

限界状態設計法による杭基礎の試設計例

Trial Design of Pile Foundation by Limit State Design

西村 昭彦 (にしむら あきひこ)

財鉄道総合技術研究所耐震・基礎研究室 室長

1. はじめに

鉄道構造物の設計においては、平成2年度にコンクリート構造物および鋼・合成構造物に限界状態設計法が導入され、平成3年12月にはその扱いについて運輸省から関係箇所に通達され、上部工を限界状態設計法で行うことができるようになった^{1),2)}。

一方、基礎構造物については、平成2年度から5年間の予定で設計法の改訂に取り組んでおり、「基礎・抗土圧構造物設計標準に関する委員会（委員長久保村圭助芝浦工業大学教授）」において検討を重ねてきた。

しかし、上部工を限界状態設計法で設計しても、現行の基礎の設計法が許容応力度設計法³⁾であるため、荷重体系等が異なり、設計の手間がかかるため、設計実務者から基礎の限界状態設計法の早期改訂の要望が高まった。そこで、検討の早く進んでいる普通地盤（基礎の設計に地震時の地盤の変位を考慮しなくてもよい地盤）における基礎構造物の設計に限り、設計指針（案）を作成し、委員会です承を得たので、その概要とそれに基づく杭基礎の試計算例を紹介する。

なお、基礎の限界状態は2.1で述べるように三つを考えているが、この試計算例では杭基礎の諸元を決定すると考えられる限界状態Ⅲ（大地震時における限界状態）を主体に述べる。

2. 限界状態設計法による基礎の設計の考え方

2.1 設計で考慮する限界状態と設計計算

限界状態設計法を導入する上で最も重要な事項は限界状態の設定である。地盤を構成する土は、構造物の主たる材料である鉄やコンクリートに比べると

塑性的な性質を有する材料であり、荷重の性状やひずみの大きさ等により異なる性状を示す。このため基礎の設計にあたっては、これらの要因を考慮して、図—1に示す荷重～変位曲線で限界状態を設定することとした。これは主として基礎の安定に関して用いるものであり、縦軸は基礎に載荷される荷重（地震時荷重によるモーメント）であり、横軸は基礎の変位（基礎の回転角）である。この図中のⅠ～Ⅲ点が限界状態であり、その定義は次による。

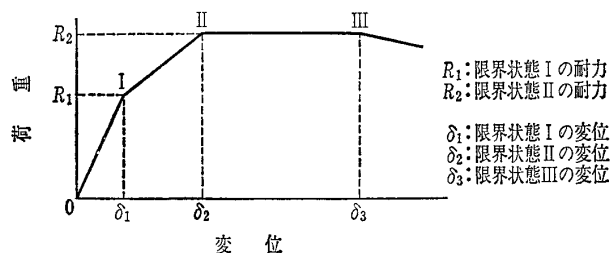
① 限界状態Ⅰ：設計耐用期間中に、常に、もしくはしばしば作用する荷重に対して、基礎が所要の使用性と耐久性を失い、しかも基礎の変位が弾性とみなされる値を超える状態。

② 限界状態Ⅱ：設計耐用期間中にまれに作用する荷重に対し、基礎が使用性と耐久性を失い、しかも基礎の変位が地盤の降伏点を超える状態。

③ 限界状態Ⅲ：設計耐用期間中に極めてまれに作用する荷重に対して、基礎が壊滅的な損傷や変位を生じ、安定や機能を失う状態。

基礎の設計計算においては図—1に示す荷重～変位曲線を地盤のばね定数およびその抵抗力の限界と部材の剛性を考慮して基礎ごとに作成し、基礎の安定、応力などを検討することとなる。

なお、実際の設計では、限界状態を荷重の組合せに応じて表—1のように細分化する。限界状態Ⅰ—



図—1 基礎構造物の荷重～変位曲線の概念

表—1 設計荷重の組合せ

限界状態		設計荷重の組合せ
I	I—1	永久荷重
	I—2	永久荷重+変動荷重
II	II—1	永久荷重+主たる変動荷重+従たる変動荷重
	II—2	永久荷重+偶発荷重+従たる変動荷重
III		永久荷重+偶発荷重+従たる変動荷重

永久荷重：変動がほとんどないか、変動が持続的成分に比べて無視できるほど小さい荷重

変動荷重：変動が頻繁に、あるいは連続的に起こり、かつ変動が持続的成分に比べて無視できないほど大きい荷重

偶発荷重：設計耐用期間中に作用する頻度はまれであるが、作用すると影響が非常に大きい荷重

I は現行設計法での常時、限界状態 I—2 は常時+一時、限界状態 II—2 は地震時にあたる。

2.2 安全係数

基礎の設計に用いる安全係数は、荷重係数、構造解析係数、材料係数、部材係数、構造物係数（重要度係数）、地盤調査係数、地盤抵抗係数、地盤特性係数とする。このうち先の五つは上部工の設計に用いられるものと同様であり、基礎として特徴のあるのは後の三つである。したがってここではその定義を示すこととする。

① 地盤調査係数：地盤の定数 c (粘着力)、 ϕ (内部摩擦角) 等の特性値が土質調査・試験の精度および信頼性に大きく依存していることを考慮するための係数。

② 地盤抵抗係数：地盤の支持力の算定式等が不確実の要素を含んでおり、それを評価するための係数。なお、この値は不確実な要素の解明が難しいため、現行の基礎標準に定める安全係数および安全係数を考慮して定めた。

③ 地盤特性係数：基礎の支持力を施工法および

施工管理方法によるばらつきや載荷試験の実施等を考慮して定めるための係数。

これらの標準的な値を表—2 に示す。なお、地盤特性係数は載荷試験を実施した場合は 1.2 としてよい。

2.3 変位量の制限値

鉄道構造物は列車の走行安全性を確保することがその目的である。そのためにはそれ自身が外力によって破壊しないことはもちろんであるが、過大な変形を生じると列車の脱線が起こり、その目的が果たせなくなるので、変位に対しても制限を設ける必要があり、その値は次の各項を考慮して決定する。

(1) 構造物の変位量の制限値

① 河川、鉄道、道路等を横断する構造物において、建築限界および所要の空頭の確保から定まる変位量の制限値

② 列車を支持する構造物において、列車の乗り心地、軌道に与える影響等から定められた不同変位の制限値

(2) 基礎の変位量の制限値

① 限界状態 I, II における基礎の変位量の制限値

② 限界状態 III における基礎の塑性率の制限値
なお、基礎の変位量の制限値は各基礎によりその復元力特性（荷重が除去されたあとの残留変位等）が異なるため各基礎において定める。

2.4 荷重

(1) 基礎の設計に用いる荷重

基礎の設計には、施工中および設計耐用期間中に作用する永久荷重、変動荷重および偶発荷重を、各々の限界状態と検討事項に応じて、適切な組合せのもとに考慮しなければならない。その設計荷重の組合せは、表—1 に示した。

表—2 基礎構造物の設計に用いる標準的な安全係数の値

限界 状態			地 盤 に 関 す る 係 数			構 造 体 に 関 す る 係 数			
	荷重係数 γ_f	構造解析 係数 γ_s	地盤調査 係数 f_s	地盤抵抗係 数 f_r	地盤特性 係数 f_p	材 料 係 数		部 材 係 数 γ_b	構造物係数 γ_f
						コンクリート γ_{mc}	鋼 材 γ_{ms}		
I	1.0	1.0	1.0~1.2	0.0~0.5	1.0~1.2	1.0	1.0	1.0	1.0~1.2
II	1.0~1.2	1.0		0.15~0.67	1.0~1.2	1.3	1.0	1.15(1.30)	1.0~1.2
	1.0	1.0		0.3~1.0	1.0~1.2	1.0	1.0	1.0 (1.30)	1.0~1.2
III	1.0	1.0		1.0	1.0~1.2	1.3	1.0	1.0 (1.15)	1.0~1.2

注：() はコンクリートの強度により定まるせん断耐力の算定に用いる。

表—3 荷重係数

限界状態	荷重の種類	荷重係数 γ_f
I	すべての荷重	1.0
IIおよびIII	永久荷重	1.0~1.2, 0.8~1.0*
	主たる変動荷重	1.1~1.2
	従たる変動荷重	1.0
	偶発荷重	1.0

*：小さい方が不利となる場合

表—4 想定地震規模と限界状態

想定地震規模	限界状態	
	基礎の安定	構造物および基礎の部材の検討
大地震	III	終局限界状態
中地震	II-2	使用限界状態

(2) 荷重係数

荷重係数は、一般に限界状態IIおよびIIIの検討において意味を持つものと考えられるが、設計荷重は荷重の特性値に荷重係数を乗じて定めるものとしたため、限界状態Iの検討に対しても導入した。その値を表—3に示す。

2.5 耐震に関する検討

(1) 耐震設計の考え方

構造物の耐震安全性は、上部工と基礎の耐震安全性によるが、そのバランスがとれていることが重要である。したがって、基礎の耐震設計にあたっては、基礎が設計想定地震に対して必要な安全性を確保するとともに、上部工を含めた構造物全体の安全性に配慮するのがよい。また、構造物の耐震安全性は、地盤の特性にも大きく左右されるので、地形・地質にあった構造計画を行うことも必要である。

(2) 考慮する地震

基礎の設計においては、表—4に示す2種類の規模の想定地震の影響を考慮することとした。またそれぞれの想定地震に対する限界状態も同表に示す。

(3) 限界状態IIIの検討

限界状態IIIにおいては、部材については強度および靱性、変位については構造物の変位および基礎の塑性率の検討を行うものとする。検討に必要な設計震度と塑性率の計算法を次に示す。

1) 設計水平震度の算定式

限界状態IIIの検討に用いる設計水平震度は次式により算定する。

$$k_h = \nu_1 \nu_2 \nu_3 \nu_4 k_{h0} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 k_h は設計水平震度であり、 k_{h0} は設計水平震度の基準値で一般に1.0とする。 ν_1 は地域別補正係数、 ν_2 は応答特性別補正係数で、いずれも「鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）」¹⁾に準ずる。 ν_3 は減衰定数別補正係数で、減衰定数 h に応じて次式より求める。

$$\nu_3 = \frac{1.5}{40h+1} + 0.5 \dots\dots\dots (2)$$

この式は減衰定数5%（弾性応答）の加速度応答スペクトル値を任意の減衰定数 h の加速度応答スペクトル値に補正するためのものである⁴⁾。基礎は一般に逸散減衰が大きいので各基礎とも0.15としてよいこととした。その場合、 ν_3 は0.71となる。

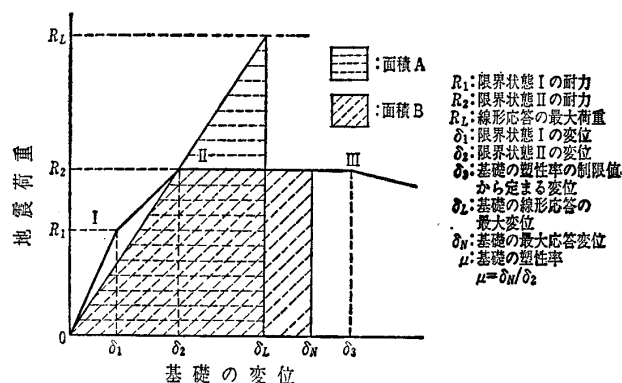
ν_4 は、有効入力に関する補正係数である。基礎に作用する有効入力動の動的相互作用の効果を評価するもので、基礎の剛性が大きいほど、また地震動の地中または地表面での分布の変化が著しいほど、基礎への有効入力動は自然地盤の地震動と異なったものとなり、基礎の存在による地震動の入力損失と呼ばれる効果が顕著になる。したがって、各基礎においてその値は異なるが、検討が十分でないため、現状では各基礎とも1.0とした。

2) 基礎の塑性率の算定

基礎の大変位領域での載荷試験の結果から、大変位領域においては基礎は塑性変形を生じるが、かなり大きい靱性率を持つこと、地盤および部材の特性から、基礎の降伏および最大耐力を求めることが可能であるということなどが判明した^{5)~7)}。

そこで、限界状態IIIにおいては基礎の塑性変形を許容することとしたが、設計計算において、塑性領域の変位量を求めるのは計算が複雑となるので、計算上の簡便さを図るため、「鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）」¹⁾と同様、エネルギー一定則により算定することとした。

エネルギー一定則とは、図—2に示す荷重～変位曲線の降伏点（II点）と原点（0点）とを結ぶ割線勾配を全体のばね定数とする基礎に、上部構造物からの荷重が外力として作用したとき、基礎が線形応答をするものとして求めた面積 A と基礎の塑性変位を考慮して求めた面積 B とが等しくなるように基礎の応答変位を求める手法をいう。また、基礎の塑性



図—2 耐震設計における基礎の塑性率の計算法概念

率は、同図における最大応答変位 δ_N の降伏変位 δ_2 に対する比 δ_N/δ_2 として求める。基礎の降伏点および塑性率の制限値は各基礎ごとに異なるので各基礎において定めるものとする。

2.6 杭基礎の設計の考え方

(1) 設計手順

杭基礎は、設計耐用期間をととして、上部構造を安全に支持するとともに、有害な変位を生じないよう一般に次の各条件を満足するように設計する。

- 1) 杭基礎に作用する外力に対して十分な支持力を有すること。
- 2) 杭基礎および上部構造物の変位がそれぞれの制限値以内であること。
- 3) 杭基礎の各部材が所要の耐力および耐久性を有すること。

また、基礎周辺の地形、地質等の条件によっては、構造物に影響を及ぼす範囲の地盤の安定についても検討しなければならない。

杭基礎の一般的な設計手順を図—3に示す。

(2) 杭基礎の設計法

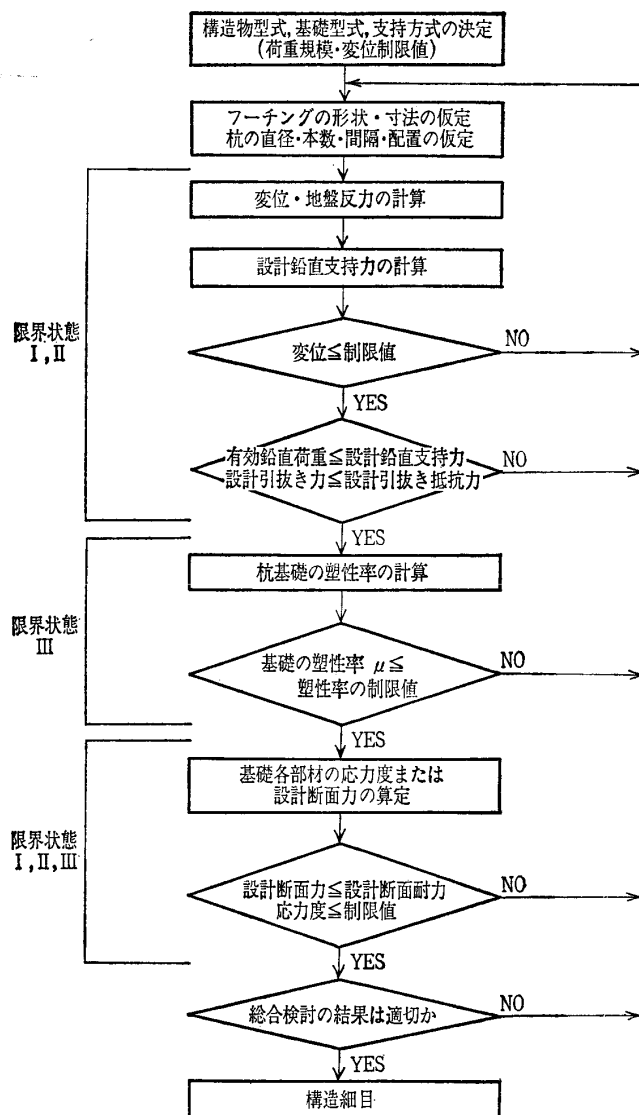
杭基礎は、設計方針に従って、各限界状態において次の条項を満足するように設計する。

1) 鉛直支持に対する検討

限界状態ⅠおよびⅡに対して、杭頭に作用する設計鉛直力が杭頭における設計鉛直支持力以下であること。

2) 引抜き力に対する検討

限界状態ⅠおよびⅡに対して、杭頭に作用する設計引抜き力が、杭基礎の設計引抜き抵抗力以下であること。



図—3 杭基礎の一般的な設計手順

3) 変位に対する検討

各限界状態において、杭基礎の設計水平変位量が、杭基礎の変位量の制限値以下であること。なお、杭基礎の限界状態Ⅲにおける塑性率の制限値は3とする。

4) 杭体の検討

各限界状態において計算される杭体の断面力が、構造物設計標準に定める値を満足すること。

5) フーチングの検討

各限界状態において、杭反力に基づいて算定した応力度または断面力が「鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）」¹⁾によって求まる応力度の制限値または設計断面耐力を満足すること。

(3) 荷重～変位曲線の計算法

杭基礎の杭頭作用力、断面力ならびに変位量の算定は、杭を曲げ部材として扱い、基礎の剛性および地盤反力の特性を考慮した骨組解析によって行うこ

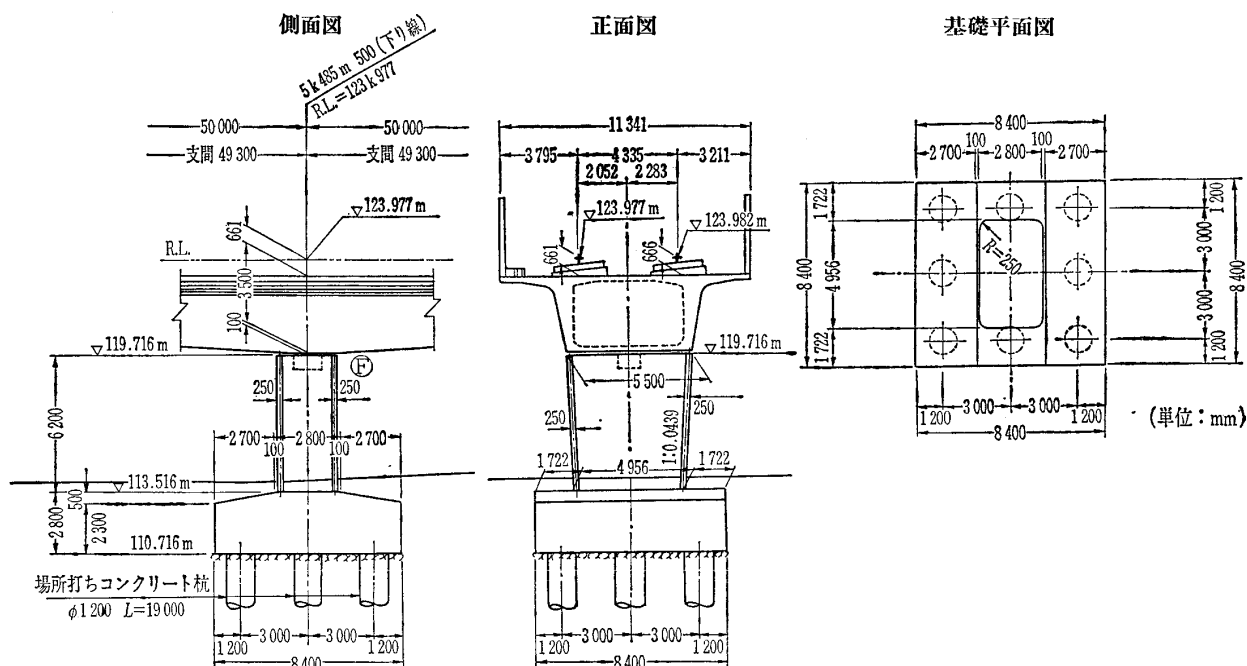


図-4 橋脚の形状

とを原則とする。なお、基礎を支持する地盤の反力度は、上限値を設けた弾塑性体として評価する。この場合、群杭においては最縁端の杭が抵抗の最大値に達した時を限界とするのではなく、荷重は順次内側の杭に分配されるものとして、荷重～変位曲線を求める。なお、荷重～変位曲線におけるⅡの限界値は杭体の降伏または最縁端の杭の鉛直方向の抵抗力の上限値としてよい。

3. 杭基礎の試算例

3.1 対象構造物

対象とした杭基礎は実際に許容応力度設計法で設計された鉄道橋梁の複線用壁式橋脚の基礎である。

橋脚の諸元を図-4に示す。

(1) 構造条件

上部構造はPC箱形連続桁(スパン50m)であり、杭基礎は場所打ちコンクリート杭($\phi 1.2\text{m}$, $L 19.0$

m)で、橋脚を支える杭は8本である。

(2) 地盤条件

地盤条件を図-5に示す。地盤は砂質土と粘性土の互層である。

(3) 解析条件

解析条件は、杭・地盤ともに非線形性を考慮した。杭については、図-6に示すようなトリリニア型とし、軸力による材料特性の変動を考慮した。基礎および地盤の反力については図-7に示すようなバイリニア型とした。この値は地震時の地盤のばね定数に変位量を乗じて求める。反力の最大値($P_{\max}$)は「建造物設計標準解説(基礎構造物および抗土圧構造物)」³⁾の支持力により定めるものとし、杭の鉛直支持力については基準支持力、土の支持力は有効抵抗土圧とした。

(4) 計算モデル

計算に用いた解析モデルを図-8に示す。荷重が

層厚 (m)	土質	N値	γ_t (tf/m^3)
3.3	表土		1.8
2.6	砂質土	10	1.8(0.8)
5.0	砂質土	15	1.8(0.8)
4.0	粘性土	4	1.5(0.5)
6.4	粘性土	10	1.6(0.6)
1.0	砂質土	50	2.0(1.0)

図-5 地盤条件

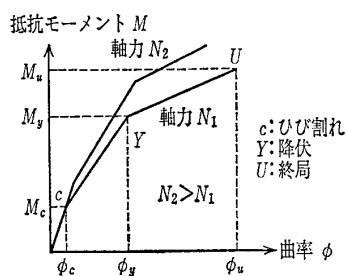
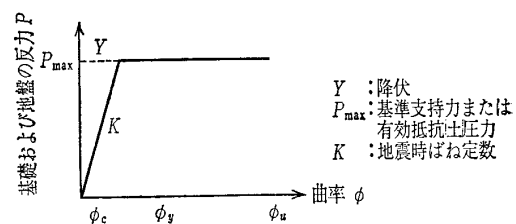
図-6 杭のモデル化
(トリリニア型)

図-7 地盤のモデル化(基礎標準型)

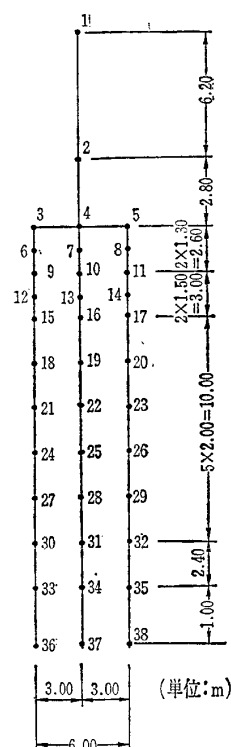


図-8 計算モデルの概要

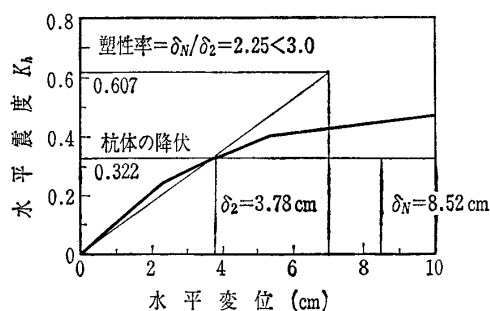


図-9 中間杭の荷重～変位曲線

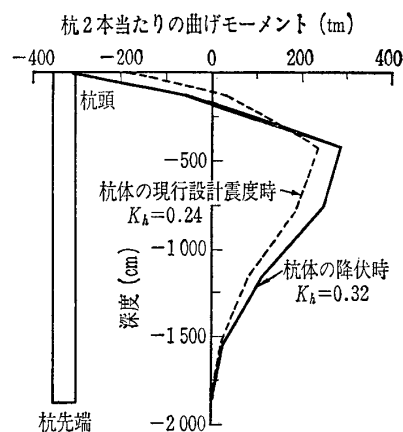


図-10 杭体の曲げモーメント分布

(2) 杭体に生じた曲げモーメント分布

非線形解析結果から得られた杭体の降伏時の曲げモーメント分布と許容応力度設計（設計水平震度 $k_h = 0.24$ ）における杭基礎の曲げモーメント分布をあわせて図-10に示す。これより杭体のモーメント分布は設計時の形状と降伏時のそれとでは形状にあまり変化が見られない。

(3) 設計計算例のまとめ

以上のように、限界状態設計法での試算では許容応力度設計法で設計された諸元とほぼ同程度のものとなる。

4. おわりに

現在作成中の限界状態設計法による試算例を示した。この設計法は平成6年度末の完成に向けて努力中であり、まだ検討しなければならない点も残されている。皆様のご意見をお待ちします。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物），丸善，1992.
- 2) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成構造物），丸善，1992.
- 3) 土木学会：建造物設計標準解説（基礎構造物および抗土圧構造物），1986.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，丸善，1990.
- 5) 西村・羽矢：塑性域を考慮した直接基礎の設計法の研究，鉄道総研報告，第6巻，第3号，pp. 57～64，1992.
- 6) 西村・羽矢・久楽・棚村：模型ケーソン基礎の大変位水平載荷試験，鉄道総研報告，第7巻，第2号，pp. 35～42，1993.
- 7) 西村・田中・奥村：模型杭の大変位水平載荷試験とその解析，鉄道総研報告，第7巻，第12号，pp. 41～48，1993.

（原稿受理 1994. 4. 21）

載荷される方向に対して直角の方向には杭の本数が同一でない（2本または3本）ので断面はそれに合うように換算した。

杭は地盤の水平ばねおよび鉛直方向の摩擦ばねに支えられている。

3.2 設計震度

各補正係数は以下のとおりである。

$$\nu_1 = 1.0, \nu_2 = 0.85, \nu_3 = 0.714, \nu_4 = 1.0$$

したがって、設計水平震度は

$$k_h = 1.0 \times 0.85 \times 0.714 \times 1.0 \times 1.0 = 0.607$$

となる。この値を用いて試算を行う。

3.3 計算結果

(1) 荷重～変位曲線

杭基礎の非線形解析結果から得られた水平荷重～水平変位曲線を図-9に示す。水平震度 $k_h = 0.322$ で引抜き側の杭体が降伏に達した。ここで、杭体の降伏とは曲げにより杭体の引張り側鉄筋が降伏ひずみに達することである。

この点を杭基礎の降伏点とし、前述したエネルギー一定則を用いて最大応答変位量の算定を行い基礎の塑性率の検討を行った。これによると基礎の塑性率は2.25となり、基礎の塑性率の制限値以下となっている。