

鉄筋により補強された砂地盤の支持力特性Ⅲ

Bearing Capacity Performance of Sand Ground Reinforced with Steel Bars (Ⅲ)

龍岡 文夫**・松尾 恵一**・竹内 達也***

Fumio TATSUOKA, Keiichi MATSUO and Tatsuya TAKEUCHI

3. 伸張補強材による地盤支持力の増加

3.2 水平に補強材を配置した場合—タイプA—考察

図15 (33巻11号所載) に示すような各種のフーチング支持力実験の結果をまとめて、水平伸張補強材による砂地盤の支持力 q_u 、地盤鉛直反力係数 K_{50} の増加のメカニズムについて考察する。図21は、密づめの砂地盤での水平補強材による支持力増加率を示したものである。横軸は水平補強材配置深度 d 、またはフーチング幅で正規化した値 d/B であり、縦軸は、補強材によって補強された砂地盤の支持力 $(q_u)_{RF}$ を、図22に示すようにして得られる補強砂地盤と同一の密度 (D_r) に対する補強されていない砂地盤の支持力 $(q_u)_{SAND}$ で除した値：すなわち支持力比である。図15に示す (d) のケースである根入れしたフーチング (根入れ深さ D_f) の支持力、

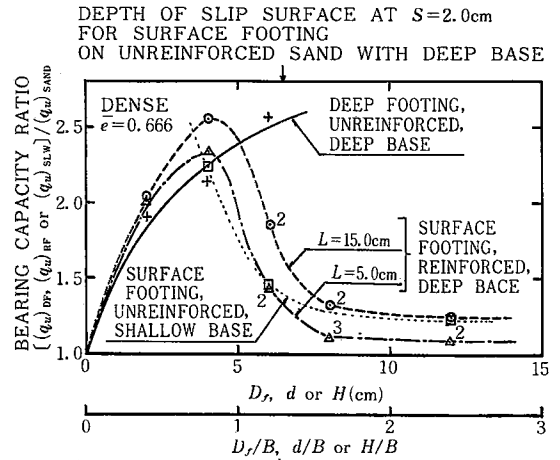


図21 密な砂地盤における鉄筋補強、フーチング根入れ、浅い底盤による支持力の増加率

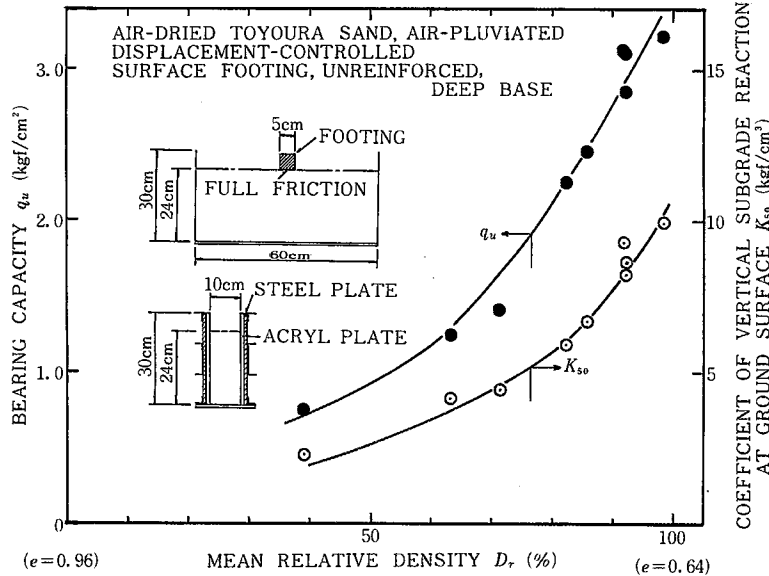


図22 補強されていない砂地盤での $q_u, K_{50} \sim D_r$ 関係

* 東京大学生産技術研究所 第5部

** 大洋技術開発(株)

*** 日本大学生産工学部

研究速報

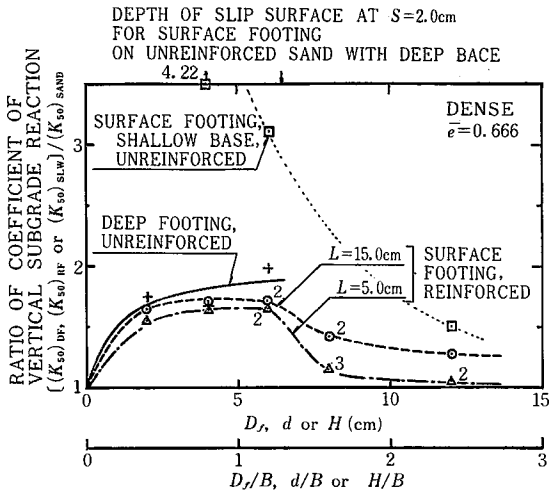


図23 密な砂地盤における鉄筋補強，フーチング根入れ，浅い底盤による地盤反力係数の増加率

および、図15の(c)のケースである剛な底盤を浅くしたとき(底盤深さ H)の支持力 $(q_u)_{SLW}$ について同様な整理をした結果も図21に同時に示してある。 K_{50} についても同様な整理をした結果を図23に示す。さらに、ゆるい砂地盤についての、図21、23と同様に整理した結果を図24、25に示す。これらの図に示してあるのはすべて、補強材の表面にアラルダイトで砂の粒子をはりつけている場合のデータである。これらの図中の横の数字は実験の数であり、図中には平均値を示してある。数字が示していないのは実験数が1回である。複数回実験を行っているのは、実験結果の確認の必要を感じた場合である。これらの図から次のことがわかる。

(1) 支持力については、 $d = 4\text{ cm}$ ($d/B = 0.8$)のとき、砂地盤の密度にかかわらず、最も水平伸張補強材による支持力増加率が大きく、実に2.0~2.5倍の支持力の増加が見られる。 $d = 6\text{ cm}$ になると急激に支持力増加率の減少が生じ、 $d = 8\text{ cm}$ 、 12 cm になると、密な砂地盤では若干補強効果が認められるが、ゆるい砂地盤では、補強効果がまったくなくなっている。これは、密な砂の方が、せん断による体積膨張(dilatancy)特性が大きく、このため補強材の周囲の砂が補強材に対して相対的にその軸方向に変位してせん断変形しようとするが、体積が膨張しようとするが、地盤内部であるためその部分で自由に体積膨張が生じない替りに、補強材に鉛直な応力が増加し、その結果補強材周囲の最大せん断応力(鉄筋コンクリートにおける鉄筋に対するコンクリートの付着強度に相当する)が増加して、けっきょく、地盤の變形が拘束され、支持力の増加をもたらすからであろう。このことは、定体積状態における砂のせん断強度が、密

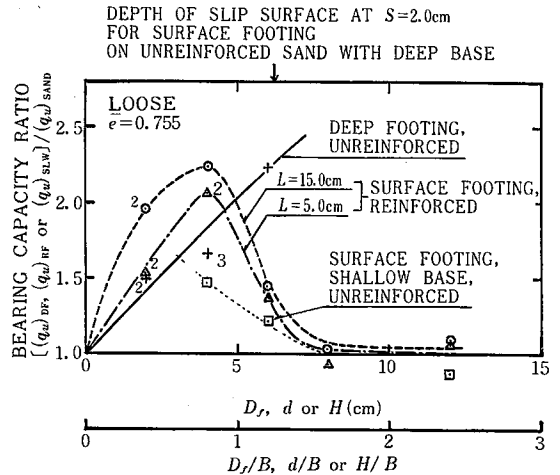


図24 緩い砂地盤における鉄筋補強，フーチング根入れ，浅い底盤による地盤支持力の増加率

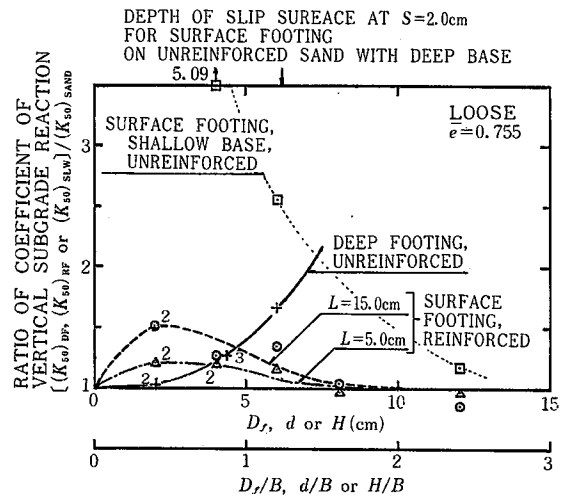


図25 緩い砂地盤における鉄筋補強，フーチング根入れ，浅い底盤による地盤反力係数の増加率

になるほど急速に(その程度は、体積変化自由の状態における程度よりもはるかに大きく)増加することに対応していると言えよう。ゆるい砂ではせん断による体積膨張特性が小さいから、水平伸張補強材の地盤拘束力が小さいのであろう。全体として見ると、密な砂地盤の方がゆるい砂地盤の場合よりも水平補強材による支持力増加率はやや大きい、その差はそう大きいものではない。しかし、水平補強材による支持力の増加量そのものは、密な砂地盤の方がゆるい砂地盤の場合よりもはるかに大きいことに注意しなければならない。それは、図22に示すように補強されていない砂地盤の支持力の値が砂地盤が密になるほど急速に増加するからである。したがって、

支持力増加量の絶対値そのもので言えば、密なほど水平伸張補強材による補強効果が急速に大きくなると言えるそのことに対する定性的説明は、上に述べたように土のダイレイタンシー特性が砂の密度によって著しく変化することによって説明できるであろう。

(2) K_{50} については、密な砂地盤の場合、 $d = 2 \sim 6$ cm のときに、ゆるい砂地盤の場合は $d = 2$ cm のときに水平補強材による増加率が大きい。全体として見ると密な方が、水平補強材による K_{50} の値の増加率は大きい。したがって、 K_{50} の値の増加量そのものは密な砂地盤の場合の方がはるかに大きいことになる。

(3) 全体としてみると、砂の密度、 d の値にかかわらず、補強材の長さ L を 5 cm から 15 cm にしても、補強効果はたいして増加しない。けっきょく、今回の実験の条件においては、単位補強材あたりの補強効果が最も大きいのは $L = B$ の長さの一層の水平伸張補強材を $d = 0.8B$ の深さに配置した場合であったことになる。

(4) $d = 0 \sim 4$ cm の間の水平補強材による地盤支持力、地盤反力係数の増加のようすは、その深さまでフーチングを根入れした場合と非常によく似ている。このことは、特に砂地盤が密な場合に言える。したがって、このような水平伸張補強材による地盤支持力改良効果を「根入れ効果」とよぶことにする。一般に砂の平面ひずみ状態での支持力は、Terzaghi によると次式で近似的にあらわされる⁹⁾。

$$q_u = \frac{rB}{2} N_r + cN_c + qN_q \quad (1)$$

c は粘着係数で今回の場合ゼロであり、係数 N_r, N_c, N_q は ϕ のみの関数であり、 q はフーチング両側の地表面荷重である。Terzaghi の提案によると、根入れ D_f があるフーチングで表面荷重がない場合は、

$$q = D_f r \quad (2)$$

としてよい。このようにすると、たとえば、Terzaghi の解では、ゆるい砂では、たとえば、 $\phi = 30^\circ$ では、 $N_r = 20$ 、 $N_q = 22.5$ で、 $N_r \approx N_q$ であるが、密な砂になると、たとえば、 $\phi = 45^\circ$ で、 $N_q = 173$ 、 $N_r = 320$ で、 N_q が N_r に比して 55% 程度になる⁹⁾。Prandle 解⁹⁾ では、 $\phi = 49^\circ$ のとき、 $N_q/N_r = 0.3$ と非常に小さな値となる。一般のハンドブックには、このような数値が記されている。ところが、実際には、深さ D_f までの土の部分にもせん断抵抗があるため、そのせん断抵抗を無視して、上述のようにして求めた N_q を用いて根入れによる支持力増加 $D_f r N_q$ を求めると密な砂地盤に対しては、過小評価になる⁹⁾。他者の実験でも密な砂の場合、 N_q/N_r は 0.7~1.0 である⁹⁾。筆者らの実験では、図 21 に示すように、密な補強されていない砂地盤で、 $D_f = 4$ cm のとき

の q_u は、 $D_f = 0$ のときに比して約 2.25 倍である。すなわち、

$$\begin{aligned} \frac{(q_u)_{D_f=4\text{cm}}}{(q_u)_{D_f=0\text{cm}}} &= \frac{\frac{rB}{2} N_r + r D_f N_q}{\frac{rB}{2} N_r} = 1 + \frac{2D_f}{B} \frac{N_q}{N_r} \\ &= 1 + \frac{2 \times 4}{5} \frac{N_q}{N_r} = 2.25 \end{aligned}$$

したがって、 $N_q/N_r = 0.78$ となり、他者の実験結果と適合している。以上要するに、フーチングの根入れによる q_u の増加率は、密な砂地盤では、深さ D_f までの砂のせん断抵抗を無視した方法での解によって示されている数値（たとえば Terzaghi 解のように）よりも、かなり大きい。したがって、実際の場合も水平伸張補強材による「根入れ効果」による支持力の増加は、通常用いられている N_q の値から推定されるよりも大きいと考えてよいだろう。

また、今回の実験では、たとえば $d = 4$ cm の所に水平伸張補強材を一層だけ配置しただけで、 $D_f = 4$ cm の根入れをしたのと同じ効果があった。したがって、 $d = 0 \sim 4$ cm の間に、別の水平補強材を何層か配置しても、これ以上支持力の大きな増加は期待できないであろう。実際の場合は、確実に「根入れ効果」を発揮するためには、多層に水平補強材を配置した方がよいかも知れない。この点については、今後の研究が必要とされる。

(5) 今回の実験では、データをより詳細に調べると、砂地盤がゆるい場合、 $d = 4$ cm に長さ 5 cm の水平補強材を配置したときの q_u は、図 24 に示すように、 $D_f = 4$ cm のフーチングを根入れしたときの q_u より確実に大きいし、 $d = 2$ cm、 $L = 5$ cm のときも、図 24 に示すように $D_f = 2$ cm のときより K_{50} は大きい。さらに、 $d = 4$ cm の所に $L = 5$ cm または 15 cm の水平補強材を配置したときの q_u の値の方が、深さ $H = 4$ cm の浅い底盤のときの q_u の値よりも大きい。これらの傾向は、図 21 を見ると、密な砂地盤でも若干はあることがわかる。これらの現象は、図 15 (33 巻 11 号所載) に模式的に示すように砂を剛なものに置き変えたときの方が q_u あるいは K_{50} が小さいことを意味している。このような現象は一見不可解であるが、現在の筆者にとって、これらの事は単純な実験誤差のためとは考えにくい。補強材を配置した場合の方が、剛体を用いる場合よりも応力集中が生じにくいことなどによって、これらの現象を説明すべきであろうが、現在の筆者では、うまく説明できない。

(6) 図 21、24 に示すように水平補強材の深度 d が約 4 cm より深くなると、同じ深さに剛な底盤があるときの q_u の値の傾向に似てくる。特に密な砂地盤(図 21)

研究速報

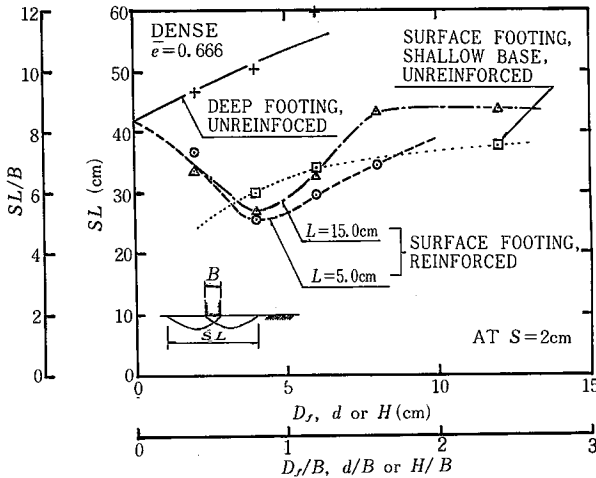


図26 鉄筋補強，フーチング根入れ，浅い底盤によるすべり面形状の変化

でその傾向が顕著である。したがって、水平補強材がある程度深くなり、フーチング底面と水面補強材の間での砂の強度で支持力が決定されることにより支持力が増加する効果を「底盤効果」と呼ぶことにする。一般には、前に述べた「根入れ効果」と「底盤効果」は、水平補強材深度 d が何cmより小さければ前者、大きければ後者と言うようには明瞭に区別できないようである。たとえば、図21に示すように、 $d=4\text{cm}$ の場合の q_u の増加は、「根入れ効果」と「底盤効果」のどちらでも説明できる。また、一般に、同一の d の値に対して、沈下量 s が小さいほど、「根入れ効果」が「底盤効果」より卓越し、 s が大きくなると、後者の方が前者より卓越してくると言えようである。たとえば、図11 (33巻11号所載) の $d=D_f=H=4\text{cm}$ でのフーチング荷重-フーチング沈下量関係を見ると、フーチング最大荷重までは、補強地盤の特性と、根

入れしたフーチングでの特性とよく似ているが、沈下量が10mm以上と大きくなり残留状態になると、補強地盤の特性は、むしろ底盤が浅いときの特性に似てくる。さらに、フーチング沈下量 $s=2\sim 3\text{mm}$ でその値を求めている K_{50} の値については、図23に示すように、 $d=6\text{cm}$ 程度まで、補強地盤の K_{50} は、根入れしたフーチングでの K_{50} とよく似ているが、フーチング沈下量4~6mmでその値を求めている q_u に関しては、図21に示すように $d=4\text{cm}$ 程度までしか、補強地盤の q_u は、根入れしたフーチングでの q_u とよく似ていない。更に、より大きなフーチング沈下量20mmで観察したすべり面の形状を見ると、図26に示すように、 $d=2\text{cm}$ のときから、補強地盤のすべり面形状は、根入れしたフーチングの場合と異なっており、 $d \geq 4\text{cm}$ のときは、底盤が浅いときのすべり面形状と似てくる(図20(b)・33巻11号所載参照)。以上要するに、フーチング沈下量が大きくなるに従って、「根入れ効果」より「底盤効果」がしだいに大きくなってゆくことを示している。これらのことを総合的に解釈するには、土の変形性を適切に考慮した力学モデルにより解析しなければならないだろう。今後の課題である。

(1981年8月12日受理)

参考文献

- 5) Lambe, T. W. and Whitman, R. V.; Soil Mechanics, SI Version; John Wiley and Sons, 1979, pp. 206 ~ 207.
- 6) 石原研而・木村 孟, 土質力学 (土の力学的挙動と地盤の地震応答解析), 土木工学大系8, 彰国社版, 1981, pp.180.

