

ジオシンセティックスを用いた構造物基礎の補強効果

Reinforcing effect of geosynthetics on building foundation

増田彩希¹, Hossain Md. Shahin², 竹田智哉³, 中井照夫⁴

1 名古屋工業大学大学院・工学研究科・mail address : cjk18561@stn.nitech.ac.jp

2 名古屋工業大学大学院・工学研究科・准教授

3 東京工業大学大学院

4 (株) 地域 地盤 環境研究所

概 要

我が国は比較的軟弱地盤が多く、構造物等の建造に伴い地耐力の確保を目的とした支持力補強が必要な場合がある。支持力補強の中でも構造物の基礎直下に繊維補強材（ジオシンセティック）を敷設する補強方法は、簡易であり且つ一般的な工法の一つである。この工法の効果は実務でも実証されており、これまでに補強材端部構造（補強材固定治具の形状や固定方法等）の違いが沈下挙動に及ぼす影響や、必要な補強材長さについての検討が行なわれてきた^{1),2)}。そこで、本稿では種々のモデル実験により最も補強効果の得られた補強仕様のもと、補強材設置深度が補強効果に及ぼす影響について検証を行う。また、中心鉛直荷荷のみならず、偏心鉛直荷荷においても補強効果の検討を行い、それぞれの荷重条件について、2次元のモデル実験と有限要素解析を行い、実験・解析の両面から支持力補強メカニズムを明らかにする。

キーワード：支持力，ジオシンセティックス，補強材

1. はじめに

我が国は軟弱地盤が広く分布しており、構造物等を建造する場合には軟弱地盤を避けることは難しい。また、軟弱地盤上に構造物等を建造する場合、地耐力を確保するために支持力の補強が必要である。一般的に支持力の補強工法としてはセメント等による「地盤改良」や「良質土への置き換え」がよく用いられている。しかし、これらは施工費の増大や施工条件上での制約を受けやすいという問題点が挙げられる。そこで本研究では、種々の支持力補強工法の中から最も施工費が安価であり、施工も容易であると考えられる「ジオシンセティックスを用いた支持力補強工法」に着目した。ジオシンセティックスを用いた補強工法とは、図1に示すように繊維材等から構成される補強材を基礎直下に敷設することにより、地盤の支持力増大を期待する工法である。これまでアルミ棒積層体を用いた2次元でのモデル実験、および地盤材料や補強材の物性を考慮した数値解析により、補強材端部構造の違いや補強材の長さ（範囲）が補強効果に及ぼす影響についての検討が行なわれてきた^{1),2)}。しかし、補強材の適切な設置深度などに関しては未だに合理的な解釈がなされておらず、現時点ではその補強メカニズムや補強効果を定量的に評価することは難しい。そこで、本稿ではこれまでに効果の得られた補強仕様（補

強材形状，補強材長さ）のもと、補強材設置深度が補強効果に及ぼす影響について検討を行う。ここで、実際に建造される構造物には一様な荷重（中心への荷重）のみが作用することは少なく、荷重作用位置の偏心や傾斜を伴った荷重を考慮する必要がある。そのため、本研究では直接基礎中心に荷重を行う中心鉛直荷荷（回転が生じない）、及び直接基礎中心から荷重位置をずらした偏心鉛直荷荷（回転が生じる）の2種類の荷重条件において、それぞれの荷重条件下での2次元でのアルミ棒積層体を地盤材料としたモデル実験と対応する有限要素解析を行い、支持力補強メカニズムについて検討を行う。



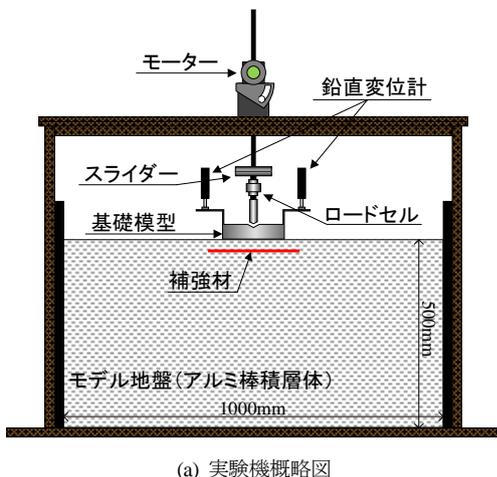
図1 ジオシンセティックスによる支持力補強

2. 2次元モデル実験, および数値解析

2.1 2次元モデル実験の概要

本研究で用いた2次元モデル試験機を図2に示す。試験はアルミ棒積層体を地盤材料としたモデル地盤に直接基礎の模型(アルミニウム製)を設置し、モーターを用いた荷重ロッドによりひずみ速度一定の変位制御方式により荷重を行った。ここで、荷重ロッドの先端には、(a)に示すように水平方向への可動が可能なスライダと支持力測定用のロードセルを設置した。また、基礎の沈下量、及び回転角度は基礎の両端に設置した鉛直変位計を用いて算出した。

ここで、試験に用いた模型は縮尺1/100程度を想定しており、(b)に示すようにモデル地盤は幅1000mm、高さ500mm、奥行50mmのアルミ棒積層体を用いた。モデル地盤の材料には、長さ50mmで直径1.6mmと3.0mmの2種類のアルミ棒を重量比3:2で混合したものを用いた。アルミ棒積層体の単位体積重量は $\gamma=20.4\text{kN/m}^3$ (中密な砂地盤に相当)である。



(a) 実験機概略図



(b) 実験状況図

図2 2次元モデル試験機

本研究で用いたモデル基礎(直接基礎)、及び補強材の概略図を図3、図4に示す。モデル基礎には幅 $B=120\text{mm}$ 、高さ35mm、奥行50mmの剛なアルミブロックを用いた。また、モデル基礎の底面にサンドペーパーを貼り付けることでモデル地盤とアルミニウム積層体地盤との摩擦を考慮した。また、補強材の形状はこれまでの研究成果²⁾をもとに最も効果の得られた補強仕様

(補強材端部有り、表面摩擦有り)で統一した。補強材には曲げ剛性のないトレーシングペーパーを採用し、補強材両面に直径1.6mmのアルミ棒を10mm感覚で貼り付けることで補強材表面の摩擦性を考慮した。補強材の幅 L はこれまでの研究成果を参考に、基礎幅 B の1.2倍($L=144\text{mm}$)に統一した。奥行きはモデル地盤と同様に50mmとした。また、補強材端部(固定材)には厚さ2mm、長さ15mm、奥行50mmのアルミニウム板を用いた。補強材端部の形状はこれまでの研究成果をもとに、トレーシングペーパーの上側に5mm、下側に10mmアルミ板が突き出す形状で統一した。

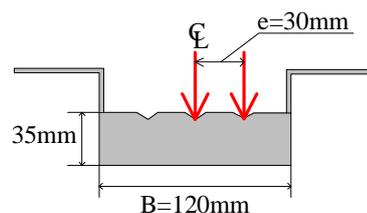


図3 直接基礎(モデル)

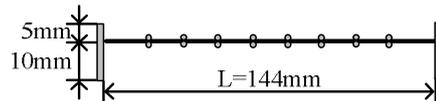


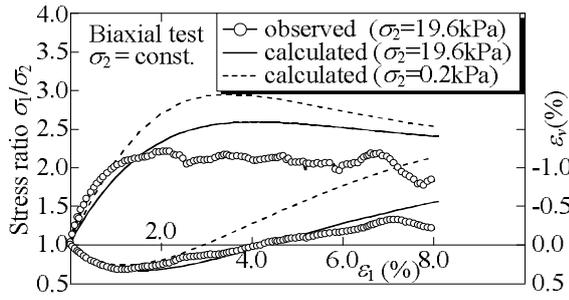
図4 補強材(モデル)

2.2 数値解析の概要

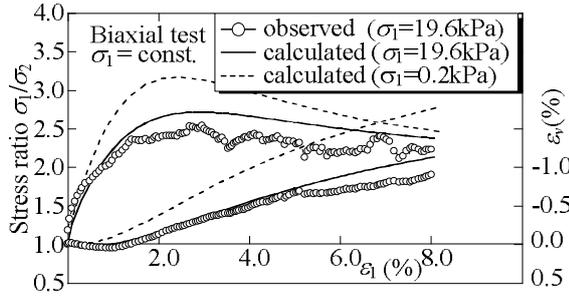
本研究の数値解析には地盤材料の弾塑性構成モデル(subloading t_{ij} model)に基づく非線形有限要素解析コード「FEM t_{ij} -2D」を用いて、2次元モデル実験と同様のスケールにおいて平面ひずみ条件下で解析を実施した。モデル地盤は4節点のアイソパラメトリック要素で表現した。境界条件はモデル実験と同様に、底面は完全固定境界、側面は水平変位のみ固定境界とした。補強材と補強材端部(固定材)はそれぞれ弾性ビーム要素で表現し、これらの物性値もモデル実験と同様の値を用いた。また、地盤と直接基礎の摩擦($\delta=15^\circ$)、及び地盤と補強材との間の摩擦($\delta=20^\circ$)を考慮するため、それぞれの境界には弾塑性ジョイント要素³⁾を用いた。ここで、直接基礎は基礎自体の変形が生じないように、剛性の大きな弾性体で表現した。

図5に本研究で用いたアルミ棒積層体の二軸圧縮試験結果、及び数値解析に用いた等方硬化型弾塑性構成モデル subloading t_{ij} model⁴⁾における要素シミュレーション結果(応力~ひずみ関係)を示す。ここで、二軸圧縮試験は軸方向応力を最大主応力とし、軸方向応力を増加した場合、及び側方向応力を減少した場合について実験を行った。実験結果、及び要素シミュレーション結果から、解析に用いる弾塑性構成モデルは地盤材料の変形・強度特性を精度よく表現できていると言える。

表1に数値解析に使用したアルミ棒積層体のパラメータを示す。



(a) 最小主応力一定試験(σ₂: 増加)



(b) 最小主応力一定試験(σ₁: 減少)

図5 アルミ棒積層体の二軸圧縮試験結果と解析結果

表1 アルミ棒積層体の材料パラメータ

λ	0.008	compression index	
κ	0.004	swelling index	
e_{NC}	0.3	reference void ratio on normally consolidation line at $p = 98 \text{ kPa}$ & $q = 0 \text{ kPa}$	Same parameters as Cam clay model
R_{cs}	1.8	critical state stress ratio $R_{cs} = (\sigma_1/\sigma_3)_{cs(comp)}$	
ν_c	0.2	Poisson's ratio	
β	1.2	shape of yield surface (same as original Cam clay at $\beta = 1$)	
a	1300	influence of confining pressure	

2.3 試験条件

今回行った試験条件を表2に示す。本試験では補強材仕様は統一し、補強材の設置深度が $D/B=0.00, 0.05, 0.10, 0.20, 0.40$ (D : 設置深さ, B : 基礎幅) の5ケースでの実験を行った。なお、荷重の載荷条件は上述したように中心鉛直載荷、及び偏心鉛直載荷時の2ケースとするため、10ケース(5深度×2載荷)の検討を行った。

表2に試験条件を示す。解析についても実験と同様のケースで行った。

表2 試験条件

	Pattern (Length of reinforcement $L/B=1.2$)				
	Depth of reinforcement D/B				
	$D/B=0.00$	$D/B=0.05$	$D/B=0.10$	$D/B=0.20$	$D/B=0.40$
Concentric Loading	○	○	○	○	○
Eccentric Loading		○	○	○	○

3. 結果と考察

3.1 中心鉛直載荷

1) 鉛直変位に対する補強効果

図6に中心鉛直載荷条件での実験結果、及び解析結果(荷重～変位関係)を示す。なお、「no reinforcement」は補強材を設置しないケース(以下、無補強)を意味する。ここで、グラフの縦軸は単位面積あたりの鉛直荷重 q_v を $\gamma \cdot B/2$ (γ : アルミ棒積層体の単位体積重量, B : 基礎幅) で除した無次元量, 横軸は鉛直変位 v を基礎幅 B で除した無次元量で表している。

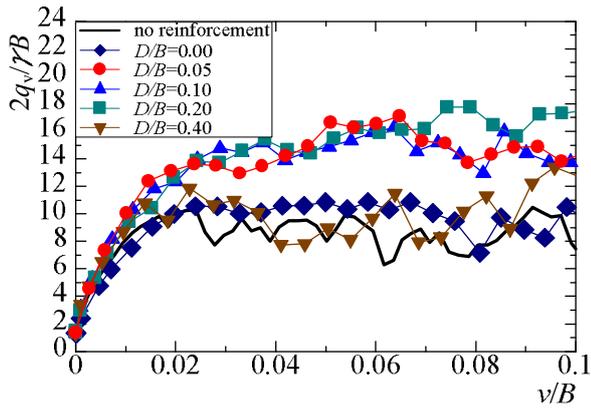
図6(a)に示す実験結果より、補強材の設置深度が $D/B=0.05, 0.10, 0.20$ のケースでは無補強に比べ支持力が増大しており、設置深度によらずほぼ同程度の補強効果が得られた。一方で、補強材の設置深度が $D/B=0.00$ (地表面)、及び $D/B=0.40$ のケースでは補強効果が得られず、無補強と同程度の挙動を示した。すなわち、補強材を地表面に設置した場合は補強材が機能しないため補強効果が得られず、また、補強材の設置深度がある一定以上深くなると(実験では $D/B=0.40$ 以深)、補強効果が得られない結果となった。これは、補強材の設置深度が地表面以下で、かつある程度浅い場合は、載荷荷重の影響により補強材に緊張力が発生するためと考えられる。以上のことから、補強材の設置は地表面より深く、かつ基礎による載荷荷重の影響を受ける範囲内に設置することで補強材の効果を発揮しやすいと考えられる。

次に図6(b)に示す解析結果より、解析結果は支持力をやや過大評価しているものの、実験結果と同様に補強材の設置深度が $D/B=0.05, 0.10, 0.20$ のケースでは支持力が増大し、補強効果が得られている。また、設置深度が他のケースよりも深い $D/B=0.40$ のケースでは他のケースと比べてあまり補強効果が得られていないことから、実験結果と同様の傾向を示しているといえる。したがって実験値と解析値は良い対応関係にある。

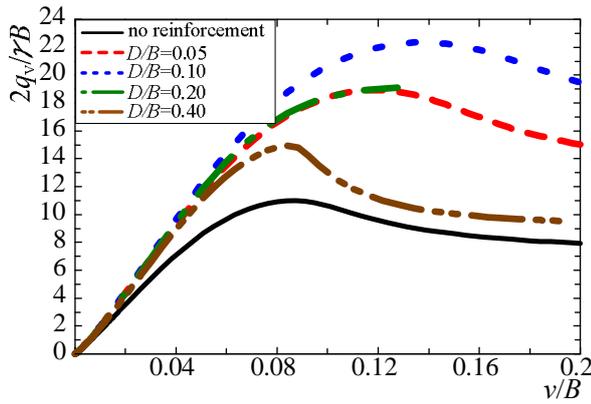
2) 偏差ひずみ分布

図7に実験、及び解析結果から得られた全てのケースにおけるピーク時での偏差ひずみ分布を示す。実験・解析結果ともに、図6に示す補強効果の得られた $D/B=0.05, 0.10, 0.20$ のケースについては、補強効果が得られなかった無補強や $D/B=0.40$ のケースと比べて偏差ひずみが発生する領域(図中で色の濃い部分)が広く、広範囲にひずみが分散し、影響範囲が広がっていることがわかる。ここで、補強効果が得られなかった無補強や $D/B=0.40$ のケースでは、偏差ひずみが基礎周辺に集中しており、ひずみが局所的となっている。

以上のことから、載荷荷重の影響を受ける範囲内に補強材を設置することにより、本来は基礎周辺に発生するひずみを地盤内に広く分散させることが可能となり、それにより補強効果が得られたと考えられる。また、実験結果と解析結果は良い対応関係にある。



(a) 実験結果



(b) 解析結果

図 6 荷重～変位関係 (中心鉛直載荷)

3.2 偏心鉛直載荷

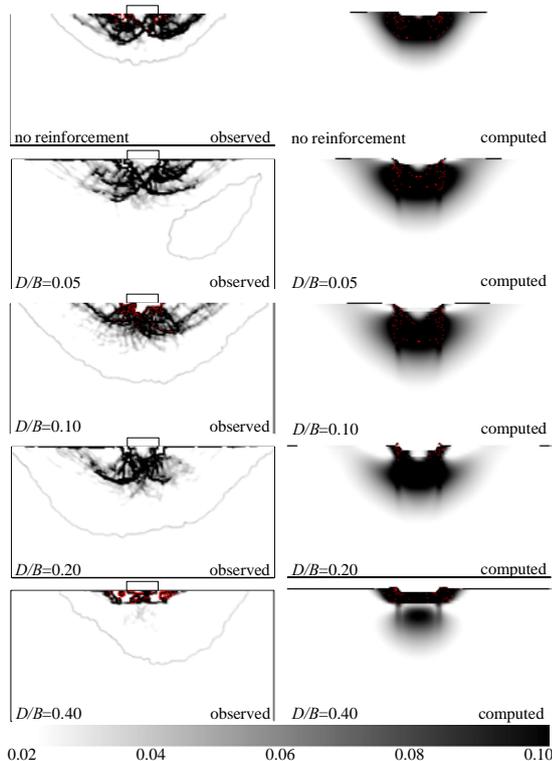
1) 鉛直変位に対する補強効果

図 8 に偏心鉛直載荷条件での実験結果, 及び解析結果 (荷重～変位関係) を示す。ここで, 荷重の偏心比は $e/B=1/4$ (基礎幅 $B=120\text{mm}$) とした。また, 中心鉛直載荷の時と同様に, 縦軸は鉛直荷重の無次元量, 横軸は鉛直変位の無次元量で表している。なお, 図 6, 及び図 7 に示す中心鉛直載荷試験において補強効果が全く得られなかった $D/B=0.00$ (補強材を地表面に設置したケース) については検討を省略する。

図 8(a) に示す実験結果より, 補強材の設置深度が $D/B=0.05, 0.10, 0.20$ のケースでは支持力が増大しており, 設置深度によらずほぼ同程度の補強効果が得られた。しかし, $D/B=0.20$ のケースにおいて, 偏心鉛直載荷では図 6(a) に示す中心鉛直載荷とは異なり, $v/B \leq 0.02$ では若干補強効果が小さい傾向にあった。また, 設置深度が $D/B=0.40$ のケースでは補強効果が得られなかった。これらの結果は中心鉛直載荷と同様の傾向であり, 偏心鉛直載荷時においても中心鉛直載荷と同様に, 補強材を基礎による載荷荷重の影響を受ける範囲内に設置することで支持力の補強効果を得ることができると考えらえる。また, 図 8(b) に示す解析結果より, 解析結果は実験結果と比較して支持力をやや過大評価しているものの, 挙動はほぼ一致しており良い対応関係にある。しかし, 偏心鉛直載荷の解析結果においては, 図 8(a) に示す実験結果と同様に設置深度が $D/B=0.20$ の場合に補強効果がやや小さい傾向にある。

2) 回転に対する補強効果

図 9 に偏心鉛直載荷条件における直接基礎の回転量と荷重の関係を示す。偏心鉛直載荷時には基礎に均等な荷重がかからないため不等沈下が生じるので, 基礎の回転量を軽減することはとても重要なことである。図 9(a) に示す実験結果より, 無補強と比較して補強材の設置深度が $D/B=0.05, 0.10, 0.20$ のケースでは, 同じ荷重に対する基礎の回転量が小さく, 回転に対する補強効果が大きいことがわかる。しかし, ここでも荷重～変位関係と同様に $D/B=0.20$ では他の 2 ケースと比較して回転の抑制効果が小さい。また, 設置深度が $D/B=0.40$ のケースでは無補強とほぼ同じ挙動を示している。したがって, $D/B=0.05, 0.10, 0.20$ のケースでは基礎の回転を抑制する補強効果が得られているが ($D/B=0.20$ は効果小), $D/B=0.40$ のケースにおいては補強効果が得られない結果となり, 支持力の補強効果と同様の傾向となった。また, 図 9(b) の解析結果より, 解析結果は実験結果と同様に支持力の補強効果が得られたケースでは, 回転に対する補強効果が得られた。また, 実験結果 (支持力, 回転量) と同様に, $D/B=0.20$ のケースは回転抑制効果も小さい。



(a) 実験結果

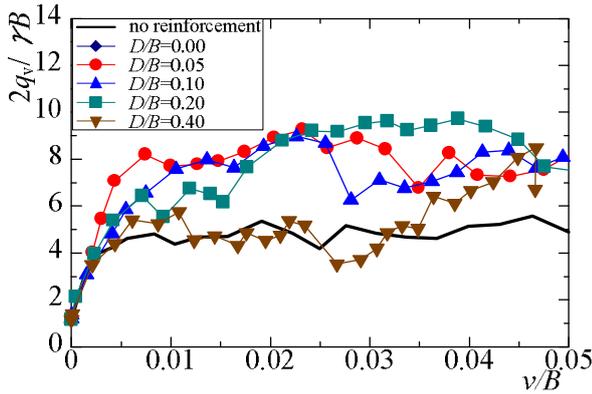
(b) 解析結果

図 7 偏差ひずみ分布 (中心鉛直載荷)

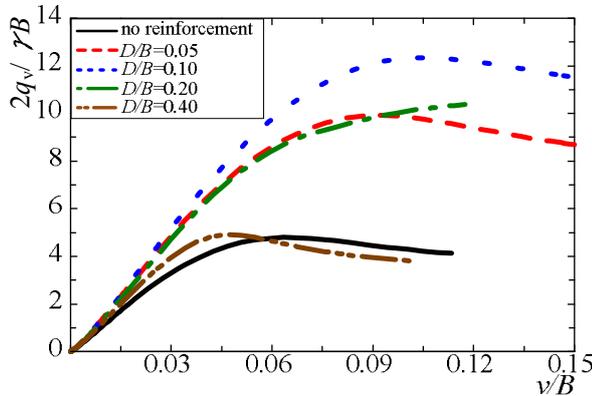
3) 偏差ひずみ分布

図 10 に実験、及び解析結果から得られた全てのケースにおけるピーク時での偏差ひずみ分布を示す。図 8 に示す補強効果が得られた $D/B=0.05, 0.10, 0.20$ のケースについては、補強効果が得られなかった無補強や $D/B=0.40$ のケースと比べ、偏差ひずみが発生する領域（図中で色の濃い部分）が広く、広範囲にひずみが分散し、影響範囲が広がっていることがわかる。しかし、補強効果が比較的小さかった $D/B=0.20$ のケースの場合は、 $D/B=0.05, 0.10$ のケースと比較して、偏差ひずみが集中しているため地盤変位も大きくなり、補強効果が若干減少したと考えられる。ここで、補強効果が得られなかった無補強や $D/B=0.40$ のケースでは、偏差ひずみが基礎周辺に集中しており、ひずみが局所的となっていることがわかる。

以上のことから、偏心鉛直载荷（図 10）の場合も中心鉛直载荷（図 7）と同様に、载荷荷重の影響を受ける範囲内に補強材を設置することにより、本来は基礎周辺に発生するひずみを広く分散させることが可能となり、それにより補強効果が得られたと考えられる。また、実験結果と解析結果は良い対応関係にある。

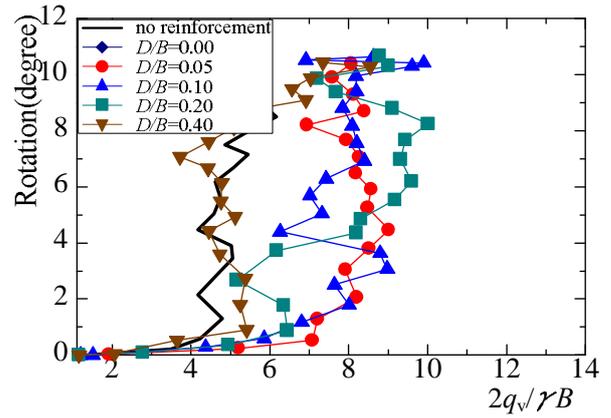


(a) 実験結果

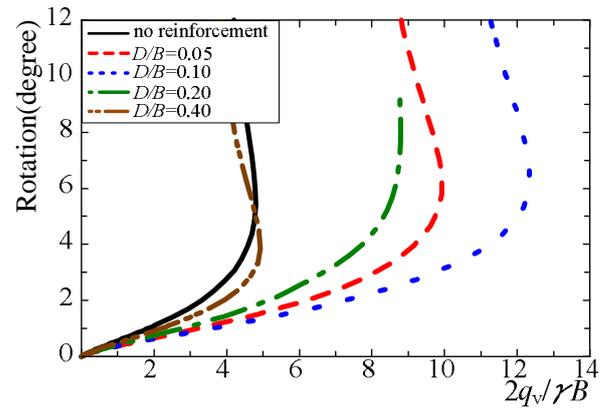


(b) 解析結果

図 8 荷重～変位関係（偏心鉛直载荷）

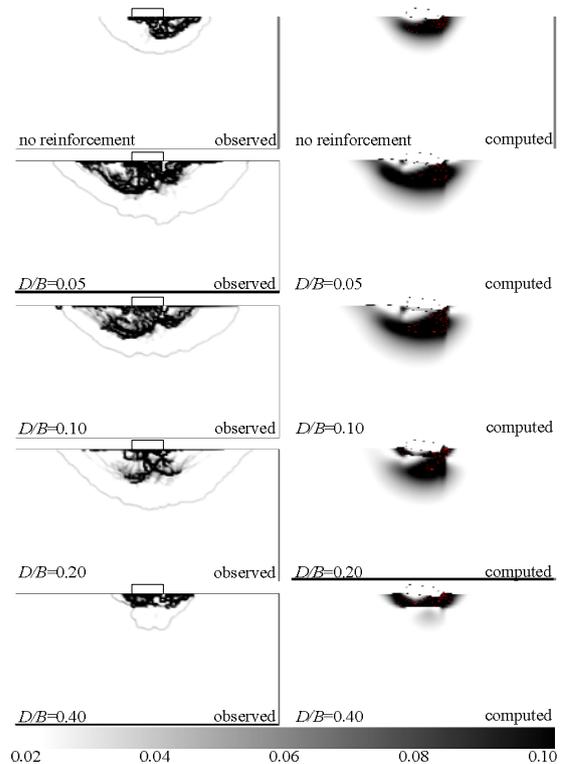


(a) 実験結果



(b) 解析結果

図 9 回転量～荷重関係（偏心鉛直载荷）



(a) 実験結果

(b) 解析結果

図 10 偏差ひずみ分布（偏心鉛直载荷）

4. まとめ

本稿ではジオシンセティック（補強材）を用いた支持力補強工法について、2次元モデル実験とその再現解析によって補強効果を検証した。知見を以下に示す。

中心鉛直载荷

- 1) $D/B = 0.00, 0.40$ のケースでは、補強効果が得られず、無補強のケースと同様の挙動を示した。
- 2) $D/B = 0.05, 0.10, 0.20$ のケースでは、補強効果が得られた。
- 3) 無補強や補強効果のない $D/B = 0.40$ のケースでは、偏差ひずみが生じる領域は基礎周辺に限られる。補強効果のある $D/B = 0.05, 0.10, 0.20$ は偏差ひずみが広く深く分散する。
- 4) 支持力・偏差ひずみ分布ともに解析値は実験値をよく捉えており、良い対応関係にある。

偏心鉛直载荷

- 1) 無補強、 $D/B=0.40$ は支持力補強効果が無い。
 $D/B = 0.05, 0.10, 0.20$ は支持力が増大する。
- 2) 無補強、 $D/B=0.40$ は基礎の回転抑制効果もない。
 $D/B = 0.05, 0.10, 0.20$ は回転抑制効果がある。
- 3) 無補強、 $D/B=0.40$ は偏差ひずみが生じる領域は基礎周辺に限られる。
 $D/B = 0.05, 0.10, 0.20$ は偏差ひずみが地盤内に広く深く分散する。
- 4) 中心载荷と異なり、 $D/B = 0.20$ では $D/B=0.05, 0.10$ と比較して補強効果が少なく、偏差ひずみも一部に集中している。

以上の結果から、中心・偏心鉛直载荷のいずれにおいても補強材の設置深度が $0.05 \leq D/B \leq 0.40$ であれば、設置深度によらず同程度の補強効果が得られるが（偏心鉛直载荷時 $D/B = 0.20$ 以深で効果減小）、 $D/B \geq 0.40$ では効果が減少した。このことから、载荷荷重の影響を受ける範囲内に補強材を設置することが重要であるといえる。また、支持力の補強効果が得られたケースにおいては、偏心载荷時における基礎の回転抑制効果も得られ、不等沈下抑制にも効果的であるといえる。さらには偏差ひずみ分布についても、支持力の補強効果や回転の抑制効果が得られたケース（ $D/B = 0.05, 0.10, 0.20$ ）については局所的に大きな偏差ひずみが発生せず、広くひずみが分散する結果となった。

5. 謝辞

本研究に対し貴重な意見をいただいた日建ウッドシステムズ三尾享氏に感謝致します。

参考文献

- 1) Nakai et al. (2009) : Proc. Of 17th ICSMGE, Alexandria, 1, 917-920
- 2) 中井ら ジオシンセティックによる効果的な支持力増加方法 (2012.7) 第47回地盤工学研究発表会, 1025-1026.
- 3) Nakai (1985) Finite element computations for active and passive earth pressure problems of retaining wall, S&F, 25(3), 98-112.
- 4) Nakai & Hinokio (2004) A Simple Elastoplastic Model For normally and over consolidated soil with unified material parameters, S&F, 44(2), 53-70.