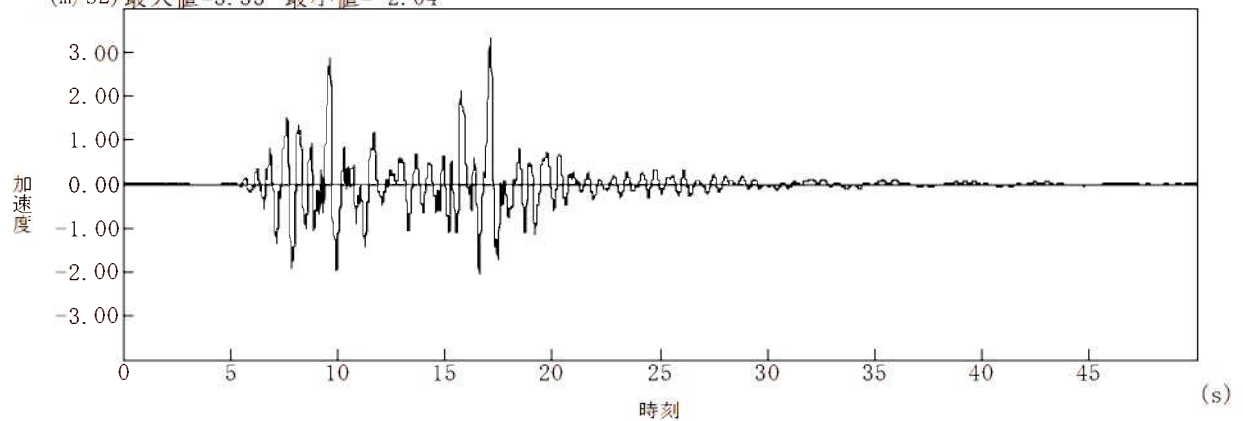


・レベル2地震動入力波形

①想定地震波 NS(南北)波

入力地震動加速度波形図

(m/s²) 最大値=3.33 最小値=-2.04

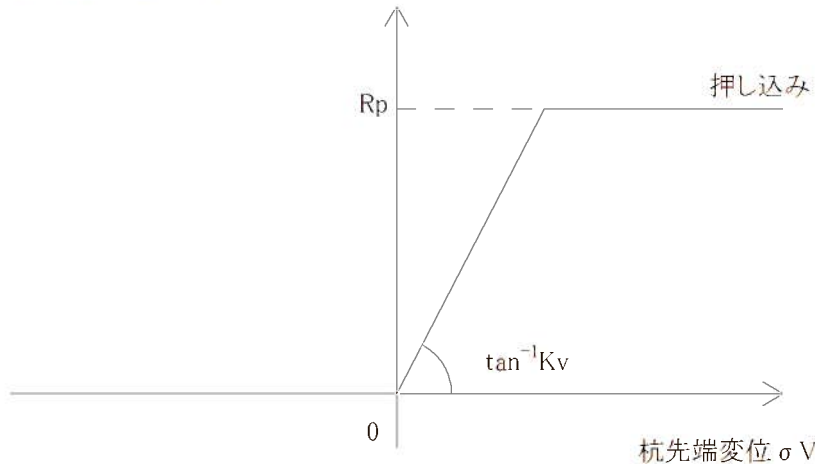


2.16 地盤反力係数

2.16.1 杭のばね特性

構造解析上での直接基礎は、地盤ばねを介して構造物を支持する。
ばね入力用の地盤反力係数を次の通り算出する。

(1) 杭先端の鉛直方向地盤抵抗



・鉛直方向ばね定数

$$K_v = k_v \cdot A_v$$

[鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物 p. 214]

K_v : 設計鉛直ばね定数(kN/m)

k_v : 鉛直方向地盤反力係数(N/m³)

A_v : 杭先端の面積(m²)

[鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物 p. 208]

・鉛直方向地盤反力係数

$$k_v = f_{rk} \cdot (3.2 \cdot \alpha \cdot E_0 \cdot D^{-3/4})$$

[鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物 p. 87]

α : E_0 の算定方法に対する補正係数 = 2 (標準貫入試験の場合)

E_0 : 地盤の変形係数(kN/m²) = 2500N

D : 杭先端の直径(m)

N : 杭先端地盤のN値

f_{rk} : 地盤抵抗係数(=1.0)

・杭の基準先端支持力

[鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物 p. 227]

$$R_p = q_a \cdot A_p$$

R_p : 杭の基準先端支持力(kN)

q_a : 杭の基準先端支持力度(kN/m²)

A_p : 杭の先端面積(m²)

・杭の基準先端支持力度

砂質土の場合

$$q_a = 300N \leq 10000kN/m^2$$

砂礫の場合

$$q_a = 300N \leq 15000kN/m^2$$

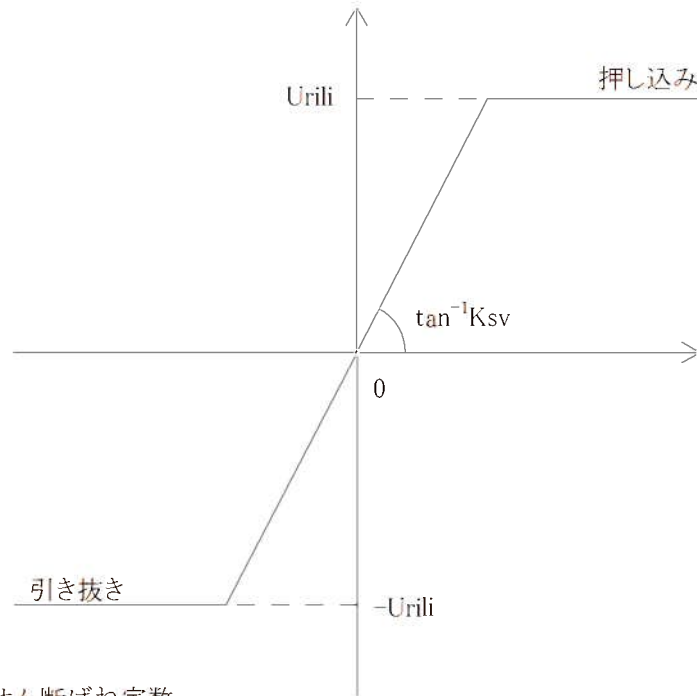
硬質粘性土または軟岩の場合

$$q_a = 4.5q_u \text{ または } 100N \leq 20000kN/m^2$$

N : 杭先端地盤における支持力算定上のN値

q_u : 杭先端地盤における支持力算定上の一軸圧縮強さ(kN/m²)

(2) 杭周面のせん断地盤抵抗



・杭周面設計せん断ばね定数

$$K_{sv} = k_{sv} \cdot U \cdot \Delta l$$

[鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物 p. 214]

K_{sv} : 設計せん断ばね定数(kN/m)

k_{sv} : 設計せん断地盤反力係数(kN/m³)

U : 杭の周長

Δl : せん断ばね定数を算定する範囲の杭の長さ

・杭周面設計せん断地盤反力係数 [鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物 p. 209]

砂質土の場合

$$k_{sv} = frk \cdot (0.16 \cdot \alpha \cdot E_0 \cdot D^{-3/4})$$

粘性土の場合

$$k_{sv} = frk \cdot (0.3 \cdot \alpha \cdot E_0 \cdot D^{-3/4})$$

α : E_0 の算定方法に対する補正係数 = 2 (標準貫入試験の場合)

E_0 : 地盤の変形係数(kN/m²) = 2500N

D : 杭先端の直径(m)

N : 杭周面地盤のN値

frk : 地盤抵抗係数(=1.0)

・杭の最大周面支持力 Ur_{li}

U : 杭の周長(m)

r_i : 各土層の杭の最大周面支持力度(kN/m²)

l_i : 各土層の厚さ(m)

・杭の最大周面支持力度 r

砂質土の場合

$$r = 3N + 30 \leq 150 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

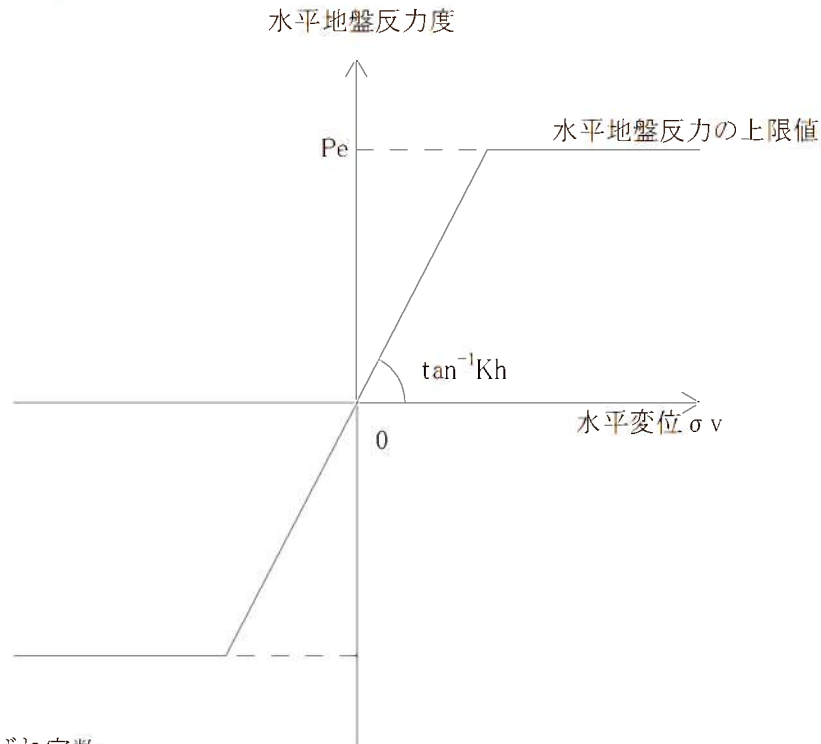
粘性土の場合

$$r = q_u / 2 \text{ または } 10N \leq 150 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

N : 土層のN値

q_u : 粘性土層の一軸圧縮強さ(kN/m²)

(3) 杭の水平方向地盤抵抗



・杭の設計水平ばね定数

$$K_h = k_h \cdot D \cdot \Delta l$$

[鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物 p. 214]

D: 杭径(m)

Δl : 水平ばね定数を算定する杭の長さ(m)

k_h : 設計水平地盤反力係数(kN/m³)

・杭の設計水平地盤反力係数

$$k_h = frk \cdot (0.6 \cdot \alpha \cdot E_0 \cdot D^{-3/4})$$

α : E_0 の算定方法に対する補正係数 = 2 (標準貫入試験の場合)

E_0 : 地盤の変形係数(kN/m²) = 2500N

D: 杭先端の直径(m)

N: 杭先端地盤のN値

frk: 地盤抵抗係数(=1.0)

・水平地盤反力の上限值

水平地盤反力の上限値は、単杭の有効抵抗度圧力度 P_e とし、土質に応じて次式により算出する。

砂質土の場合

$$P_e(z) = frp(\alpha \cdot \gamma \cdot z \cdot K_p)$$

$P_e(z)$: 深さZにおける有効抵抗土圧力度(kN/m²)

α : 杭前面の形状係数(一般に $\alpha=2$)

γ' : 深さZまでの平均有効単位体積重量(kN/m³)

z: 深さ(m)

K_p : 受動土圧係数

$$K_p = \tan^2(45 + \phi/2)$$

ϕ : 内部摩擦係数(度)

frp: 地盤抵抗係数(=1.0)

粘性土の場合

$$P_e(z) = (1+z/2D)(\gamma \cdot z + 2c) \leq 6c$$

D: 杭の直径

c: 粘性土の粘着応力度(kN/m²)