

砂地盤の三次元支持力特性に関する遠心载荷実験

愛知工業大学工学部

正会員 成田 国朝

正会員 奥村 哲夫

1. はじめに

盛土や自然斜面を含めて、地盤や土構造物の破壊は本来三次元的であり、その破壊評価及び安定性の検討に際しては、境界条件や载荷条件、更に破壊形態などの基本因子について三次元性を加味した議論が望まれる。地盤の支持力評価は、帯基礎問題として歴史的に古くから研究が進められているが、円形や正方形及び長方形基礎といった、いわゆる三次元の支持力評価は、Terzaghiの支持力公式に実験や経験などから定まる形状係数を導入する形で議論が進められてきた。また、円形や正方形基礎の支持力実験は単独に数多く行われているが、長方形基礎まで含めて基礎形状が支持力値や破壊形態に及ぼす影響を系統的に調べた研究は比較的少ない。

このような地盤の三次元破壊のメカニズムや三次元的な拘束効果の特性を明らかにするために、本研究では、遠心载荷装置を用いて水平及び傾斜砂地盤上の矩形・円形基礎に対する支持力実験を行い、基礎の形状比や設置条件の変化に伴う支持力値の動向と破壊形態の特性を調べながら、寸法効果や形状係数などの基本特性について二、三検討を行った。なお、本研究は土質工学会「地盤破壊の三次元的評価に関する研究委員会」が提案した『三次元一斉支持力実験』の参加機関の一員として本学が行った遠心実験の結果を集約したものであり、その一部は同研究委員会シンポジウム等で発表した^{1) 2)}。

2. 実験概要

2.1 一斉支持力実験

一斉実験の主な共通仕様は以下の通りである。①試料には気乾の豊浦標準砂を用いる。②試料容器は剛で破壊域に対して十分な余裕をとる。③载荷は十分な剛性を有する機構とし、フーチングを载荷ロッドに剛結して変位制御(1mm/分)で行う。④フーチングは幅 $B=30\text{mm}$ 、底面は粗の条件とし、矩形基礎では形状比 $L/B=1, 3, 5, 7$ に対して実験を行う。⑤地盤は相対密度 $D_r=85\pm 5\%$ を目標に空中落下法で層厚 150mm(5B)以上に作製する。⑥色砂を1~2cm間隔で設置し、実験後断面を切り出して破壊面を観察する。

2.2 実験方法

支持力実験には、図1に示すような厚さ 6mmのステンレス鋼製の円筒形容器(内寸法： $\phi 450\times 350\text{mm}$)を用いた。容器寸法が大きく、かつ剛性もかなり高いので、三次元载荷における境界の影響は殆どないと考えられる。

模型地盤の作製にはサンドホッパーを用い、一定高さから砂を降らす形式を採った。図2は事前に密度検定を行った結果であり、ホッパー開口部幅を 2mm一定とし、試料砂を一定厚(約1.5cm)の層に分けて厚さ約20cmまで詰めた時の相対密度と落下高さの関係を表している。図の関係

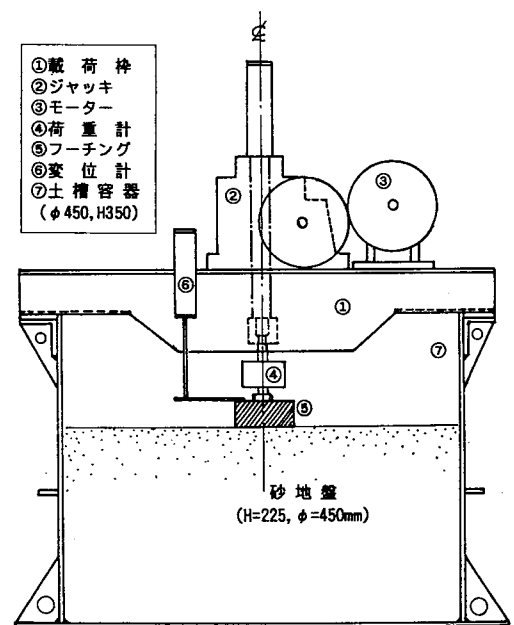


図1 载荷試験の概要

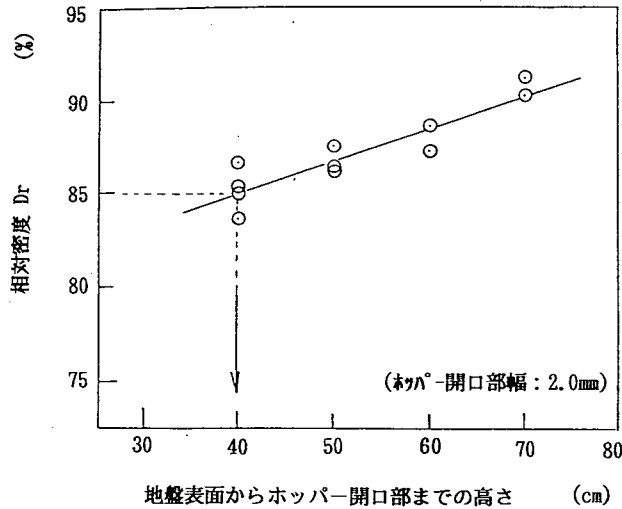


図2 密度検定

表1 実験条件

基礎寸法比 L/B(B×L,cm)	遠心加速 度 n (G)	換算基礎寸法 Bn×Ln(cm)	相対密度 Dr (%)
1 (3×3)	30	90×90	水平 86.4
			傾斜 85.3
3 (3×9)	10	30×90	水平 86.1
			傾斜 86.9
3 (3×9)	30	90×270	水平 85.6
			傾斜 85.8
3 (3×9)	50	150×450	水平 87.2
			傾斜 86.9
5 (3×15)	30	90×450	水平 85.6
			傾斜 86.3
円形 (φ=3)	30	φn=90	85.6
円形 (φ=6)	15	φn=90	86.6
円形 (φ=9)	10	φn=90	87.2

最大密度: $\rho_{max}=1.650 \text{ g/cm}^3$ ($e_{min}=0.606$)

最小密度: $\rho_{min}=1.343 \text{ g/cm}^3$ ($e_{max}=0.973$)

から、所要の相対密度85%を満たす落下高さとして、40cmを採用することとした。傾斜地盤を含めて、地盤整形は余分な砂を真空装置で吸い取る方法で行い、載荷直前に霧吹きで表面に水を与えて破壊面の観察を容易に行えるようにした。色砂層（インク染色）を設置する場合は、破壊面の貫通が予想される載荷板下10~15cmの範囲に、各層毎にポアリング法で1~2mm程度薄く敷設した。

地盤の載荷機構を図1に示す。ジュラルミン製のフーチング⑤を圧縮・引張型の荷重計④（容量2tf）に剛結し、変位計⑥（容量50mm）を設置して電動ジャッキ②で載荷した。実験手順は、土槽を遠心載荷装置に搭載して所定の遠心加速度まで回転数を上昇した後、フーチングを貫入し、計測を開始してからピーク及び残留荷重強度を経て、沈下/載荷幅比(s/B)が約0.5程度になるまで載荷を行った。載荷終了後、地表面の破壊域をスケッチし、色砂層を設置した地盤では地盤全体を水浸・自立させて断面を切り出し、色砂のズレで識別できる破壊面形状を目視で測定した。

2.3 実験内容

実験ケースを表1にまとめた。矩形基礎の載荷では水平・傾斜地盤双方に対し、基礎幅 B=30mm、基礎形状比L/B=3、遠心加速度 30Gを標準条件とし、これを挟んで、形状係数の特性を調べるための形状比を変えた実験（30G, L/B=1, 3, 5）と、寸法効果を調べるための換算基礎幅を変えた実験（L/B=3, nB=90, 150, 270cm）を行った。また、円形基礎に対しては modelling of models の確認実験を行った。なお、傾斜地盤の実験では斜面勾配を 1:2 一定とし、フーチングを法肩に設置して載荷した。

以上の一連の遠心実験のほかに、遠心実験の n=1 に対応する実験として、矩形基礎に対して表1と対応する条件（水平・傾斜地盤で L/B=1, 3, 5, 7）の重力場実験を実施した。模型地盤の作製方法及び実験手順等は遠心実験と本質的な相違はない。

地盤試料に用いた豊浦標準砂の最大・最小密度については、一斉実験に参加した二三の研究機関の実験結果の平均値として、表1欄外の値が得られている。これらの値を用いて各実験における模型地盤の相対密度を求め、表1の最右欄に示した。これによると、相対密度の目標値85%に対し平均値は86.3%であり、約2%程度の誤差に収まっていることが知れる。

3. 実験結果と考察

3.1 modelling of models

図3は、遠心場での支持力実験の再現性を確認するために、換算直径がφn=90cm一定になるように、円形基礎の直径（φ=3, 6, 9cm）と遠心加速度（nG=30, 15, 10G）の組み合わせを変えて行った modelling of models の実験結果である。以下、荷重強度 q は換算基礎幅 Bn と地盤の単位体積重量 γ で除して正規化

して $2q/\gamma Bn$ と表し、また沈下量 s は基礎幅 B で正規化して s/B と表す。図の荷重～沈下量関係を見ると、 $\phi=3\text{cm}$ と 6cm では曲線の初期の立ち上がり、変曲点の位置、変曲点以降の曲線形状の何れもかなり似通っているが、 $\phi=9\text{cm}$ では曲線に明瞭なピークが認められ、荷重強度の値も他と比較して約15%大きいことが知れる。これは、 $\phi=3\text{cm}$, 6cm では土槽半径 R と基礎直径 ϕ の比が、それぞれ $R/\phi=7.5$, 3.8 で、側壁の影響を無視できる条件 ($R/\phi \geq 4 \sim 5$) をほぼ満たしているのに対し、 $\phi=9\text{cm}$ では $R/\phi=2.5$ であり、側壁摩擦の影響が若干現れたためと考えられる。この影響も含めて考察すると、3つの曲線は総じて一致し、modelling of models の妥当性が確認される。

3.2 円形基礎と正方形基礎

図4は円形基礎と正方形基礎の荷重～沈下曲線を比較したものである。ただし、正方形基礎については等価面積の考え方にに基づき、換算基礎幅 $B_n=90\text{cm}$ を円形基礎の直径に換算して正規化支持力を計算している。図によると、円形・正方形基礎とも荷重強度の増加は $s/B=0.1$ まで顕著に見られるが、それ以降は変化が緩やかであり、曲線の形状は両者でほぼ類似していると言える。またピーク荷重強度も支持力係数にして $N_\gamma=150$ 程度の狭い範囲に集中しており、円形と正方形で大きな差は認められない。

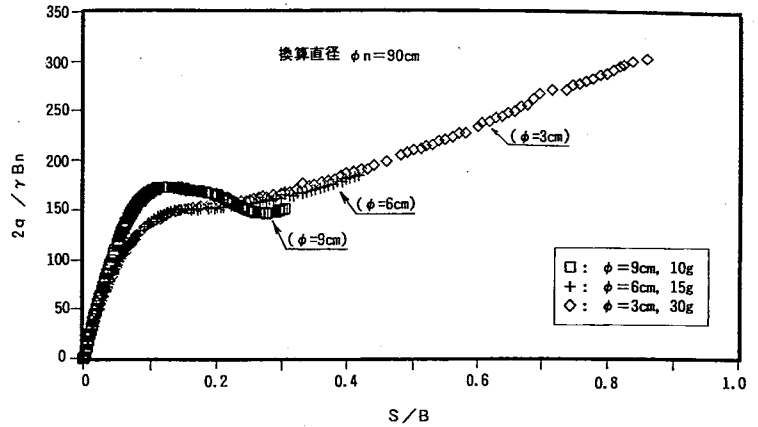


図3 modelling of models

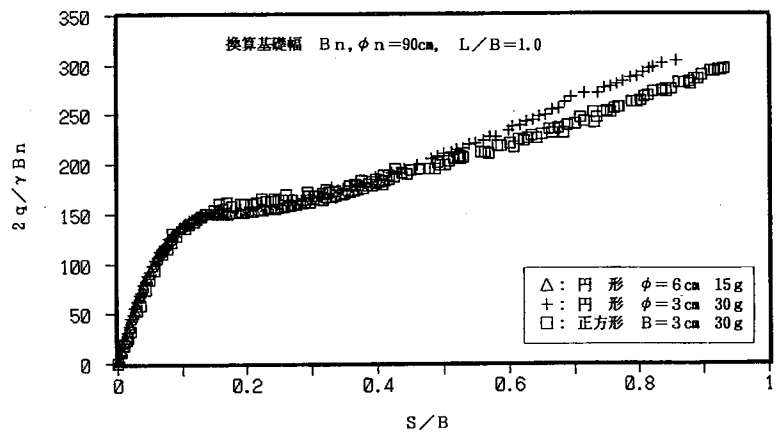


図4 円形と正方形基礎の比較

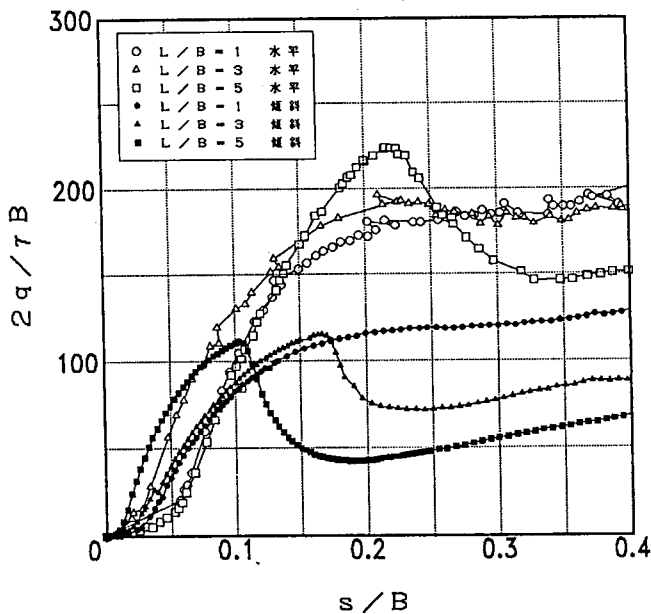


図5 荷重～沈下 ($B=30\text{mm}$, 30G)

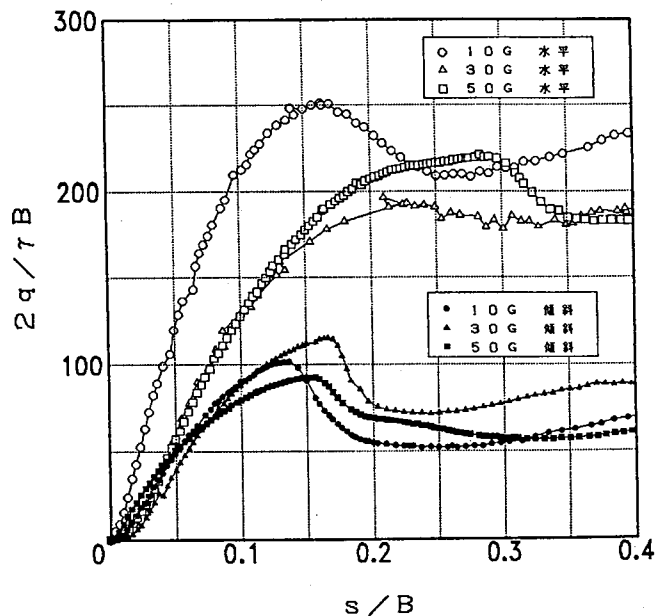


図6 荷重～沈下 ($B=30\text{mm}$, $L/B=3$)

3.3 矩形基礎の荷重～沈下関係

図5及び図6は、水平・傾斜地盤に対して矩形基礎の載荷実験を行った時の荷重強度～沈下量曲線であり、白抜き印は水平地盤、黒塗り印は傾斜地盤である。図5は遠心加速度 ($nG=30G$)一定で形状比(L/B)を変えた場合であり、水平・傾斜地盤とも L/B 大なるに従ってピークが明瞭に現れるが、ピーク荷重値の変動はさ程大きくないこと、また初期補正を考慮すると L/B による初期地盤反力係数の変動も比較的小さいことが知れる。図6は形状比($L/B=3$)一定で遠心加速度を $nG=10G\sim 50G$ (換算基礎幅 $B_n=30\sim 150cm$)の範囲で変化させた場合であり、水平・傾斜地盤それぞれにおいて、遠心加速度 (換算基礎幅)に対するピーク荷重値や地盤反力係数の変動が極めて小さい結果を得ている。

3.4 残留荷重強度と初期地盤反力係数

図5, 6の荷重～沈下曲線の特性を、残留荷重強度と初期地盤反力係数の形で整理すると図7, 8のようになる。図7は残留強度とピーク強度の比(q_r/q_u)と L/B の関係を重力場実験の結果を加えて調べたものであり、いずれの実験でも L/B の増加に伴い強度比が急激に低下する(脆性破壊の特性)傾向が見られる。ただし、その程度は遠心実験(特に水平地盤)では小さく、重力場でかなり大きくなることが知れる。

図8は水平地盤載荷における初期地盤反力係数 (K_i)と換算基礎幅 B_n の関係を調べたものである。遠心場実験の矩形載荷では K_i 値が形状比 L/B の影響を受けないこと、重力場実験の結果と併せて見ると K_i が基礎幅の増大に伴ってほぼ比例的に増加することなどが知れる。

3.5 形状係数

図9は水平地盤における形状係数の特性を調べるために、 $L/B=5$ の支持力 ($N_r=2q_u/\gamma B=224$)を帯基礎の支持力 (N_{r2})とみなして、 $s_r=N_r/N_{r2}$ より求めた形状係数 s_r と形状比 B/L (または L/B)の関係を見たものである。参考のため、円形基礎の実験値も $L/B=1$ にプロットした。この関係を直線式: $s_r=1+n_r(B/L)$ で表し、De Beer³⁾は実験結果に基づいて $n_r=-0.4$ を提案しているが、本実験においても(若干上方にプロットされるものの)概ね同一傾向が見られている。なお、傾斜地盤の実験では B/L に対する支持力値の変動が小さく、またバラツキも比較的大きかったので、明瞭な関係は捉えられなかった。

3.6 寸法効果

図10は $L/B=3$ の実験において、支持力係数 N_r と換算基礎幅 B_n の関係をプロットして寸法効果を調べ

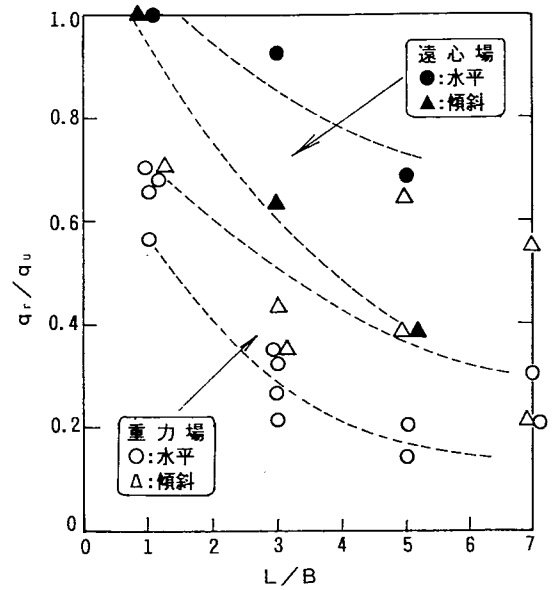


図7 残留荷重強度

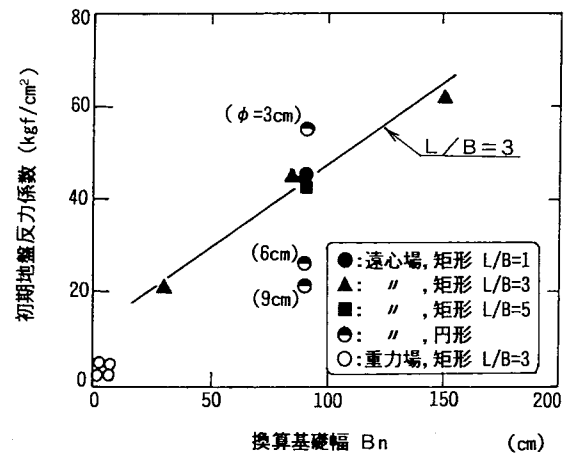


図8 初期地盤反力係数

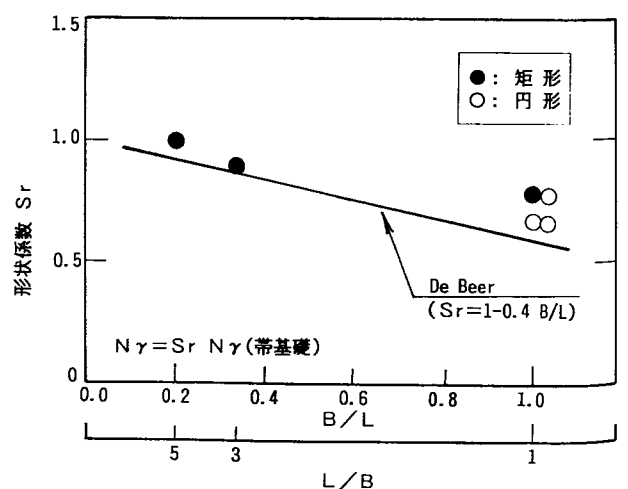


図9 形状係数の特性

たものであり、遠心実験の他に $n=1$ ($B_n=3\text{cm}$) の実験値として重力場実験の結果も白抜き印で併せて示している。また参考のために、同程度の相対密度で行われた稲城砂の実験結果⁴⁾もハッチで併記した。遠心実験を各ケースで1回しか行っていないのでバラツキを含めて見る必要があるが、水平・傾斜地盤の双方で基礎幅の増加とともに支持力値が低下する従来の寸法効果の特性が見られている。

3.7 傾斜の影響

図11は遠心及び重力場実験ごとに、傾斜地盤と水平地盤における支持力値の比を調べたものである。両実験とも L/B の増加に伴って支持力比が低下する傾向が見られるが、絶対値的にはかなり差が大きく、重力場実験では遠心実験の約半分程度になることが知れる。

3.8 地盤の破壊状況

図12は遠心実験の $L/B=3$ の矩形载荷において、地表面に現れた破壊域を測定した結果である。基礎中心を軸に右回りに第I～IV象限を設定し、各象限ですべり面先端までの距離を計測して、破壊面の平均的な到達距離を捉えることができる。

図13は、このようにして求めたすべり面の大きさ a (基礎幅で正規化して a/B) と L/B の関係を調べたものである。図によると遠心場と重力場、水平地盤と傾斜地盤の違いに関わらず、すべり領域は L/B に対して直線的に拡大することが分かる。

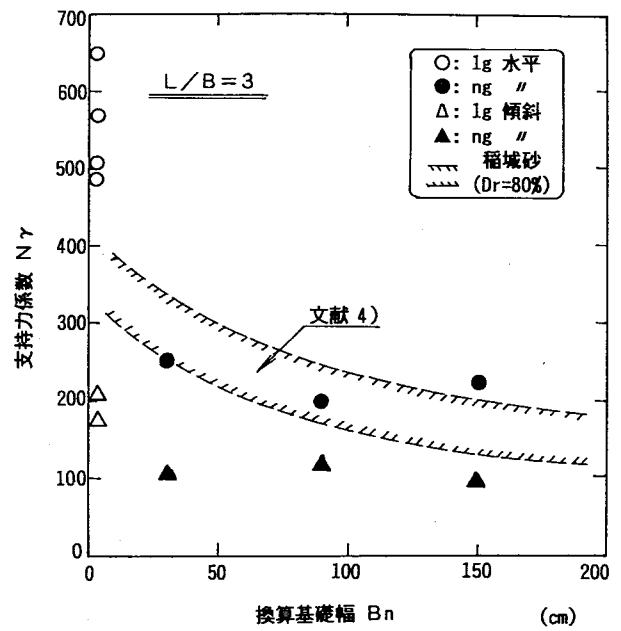


図10 寸法効果

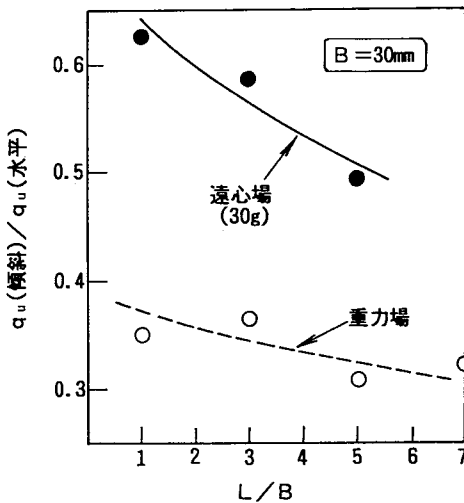


図11 傾斜地盤の強度低下

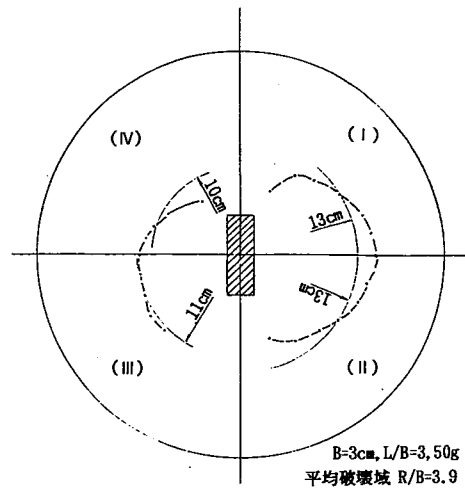


図12 すべり面の観察

4. おわりに

以上の実験結果及び考察をまとめると、以下のように要約される。

- ①円形基礎の遠心実験では、模型基礎の大きさが異なっても、換算基礎幅が等しければ基礎の挙動はほぼ同じになり、modelling of models の妥当性が確認された。
- ②円形基礎と正方形基礎の比較においては、等価面積の考えに基づいて基礎寸法を換算して整理すれば、両者の挙動がほぼ一致することが確かめられた。

- ③矩形基礎の荷重実験では、水平及び傾斜地盤とも、形状比 L/B 大なるに従ってピークが明瞭に現れ、全般せん断破壊の特性が見られたが、ピーク荷重値や地盤反力係数の変動はさ程大きくないことが知れた。
- ④残留強度とピーク強度の比は、上記のように L/B 大なるに従って急激に減少するが、重力場実験の強度比は遠心実験の約半分程度と小さく現れた。また初期地盤反力係数は L/B による影響は小さいが、換算基礎幅の増大に伴ってほぼ比例的に増加することが知れた。
- ⑤水平地盤の矩形荷重では、 L/B の増加 (B/L の低下) に伴ってピーク強度が増加し、形状係数は De Beer の提案値 ($n_r = -0.4$) より若干低めの値を得た。ただし、傾斜地盤の荷重では L/B による強度変化は殆ど認められなかった。
- ⑥支持力値と換算基礎幅の関係を調べたところ、遠心実験の変動が若干小さいのであるが、水平及び傾斜地盤の双方で基礎幅の増加とともに支持力値が低下する従来の寸法効果の特性が見られた。
- ⑦傾斜地盤(1:2)と水平地盤の支持力値の比は、 L/B の増加に伴って減少し、遠心実験では 0.5~0.6、重力場実験では変動が小さく平均的に約 0.3程度の値を得た。
- ⑧すべり面の大きさ(a/B) は、遠心場と重力場、水平地盤と傾斜地盤の違いに関わらず、 L/B に対して直線的に拡大する傾向が見られた。
- なお、本研究は文部省科学研究費補助金の援助を受けた研究であることを付記し、謝意を表す。

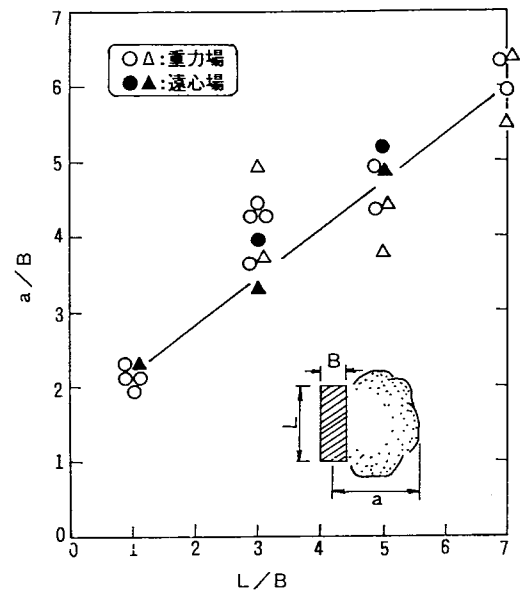


図13 すべり領域

【補足】 本学に設置されている遠心荷重装置の諸元を下表に整理した。

項目	性能
有効半径	1360 mm
最大遠心加速度	200 G (75kgf搭載時)
最大搭載重量	200kgf (75G加速時)
容量	15 G-ton
最大回転数	360 rpm
駆動馬力	11.0Kw インバータモタ
試料容器 搭載形式	スイング プラットフォーム
載荷スペース	W660×D500×H770

【参考文献】

- 1) 成田・奥村 (1995): “矩形荷重に伴う水平及び傾斜砂地盤の破壊形態と支持力特性について,” 地盤破壊の三次元的評価に関するシンポジウム (土質工学会) 発表論文集, pp. 173-178.
- 2) 奥村・成田 (1995): “砂地盤上基礎の支持力遠心実験,” 平成6年度土木学会中部支部研究発表会講演集, pp. 3-4.
- 3) E. E. De Beer (1970): Experimental Determination of The Shape Factors and The Bearing Capacity of Sand, Geotechnique, Vol. 20, No. 4, pp. 387-411.
- 4) 森影・日下部・山口・小林利雄 (1990): 乾燥砂上3次元基礎の支持力遠心実験, 第25回土質工学研究発表会, pp. 1273-1276.