

基礎構造物における限界状態

How to Define the Limit States for Foundation Design

基礎構造物の限界状態設計に関する研究委員会

限界状態の定義ワーキンググループ

1. ま え が き

構造設計において限界状態設計法の導入は、時代のう勢であり、海外における基準、国内における上部構造の基準で既に実現化されている。基礎構造物に限界状態設計法を導入するためには、基礎構造物の挙動の複雑さ、地盤の強度特性や多岐にわたる工法とその品質等に関する統計・確率量としての評価、上部構造の機能への影響による間接的評価など、多くの課題を克服しなければならない。ここでは、基礎構造物に限界状態設計法を導入するに当たって、根幹となる限界状態の定義にかかわる事項を、海外・国内基準の動向および杭基礎を具体事例として論ずることとする。

2. 基礎構造物における限界状態の特殊性

基礎構造物が支持する上部構造の機能は、明りょうかつ直接的である。例えば、建築物は人が生活するという機能、橋梁は交通を可能にするという機能を持っており、それを維持することが限界状態の定義そのものである。しかしながら基礎構造物では、要求される機能は上部構造を支持することであり、上部構造を介して評価される特殊性を有している。

上部構造を支持する基礎構造物への最小限の要求は、基礎構造物自体の安定性、耐久性が確保されることにある。これに影響する基礎の挙動は、基礎周辺地盤の安定と変形、支持力、基礎構成部材耐力、地盤および部材の破壊形態の影響を受ける。さらに、自然地盤の強度特性、基礎の支持力特性、部材の品質等は、大きな変動を有する統計・確率量である。

一例として地盤破壊の定義は、局部破壊と全般破壊のように評価方法で異なる。また、地盤は極限状態に至っていないが、相当大きな変形が上部構造の

終局限界状態を引き起こすこともあり得る。

基礎構造物のもう一つの特殊性は、補修が非常に困難かつ多額の費用が掛かるということであり、これも限界状態の決定に大きな影響を与える。

基礎の限界状態の設定に当たっては、これらの事象を適切に評価する必要がある。

3. 諸基準における基礎の限界状態

3.1 海外基準

(1) Eurocode^{1)~3)}

1) 概要 Structural Eurocode(以下Eurocodeと称す)は、制度的には欧州連合(EU)の建設製品指令(CPD89/106/EEC)に規定されている六つの基本要件の一つ、「力学的耐力と安定性」に対応する解釈文書(ID)的なものと位置付けられる。欧州標準化委員会(CEN)はEurocodeを制定するため、1990年5月CEN/TC250“Structural Eurocode”を設置した。Eurocodeは1から9まで制定される。すべての構造物に適用できる構造設計基準を作成しようとする考えは、技術・学術団体の協定により1974年に誕生し、20年の長い歴史がある。

Eurocodeは現在制定作業中であり、その一部が欧州規格案(ENV. Prestandard)として発行されている。試行を経て将来欧州規格(EN, European Standard)となる。基礎構造物の設計に関しては、Eurocode 7, Part 1, Feb., 1993である。関連するものに、Eurocode 1, Part 1, Oct., 1993(設計の基本)がある。これらはENV以前の作業文書である。

2) 設計法の特徴と目標安全度 設計法のレベルとしては部分安全係数法であり、基本的には既存の基準とのキャリブレーションにより係数を決める。しかし、一部の係数はFORM(First Order Reliability Method)の単純化として決められている。後

表—1 限界状態および作用組合せの部分係数など (Eurocode)

限界状態と設計状況		作用 (荷重) 永 久 作 用 $G_{kj}(j \geq 1)$	プレストレス 作用 P_k	支配的変動作 用 Q_{k1}	他の変動作用 $Q_{ki}(i > 1)$	偶発作用 A_c	地震作用 A_{Ed}
終 局 限 界 状 態	永久作用 (常時), 一時的作用 (施工時等) 設計状況	γ_{Gi}	γ_P	γ_{Q1}	$\gamma_{Qi}\Psi_{0i}$	—	—
	偶発作用設計状況の組合せ	γ_{GAj}	γ_{PA}	Ψ_{11}	Ψ_{2i}	1.0	—
	地震作用設計状況の組合せ	1.0	1.0	Ψ_{21}	Ψ_{2i}	—	γ_I
使 用 限 界 状 態	支配的作用がまれに生ずる組合せ	1.0	1.0	1.0	Ψ_{0i}	—	—
	支配的作用がしばしば生ずる組合せ	1.0	1.0	Ψ_{11}	Ψ_{2i}	—	—
	支配的作用がほとんど常時生ずる組合せ	1.0	1.0	Ψ_{21}	Ψ_{2i}	—	—

注 1) G_{kj} , P_k , Q_{k1} , Q_{ki} は各作用の特性値。 A_c は一つの偶発作用の, A_{Ed} は地震作用の設計値。

注 2) γ_{Gj} は永久作用の, γ_P はプレストレス作用の部分係数。 γ_{GAj} , γ_{PA} は偶発作用設計状況に対する γ_{Gj} , γ_P である。 γ_{Q1} は支配的変動作用の, γ_{Qi} はほかの変動作用の部分係数。部分係数 γ は, 建物の場合 0.9~1.5 の値。

注 3) Ψ_{0i} は一つの変動作用の組合せ値に対する係数 (建物の場合 0~1.0 の値)。 Ψ_{11} は同様に, しばしば生ずる値に対する係数 (建物の場合 0~0.9 の値)。 Ψ_{2i} は同様に, ほとんど常時生ずる値に対する係数 (建物の場合 0~0.8 の値)。ここで, $i=1$ は支配的変動作用を, $i>1$ はほかの変動作用を意味する。

注 4) γ_I は重要度係数で, I から IV までのカテゴリーに分けられる。建物の場合 1.4, 1.2, 1.0, 0.8 の値がガイドラインとして提示。値は各国の National Authorities が決める。

者は主に「試験により支援された設計」の分野に用いられる。例えば, 杭の載荷試験の実施回数により終局支持抵抗の算定が有利になる点などに考慮されている。

意図された使用期間 (4 種類のクラス, 通常の建物 50 年, 土木構造物 100 年) における目標安全度は, 終局限界状態で 3.8, 疲労限界状態で 1.5~3.8, 非可逆的な使用限界状態で 1.5 である。これらの値は, 構造物の破壊頻度を示すというよりは, 一貫した設計ルールを発展させるための道具として意図されたものである。

3) 杭基礎の限界状態と作用の組合せ 杭基礎の限界状態は, 終局, 使用の各限界状態に分けることなく, 以下のものが提示されている。

①全体的な安定性を失うこと, ②杭基礎の支持抵抗が破壊すること, ③杭基礎の浮上りもしくは不十分な引張り抵抗, ④杭基礎の水平加力による地盤の破壊, ⑤圧縮, 引張り, 曲げ, 座屈, せん断による杭の構造的破壊, ⑥地盤と杭の複合破壊, ⑦地盤と構造物の複合破壊, ⑧過度の沈下, ⑨過度のヒービング, ⑩受容しがたい振動。

Eurocode では, ISO (International Standard Organization) の用語を踏襲して作用 (Action) を使用しているが荷重の意味に近い。Eurocode 7 では, 作用の組合せについて示されていない。Eurocode 1 では, 表—1 に示すように終局限界状態, 使用限界状態において各々三つの場合を想定して作用の組合

せを示している。

終局限界状態における地震作用設計状況の場合についてシンボリックに示せば,

$$\sum G_{kj} + P_k + \gamma_I A_{Ed} + \sum \Psi_{2i} Q_{ki} \quad (j \geq 1, i \geq 1)$$

ここに, “+”は「考慮すべき」を, Σ は「必要に応じて考慮」を意味する。その他の記号は表—1 を参照のこと。

(2) AASHTO

1) 概要 米国では, AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials; 1962 年発足) 制定の高速道路橋標準示方書において, 1970 年半ばに軀体より上部の構造に対して LRFD (荷重抵抗係数設計法) の適用法が示されて以来, 現在では多くの州が上部工の設計に LRFD を採用している。

また, LRFD の一層の普及を目的として開始された NCHRP Project の一環として, 1991 年には設計指針案が作成され, 翌 1992 年には AASHTO により採択された。これにより, 上部構造と下部構造は同一の荷重を用いた設計が可能となり, 設計の省力化と構造全体はバランスのとれた安全裕度の設定が図られている。すなわち, 各種の周辺地盤を含む基礎の抵抗力に対して適切な抵抗係数 ϕ を詳細に与えることにより, 設計の手法および思想が統一された。

2) 限界状態と荷重の組合せ 主な限界状態として終局限界状態と使用限界状態がある。前者は基

表—2 限界状態および荷重組合せの部分安全係数など (AASHTO)

荷重組合せ 限界状態	永久荷重	短期荷重 ①	短期荷重 ②	短期荷重 ③	短期荷重 ④	短期荷重 ⑤	短期荷重 ⑥	偶発荷重	想 定 供 用 状 態
強度限界状態—I	γ_P	1.70	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	—	無風下の通常車両走行
強度限界状態—II	γ_P	1.30	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	—	無風下の許可車両走行
強度限界状態—III	γ_P	—	1.00	1.40	—	1.00	0.50/1.20	—	最大風速時、有意な活荷重なし
強度限界状態—IV (部材等死荷重のみ)	γ_P (1.5)	—	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	—	死荷重効果/活荷重効果>7.0
強度限界状態—V	γ_P	1.30	1.00	0.40	0.40	1.00	0.50/1.20	—	風速 25 km/s 時の通常車両走行
偶発的限界状態	γ_P	0.50	1.00	—	—	1.00	—	1.00	単一の偶発荷重の作用
使用限界状態—I	1.00	1.00	1.00	0.30	0.30	1.00	1.00/1.20	—	風速 25 m/s 時の通常車両走行
使用限界状態—II	1.00	1.30	1.00	—	—	—	—	—	供用期間中数回程度の超過車両走行
使用限界状態—III	1.00	0.80	1.00	—	—	—	—	—	地域管制下の許可車両走行
疲労限界状態	—	0.75	—	—	—	—	—	—	トラック走行頻度を考慮

永久荷重：部材・付属物死荷重，ネガティブフリクション，舗装等の死荷重，土圧，盛土荷重，上載土荷重 短期荷重①：活荷重，衝撃荷重，車両遠心力，制動荷重，歩道荷重 短期荷重②：水荷重，流水圧 短期荷重③：構造物に作用する風荷重 短期荷重④：車両等に作用する風荷重 短期荷重⑤：摩擦力 短期荷重⑥：均一温度，温度勾配，クリープ，収縮，沈下の影響 偶発荷重：地震力，氷荷重，車両衝突荷重，船舶衝突荷重（いずれか一つを考慮）

礎の構造体としての破壊および支持地盤の破壊による崩壊を指し，後者は基礎の沈下や過大な変位などによる走行性や排水機能などの喪失を指す。その他の限界状態も合わせ，検討すべき荷重の組合せを表—2に示す。

3) 目標安全度と抵抗係数の決定 AASHTOではACI Code⁴⁾などの例にならい，抵抗係数 ϕ はPerformance-Factorという形で抵抗値の公称値に一括して乗じる方法が取られており，基礎の形式，支持地盤の種類とその抵抗値の評価方法ならびに調査方法などにより評価される。

抵抗係数の決定方法としては，荷重と抵抗の統計値に関する十分なデータが得られる場合には，従来の設計における安全レベルを確認のうえで，信頼性解析手法により目標とする安全性指標 β_T を設定し，これを満足する抵抗係数が荷重と抵抗の平均値，変動係数および公称値と平均値の比率から決定された。一例として，打込み杭では β_T が2.0～2.5に設定されているが，場所打ち杭では β_T が2.5～3.0に設定されている。これは統計値に基づく信頼性解析の結果が両者に同じ結果を与えたのに対し，打込み杭では群杭として用いられることが多いため，単体基礎としての破壊時において群杭としての冗長性(Redundancy)を考慮した結果と報告されている。また，情報量が少ない場合には，許容応力度法における安全率に対応する形で工学的判断を加味し，抵抗係数が割り当てられている⁵⁾。

4) 地震荷重の扱い すべての橋梁は，地震被災後に要求される供用の程度と安全性確保への貢献度に応じて三つの範ちゅうに分類されるが，重要な橋梁（緊急車両が走行可能）では，再現期間475年相当の基盤加速度が与えられる。基礎の設計に用いる地震加速度を試算した結果，米国と我が国の地震活動度の高い地域において構造物の固有周期が0.3と仮定すると，II種地盤（普通地盤）で804 galと595 galを，III種地盤（特殊地盤）で804 galと700 galを得た。なお，我が国の試算は文献6)の限界状態IIIによった。

3.2 国内基準

(1) 限界状態設計法による既往の基準

限界状態設計法を採用している我が国の基準には，表—3がある。これらは鋼構造物設計指針を除き，LRFDによる部分安全係数法を採用しており，各限界状態の概要は表—4に示すとおりである。

(2) 限界状態設計法による基礎構造物の基準

1) 概要 道路橋関係では，国土開発技術研究センターにおいて1989年から3年間「道路橋下部構造の限界状態設計法に関する調査研究委員会」が設けられ，道路橋下部構造の限界状態設計法試案が作成⁷⁾され，その後引き続き日本道路協会「橋梁委員会下部構造小委員会」において「限界状態設計法ワーキンググループ」が設けられ，基準化に向けた研究が進められている。鉄道関係では，鉄道総合技術研究所を事務所として1991年から5年間の予定で「基礎・

表-3 我が国の限界状態設計法による基準類

基準の名称	発行年	機関名
コンクリート標準示方書	1991	土木学会
鋼構造物設計指針	1987	土木学会
鋼構造限界状態設計基準	1990	日本建築学会
鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物、コンクリート構造物	1992	運輸省鉄道局

表-4 各限界状態の概要

機関	土木学会	日本建築学会	運輸省鉄道局
限界状態種類	終局限界状態 使用限界状態 疲労限界状態	終局限界状態 使用限界状態	終局限界状態 使用限界状態 疲労限界状態
設計耐用期間	50年	50年	100年
地震	$k_0=0.2$	$k_0=0.2$	$k_0=1.0$ $k_0=0.2$

抗土圧構造物設計標準に関する委員会」が設けられ、限界状態設計法に基づいた基準作成が進行中である。

これらの試案、作成案の共通点としては、我が国の厳しい地震環境を考慮して、大規模および中規模地震を考え、各地震に対応した二つの限界状態を設定している。このような考え方は、上述した既往の基準、原子力施設の耐震設計、道路橋示方書 V 耐震設計編等に見られるように多段階の設計地震を設定するのが一般的であること、基礎構造物の変状や損傷が生じた場合の補修が大掛かりになることなどを考慮したものと想定される。

2) 道路橋 試案で設定した基礎の限界状態と支配的な荷重を表-5に示す。なお、基礎の安定照査における各限界状態の概念は、基礎における荷重-変位曲線関係で表すとすれば図-1のようになる。試案では、限界状態 II および III に関する成文化が試みられているが、限界状態 I については今後の課題としている。

3) 鉄道構造物 現在作成中ではあるが、基礎の限界状態と主な荷重の組合せを表-6に示すとおりである。限界状態の大別は、道路橋下部構造の試案と同様（記号に関して異なる）であるが、安定照査項目が具体的になっている。なお、限界状態 III（道路橋の I に相当）については、地盤抵抗を弾塑性体と仮定し、等価エネルギー法により基礎の変形性能（塑性率）を照査することとしている。

表-5 限界状態と荷重（道路橋の例）

限界状態	支配的な荷重
I	極めてまれに作用する荷重に対して構造物が壊滅的な損傷が生じない限界状態
II	まれに作用する荷重に対して構造物にほとんど損傷が生じない限界状態
III	常に、またはしばしば作用する荷重に対して構造物が所要の使用性と耐久性が確保される限界状態

表-6 限界状態と設計荷重の組合せ（鉄道の例）

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+中規模地震荷重+従たる変動荷重
III	永久荷重+大規模地震荷重+従たる変動荷重

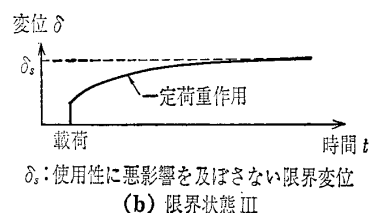
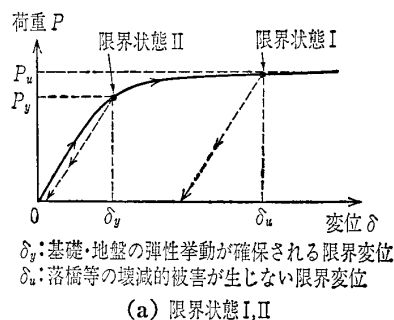


図-1 荷重（時間）-変位曲線における限界状態の位置付け

4. 杭基礎の限界状態の方向付け

4.1 杭基礎の各種限界状態

(1) 終局限界状態における終局耐力の表現

現行設計法では、着目杭において押込みや引抜き抵抗、杭頭部や中間部の部材耐力など、部分としての照査による評価が一般的であり、その問題点が指摘されている。

限界状態設計法では、杭基礎全体として終局耐力を評価することが考えられる。杭基礎の厳密な挙動

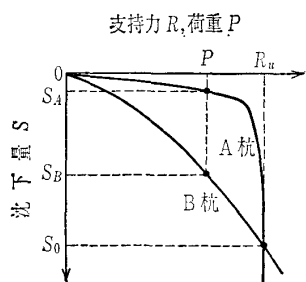


図-2 支持力特性の相違

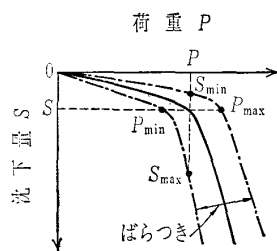


図-4 支持力特性の変動の影響

は、地盤抵抗や杭部材の非線形挙動、杭と地盤の相互作用をも考慮しなければならない。その中で杭作用力や杭部材応力の再配分がなされて、杭基礎全体の耐力が求まることになる。ただし、これらの設計法としての実用化には多くの困難があることは想像に難くない。しかしながら、実用的設計法のための努力や改善の策として、部分としての照査方法になろうとも全体耐力が念頭に入ったものにする必要がある。

(2) 杭基礎の支持力特性が限界状態に及ぼす影響

単杭の支持力特性の概念を図-2に示す。終局限界状態において、A杭は急激な極限状態を示すことから明らかである。しかし、B杭は沈下量で支持力を基準化した値を限界点にしていることから、これ以内でも構造物が必ずしも損傷しないとはいえず、限界点の損傷度との有意差はほとんど無いに等しい。大多数の技術者は、現行設計法において許容値以内にあることは、有害な損傷（部材、変位）を想定していない。この「技術者の常識」は、限界状態設計法であっても尊重しなければならないであろう。

多くの杭基礎は群杭で構成されている。支持力の不確実性を確率的に評価すれば、杭本数の多さが安全性の向上に直結する。しかし、図-3に示すよう

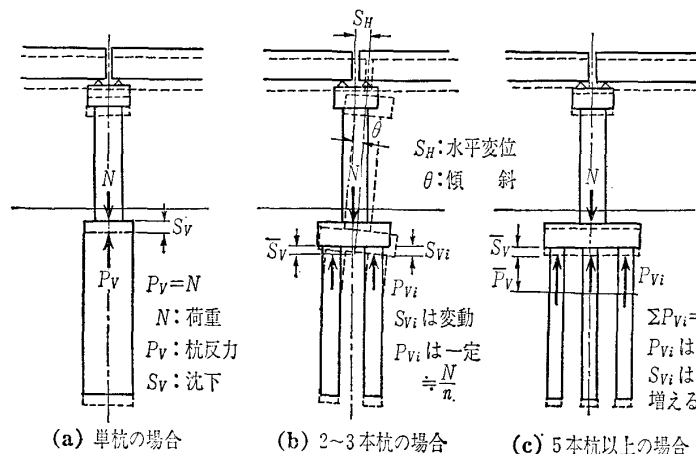


図-3 橋梁下部構造の挙動

に橋梁等の土木構造物では、単杭は単純な沈下をもたらすだけであるが、2, 3本杭では基礎の傾斜を、4本杭でも傾斜は緩和されても過大な不均衡反力を生じ、フーチングなどの部材設計に及ぼす影響は無視できない。

不均衡杭反力の原因の一つの群杭効果は高いレベルの計算が可能であるが、施工のばらつき、地盤の空間的ばらつきの影響は問題である。その影響を大きくするのが杭の支持力特性である。例えば、図-4に示す一般的な杭の荷重-沈下量曲線において、支持力特性の変化点（降伏点相当）近傍では反力あるいは沈下のばらつきが増幅される。限界状態設計法では、群杭の安全性の確率的評価についてはこれらの現象にも配慮すべきであろう。

(3) 地盤沈下および側方移動の影響

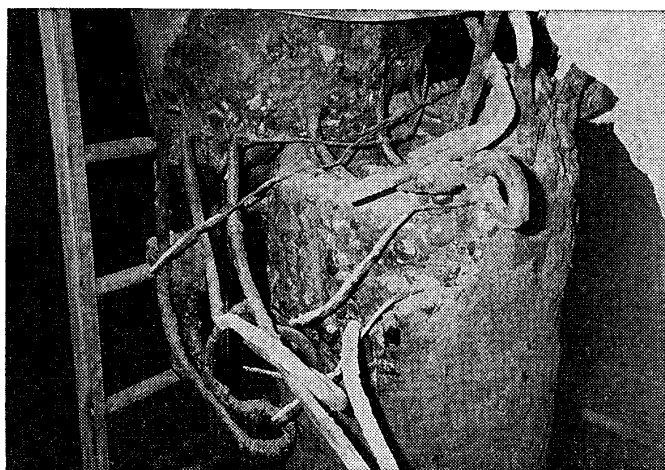
圧密等による沈下や偏土圧等による側方移動が生じる地盤中の杭基礎の扱いは、限界状態設計における大きな課題である。永久荷重作用下の現象であることから使用限界状態の範ちゅうに属するととも言えるが、沈下あるいは水平変位によって引き起こされる構造物への影響度（損傷度）は致命的であり、終局限界に匹敵することが多い。確かに現行設計法でも沈下量、変位量は予測しており、その影響は予定（許容）している。しかし、予測値はばらつき、誤差の影響も大きい。安易に現行設計のキャリブレーションのみで安全係数を決めれば、終局限界状態との矛盾が避けられないのは明らかであろう。

4.2 地震に対する基礎構造物の限界状態

地震に対する基礎構造物の限界状態設計法は、まだほとんど検討されていない。その最も大きな要因として挙げられるのが地震荷重の特殊性である。地震荷重の特殊性とは、①他の外力と異なり発生する確率が非常に小さいこと、②一旦発生すると非常に大きい外力が作用すること、③発生に関して地域差が非常に大きいことなどである。したがって、

これまでに示した基準類でも地震動に対する限界状態は他のものとは異なる範ちゅうとして分類されている。

地震に対する限界状態を考える前に、一つの例を見てみよう。写真-1は1964年新潟地震で被害を受けた杭を示してい



写真—1 新潟地震による杭の被害状況

るが、上部構造は若干の被害を受けただけで、地震後25年間使われてきた。構造物の撤去も構造的な寿命ではない。とすれば、この杭はその役目を完全に果たしたということになるが、単純にそのように断定できるだろうか。この建物は、被害を受けた地震以後に大きな地震を受けなかったが、もう一度大地震があったとすれば構造物の応答はやはり終局限界内にとどまっていただろうか？ また、杭の被害は構造物の撤去時に特別な調査を行うまで分からなかったが、もし杭の被害が簡単に分かるとして、これだけの被害を受けていることが分かれば、それでも建物を使い続けたらどうか？

基礎構造物では被害の確認が困難であり、補修に多額の費用が掛かるなど特殊性がある。したがって限界状態の設定では、基礎単独では被害の調査や補修はしないことを前提に考える必要がある。後は、社会、経済情勢を考えながら、限界状態を決めればよい。一つの考え方として、次のようなものが挙げられる。

地震に対する使用限界状態は、上部構造物の応答が使用限界内に収まるのは勿論のことであるが、基礎構造にも被害が生じない限界の状態として定義する。設計の対象とする地震動は、構造物の使用期間中に数度は発生するようなものとなる。

これに対して終局限界状態は、上部構造が終局限界に至らない程度であれば被害は生じてよいとする。基礎の被害に伴う上部構造の被害は沈下、不同沈下などが想定され、このようになる限界としては、コンクリート杭であればコンクリートの圧壊、鋼管杭では局部座屈の発生などが考えられる。このよう

な被害を受けた杭は、次に同じ地震が来たとしたら、その機能を果たすことは考えられない。したがって、終局限界状態で想定する地震動は、構造物の使用期間中に一度は発生するかもしれないが、二度は絶対に発生しないような地震ということになる。ただし、このような設計を可能にするには、基礎構造物の被害の上部構造への影響や被害を受けた杭の次の地震時の挙動を明らかにする必要がある。

ここで挙げた終局限界状態と使用限界状態は一つの案であって、まだ十分な検討がなされているわけではない。例えば、経済的に余裕があれば、ここで終局限界状態用に設定した地震動で、応答を使用限界状態に収めるという設計も可能である。

5. あとがき

本報文は、基礎構造物の限界状態設計に関する研究委員会「限界状態の定義ワーキンググループ」（主査：青木一二三、桑原文夫・水野二十一・吉田望の各幹事委員および坂田英一・飯古道則・古川毅・川端規之の各委員）の活動成果の一部である。

先行の海外、国内基準等においては、各種限界状態の定義付けおよび荷重の組合せが示されている。ここでは、基礎の限界状態の考え方について、杭基礎を具体事例にして考察した。当ワーキンググループでは、さらに検討を加えて基礎の限界状態について提言したいと考えている。

参考文献

- 1) Breitschart, G. et al.: The Structural Eurocodes —Conceptual Approach, IABSE Reports, Vol. 65, IABSE Conference Davos, pp.9~37, 1992.
- 2) Krebs Ovesen, N.: EC7: Geotechnical Code of Practice, IABSE Reports, Vol. 65, IABSE Conference Davos, pp.261~280, 1992.
- 3) Pinto, P.E.: EC8: Eurocode Approach to Seismic Design, IABSE Reports, Vol. 65, IABSE Conference Davos, pp.291~306, 1992.
- 4) ACI: ACI Standard 301-72 Specifications for Structural Concrete for Buildings, 1972.
- 5) Baker et al.: Manuals for the design of bridge foundations, NCHRP Report 343, Transport. Res. Board, 1991.
- 6) 鉄道総合技術研究所：限界状態設計法による基礎構造物の設計の考え方, pp.13~16, 1992.
- 7) 財国土開発技術研究センター：道路橋下部構造の限界状態設計法に関する調査研究委員会報告書（その3）, 1991. (原稿受理 1994.4.21)