

# 模型砂地盤の支持力実験における砂箱側壁面摩擦の影響VII

## ——側壁面摩擦係数と測定された支持力特性との関係——

Influence of Side Wall Friction of Sand Box in Bearing Capacity Test on Model Sand Ground VII

——Relationship between Surface Friction on Side Wall and Measured Bearing Capacity——

龍岡 文夫\*・生原 修\*\*

Fumio TATSUOKA and Osamu HAIBARA

### 1. はじめに

ここでは、直接せん断試験で測定した摩擦角  $\phi_{\mu}^{22)}$  と測定された支持力係数  $N_r$  等<sup>23)</sup> との対応をつけて、側壁面摩擦の影響を定量的に示すことを試みる。それにはまず寸法効果について検討しておく必要がある。

### 2. 側壁面摩擦と寸法効果

砂地盤の表面載荷の支持力実験において、支持力係数  $N_r$ ,  $K_{50}$  の値や  $S_f/B$  の値がフーチング幅  $B$  の増加によって変化することを一般に寸法効果 (Scale effect) と呼び、これまでに非常に多くの研究がある (たとえば De Beer,<sup>24)</sup> 山口ら,<sup>25)~29)</sup> 小田ら<sup>30)</sup>。寸法 ( $B$ ) が大きくなると  $N_r$ ,  $K_{50}$  は減少し、 $S_f/B$  は増加するといわれている。寸法効果の理由として、 $B$  の増加による (1) 応力増加に伴う砂の内部摩擦角の減少, (2) 進行性破壊 (Progressive failure) の程度の増加, がこれまでに主要なものとして指摘されている。ここで議論しようとするのは寸法効果問題全体ではなく、実験技術上の問題に限定したものである。これまでに詳しく述べてきたように、側壁面摩擦が測定された  $N_r$ ,  $K_{50}$ ,  $S_f/B$  の値に及ぼす影響は極めて大きくなりうるから、側壁面摩擦の影響がない、あるいは無視できるデータを用いて寸法効果の実験的検討をまずすべきことは明らかであろう。そこで側壁面摩擦の影響が比較的少ない幅  $W=40$  cm の中型砂槽を用いて得られたデータを検討してみる。

図 43(b) に示す  $(N_r)_c$  の値は今回得られたデータの中では最も信頼のおけるデータである。そこで、 $\bar{e}_i=0.66$  に相当する値、 $(N_r)_c^*=(N_r)_c/CF$  を個々のデータに対して求め、 $B=2.5$  cm, 5 cm, 10 cm に対する平均値 (MEAN) と標準偏差 (S.D.) を求めた。MEAN  $\pm$  S.D. を  $B$  に対してプロットした図 48(a) を見ると、たしかに、確実に、 $N_r$  に対する寸法効果が認められる。 $B$  が 2

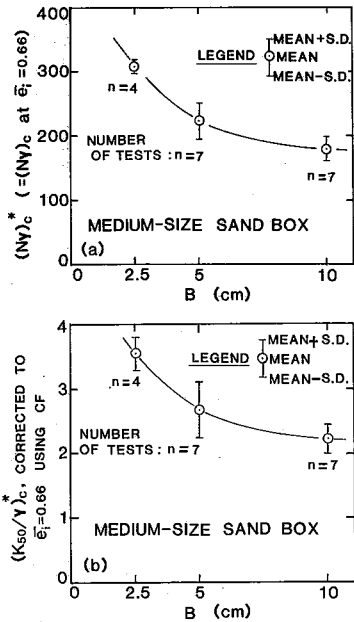


図 48 中型模型実験における寸法効果 (a)  $N_r$  を用いた表示, (b)  $K_{50}$  を用いた表示

倍変わると  $N_r$  は約 25% 変化している。同様に、図 46(c) に示す  $(K_{50}/\gamma)_c$  の値を  $\bar{e}_i=0.66$  の値に対して補正した  $(K_{50}/\gamma)_c^*=(K_{50}/\gamma)_c/CF$  の値の  $B=2.5$  cm, 5 cm, 10 cm に対する平均値、標準偏差を求めた (図 48(b))。この場合も明確な寸法効果が見られる。この場合も  $N_r$  の場合と似て、 $B$  が 2 倍増加すると  $K_{50}$  はだいたい 25% 減少している。つぎに、このグラフを用いて異なる  $B$  に対する側壁面摩擦の影響を定量的に検討してみる。

### 3. 支持力実験における側壁面での平均的摩擦角 $\phi_{\mu}$ の推定と $N_r$ および $K_{50}$ との比較

表 5<sup>23)</sup> に示す No.1~No.18 の実験のうち、No.1, No.2, No.5, No.13, No.14 の実験ケースを除いて検討するこ

\* 東京大学生産技術研究所 第 5 部

\*\* 廣瀬鋼材産業(株)

タイプ	記号	説明 図	備 考
砂粒子がテフロンシート表面を滑る。	S/T		試験終了後テフロンシート表面に傷なし。
砂粒子がテフロンシート表面をひっかく。	S///T		試験終了後テフロンシート表面に粒子貫入の跡あり。
テフロンシートがアクリル表面を滑る。	T/P		この間で滑る

小型土槽を用いた模型実験の土槽剛性と滑りのメカニズムの関係

タイプ	滑りのメカニズム		備 考	No.
	注	注		
溝型鋼と鉄板でガイド	S///T		テフロンシートを巻き込む。	3
	S/T			4
	(S///T, S/T, T/P)		テフロンシートをテープで止める。	5
溝型鋼でガイド				2
ガイドなし				1

注) 表-5<sup>23)</sup>に示す実験No.

図49 砂とテフロンシートが接しているときの滑りのメカニズムの分類

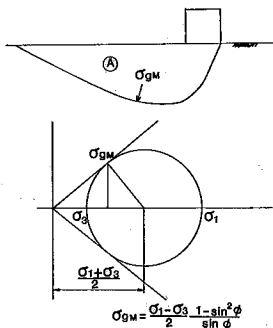


図50 滑り面に作用している直応力の説明

とにする。No.1, No.2 の場合は側壁剛性がほかの場合とは異なるし, No.5, No.13, No.14 の場合の側壁面条件は, 図 20<sup>22)</sup> に示す直接せん断試験のどの実験条件とも対応がつかないからである。この場合 (No.5, No.13, No.14) は, テフロンは大きな引張抵抗力を有することと砂層内にひずみが生ずるという理由で, 図 49 の 3 つのメカニズムが混在しているものと思われる。

一方砂粒子とアクリル板表面の滑りに対する摩擦角はアクリル板表面の状態 (各種の処置法) の関数であり, 一般に直応力の関数であり一定値ではない。したがって, 砂箱側壁面での摩擦角は一定値でないことになる。壁面に摩擦力が作用しているときの砂箱側壁面に作用する直

応力を解析的に求めることは, それほど簡単ではない。Meyerhof<sup>31)</sup>によると, すべり面に作用する直応力の平均値  $\sigma_{G-M}$  は次式で近似的に表される (図 50)。

$$\sigma_{G-M} = \frac{1}{10} q_u \quad (5)$$

側壁面に作用する直応力  $\sigma_n$  は中間主応力  $\sigma_2 = \frac{\alpha}{2} (\sigma_1 + \sigma_3)$  に近い値と考えられる。破壊時の  $\alpha$  の値は福島<sup>32)</sup> が豊浦砂の平面ひずみ圧縮試験で調べた結果によると大略 0.65 である。すると, すべり面上の  $\sigma_2$  の平均値は

$$\{\sigma_2\}_{av.} = \frac{1}{10} \frac{\alpha}{1 - \sin^2 \phi} \cdot q_u \quad (6)$$

となる。そこで, 図 50 に示す A のすべり領域で側壁面に作用する平均的な直応力を近似的に,

$$\bar{\sigma}_n = \{\sigma_2\}_{av.} \quad (7)$$

で表し,  $q_u$  として測定された平均フーチング最大応力  $\bar{q}_u$ ,  $\phi$  として  $45^\circ$  を用いると,  $\bar{\sigma}_n = 0.13 \bar{q}_u$  となる。  $\bar{\epsilon}_1 = 0.66$  のときの  $\bar{q}_u$  を  $N_r^* \cdot 2 / (B, \gamma)$  から求めて, これから  $\bar{\sigma}_n$  の値を求めた。つぎにこの  $\bar{\sigma}_n$  の値を用いて図-22<sup>22)</sup> に示す  $\bar{\sigma}'_v$  を  $\bar{\sigma}_n$  として個々のケースでの砂箱側面でのすべり領域での平均的な  $\phi_\mu$  の値を, 直接せん断試験の結果 (図-22) から求めた。この  $\phi_\mu$  の値と個々のケースでの  $\bar{N}_r^*$  の平均値を対応させたのが図-51(a)である。小型砂箱の場合では, このようにして推定した  $\phi_\mu$  の値と  $\bar{N}_r^*$  の値には明確な相関がある。また  $\phi_\mu$  が  $5^\circ$  を越えると急激に  $\bar{N}_r^*$  の値が増加してゆくことが分かる。中型砂箱の場合は,  $\phi_\mu$  の値の上昇による  $\bar{N}_r^*$  の値の増加率は極めて小さい。ただし, 実験 No.12 での  $\phi_\mu$  が  $15^\circ$  程度としてあるのは, テフロンが破断しなかったと仮定し, 図-49 での S///T のタイプの挙動が生じていたと仮定したからである。実際は  $W$  が大きい (40 cm), フーチング総荷重が大きいので, テフロンが伸び, T/P の現象も生じていて,  $\phi_\mu$  はもっと小さかった可能性がある。また, 小型砂箱の場合  $B = 2.5$  cm の場合のほうが  $B = 5$  cm の場合より側壁面摩擦の影響は小さいことが分かる。したがって, 今回の実験の範囲では  $B = 2.5$  cm,  $W = 10$  cm で  $W/B = 4$  のとき,  $B = 10$  cm,  $W = 40$  cm で  $W/B = 4$  のときはいずれも側壁面摩擦が小さかったことになる。このことから, 側壁面摩擦の影響を小さくするには  $W/B$  を大きくすること, 少なくとも 4 以上である必要性を示唆している。また,  $W = 10$  cm,  $B = 5$  cm,  $W/B = 2$  (●印のデータ) の場合,  $\phi_\mu = 0$  の値を外挿して求めると, 大略  $\bar{N}_r^* = 180$  となる。したがって, 今回の実験結果は,  $\bar{\epsilon}_1 = 0.66$ ,  $B = 10$  cm のときの側壁面摩擦の影響のない  $N_r$  の値は 180 程度であることを示している。図 51(a) に示す  $\bar{N}_r^* \sim \phi_\mu$  の関係を解析的に求めることは今後の課題である。

研究速報

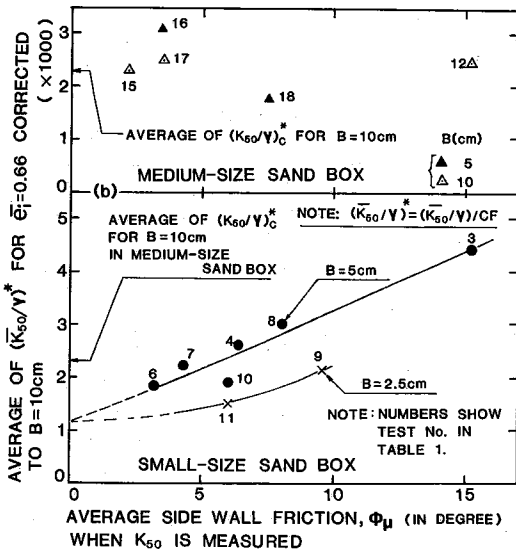
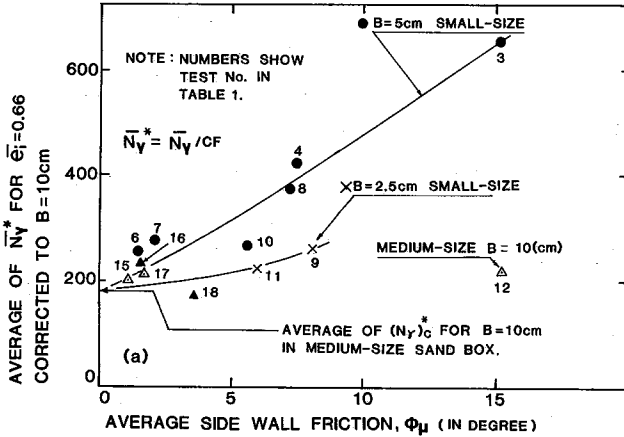


図51 側壁面摩擦の影響  
(a)  $\phi_\mu \sim \bar{N}_y^*$  関係 (b)  $\phi_\mu \sim (\bar{K}_{50}/\gamma)^*$  関係

図51(b)に示すのは、個々のケースでの  $(\bar{K}_{50}/\gamma)^*$  の平均値を  $B=10\text{ cm}$  に対する値に補正した値を  $\phi_\mu$  に対してプロットしたものである。ただし、 $\phi_\mu$  の値は  $\sigma_v = 0.13 \times (\bar{q}_u/2) = 0.065 \bar{q}_u$  に対して求めた。中型砂箱の場合は  $K_{50}$  の値に及ぼす  $\phi_\mu$  の影響は定かではない。しかし、小型砂箱で  $B=5\text{ cm}$  の場合は(図中の●印のデータの場合は)、明確な相関関係が見られる。この場合も、 $B=2.5\text{ cm}$  の場合のほうが  $5\text{ cm}$  の場合よりも  $\phi_\mu$  の影響は小さい。したがって、 $K_{50}$  の値を求めるうえにも、側壁面摩擦の影響を小さくするためには  $W/B$  を限界値以上にする必要があるといえよう。

図51(b)で  $W=10\text{ cm}$  のとき、 $\phi_\mu=0$  のときの  $(\bar{K}_{50}/\gamma)^*$  の値を外挿で求めると、 $W=40\text{ cm}$  のときの同様の

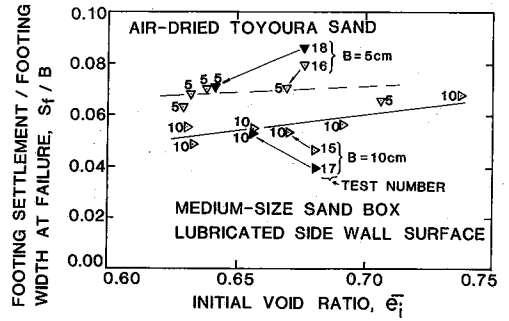


図52 中型模型実験における  $S_f/B \sim \bar{e}_i$  関係 ( $B=5, 10\text{ cm}$ )

値； $2.3 \times 10^3$  よりも相当小さい。この原因として、小型砂箱での実質的側方向剛性が不足していたことが考えられる。<sup>22)</sup>したがって、今回の実験範囲で、 $\bar{e}_i=0.66$  で、 $B=10\text{ cm}$  のときで、平面ひずみ条件が十分に保たれていて、側壁面摩擦の影響がないときの  $K_{50}/\gamma$  の値は  $2.3 \times 10^3$  程度であると推定される。

4. 破壊時フーチング沈下量  $S_f$  と側壁面摩擦

図52は今回得られた破壊時フーチング沈下量に関するデータの中で最も信頼のおけるデータと考えられる中型砂箱で側壁面の摩擦を軽減した場合のものである。 $B=5\text{ cm}$  の場合のほうが  $B=10\text{ cm}$  の場合よりも  $S_f/B$  のほうが若干大きいことが分かる。その理由は定かではないが、1つのありうる理由として、同一の砂を用いているため、 $D_{50}/B$  ( $D_{50}$  は砂の平均粒径) が  $B=5\text{ cm}$  と  $10\text{ cm}$  で2倍異なっていることが考えられる。すなわち、破壊近くなると、砂層内にすべり層が形成されてくるようになるが、すべり層の厚さは  $D_{50}$  に比例すると考えられる。すると、破壊(フーチング最大荷重)時のすべり層内のひずみの大きさが  $B$  によらないとすると、フーチングの破壊に至るまでの変位量はむしろ  $B$  にはあまりよらないことになり、 $S_f/B$  は  $B$  が大きいほど小さくなる。しかし、進行性破壊の程度は  $B$  が大きいほど大きくなるのが考えられ、この点では  $B$  が大きいほど  $S_f/B$  は大きくなると思われる。図-52に示す結果は、前者の要因がより大きいことを示唆しているが、このことを定量的に明らかにすることは、今後の研究課題である。

今、図-52に示す  $S_f/B$  は  $\bar{e}_i < 0.75$  では  $\bar{e}_i$  にあまりよらないので、ここに示すデータの平均値の比をとると、 $\beta = (B=5\text{ cm}$  での  $S_f/B) / (B=10\text{ cm}$  での  $S_f/B) = 1.24$  となる。図-52に示したものの以外で  $B=2.5\text{ cm}$  での測定された  $S_f/B$  を  $1/\beta^2$  倍し、また、 $B=5\text{ cm}$  での値は  $1/\beta$  倍して、 $B=10\text{ cm}$  に対して補正した  $S_f/B$  の値を求めてこれから各ケースでの平均値を求めて、これを  $\phi_\mu$  の値に対してプロットした(図-53)。 $S_f$  に対す

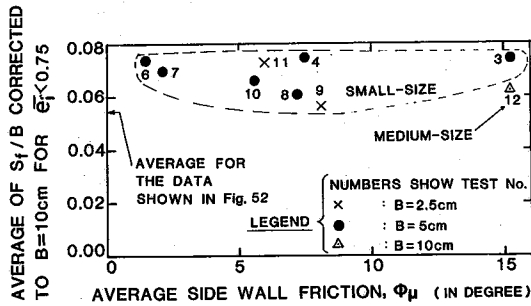


図53 側壁面摩擦の影響 ( $\phi_\mu \sim S_f/B$  関係)

る  $\phi_\mu$  の値の影響は定かではないが、小型砂箱での  $S_f/B$  の値のほうが、中型砂箱での値よりも全般的に大きい。これは、小型砂箱のほうが、実質的側方向剛性が小さいこと、側壁面摩擦の影響がより大きいことなどが原因していると思われる。これらのデータから、平面ひずみ状態が保たれていて、側壁面摩擦の影響がないときの  $B=10\text{ cm}$  に対する  $S_f/B$  は  $\bar{\epsilon}_f=0.66$  のとき、0.055程度であることが分かる。

5. ま と め

以上示した事実から、少なくとも豊浦砂のような細砂を用いる実験に対して以下のことが指摘できるであろう。

(1) 重力の作用下での模型支持力実験で幅 2.5 cm ~ 10 cm のフーチングを用いるときは、砂箱の幅はフーチング幅の 4 倍程度は必要である。

(2) 側壁面の摩擦は、砂層と側壁面の間に 200  $\mu\text{m}$  程度の厚さのラテックスメンブレンと 60  $\mu\text{m}$  程度の厚さのシリコングリースを介すると小さくしうるが、それでも若干は側壁面摩擦の影響は残る。またこのとき、フーチング変位が大きくなるとメンブレンの変形による抵抗力が大きくなることに注意しなければならない。

(3) 信頼するに足る支持力を得るためには、フーチングの中央部分での鉛直力を測定する必要がある。この目的のためには本論文に示したロードセルを用いるのが有効であろう。(以上) (1984年4月2日受理)

参 考 文 献

- 22) 龍岡文夫, 生原修 (1984), “模型砂地盤の支持力実験における側壁面摩擦の影響III (砂と平板の間の摩擦力の測定につづき)”, 生産研究, Vol.36, No.3, pp.28-31 頁
- 23) 龍岡文夫, 生原修 (1984), “模型砂地盤の支持力実験における側壁面摩擦の影響VI (小型・中型砂箱での各種側壁条件の影響)”, 生産研究, Vol.36, No.7, pp.29-32 頁
- 24) De Beer, E. E. (1965), “Bearing Capacity and Settlement of Shallow Foundations on Sand”, Lecture 3, Proc. of Sym. on Bearing Capacity and Settlement of Foundations, Duke Univ., April, pp.15-33
- 25) Yamaguchi, H., Kimura, T. and Fujii, N. (1977), “On the Scale Effect of Footings in Dense Sand”, Proc. 9 th ICSMFE, Vol.1, pp.795-798, Tokyo
- 26) Yamaguchi, H., Kimura, T. and Fujii, N. (1976), “On the Influence of Progressive Failure on the Bearing Capacity of Shallow Foundations in Dense Sand”, Soils and Foundations, Vol.16, No.4, pp.11-22
- 27) 山口柏樹, 木村孟, 藤井斉昭 (1975), “遠心力載荷装置による浅基礎の支持力実験”, 土木学会論文報告集, 第 233 号, pp.71-85
- 28) 木村孟, 藤井斉昭, 斉藤邦夫, 日下部治 (1982), “砂中の浅基礎の支持力に関する研究”, 土木学会論文報告集, 第 319 号, pp.97-104
- 29) 木村孟, 斉藤邦夫, 日下部治, 司代治 (1982), “砂地盤の支持力ならびに変形性状に対する異方性の影響について”, 土木学会論文報告集, 第 319 号, pp.105-113
- 30) Oda, M. and Koishikawa, I. (1979), “Effect of Strength Anisotropy on Bearing Capacity of Shallow Footing in a Dense Sand”, Soils and Foundations, Vol.19, No. 3, pp.15-28
- 31) Meyerhof, G. (1950), “The Bearing Capacity of Sand”, Ph. D. Thesis, University of London (文献 26) による)
- 32) 福島伸二 (1982), “ねじりせん断試験による砂の変形・強度特性の実験的研究”, 東京大学工学系大学院博士請求論文, 12 月
- 33) 龍岡文夫, 党宣夫, 生原修, 佐藤剛司 (1983), “模型砂地盤の支持力実験における砂箱側壁面摩擦の影響 I (側壁面摩擦の影響の実際)”, 生産研究, Vol.35, No.12, pp. 27-30