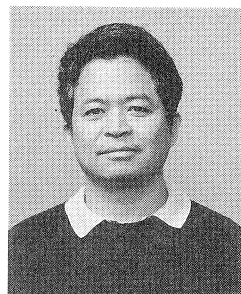


基礎工に関する遠心実験の利用と適用性

Applications of Centrifuge Modeling to
Foundation Engineering

日下部 治* (Osamu Kusakabe)



本展望では、基礎工問題について遠心実験の有効性を確認した事例を紹介し、今後の問題点を整理した。モデリング オブ モデルズと実大実験との比較事例から基礎幅/粒径比が100程度以上であれば、遠心実験が基礎工の諸問題解決へ有効であることが確認され、自然地盤上載荷試験との直接比較事例から、不攪乱試料を用いれば降伏荷重は85%程度の安全側で推定できる可能性が示されたが、初期地盤反力係数は、局所的な影響を受け易く正確な推定が困難であることが示唆された。杭基礎のモデル化では、杭施工過程の忠実な再現、杭設置後の再圧密を遠心場で行うことの必要性を指摘した。こうした条件を満たせば、杭基礎挙動についても遠心模型実験は有効であることが実物大試験との比較から示された。ただし、基礎工への適用性との視点からは、地盤条件の忠実な再現が必ずしも必須ではなく、現在の設計解析とのバランスの上で現象の等価な単純化が有効であることを指摘した。

キーワード：模型実験 遠心実験 直接基礎 杭基礎 相似則 (IGC:E3/E4)

1. はじめに

筆者が遠心実験に興味を持ちはじめたのは15年程前からである。当時わが国では、大阪市立大学と東京工業大学からの研究発表しか存在せず遠心実験は極めて特殊な実験とのイメージが強った。1984年に東京で開催された遠心模型実験の国際シンポジウムと、それに続き土質工学会誌「土と基礎」の講座で1987年から1988年にかけて「遠心模型実験」が取り上げられたのを契機として、急速にその利用が広がり、大学や国の研究機関はもとより建設会社・コンサルタント会社も自前の遠心装置を備え各種の問題に取り組む状況に至った。現在わが国は少なくとも遠心装置の数とそれを用いた研究の数では世界一と言えよう。

その間、地盤工学の技術者の遠心実験への評価は、利用への過大な期待と適用範囲についての懐疑とが振り子のように周期的に揺り動いているように筆者には思える。その一面が1993年の土質工学研究発表会での「模型実験」のセッションでの議論に現れている。縮尺模型実験であるという制約条件を考えず、無いものねだりとも思える疑問も提示されている。

本技術展望では、対象を基礎工問題に限り、今までの遠心実験の有効性を確認した実験事例を紹介しつつ、今後解明すべき問題を整理してみたいと思う。そのため今回ややしっかりと文献を探してみると、筆者の調べた範囲のみでも60以上の論文・報告が存在する。現在までにいかに多くの遠心実験が基礎工の諸問題の解明にとの期待を込めて行われてきたか、また多くの研究者の興味を引いて来たかが推測される。

遠心実験結果の整合性がとれているかを確認する方法として「モデリング オブ モデルズ」と言われる手法がとられる。幾何学的な縮尺を $1/N$ とし重力の N 倍の遠心加速度を加えると実物と等価な応力レベルが遠心模型中に再現できるというのが、遠心実験の本質である。一つの実物を表現するのに縮尺 $1/N$ と加速度倍率 N の組み合わせは、幾くともおも考えられる訳で、異なる N について実験を行っても同じ挙動が確認されなければならない。もしそれが確認されれば、 $N=1$ の外挿から実物の挙動が予測されると考える訳である。恐らく「モデリング オブ モデルズ」の成功例よりも重力場で行われた実大規模の実験と縮尺遠心模型実験との結果

* 広島大学工学部第四類（建設系）教授

の一致の事例は、より技術者へ遠心実験の有効性について説得力があるであろう。そのような視点から「モデリング オブ モデルズ」の実施例と実大実験と遠心実験との直接比較を中心に事例の紹介をしつつ、いくつかの問題点を指摘したい。なお、ここでは静的な基礎の荷重・変形問題に限定する。

2. 直接基礎への利用

2.1 砂地盤上の直接基礎の支持力

砂地盤上の直接基礎の支持力実験は、遠心実験の中でも極めて基本的な実験の一つで、実験そのものも比較的簡単である。重力場のもとで空中落下法で作成された地盤に遠心加速度を加え、ある一定の加速度場で載荷試験を行えばよい。図-1は、Ovesen(1980)の実験で、円形基礎をさまざまな縮尺と加速度の組み合わせで載荷試験を行った結果得られた荷

重-沈下曲線である。いずれも実物での寸法は、直径1.0mの基礎に相当する。この範囲ではそれぞれの荷重-沈下曲線は極めて近似しており、「モデリング オブ モデルズ」の試みは成功していると判断されよう。同様な実験例は、Cherkasovら(1970)、Mikasa and Takada(1973)、Ovesen(1975)、Yamaguchiら(1977)、Corteら(1988)、Pu and Ko(1988)、Kutterら(1988)と数多く存在し、砂地盤上直接基礎問題の遠心実験の有効性は繰り返し証明されている。

砂を地盤材料とする場合、粒子の縮尺が常に議論的になる。基礎工の問題では、載荷幅(基礎幅)と模型地盤を構成する平均的な粒子径との比-基礎幅/粒子径の比(B/d)がその指標として用いられる。過去の実験データを調べるとこの比が100を下回ると挙動の差異が現れるようである。 B/d は50以上ならば良い(Bagge and Christense, 1977)、

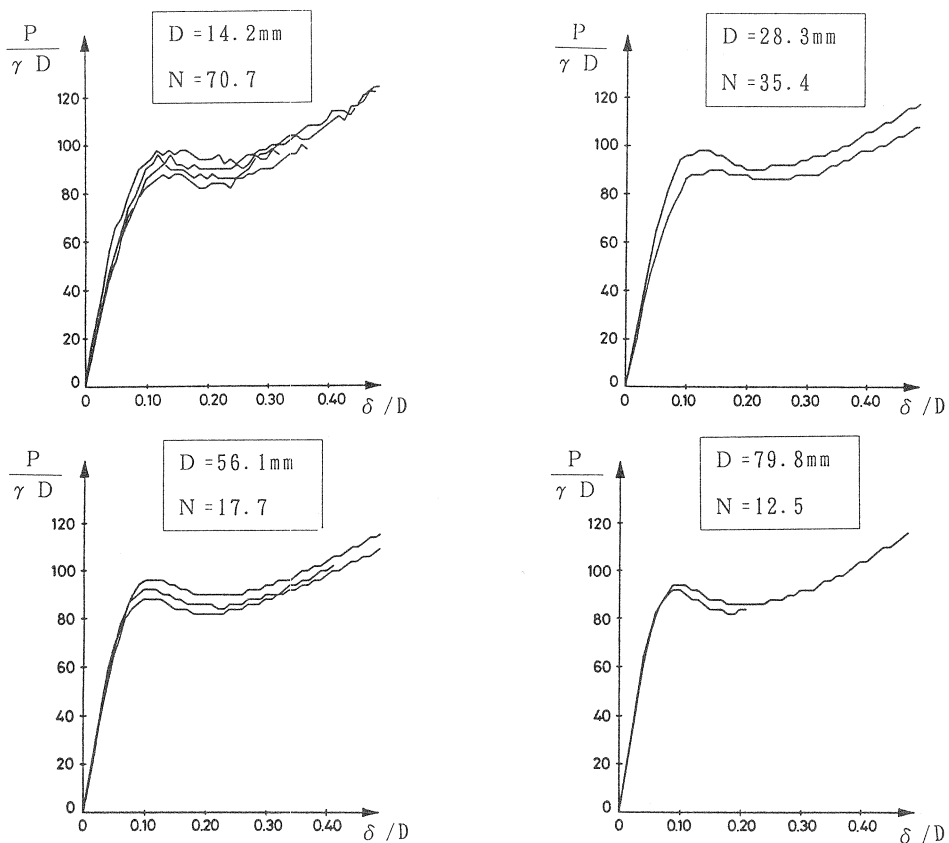


図-1 無次元化された荷重～沈下曲線 (Ovesen, 1980)
(P: 載荷重強度、D: 基礎直径、 δ : 沈下量、 γ : 土の単位体積重量)

20-40で影響が現れる (Ovesen, 1980)、84-42の範囲では 42 の場合に影響が見られた (Gemperline, 1988) との報告から B/d が 100以上であれば、基礎幅/粒径比は現象の理解に大きく影響しないと判断出来そうである。龍岡ら(1991)の豊浦砂上の $B = 3 \text{ cm}$ の遠心実験では B/d が 150程度と推測されるが、従前の報告と比べ B/d の影響の程度が際だっているデータである。

B/d の問題に対処する方法として、模型材料と実物の粒子径も縮尺比率 N を満足させればよいとも考えられるが、それは必ずしも実務的な要求を満たさない恐れがある。すなわち、粒子径を小さくすると粒子破碎が大きくなり、大型基礎ではしばしば経験される高圧力下での圧縮・せん断現象の相似性を失う恐れがあるのである。 B/d の影響を遠心実験と大型重力場実験との比較から調べるとき、基礎幅の相似性のみばかりでなく、他の実験条件の統一にも十分注意を払わなければならない。そのなかで特に、「載荷装置の差異」と模型地盤の「載荷前の密度と応力状態」の把握が重要である。直接基礎の支持力問題では、載荷時の基礎の回転の自由度、小さな偏心量の有無が得られる挙動に大きく影響する (Kitazume, 1984, Kutterら, 1988)。さらに重力場で作成された地盤は遠心加速度の上昇・下降に伴う 1 次元的な圧縮と膨張を受け、それに伴う地盤内の応力も変化する (Uenoら, 1993)。重力場実験と遠心実験との対比は実際はかなり難しい問題を含んでいるのである。

2.2 自然堆積地盤での載荷試験との比較

筆者は、1985年から最近までにシラス地盤、スコリア地盤、河口堆積砂地盤の 3 つ自然地盤での載荷試験と、不攪乱ブロックによる縮尺模型遠心実験との比較を行うチャンスを得た (Fujiiら, 1988, Kusakabeら, 1993)。それぞれの場合で不攪乱試料の取扱い、載荷試験方法など異なるが、それらの比較実験条件の一覧を表-1に示した。結果を支持力と地盤反力の 2 点について現場試験に対する遠心実験の比を B/d の比に対して整理したのが図-2および3である。すなわち、 B/d の値によらず、図-2からは、不攪乱試料を用いた支持力遠心実験結果は、現場載荷実験から得られる降伏荷重の約85%、極限荷重の約65%となりいずれも安全側の予測となっていること、図-3からは、遠心実験では除荷時の地盤反力係数はほぼ現場試験と同等に再現するが、

表-1 3つの比較実験条件の一覧

試料名	しらす	スコリア	早川河口砂
現場試験形状	長方形	正方形 長方形	正方形
現場試験基礎幅 B (m)	0.6	0.4×0.4 0.4×1.2	0.4
遠心実験縮尺比	1/20	1/13.3	1/13.3
試料調整方法	フロックソフール	フロックソフール	フロックソフール
試料状態	不飽和	飽和	飽和
平均粒径 d (mm)	0.20	1.30	0.17
平均粒径/基礎幅	3.33×10	3.25×10^{-3}	4.25×10^{-4}
現場載荷試験方法	荷重制御	荷重制御	荷重制御
遠心載荷試験方法	荷重制御	変位制御	荷重制御

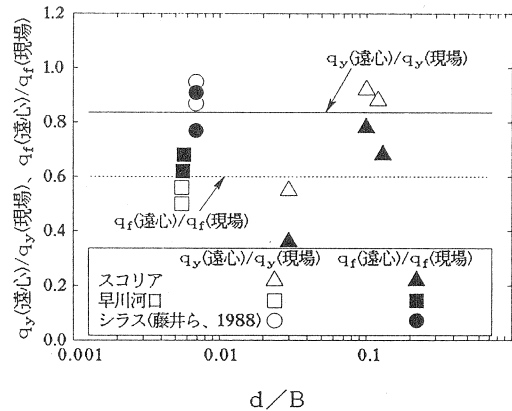


図-2 降伏荷重・極限荷重と d/B の関係

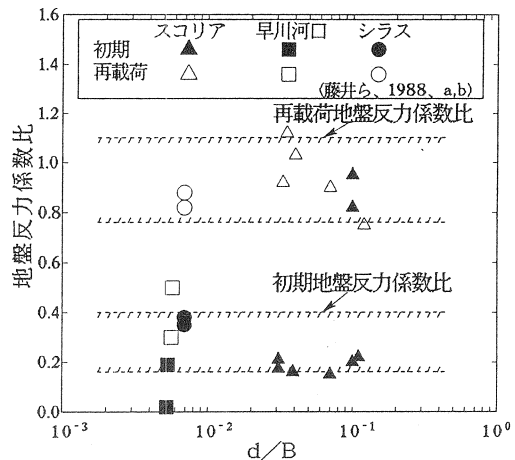


図-3 現場試験に対する遠心実験の地盤反力係数比と d/B の関係

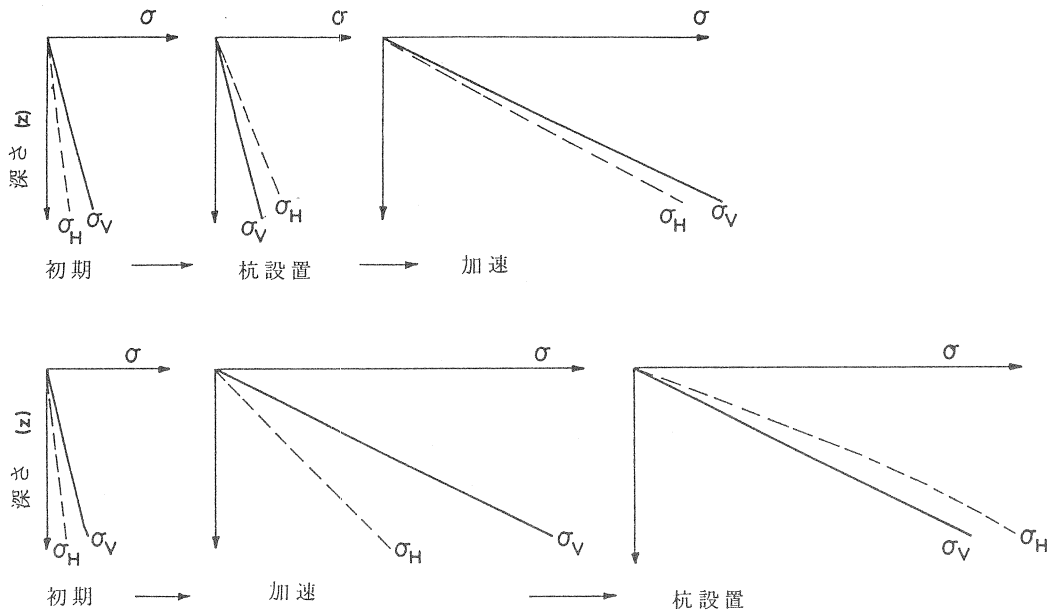


図-4 地盤内応力の差異 (Craig, 1984)

初期地盤反力係数は遠心実験の値はかなり小さくなること等がわかる。

乾燥砂での実験に比べ、自然堆積地盤を扱うには、小さな地層構成の再現・粒子間固結力の保持など多くの難しい未解決な問題が残っている。縮尺模型では、絶対変形量が小さくなるので、わずかな試料の局所的な特異性、実験上の差異（特に、bedding error）が変形特性（特に初期地盤反力係数）に影響する。自然地盤上基礎への遠心模型の適用性を明かにするには、更に同種の比較実験の蓄積が必要であることが疑いも無いが、ここに示した3例の直接比較は遠心実験で現場載荷試験を再現する場合の現在の標準的な技術水準を表現しているのではないかと筆者は考えている。

3. 杭基礎への利用

3.1 杭施工過程の再現の重要性

杭の荷重・変形挙動は、その設置方法によって大きく変化することが良く知られている。すなわち打ち込み杭は初期の地盤反力係数が大きいのに比べ、埋め込み杭では降伏荷重に達するのに多くの沈下量が必要とされる。遠心実験を実施する時にもこの施工過程の再現は重要で、杭は実物で想定される地盤応力場で設置されなければならない。図-4は押し

込み杭について地盤内応力の変化を模式的に表したものである。すなわち、小さい応力状態で杭を打ち込むと水平応力は増大するがその後の遠心加速度場で鉛直応力に越されてしまう。それが実物に対応する遠心場で押し込まれると、水平応力が鉛直応力より大きくなり、その後の載荷試験結果に大きく影響する。重力場で密な砂地盤中に押し込み設置され、その後70Gで載荷試験された杭と、70G場で設置され同じ70Gで載荷された杭の鉛直荷重-沈下曲線の比較が図-5である。重力場で設置されたものは70G場で設置された杭の極限荷重の約60%程度しかない。この事実は、遠心場で設置しない杭の鉛直載荷試験は、いかに載荷時の応力の相似性を満たしていてもだめであることを教訓的に示している。今後杭の遠心実験をする際には、ぜひこの点を検討する必要がある。

図-6は、遠心場で密な砂地盤に押し込み設置された杭の鉛直載荷試験から得られた支持力係数 N_q の鉛直土被り圧による低減を示すデータであり、浅い基礎の寸法効果（ B の増大による N_q の低減）と併せて認識されるべき事実である。

この杭施工過程の重要性の為、海外の多くの機関では遠心回転中に押し込むか打撃によって杭を設置する方法がとられ、実物の施工過程をかなりの程度で再現できるまでに現在の技術は発展してきている

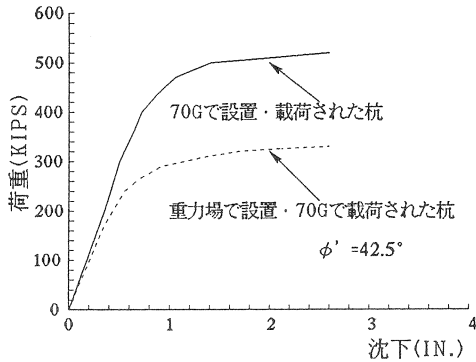


図-5 砂地盤中杭の設置応力レベルの違いによる荷重～沈下曲線の差 (Koら, 1984)

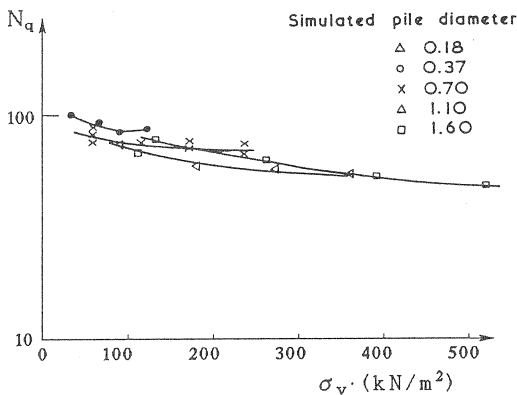


図-6 N_q の応力レベルによる低減 (Craig, 1984)

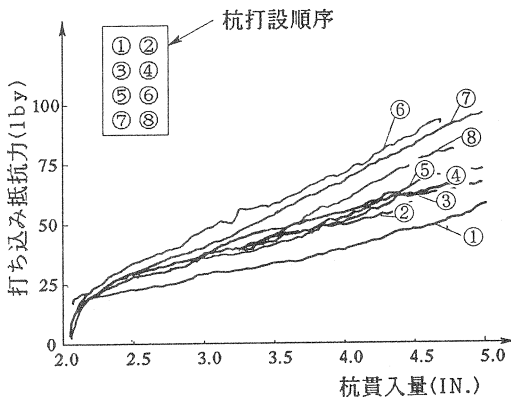


図-7 群杭設置時の抵抗力の差異 (Koら, 1984)

(押し込み設置: Craig, 1984, Nunezら, 1984, 打撃設置: Nunezら, 1988, Cyranら, 1991)。このとき、杭先端が開端である場合、杭の肉厚と直径の比および粒子径が杭の先端閉塞現象に影響を与えるので、

鉛直载荷試験ではこの点のモデル化が重要なポイントとなる。なお杭の模型実験では、粒子径との影響は直接基礎で用いられた B/d に代わって、杭周 (πD : D 杭直径) と d との比、 $\pi D/d$ がしばしば用いられ、その値としては 150-600 (Nunezら, 1988)、360 (Lyndon and Pearson, 1988)、220-610 (Dickin and Wei, 1991) 程度である。この範囲では粒子径の影響は報告されていない。

群杭のモデル化の場合、施工順序が重要で、図-7は8本杭の押し込み設置時の抵抗力の測定の一例である。こうした施工時に発生する地盤内応力の再現は遠心実験に不可欠である。

鉛直载荷試験に比べ水平载荷試験では、杭設置の影響が比較的小さいとされ、高々10%程度剛性が低下する程度との報告があり (Craig, 1984) 重力場で杭を設置した実験も数多く行われている。その影響をさらに小さくする方法として杭を加圧下で押し込む方法がとられる。その圧力としては、実物の杭が受ける平均的な鉛直有効応力が採用されている (Nunezら, 1988)。

3.2 粘土地盤中杭の実大鉛直载荷試験との比較

実地盤では、均質単一な密な砂層に杭が設置されることは杭設置の目的からして極めて希である。ほぼ均質な過圧密粘土地盤に設置された杭の鉛直载荷試験と遠心実験との比較を図-8, 9に示す。遠心実験は1/50, 1/70, 1/100の縮尺で実施された。図-8は荷重～沈下曲線であり、図-9は荷重伝達曲線であり、いずれも良い一致を示していると判断される。荷重伝達曲線の上部3mまでの不一致は、実物ではオーガ掘りを数メートル先行させたためとされる。図-10は非排水強度を変化させた地盤への载荷試験結果であり、実物の試験結果と良い整合性がある。

砂地盤に比べ粘土地盤では、設置の速度、設置後の応力回復状態が重要で、ともに遠心場での圧密、再圧密操作が载荷試験の前には必要である。この試みの無い実験はほとんど無意味でさえある。

3.3 カルカリオス砂の水平载荷試験

石灰質で粒子内部に空隙が大きく、粒子破碎を生じやすく特異な挙動をすると言われるカルカリオス砂中の単杭の水平载荷試験について遠心実験とその後ピットでの载荷試験結果の比較が報告されている (Nunezら, 1988)。試料は現場から採取された固結

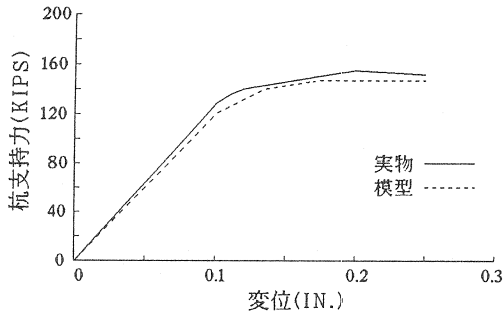


図-8 荷重沈下曲線 (Koら, 1984)

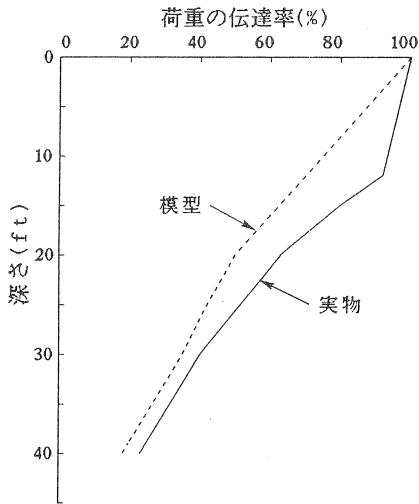


図-9 荷重伝達曲線 (Koら, 1984)

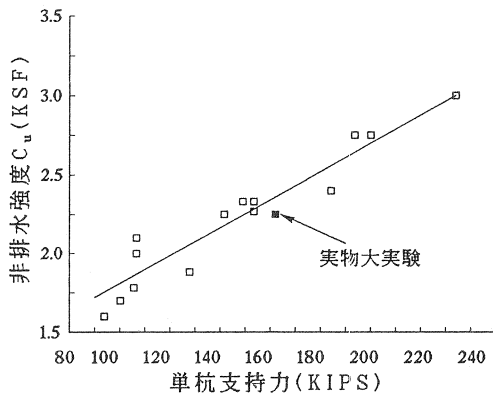


図-10 単杭の支持力と非排水強度の関係
(Koら, 1984)

していないカルカリオス砂である。遠心実験では杭は表面圧力を加えながら重力場で押し込まれたものである。それに対応する大型水平載荷試験の杭は直

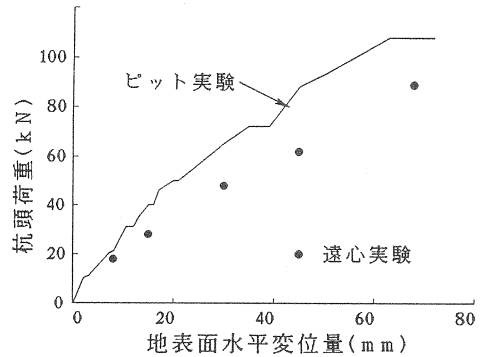


図-11 杭頭水平載荷重と地表面水平変位量曲線
(Nunezら, 1988)

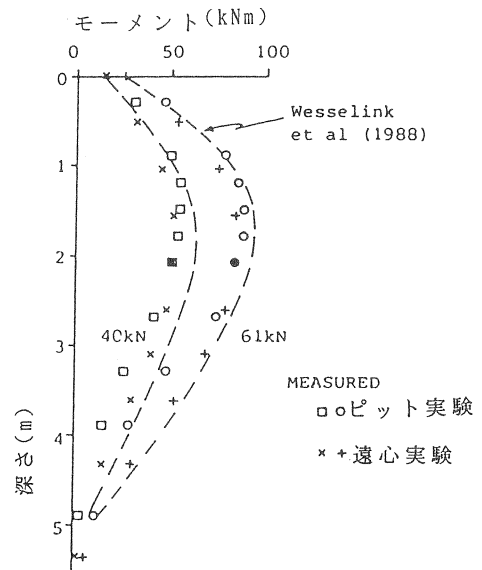


図-12 杭体内曲げモーメント分布
(Nunezら, 1988)

径0.356m、長さ6.0mであり、縮尺比率は1/17である。図-11は載荷荷重と地表面での水平変位との関係、図-12は杭中の曲げモーメント分布であり、曲げモーメント分布にはよい一致が見られるが、ここでも初期地盤反力係数は遠心実験では小さくなっていることに注意したい。

3.4 軟岩中の実大深礎基礎の鉛直載荷試験との比較

従来から節理や亀裂の発達した岩盤の縮尺モデルの可否については議論が分かれ、厳密な縮尺モデルの作成は事実上不可能に近いとの見解が大勢を占めていた。しかし地盤調査から設計地盤に解釈・単純

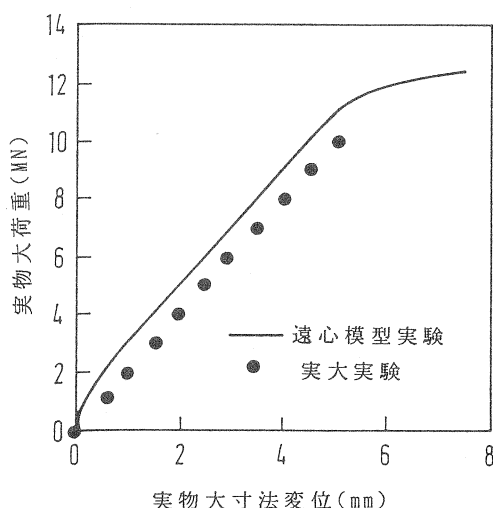


図-13 荷重～沈下曲線の比較
(Leung and Ko, 1991)

化する時には、設計解析で取り扱える範囲に地盤の複雑さを単純化している。そうした視点から亀裂性岩盤も力学的に等価な地盤材料でモデル化が可能ではないであろうかとの見解もありうる。このようなケースとして強度に風化した軟岩に設置された深礎基礎の鉛直荷重挙動のモデル化と実物実験との良好な対比事例が報告されている (Leung and Ko, 1991)。

実物杭は直径0.81m、長さ12.4mのコンクリート杭で、下部は10.5mの範囲が強風化で極度に亀裂が発達したシルト質岩に根入れされている。遠心実験は、1/64の縮尺で実施され、模型アルミ製杭を所定の位置に設置したまま、適度に配合されたスラリー状の石膏・セメントを投入し、杭体と一体化を計っている。固結後の石膏・セメントは原位置での一軸圧縮強度と整合性をとるように配慮されている。図-13は鉛直荷重-鉛直変位量との関係で、両者にはよい一致が認められる。

4. まとめと今後の展望

直接基礎、杭基礎について「モデリング オブ モデルズ」の事例と実物大試験との比較事例を数例紹介した。そしてせん断現象の局所化との関連で現在活発に議論されてる基礎幅/粒径比は100程度以上であれば、基礎工分野での遠心のモデル化に大きく影響は及ぼさず、遠心実験の基礎工の諸問題解決への有効性が示された。また自然地盤への適用につ

いて3つの直接比較事例から、十分注意された不攪乱試料を用いれば降伏荷重は85%程度の安全側で推定できる可能性が示された。しかし、初期地盤反力係数は、局所的な影響を受け易く正確な推定が困難であることが示唆された。この変形の敏感さは杭の試験からも経験された。

杭基礎のモデル化においては、砂地盤では杭施工過程の忠実な再現が不可欠であること、粘土地盤では、地盤の圧密、杭設置後の再圧密を遠心場で行うことの必要性を指摘した。こうした条件を満たせば、杭基礎挙動についても遠心模型実験は有効であることが2, 3の実物大試験との比較から示された。

ただし、基礎工への適用性との視点からは、地盤条件の忠実な再現が必ずしも必須ではなく、現在の設計解析とのバランスの上で現象の等価な単純化が有効であることを指摘した。

なお本報告の作成の一部には科学研究費（一般研究B：課題番号05452241、自然堆積地盤への遠心支持力実験の適用限界に関する実験的研究、代表 日下部 治）の援助を受けたことを付記する。

5. 参考文献

今回収集された基礎工に関する文献をアルファベット順に整理して以下に示す。ただし国内で和文で報告されたものは、多くの読者が直ちに検索・入手が可能と思われるので削除した。

- Aiban, S. A., Znidarcic, D. (1991): Shallow footings on sand under vertical central, eccentric and inclined loads, Centrifuge'91, 201-208.
- Bagge, G. and Christensen, S. N. (1977): Centrifugal test on the bearing capacity of circular footings on the surface of sand, DIALOG1-77, Danmarks Ingeniorakademi.
- Bagge, G., Fuglsang, L., James, R. G., Tan, T., Corte, J. F., Fargeix, D. and Garnier, J. (1989): surface footings on a sand with a capillary zone, Proc. 12th Int. Conf. on Soil Mech. Vol. 2, 887-890.
- Basset, R. H. (1979): The use of physical models in design, Proc. of 7th European Regional Conf. on Soil Mech., Vol. 5, 253-270.
- Barton, Y. O. (1984): Response of pile groups

- to lateral loading in the centrifuge, Proc. of the Application of centrifuge modeling to geotechnical design, 456-472.
- Bloomquist, D., Feld, T., Townsend, F. C., Gravgaard, J. and Gill, J. (1991) : Development of a multiple pile driver/load test device for pile group studies, Centrifuge'91, 355-360.
- Bolton, M. D. and Lau, C. K. (1988) : Scale effect arising from particle size, Centrifuge'88, 127-134.
- Bolton, M. D. and Lau, C. K. (1989) : Scale effects in the bearing capacity of granular soils, Proc. 12 th Int. conf. on Soil Mech. Vol. 2, 895-898.
- Bolton, M. D. and Sun, H. W. (1991) : The displacement of bridge abutments on clay, Centrifuge '91, 91-98.
- Bouafia, A. and Garnier, J. (1991) : Experimental study of P-Y curves for piles in sand. Centrifuge'91, 261-268.
- Canepa, Y., Garnier, J., Smar, S. and Corte, J. F. (1988) : Comparison between field and centrifugal model tests on shallow foundations, Centrifuge'91, 322-324.
- Corte, J. F., Fargeix, D., Garnier, J., Bagge, G., Fuglsand, L., James, R. G., Shi, Q and Tan, F. (1988) : Centrifugal modeling of the behaviour of a shallow foundation. - A cooperative test programme, Centrifuge'88, 325-336.
- Cyran, T. C., Mehle, J. S. and Goble, G. G. (1991) : Centrifuge modeling of piles, Centrifuge'91, 377-384.
- Craig, W. H. (1984) : Installation studies for model piles, Proc. of the Application of centrifuge modeling to geotechnical design, 440-455.
- Craig, W. H. (1985) : Modeling pile installation in centrifuge experiments, Proc. 11th Int. Conf. on soil Mech., Vol. 2, 1101-1104.
- Dean, E. T. R., James, R. G., Schofield, A. N., Tan, F. S. C. and Tsukamoto, Y. (1992) : The bearing capacity of conical footings on sand in relation to the behaviour of spudcan footings of jackups, Predictive Soil Mechanics, 230-253.
- Dickin, E. A. and Wei, M. J. (1991) : Moment carrying capacity of short piles in sand, Centrifuge'91, 277-284.
- Finn, W. D. L., Barton, T. O. and Towhata, I. (1984) : Dynamic lateral response of pile foundations, Centrifuge data and analysis, 143-153.
- Foray, P., Genevos, Labanieh, S. and Goulois, A. (1989) : Effect of pile installation on the bearing capacity of piles in Sand, Proc. 12th Int. Conf. on Soil Mech. Vol. 2, 913-914.
- Fujii, N., Kusakabe, O., Kato, H. and Maeda, Y. (1988) : Bearing capacity of a footing with an uneven base on slope : Direct comparison of prototype and centrifuge model behaviour, Centrifuge'88, 301-306.
- Garnie, J. and Canepa, Y. (1991) : Effects of different footing conditions on the ultimate bearing pressure, Centrifuge'91, 209-216.
- Gemperline, M. C. and Ko, H. Y. (1984) : Centrifuge model tests for ultimate bearing capacity of footings on steep slopes in cohesionless soils, 206-225.
- Gemperline, M. C. (1988) : Coupled effects of common variables on the behaviour of shallow foundations in cohesionless soils, Centrifuge'88, 285-292.
- Hamilton, J. M., Phillips, R., Dunnavant, T. W. and Murff, J. D. (1991) : Centrifuge study of laterally loaded pile behaviour in clay, Centrifuge'91, 285-294.
- James, R. G. and Shi, Q. (1988) : Centrifuge modeling of the behavior of surface footings under combined loading, Centrifuge'88, 307-312.
- Kimura, T., Nakase, A., Kusakabe, O. and Saitoh, K. (1985) : Behaviour of Soil improved by sand compaction piles, Proc. of 11th Int. Conf. on Soil Mech., Vol. 2, 1109-1112.
- Kimura, T., Kusakabe, O. and Saitoh, K. (1985) : Geotechnical model tests of bearing capacity problems in a centrifuge, Geotechnique, Vol. 35, No. 1, 33-45.
- Ko, H. Y., Atkinson, R. H., Goble, G. G. and Ealy, C. D. (1984) : Centrifuge modeling of pile foundations, Analysis and Design of Pile Foundations, ASCE, Ed. Meyer, J. R. 21-40.

- Kulkarni, K. R., Chandrasekaran, V. S. and King, G. J. W. (1985): Centrifuge model studies on laterally loaded pile groups in sand, Proc. 11th Int. Conf. on soil Mech., Vol. 2, 1113-1116.
- Kusakabe, O., Yamaguchi, H. and Morikage, A. (1991): Experiment and analysis on the scale effect of N_r for circular and rectangular footings, Centrifuge'91, 179-186.
- Kusakabe, O., Maeda, Y., Ohuchi, M. and Hagiwara, T. (1992): Attempts at centrifugal and numerical simulations of a large-scale in situ loading test on a granular material, Predictive Soil Mechanics, 404-420.
- Kusakabe, O., Hagiwara, T., Maeda, Y. and Ohuchi, M. (1993): Field loading tests and centrifuge tests (unpublished)
- Kutter, B. L., Abghari, A. and Shinde, S. B. (1988): Modeling of circular foundations on relatively thin clay layers, Centrifuge'88, 337-344.
- Kutter, B. L., Abghari, A. and Cheney, J. A. (1988): Strength parameters for bearing capacity of sand, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 4, 491-498.
- Lenke, L. R., Pak, R. Y. S. and Ko, H. Y. (1991): Boundary effects in modeling of foundations subjected to vertical excitation, Centrifuge'91, 473-480.
- Leung, C. F., Khan, A. and Ko, H. Y. (1991): Capacity of socketed drilled piers, Centrifuge'91, 269-276.
- Luong, M. P. (1989): Centrifuge pile models under lateral dynamic loading, Proc. 12th Int. Conf. on Soil Mech., Vol. 2, 945-946.
- Luong, M. P. (1991): Modeling prestressed foundations for overhead line towers, Centrifuge'91, 217-224.
- Lyndon, A. and Pearson, R. A. (1988): Skin friction effects on laterally loaded large diameter piles in sand, Centrifuge'88, 363-370.
- Mikasa, M., Takada, N. and Yamada, K. (1973): Significance of centrifuge model test in soil mechanics, Proc. 8th Int. Conf. Soil Mech., Moscow, Vol. 1.2, 273-278.
- Murff, J. D., Hamilton, J. M., Dean, E. T. R., James, R. G., Kusakabe, O. and Schofield, A. N. (1991): Centrifuge testing of foundation behaviour using full jackup rig models, Offshore Technology Conf. Paper OTC6516, 165-178.
- Nakase, A., Kusakabe, O. and Wong, S. F. (1984): Centrifuge model tests on bearing capacity of clay, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 110, No. 12, 1749-1765.
- Nakase, A., Kimura, T., Saitoh, K., Takemura, J. and Hagiwara, T. (1987): Behaviour of soft clay with a surface crust, Proc. of 8th Asian Regional Conf. on Soil Mech. Vol. 1, 401-404.
- Nauroy, J. F. and Golightly (1991): Bearing capacity of a shallow foundation on calcareous sand, Centrifuge'91, 187-192.
- Nunes, I. L. and Randolph, M. F. (1984): tension pile behaviour in clay - centrifuge modeling techniques, Proc. of the Application of centrifuge modeling to geotechnical design, 87-102.
- Nunez, I. L., Hoadley, P. J., Randolph, M. F. and Hulett, J. M. (1988): Driving and tension loading piles in sand on a centrifuge, Centrifuge'88, 353-362.
- Nunez, I. L., Phillips, R., Randolph, M. F. and Wesselink, B. D. (1988): Modeling laterally loaded piles in calcareous sand, Centrifuge'88, 371-384.
- Oldham, D. C. E. (1984): Experiments with lateral loading on single piles in sand, Proc. of the Application of centrifuge modeling to geotechnical design, 122-142.
- Ovesen, N. K. (1975): Centrifuge testing applied to bearing capacity problems of footings on sand, Geotechnique, Vol. 25, 394-401.
- Pu, J. L. and Ko, H. Y. (1988): Experimental determination of bearing capacity in sand by centrifuge footing tests, Centrifuge'88, 293-300.
- Scoot, R. F. (1981): Pile testing in a centrifuge, Proc. of 10th ICSMFE, Vol. 2, 839-842.
- Springman, S. M., Randolph, M. F. and Bolton, M. D. (1991): modeling the behaviour of piles subjected to surcharge loading, Centrifuge'91, 253-260.
- Steedman, R. S. (1989): Modeling the dynamic res-

- ponse of piles in dry sand, Proc. 12th Int. Conf. on Soil Mech., Vol. 2, 983-986.
- Taniguchi, E., Koga, Y., Morimoto, I. and Yasuda, S. (1988) : Centrifugal model tests on reinforced embankments by non-woven fabric, Centrifuge' 88, 253-258.
- Tatsuoka, F., Okahara, M., Tanaka, T., Tani, K., Morimoto, T. and Siddiquee, M. S. A. (1991): Progressive failure and particle size effect in bearing capacity of a footing on sand, Geotechnical Engineering Congress, ASCE, Vol. II, 788-802.
- Terashi, M., Kitazume, M. and Kawabata, K. (1989): Centrifuge modeling of a laterally loaded pile, Proc. 12th Int. Conf. on soil Mech., Vol. 2, 991- 994.
- Terashi, M., Kitazume, M., Maruyama, A. and Yamamoto, Y. (1991) : Lateral resistance of a long pile in or near the slope, Centrifuge' 91, 245-252.
- Terashi, M., Kitazume, M. and Okada, H. (1991): Applicability of Practical Formura for Bearing Capacity of Clay Improved by SCP, Proc. of Geo-Coast' 91, 405-410.
- Thaher, M. and Jessberger, H. L. (1991) : The behaviour of pile-raft foundations, investigated in centrifuge model tests, centrifuge '91, 225-23
- Tirant, P. L., Fay, J. B., Nauroy, J. F., Meimon, Y. and Lassoudiere, F. (1988) : Centrifuge simulation of the behaviour of a shallow foundation for offshore structure on calcareous sand, Centrifuge' 88, 345-352.
- Wei, R. L. and Tu, Y. M. (1991): Preliminary study on interaction between pile-supported pier and bank slope. Centrifuge' 91, 193-200.
- Wesselink, B. D., Murff, J. D., Randolph, M. F., Nunes, I. L. and Hyden, A. M. (1988) : Analysis of centrifuge model test data from laterally loaded piles in calcareous sand, Proc. Int. Conf. on Calcareous sediments, Vol. 1, 261-270.
- Yamaguchi, H., Kimura, T. and Fujii, N. (1977): On the scale effect of footings in dense sand, Proc. 9th Int. Conf. on Soil Mech., Vol. 1, 795-798.
- Zhang, L. and Hu, T. (1991): Modeling of residual stresses of large piles in centrifuge, Centrifuge' 91, 237-244.