

# 総説 限界状態設計法と部分係数の決定

本城 勇介\*

## 1. はじめに

本号の鈴木 (2001) の総論にもあるように、性能設計や設計法の国際化の流れの中で、限界状態設計法が基礎設計コードを記述するときの共通の言葉として認められている。この流れは、単に地盤工学の設計コードにとどまるものではなく、構造物のすべての分野にわたるものであり当分変化することはない。

限界状態設計法の中でも、設計コードはレベル I と呼ばれる「部分係数法」により書かれることになる。このとき部分係数をいかに合理的に決定するかは、コード作成者にとっては焦眉の急の問題であり、この総説では特に杭の鉛直支持力の問題に焦点を絞り、世界のいろいろな設計コードで部分係数の決定がどのように行われているかを紹介したい。

以下、限界状態設計法の発展の経緯と方法について簡単に振り返った後、まず Becker (1996) が行ったカナダの建築基礎基準作成時の部分係数決定法について述べた後、Goble (1999, 2000) に基づいて世界のいろいろな設計コードにおける杭の鉛直支持力に関する部分係数の具体的な値について述べる。これに続いて、最近行われた広範なデータベースに基づいて行われている部分係数決定に関する研究に触れる (Paikowsky and Stenensen, 2000)。

なお、部分係数を用いた限界状態設計法 (いわゆるレベル I) については、部分係数法、荷重抵抗係数法 (LRFD)、材料係数アプローチ、抵抗係数アプローチなど多くの名称で呼ばれているが、ここではこれをすべて限界状態設計法という名称で統一的に呼ぶ。

部分係数を個々の地盤パラメータに作用させるべきか、あるいは計算された抵抗値全体に掛けるべきか、さらにはこれらの中間的な考え方をとるかについては、いろいろな議論がある (Simpson, 2000)。ことを本総論で扱う杭の鉛直支持力の問題に限定すると、抵抗側の不確実性評価は普通載荷試験結果との比較で行われるため、抵抗値全体、またはせいぜい杭先端抵抗と杭周面抵抗 (これをさらに砂質土層と粘性土層に分ける場合もある) に分離することが限度であり、これより細かい項目

に分けて部分係数を適用する設計コードは見当らない。すなわち、次式を基本として以下の議論を進める。

$$\sum_i \phi_i R_i \geq \sum_j \gamma_j S_j \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\phi_i$  と  $R_i$  はそれぞれ抵抗側の部分係数と抵抗力 (杭先端抵抗力と杭側面抵抗力)、また  $\gamma_j$  と  $S_j$  はそれぞれ荷重項の部分係数と荷重値 (死荷重、活荷重等) を表わす。なお本文では、 $\phi_i$  と  $\gamma_j$  をそれぞれ抵抗係数と荷重係数と呼ぶ場合もあることをお断りしておく。

## 2. 限界状態設計法の発展

限界状態設計法、あるいは信頼性設計法の発展の歴史についての記述は、それを書く人の立場により微妙な違いを見せ興味深い。ここでは、北米における基礎構造物設計コードへの、この方法の適用という観点から書かれた Goble (1999, 2000) に従って述べることにする\*1。

北米で限界状態設計法がはじめて登場したのはコンクリート工学の分野で、それは 1963 ACI コードとして知られている (ACI, 1963)。これはコンクリート梁の断面計算を線形弾性理論に基づいて行うとき、これがコンクリートの収縮等の影響で、極端に安全側になるという問題点を克服するために考えられた設計コードであった。新しいコードによる設計断面は、従来のものより経済的であったため、このコードは 2 年間のうちに全米に普及したといわれている。

その後、1968 年に Cornell (1969) によって、この部分係数を確率論に基づいて合理的に決定することが提案され、画期的な時代を迎える。この Cornell の提案は、それまで Freudenthal らが確立してきた構造信頼性理論を簡略化して、実用に供しやすい形にしたものであった。Cornell の提案は、Ellingwood ほか (1980) の建築構造物の荷重に対する部分係数の決定に関する包括的な研究 NBS Report 577 に継承されている。

コンクリート分野における限界状態設計法の普及に対して、鋼構造分野の限界状態設計法による設計コードは、1986 年になってようやく完成した (AISC, 1986)。これ

\*1 地盤工学会 (1999) の「地盤工学ハンドブック」第 3 編第 3 章「地盤構造物の設計法」にも記述があるので対比されたい。

はNBS Report 577の荷重と荷重組合せを用いている。しかし、ACI1963のような急速な普及の広がりは起こらなかった。

上記のACIもAISCも、基礎の設計については触れていない。その結果、特に鉄筋コンクリート建築構造物の設計では、上部は限界状態設計法、下部は許容応力度設計法に基づく考え方による設計が30年間続いている。

一方、ヨーロッパのデンマークでは、ほぼ1963 ACIコードと同じ時期に、これとは全く独立に、地盤工学者の主導のもとに限界状態設計法が開発された (Brick-Hansen, 1966)。この限界状態設計法では、当初から終局と使用の少なくとも2種類以上の限界状態が想定され、また抵抗側の部分係数は、計算された抵抗値に掛けるのではなく、導入される地盤パラメータ値を直接割引く形式が採用された。デンマークでは1970年までに、この形式の基礎構造物設計基準が採用された。

1990年代に入り、基礎構造物に関しても多くの限界状態設計法による設計コードが表われている。

### 3. カナダ建築基礎基準の開発

Becker (1996) は、カナダにおける建築基礎基準の開発について詳しく述べている。このコードが開発された最大の理由は、カナダでは1975年頃からコンクリートや鋼の上部構造物の設計に限界状態設計法が採用され、許容応力度設計法にとどまっている基礎の設計との間に、いろいろな矛盾が生じはじめていたことをあげている。特に荷重の解釈において、上部と基礎の間に違いが大きく問題となっていた。このコードで材料係数アプローチではなく、抵抗係数アプローチを用いた理由について、Beckerは次のような三つの理由をあげている。

- ① すでに使用されている許容応力度設計法に同等の設計コードを限界状態設計法 (部分係数法) で記述しようとするとき、材料係数アプローチよりも抵抗係数アプローチを用いる方がはるかに容易である。
- ② 抵抗係数アプローチは、材料のばらつきに関する不確実性ばかりでなく、モデルの不確実性など他の不確実性も設計に導入することが容易である。
- ③ 北米ではこの形の照査式が広く用いられており、他の基準との整合性がよい。

種々の不確実性に関する統計解析に耐え得るデータの一般的な不足を指摘した後、Beckerはこのコードの開発では、①従来の許容応力度設計法への係数の直接のすり合わせと、②信頼性解析によるコード・キャリブレーション二つの方法を、平行して用いて係数の決定が行われたと述べている。

①の方法でキャリブレーションが行われる場合、もし荷重係数がすでに決定しており、ただ一つの抵抗係数を決定するだけであれば、次式を用いることができる。

$$\phi = \frac{\sum_j \gamma_j S_j}{F_s \sum_j S_j} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $F_s$ は許容応力度法の安全率である。しかし、

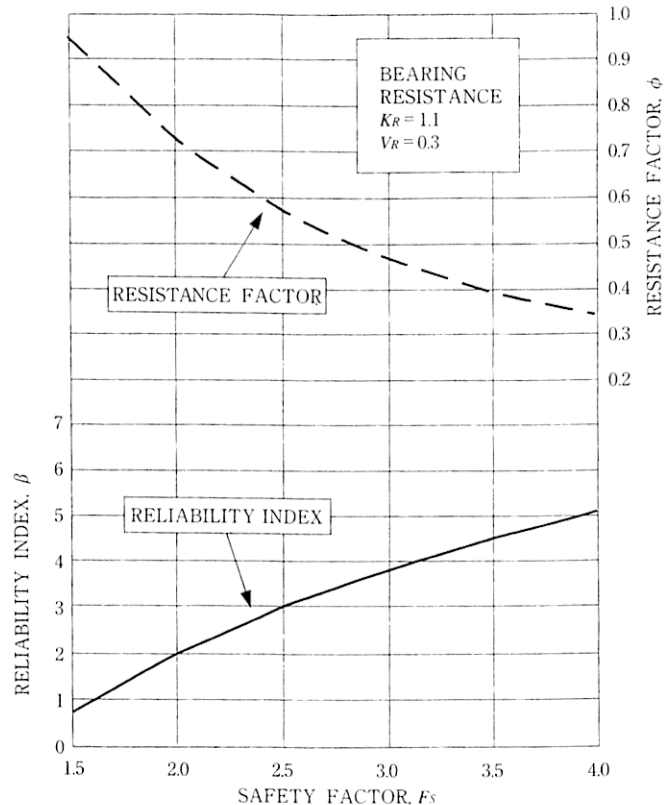


図-1 全体安全率 $F_s$ 、部分係数 $\phi$ と信頼性指標 $\beta$ の関係 (Becher, 1996より)

式(2)から一意的に抵抗係数を決めることはできない。その理由は、各荷重相互の割合は構造物によって異なり、この割合が異なると、計算される抵抗係数も異なってくるからである。典型的な死荷重/活荷重比、死荷重/地震荷重比等を設定し、感度を調べる必要がある。

Becker (1996) は典型的な荷重組合せに対して、 $\phi$ は $F_s=3.0$ に対しては0.4~0.5程度、 $F_s=2.0$ に対しては0.6~0.7程度になると試算している。

一方、②信頼性解析による方法では、抵抗 $R$ と荷重 $S$ がそれぞれ対数正規分布に従うと仮定し、設計値法により(2)式の関係も考慮して、安全率 $F_s$ と信頼性指標 $\beta$ の関係を求め、それぞれの基礎形式 (浅い基礎、杭、擁壁等) について考えられる変動係数 $V$ や、公称値と平均値の比 $k$ を想定したうえで、次の手続きをとっている。

- ①  $F_s$ と $\beta$ の関係を議論し、従来から使用されている $F_s$ は $\beta$ でどの程度かを把握し、その安全性余裕の妥当性を示す。
- ② このときの $\beta$ を目標信頼性指標として、抵抗係数を決定する。

図-1に支持力に関する計算例を示した。この場合、 $F_s=3$ に対応する $\beta$ は3.5~4.0程度で、このときの抵抗係数は0.5弱となる。

ここに紹介したBecker (1996) は、FORM解析を用いたかなり大雑把な検討により抵抗係数を決定しており、AASHTOの設計コード改定のために行われたBarkerら (1991) の仕事と並んで、1990年代までのコードキャリブレーションの典型例であるといえると思われる。

表-1 取上げる代表的な設計コード (Gobel, 2000)

設 計 コード	正 式 名 称 ( 発 行 年 )
AASHTO道路橋コード	AASHTO LRFD bridge design specifications. 1 <sup>st</sup> ed. (1994)
ACI318-95	Amer. Conc. Inst. : Building code requirements for RC. ACI318-95 (1995)
ANSおよびNBS577	Development of a probability based load criterion for ANS A58 (1980)
オンタリオ道路橋コード	Ontario highway bridge design code and commentary 3 <sup>rd</sup> ed. (1992)
カナダ道路橋コード	Design of highway bridges CAN/CSA-56-88 (1988)
ユーロコード	drEN 1997-1 Eurocode-7 Geotechnical Design part 1 General rules (1999)
デンマーク・コード	Code of practice for foundation engineering. Danish Geotech. Inst. (1983)
フロリダ交通局道路橋コード	Load and resistance factors for bridge design, foundations (1997)
PDCA	Recommended design specifications for driven bearing pile (1999)

表-2 代表的な設計コードの荷重係数 (Gobel, 2000)

設 計 コード	死荷重	活荷重
AASHTO道路橋コード	1.25	1.75
ACI318-95	1.40	1.70
ANSおよびNBS577	1.20	1.60
オンタリオ道路橋コード	1.20	1.40
カナダ道路橋コード	1.20	1.60
ユーロコード	1.35	1.50
デンマーク・コード	1.00	1.30

表-3 AASHTO道路橋コードにおける抵抗係数 (AASHTO, 1994)

方 法 / 地 盤 / 条 件	抵抗係数
側面抵抗	
粘性土	
α 法 (全応力による評価)	0.70
β 法 (有効応力による評価)	0.50
λ 法 (有効受働土圧による評価)	0.55
先端抵抗	
粘性土	0.70
岩盤	0.50
側面抵抗と先端抵抗	
砂	
標準貫入試験による方法	0.45
コーン貫入試験による方法	0.55
波動方程式による方法	0.65
載荷試験	0.80

#### 4. 各基準の限界状態設計法の杭基礎部分係数

Gobel (1999, 2000) は、世界のいろいろな基礎構造物についての部分係数を調べ比較している。この報告を見てまず気がつくことは、欧米では杭の支持力評価は施行中の観測情報や載荷試験によって行うのが原則であり、地盤調査のみにより支持力を算定することが多いわが国の現状とは異なっていることである。これに伴い、打込み杭の比重が場所打ち杭に比べ高い。多くのコードで、地盤調査のみによる支持力算定は小さな抵抗係数を採用することを規定しており、設計が不経済になる。

表-1 に、ここで取上げた設計コードの正式名称と発行年を示した。また表-2 には、それぞれのコードの荷重係数を、死荷重+活荷重という最も基本的な場合について示した。これらの係数は、多くの場合、荷重の統計データに基づき信頼性理論により算定されており、ANSの荷重係数を決定したElingwoodら (1980) の研究は、特にこの方法を確立した業績として定評がある。

表-2 の死荷重に関する部分係数で、デンマーク・コードのみが1.0をとっているが、これはこのコードが基礎構造物専用のコードで、その他はすべて上下部共通の荷重係数を示していることに注意を要する。

表-3 には、AASHTOの1994年のコードにおける抵抗係数を示した。このコードは1997年の改訂、さらに次節に説明する現在進行中の改定を経て、動的載荷試験重視の方向が明確化している。なおこの表で示した抵抗係数はBarkerほか (1991) の研究に負っているが、この研究は実際の載荷試験等に沿った不確実性評価を行っていないなど、不備の多いものでありかなり批判されている。

表-4 と表-5 には、カナダの二つの設計コードが採用

表-4 オンタリオ道路橋コード (Gobel, 2000)

鉛 直 軸 荷 重	抵抗係数
静的解析	0.4
静的試験	0.6
動的解析	0.4
杭の打込み解析	0.5

表-5 カナダ道路橋コード (Gobel, 2000)

杭 の 種 類	抵抗係数
鉄筋コンクリート杭	0.4
場所打ちコンクリート杭	0.4
底面拡張コンクリート杭	0.4
プレストレストコンクリート杭	0.4
H鋼杭	0.5
鋼管杭 (開端)	0.5
コンクリート充填鋼管杭	0.4
木杭	0.4

表-6 フロリダ交通局 (Gobel, 2000)

設 計 の 方 法	抵抗係数
SPT97による方法	0.65
PDA (杭打込み解析)	0.65
波動方程式解析	0.35
静的載荷試験	0.75

表-7 ユーロコード7 (CEN, 1999)

(a) 載荷試験により杭の抵抗力特性値を算定する場合  
計測値を下記の係数で割引く

載 荷 試 験 数	1	2	3	4	5
試験結果の平均値	0.71	0.77	0.83	0.91	1.0
試験結果の最小値	0.71	0.83	0.95	1.0	—

(b) 計算により杭の抵抗力特性値を算定する場合  
得られた地盤パラメータ計測値を下記の係数で割引く

試 験 数	1	2	3	...	10
地盤パラメータの平均値	0.74	0.77	0.79	...	0.83
地盤パラメータの最小値	0.74	0.83	0.91	...	1.00

(c) 杭の抵抗力設計値の算定

(a)または(b)の方法で得られた特性値を下記の係数で割引く

部 分 係 数	先端	側面	一括
打込み杭	0.77	0.77	0.77
埋込み杭	0.63	0.77	0.67
CFA杭	0.70	0.77	0.71

(注) CFA杭: continuous flight auger pile

している部分係数である。Gobel (2000) によると、これらの係数がどのように決められたかという記述はほとんどないということである。

表-6 は、フロリダ交通局が1997年に提案したもので、実際のデータに基づきキャリブレーションにより決定された抵抗係数である。

表-7 は、ユーロコード7 (EC7) の部分係数を示している。ECは種々の部分係数の組み合わせ方法があり複雑であるが、これは1994年版ENVでケースBといわれ

表-8 デンマーク・コード (Gobel, 2000)

構造物重要度	普通	重要
試験なし(地盤データのみ)	0.50	0.45
試験あり	0.63	0.57
試験された杭	0.71	0.65

表-9 PDCA抵抗係数 (Gobel, 2000)

抵抗値決定の方法	抵抗係数
静的載荷試験(0.5~10%の杭に実施)	0.75~0.90
PDA試験(2~10%の杭に実施)	0.70~0.80
波動方程式	0.60
動的公式	0.43
静的解析(粘性土地盤のみ)	0.43

(注) PDCA: the Pile Driving Contractors Association

ている場合の部分係数である\*2。EC7では杭は載荷試験により支持力を求めることを原則としており、試験の数によりその抵抗係数を変化させているのも特徴の一つである。載荷試験による場合(表-7(a))も、計測された地盤パラメータに基づき計算による場合(表-7(b))も、まず抵抗力の特性値を求め、これにさらに部分係数を掛けて設計値を求める(表-7(c)) ことになっている。

表-8は、1985年版のデンマーク・コードの部分係数の要約である。このコードでは、動的な載荷試験も考慮されており、また構造物の重要度のランクも採用されている。Gobel (2000) によれば、背景には統計的考察も加えられているということである。

表-9は、PDCA (Pile Driving Contractors Association) が1999年に発表した杭の抵抗係数で、杭の試験方法、その全体に占める割合に基づき細かく係数が指定されているところに特徴がある。このコードは建築構造物を対象としており、ACIとAISC両者の荷重係数に対してそれぞれ抵抗係数が示されている。表-9に示したのはACIの荷重係数に対するものである。

最後に、これらの設計コードの部分係数を比較するために、それぞれが結果的に想定している全体安全率を計算し比較した。全体安全率 ( $F_s$ ) は、活荷重と死荷重の比 ( $L/D$ ) の関数として次式で計算できる。

$$F_s = \{1.0 \times \gamma_D + (L/D) \times \gamma_L\} / \phi_R / \{1.0 + (L/D)\} \dots (3)$$

結果は図-2に示した。明記されていない場合は、すべて静的載荷試験を行った場合の全体安全率である。またカナダ道路橋コードについては、部分係数の定義がGobel (1999) の記述では不明確で計算から除外した。

この図よりわかるように、AASHTOでN値に基づく算定以外の場合では、EC7の全体安全率が他に比べてかなり大きく、これに続きオンタリオ道路橋コード、そして他のコードは類似の値(1.5~2.0の間)を示している。一般にEC7が過度に安全なのではないかという批判があるが、これを裏づける形となっている。

Gobel (1999, 2000) は、現在までに発表されている多くの設計コードでは杭の鉛直支持力の抵抗係数が合理的

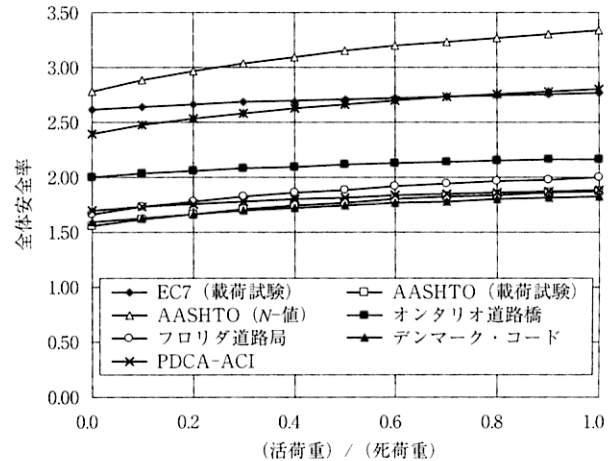


図-2 異なるコード間の全体安全率の比較 (Gobel, 2000より)  
に算定されているとはいいい難いと述べている。その中でフロリダ交通局、PDCAのコードなどは曖昧さの少ない部分係数の設定を行っており、今後はデータベースに基づいた合理的な部分係数の決定を、信頼性理論により実際の杭の施工の実情を踏まえて進めるべきだとしている。

## 5. AASHTOの新しい打込み杭設計法の部分係数の決定

前節で述べたGobel (1999, 2000) の反省を踏まえて、現在AASHTOのプロジェクトとして進行しているのが、Paikowskyら (2000) によるAASHTOの杭の設計法に関する改訂版のための研究である。これは、Barkerら (1991) のコードキャリブレーションがかなり大雑把で、AASHTO (1994) が不評であるため、これを改訂するために行われているものである。

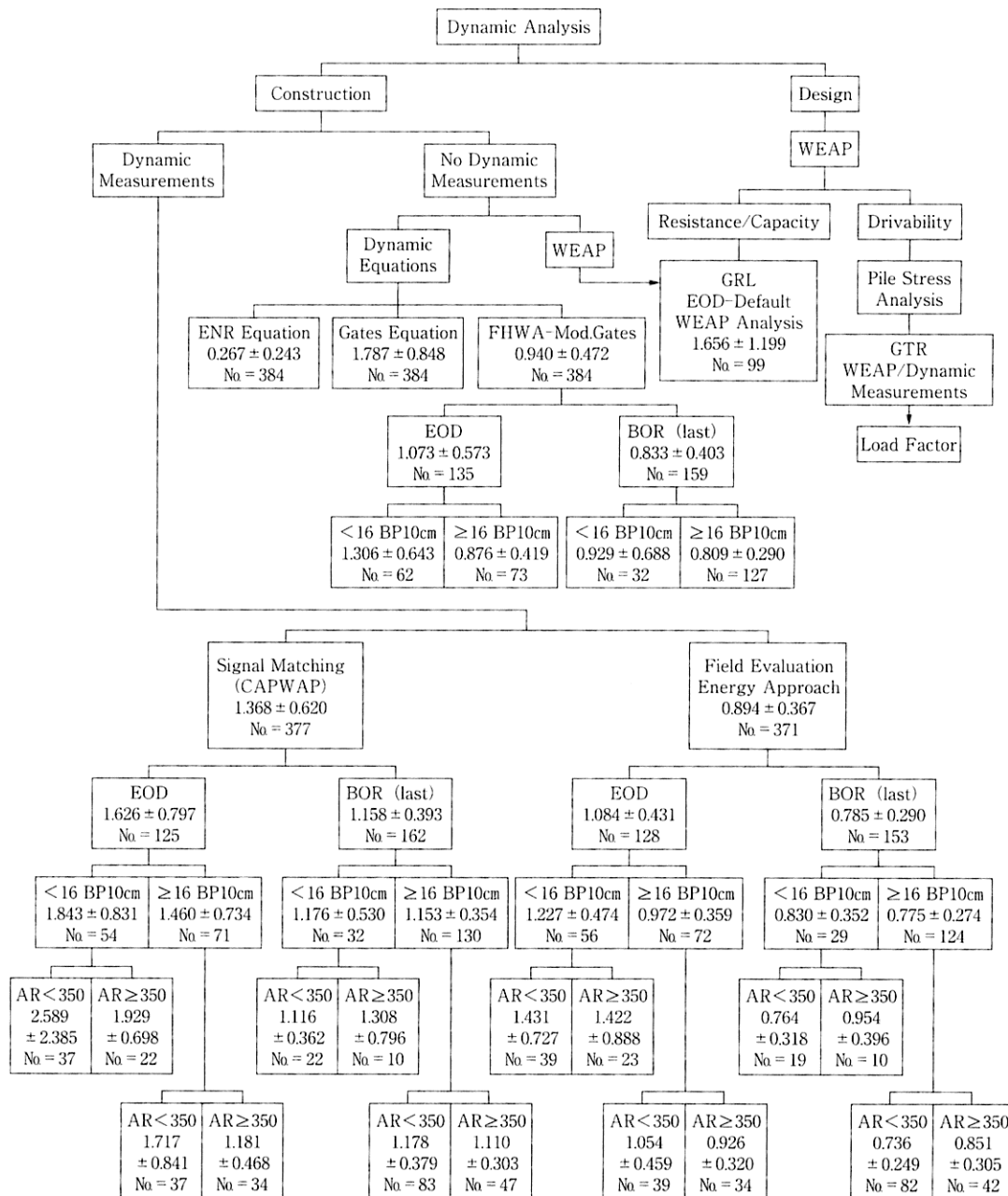
この研究の最大の特徴は、打込み杭に関する非常に大きなデータベースをもとに研究を進めている点である。PT/LT2000と呼ばれるデータベースは杭数で389本、サイト数で210 (ほとんどがアメリカ東部) のデータを含むものであり、これにはすべて打込み時の動的観測データと静的載荷試験結果を含んでいる。

Paikowskyら (2000) は、まず静的載荷試験より極限支持力を推定する五つの方法を比較・吟味の結果、Davisson法が最も優れているとして、以後すべての杭の極限支持力はこの方法により求めている。

この結果をもとに、杭打ち公式や動的観測に基づく種々の支持力推定法を比較し、それぞれの精度を詳細に検討している。この結果を示したのが図-3である。

図-3の記号を説明すると、Designは設計時の評価、Constructionは施工中の評価であり、後者は動的計測を行う場合とそうでない場合に分けられる。計測がない場合は、ENR (Engineering News Record) 公式、Gates公式FHWA (修正Gates) 式があり、それぞれの推定結果と静的載荷試験結果の平均値±標準偏差が示されており、それぞれの精度を知ることができる。ENR公式などはお話にならないことがわかる。FHWA法はさらに、EOD (End of Driving: 打込み終了時) とBOR (Beginning of Restrike) という、計測の行われたタイミング

\*2 ECでは、部分係数は抵抗側では特性値を除く形(したがって、1.0より大きい)の部分係数を与える習慣である。ここではこの逆数を示している。



\* All values represent the ratio of the static capacity based on Davisson's failure criterion over the dynamic methods prediction, mean  $\pm$  1 S.D.

図-3 異なる支持力評価法の支配パラメータによる分解と精度（それぞれの場合の評価値の偏差とその標準偏差が示されている。Paikowskyほか，2000より）

で分類されている。BORは一定以上の時間をおいて打込みを再開したときのことである。さらにこれらは、16 BP 10cm（10cmの貫入に16ブロー）という基準で分類されている。

一方、動的計測を行った場合は、信号解析（CAPWAP）で解析した場合とエネルギー法で解析した場合に分かれており、さらにこれらをEODとBOR、16BP 10cmおよびAR（Area Ratio：面積比＝杭周面面積／杭先端有効面積）で分類している。

この結果より得られた主な結論は次のとおりである。

- ① 信号解析がBORにおいてよい予測結果を与えるのに対して、エネルギー法はEODにおいてよい結果を与える。

- ② FHWA公式は、動的観測を行わない場合、かなり合理的な予測を与える。

- ③ ほとんどのデータが対数正規分布で近似できる。

以上の結果を踏まえて、信頼性解析が行われた。抵抗係数が図-3で分類されたケースのうち、表-10で示すケースについて行われた。このときの性能関数は、

$$Z = R - S_D - S_L \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 $R$ はそれぞれのケースにおいて図-3に示したパラメータをもつ対数正規分布に従い、 $S_D$ と $S_L$ は死荷重と活荷重でそれぞれ平均1.05と1.15、変動係数0.10と0.20の対数正規分布に従うとして、FORMにより解析している。目標信頼性指標を2.0と2.5にしたときの部分係数が表-10に示されている。しかし、この解析結果は

中間的なものであることに注意しなければならない。

このほか比較的よく知られた信頼性解析に基づくコードカリブレーションの例としては、Phoon, Kulhawy and Grigoriu (1995, 2000) の送電施設基礎設計基準の部分係数の決定の例があるが、ここでは紙面の制約の都合上割愛する。

## 6. むすび

1990年代までの部分係数法の決定は、信頼性理論を用いている場合もかなり大雑把な仮定と計算に基づき、従来の設計法の安全率に直接すりつける形で、部分係数を決定してきた。

日本においても、鉄道構造物設計標準のための部分係数の決定(村田・青木・真田, 1984. 村田・館山, 1990), 建築学会構造委員会限界状態設計法小委員会(2000)の「建築物の限界状態設計指針(案)第2版・同設計例」などがある。また、道路橋示方書についての部分係数の検討も行われている(Honjoほか, 2001)。

今後は、しっかりとしたデータベースに基づき、信頼性理論もより進んだ方法を用いて部分係数を決定しようとする研究が増加し、そのような方法が実際の設計コードの部分係数の決定にも用いられてくると予想される。

最後に地盤工学会では、2002年4月10日から12日にIWS鎌倉「基礎構造物設計基準と地盤調査法-国際的調和と性能設計」と題したワークショップを予定している。講演者としてユーロコード7の作成に深く関わったアイルランド・ダブリン大学のOrr博士、さらに現EC7議長のフランスのFrank博士、アメリカAASHTO基準に責任をもち特に耐震設計法に造詣の深いCooper氏、またこの論文でも紹介したPaikowsky教授、信頼性理論に基づいた送電線施設基礎設計コードを作成したCornell大学のKulhawy教授、アジアの基礎設計規準に詳しいシンガポール国立大学のYong教授が講演を行う。特に4月10日(水曜日)は、会場を御茶ノ水の中央大学駿河台記念館として、一般の方に聞いていただける通訳つきの講演を予定している。続く11~12日は会場を葉山の湘南国際村センターに移し、この論文に記したような問題についてより深い発表や討論を行う。IWS鎌倉の詳細は『土と基礎』公告、ホームページ<http://www.cive.gifu-u.ac.jp/~IWS-Kamakura2002/>を参照されたい。

## 【参 考 文 献】

- 1) 鈴木誠：構造設計の国際化と性能設計，基礎ⅠVol. 29, No. 8, 通巻337号(本号), 2001.
- 2) Becker, D.E.: Limit state design for foundations Part II development for the national building code of Canada, Canadian Geotechnical J. 33 (6), pp. 984~1007, 1996.
- 3) Gobel, G.G.: Geotechnical related development and implementation of load and resistance factor design (LRFD) methods, Synthesis of Highway Practice, NCHRP synthesis 276, TRB, NRC, 1999.
- 4) Gobel, G.G.: LRFD design codes for pile foundations-a review, Proc. 6<sup>th</sup> Int. Conf. on the Application of Stress-wave Theory to Piles, Brazil, 2000.

表-10 種々の杭支持力評価手法に関する部分係数の試算例 (Paikowskyほか2000)

評 価 方 法		ケ ー ス	抵 抗 係 数	
			$\beta_r=2.0$	$\beta_r=2.5$
動的計測を 行う	信 号 解 析	一般	0.68	0.54
		EOD AR<350 BC<16BP 10cm	0.52	0.35
		BOR	0.73	0.61
	エネルギー法	一般	0.48	0.39
		EOD	0.60	0.49
	杭打ち公式	Gates法	一般	0.85
FHWA法		一般	0.42	0.33
WEAP		EOD	0.48	0.34

- 5) Paikowsky, S.G. and K.L. Stenersen: The performance of the dynamic method, their controlling parameters and deep foundation specifications, Proc. 6<sup>th</sup> Int. Conf. on the Application of Stress-wave Theory to Piles, Brazil, 2000.
- 6) Simpson, B.: Partial factors, where to apply them?, Proc. LSD2000 Int. Workshop on LSD in Geotechnical eng., Melbourne, 2000.
- 7) Barker, R.M., J. M. Duncan, K.B. Rojiani, P.S.K. Ooi, C.K. Tan and S.G. Kim NCHRP report 343: manuals for the design of bridge foundations, TRB, NRC, 1991.
- 8) American Concrete Institute: Building code requirements for reinforced concrete, ACI318-63, 1963.
- 9) Cornell, C.A.: A probability based structural code, ACI Journal, December, pp. 974~985, 1969.
- 10) Ellingwood, B., T.V. Galambos, J.G. MacGregor and C.A. Cornell: Development of a probability based load criterion for American National Standard A58 building code requirements for minimum design loads in building and other structures, NBS report 577, 1980.
- 11) American Institute of Steel Construction Inc.: Load and resistance factor design specification for structural steel buildings, 1986.
- 12) Brick-Hansen, J.: The philosophy of foundation design, design criteria, safety factor and settlement limit, Proc. Symp. Bearing Capacity and Settlement of Foundations, (ed. A.S. Vesic), 1967.
- 13) CEN: Preliminary Draft EN 1997-1 Eurocode 7 Geotechnical Design Part 1 General Rules (doc. no. CEN/TC250/SC 7 N 301), 1999.
- 14) CEN: Draft EN 1990 Eurocode 0 Basis of design, 1999.
- 15) Phoon, K.K., F.H. Kulhawy and M.D. Grigoriu: Reliability based design for transmission line structure foundations, Computers and geotechnics 26, pp. 169~185, 2000.
- 16) Phoon, K.K., F.H. Kulhawy and M.D. Grigoriu: Reliability based design for transmission line structure foundations, Report TE-105000, Electric Power Research Institute, 2000.
- 17) 村田修, 青木一三, 真田道夫: 場所打ち杭の支持力評価, 構造物設計資料, 日本鉄道施設協会, 1984.
- 18) 村田修, 館山勝: 場所打ち杭の支持力性状についての統計的考察, 鉄道総研報告, 4(7)pp. 30~36, 1990.
- 19) 日本建築学会構造委員会限界状態設計法小委員会: 建築物の限界状態設計指針(案)第2版・同設計例, 2000.
- 20) Honjo, Y., M. Suzuki, M. Shirato and J. Fukui: Determination of partial factors for a vertically loaded pile based on a reliability analysis, to be submitted to Soils and Foundations, 2000.