

砂地盤における地盤補強型基礎の力学的特性に 関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON MECHANICAL PROPERTIES OF FOUNDATION WITH SOIL REINFORCEMENT IN SANDY GROUND

松尾 稔*・上野 誠**・関野英男***・加藤十良***

By Minoru MATSUO, Makoto UENO, Hideo SEKINO
and Toyoshi KATO

The authors propose a new caisson type pile foundation with steel bars which reinforce the surrounding ground. In this paper, they investigate on the effectiveness of this foundation by model tests and numerical analysis. Model tests are carried out by changing density and rigidity of bars for reinforcement. As the result, it is made clear that the reinforcement is very effective for increasing of bearing capacity and rigidity in sandy ground. Then, the optimum density and rigidity of bars are supported to exist.

By the analysis of these tests, the mechanism of reinforcement is proved to consist of two factors, such as structural effect of bars and effect by soil reinforcement. Numerical analysis by FEM are carried out and make sure that it is able to evaluate the effectiveness of reinforcement with sufficient accuracy.

Keywords: caisson type pile, soil reinforcement, model test, sand, bearing capacity

1. ま え が き

近年、山岳地において橋梁基礎や送電用鉄塔基礎が建設されることが多い。山岳地では、作業スペースが狭い上に、工事に必要な資材や機械の運搬に制約があるため深礎が基礎として採用される割合が高くなっている。深礎は鋼板などで坑壁を保護しながら人力で掘削を行い、基礎を構築する方法で、工法が単純であり上述のような作業環境による制約が少ない。ただし、構造物の大型化につれ、大深度、大口径の深礎が要求されるようになり、建設費に対する基礎工事費の占める割合も高まり、より経済的で合理的な基礎工法の開発が望まれている。

送電用鉄塔基礎では、圧縮支持力よりむしろ上部工からの引揚、水平力に対する支持力が問題となる場合が多い。橋梁基礎でも傾斜地に建設される場合、水平支持力が問題となる。これらの基礎では支持力だけでなく、変位量の制限もある。引揚、水平力に対する基礎の支持力および変形量は、当然基礎周辺地盤の力学的性質に左右

される。構造物の大型化に伴う荷重の増加に対し、従来の深礎では所定の支持力、変形性能を得るために、基礎径を大きくしたり、長くしたりして対処せざるを得ない。

このような状況をふまえ、著者らは従来の深礎工法に補強土工法の考え方を取り入れた新しい基礎工法を提案し、開発に着手した。この新工法は、深礎掘削時に坑内から鉄筋やロックボルトなどの補強材を打設・定着させることにより、周辺地盤を補強地盤として強度や剛性を高めるとともに、補強材自体の抵抗により基礎の支持力の増加と変形の抑制を図るものである。図-1にその原理を示す。図-1(a)は、引揚力が作用する場合であるが、補強材打設により補強部の物性が改良され、基礎支持力が増加することを模式的に示している。図-1(b)は水平力が作用する場合であるが、地盤補強により受働

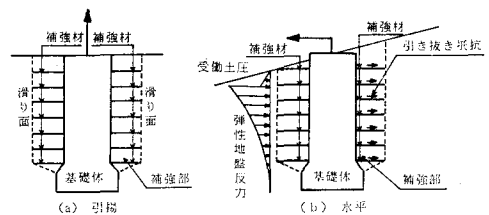


図-1 概念図

* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部地盤工学教室
(〒464/名古屋市千種区不老町)

** 正会員 工博 大日本土木(株)技術室第一技術課課長
(〒162/新宿区市ヶ谷田町 2-35)

*** 大日本土木(株)技術室第一技術課(同上)

塑性化領域が減少するだけでなく、補強材自体の引抜抵抗により支持力が増加することを表わしている。これらの模式図で示すように、地盤補強により基礎の支持力の増大と変形の軽減が期待でき、より経済的な基礎が可能となる。なお、この基礎を地盤補強型基礎とよぶことにする。

ところで、最近補強土工法の研究が盛んに行われるようになり、かなりの成果が挙げられているが、工法自体がまだ開発途上でありその力学的評価も確立されているとはいえない。また、著者らの知る範囲では支持力の増加を目的とした地盤補強型基礎の載荷試験例もほとんどみられないため、多数の不明な点が残されていると考える。そこで、地盤補強型基礎工法の力学的効果・特性を解明する目的で、模型実験およびその解析を行ったので、以下に述べることにする。

2. 模型実験

(1) 概要

模型実験の主要な目的は、補強効果の確認とその程度の把握である。ただし、補強効果は載荷方向、補強方法により変わることが予想されるので、補強効果に対するこれら主要な要因の影響も調べることにした。また、模型実験の結果は、補強機構の解析にも用いられる。

模型基礎の寸法は、実規模（直径 3~4 m、深さ 12 m 程度を想定）の 1/40 程度、すなわち直径 10 cm、根入れ深さ 30 cm とした。補強材長は実際の施工条件を考え基礎直径の 3/4 (=7.5 cm) とした。なお、基礎底部は拡底深礎の形状を模して、2.5 cm の拡底部を設けた。

実験は砂質土で地盤を作成して行うが、作成時に基礎を埋め込んで形成した。地盤状態が変化すると、基礎の荷重・変形特性に差が現われることが考えられるため、3 基礎体を 1 ユニットとして同一の地盤状態で実験した。

実験のパラメーターとして、以下のものを考えた。

- ① 地表面形状：水平、傾斜（傾斜角 20°）
- ② 載荷条件：鉛直引揚、水平載荷（谷側）
- ③ 補強材密度：0, 6 本, 12 本
- ④ 補強材料：φ6 mm 塩化ビニール棒
□3 mm, φ2 mm アクリル棒

実験パラメーターを組み合わせ、3 ユニット（合計 9 基）の実験を行った。このうち、ユニット 1, 2 が当初設定した基本ユニットであり、ユニット 3 は追加した実験である。図-2 に、鉛直引揚載荷、水平載荷実験の概要を示す。また、表-1 は各ユニットの実験目的、および各実験ケースの実験条件を示している。鉛直引揚載荷実験では地表面は水平にしているが、水平載荷実験では図-2 に示すように地表面傾斜の条件（傾斜角 20°）で行っている。

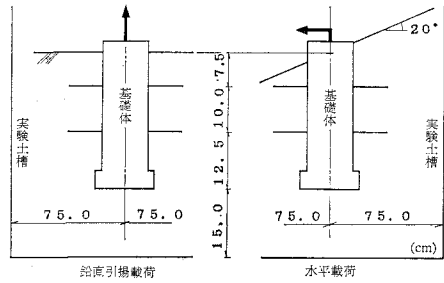


図-2 実験概要

表-1 実験ケース一覧

ユニット	ケース	載荷方向		補強材		
		鉛直	水平	材質	長さ(cm)	本数(段数)
1	V1	○		φ6 塩ビ棒 φ6 塩ビ棒	7.5	0
	V2	○				6 (2)
	V3	○				12 (2)
2	H1		○	φ6 塩ビ棒 φ6 塩ビ棒	7.5	0
	H2		○			6 (2)
	H3		○			12 (2)
3	V4	○		φ6 塩ビ棒 □3 アクリル棒 φ2 アクリル棒	7.5	12 (2)
	V5	○				12 (2)
	V6	○				12 (2)

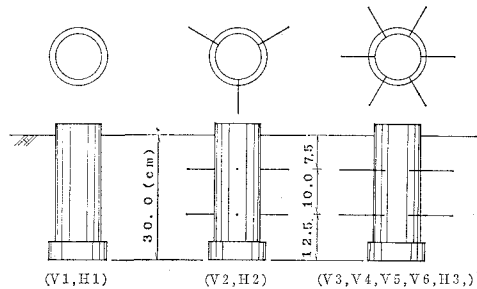


図-3 基礎体概要

(2) 実験装置

a) 基礎体

図-3 に実験に用いた基礎体の概要を示す。基礎体は塩化ビニール製であり、内部に載荷用のロッド（φ20 mm）が埋め込まれている。基礎体には、図-3 に示した補強材打設位置に補強材定着用のねじとともに、補強材応力測定用ひずみゲージのリード線を保護する溝も切られている。基礎体表面は、地盤との付着をよくするために、実験用の砂を接着している。

b) 補強材

補強材質としては、実際の補強材（鉄筋など、弾性係数 $2.1 \times 10^8 \text{ kgf/cm}^2$ ）に対して実験の相似律（1/40）を考慮すれば、表-2 に示すような

表-2 補強材の弾性係数

補強材	弾性係数 (kgf/cm ²)
φ6 塩ビ棒	42000
□3 アクリル棒	35000

弾性係数をもつプラスチック材料が適当であると考えられる。計測用補強材には、基礎体より 2 cm、5 cm の位置に、上下側 2 枚ずつひずみゲージを貼付している。な

お、補強材表面はすべて、実験用砂質土を接着し、地盤との付着がとれるようにした。

c) 荷重装置

図-4 に示すような荷重装置を組み立て、1.5m×4.5m×0.7m の鋼製土槽で実験を行った。鉛直引揚荷重実験は図-4 のように荷重用架台を土槽をまたいで設置し、引張用油圧ジャッキを基礎体の真上に吊り下げ、鋼製ロッドを介して行った。水平荷重実験は、架台を土槽側部に設置した後、滑車が組み込まれた水平荷重反力受を利用してワイヤーロープを基礎とジャッキに連結し、鉛直引揚と同様な方法で荷重した。

(3) 実験地盤の作成

実験地盤は締固め状態が一様になるよう4層に分けて締固め、所定の高さまで盛上げた。1層当たりのまき出し厚は最下層で15cm、それより上は10cmとし、鋼製ランマー(重量約10kgf、直径30cm)を用いて人力で締固めた。地盤作成とともに基礎体に補強材を定着するので、特に補強材に損傷を与えないよう注意した。傾斜地盤(水平荷重実験)は、いったん水平地盤を作成した後、斜面上部を削りながら所定の斜面形状に成形した。

実験土槽内での基礎体の配置を図-5 に示すが、1ユニットで3体を同時に埋設している。基礎の影響範囲は、実験に先立って行った有限要素解析の結果から根入れ長の2.5倍とすれば十分であると判断し、半径75cmの円形の範囲を設定した。したがって、基礎体間隔は150cmとなる。

表-3 に、ユニット1, 2 における地盤条件を示す。

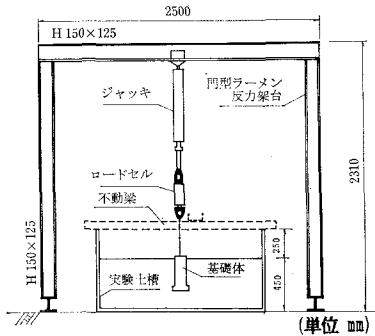


図-4 荷重装置

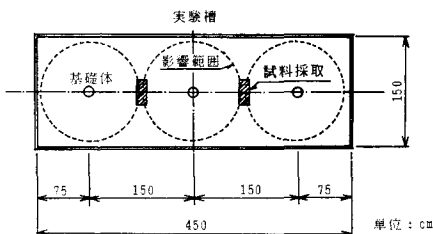


図-5 基礎体の配置

表-3

ユニット	1	2	
土粒子の比重 G_s	2.724	2.735	
粒土組成 (%)	レキ分	19	15
	砂分	76	81
	シルト・粘土分	5	4
単位体積重量 ρ_s (tf/m ³)	1.67	1.79	
粘着力 C (tf/m ²)	0.5	0.4	
内部摩擦角 ϕ (度)	31.8	35.3	
含水比 w (%)	7.2	8.1	

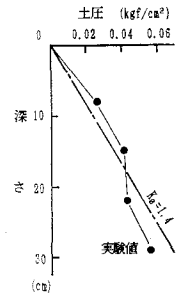


図-6 土圧分布

土質試験用試料は、図-5 に示すような位置から採取し、三軸圧縮試験(UU試験)を行っている。表-3の各ユニットにおける土質諸係数は2回の試験結果の平均値である。ユニット間での土質諸係数に若干の差はみられるが、さほど大きなものでなく、地盤は比較的均一に作成されていると考えてよい。なお、土槽壁面に小型土圧計(ひずみゲージ型、容量2kgf、受圧面積17.5cm²)を取り付け、土圧を測定した結果を図-6に示す。平均的な土圧係数 $\bar{K}_0=1.4$ であり、自然地盤に比べかなり大きな値になっている。これは締固めの影響によるものと考えられる。この土圧係数は後の解析に用いられる。

(4) 荷重方法および計測

a) 荷重方法

荷重は架台に設置した油圧ジャッキにより、手動で荷重した。荷重方法はクイの鉛直荷重試験基準・同解説(土質工学会)²⁾を参考に、予想最大荷重を10~20等分した値を1ステップの荷重とし、各ステップにおける荷重保持時間は5分とした。

b) 計測

計測項目および計測点数は、表-4 に示すとおりである。また、鉛直引揚実験における計測点の配置を図-7に示す。水平荷重実験では、傾斜方向に1測線(4点)地表面変位の計測を増やしているが、その他は鉛直と同様である。各計測器からの信号は、スイッチボックス、デジタルひずみ測定器を介し、マイクロコンピュータに取り込まれ処理される。

(5) 実験結果および考察

表-4 各ケースの計測点数

ユニット	ケース	計測点数			
		載荷荷重	天端変位	地表面鉛直変位	補強材応力
1	V1	1	鉛直 2	8	0
	V2	1	" 2	8	16
	V3	1	" 2	8	16
2	H1	1	水平 2	12	0
	H2	1	" 2	12	8
	H3	1	" 2	12	16
3	V4	1	鉛直 2	8	16
	V5	1	" 2	8	16
	V6	1	" 2	8	16

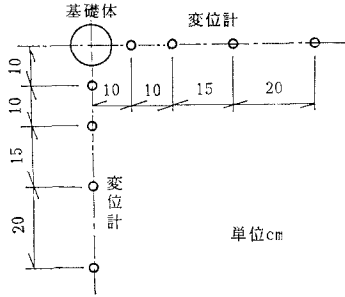


図-7 計測点の配置 (鉛直引揚)

a) 基礎荷重

基礎の降伏荷重，終局荷重を表-5にまとめて示す。降伏荷重は $\log P \sim \log S$ 法， $dS/dt \sim P$ 法²⁾によって求めた値である (P : 荷重， S : 基礎体変位)。終局荷重は5分間維持可能であった最大ステップの荷重を用いた。降伏，終局荷重比は，各ユニット内の基準ケース(荷重比1.0で表示)に対する比で，値が大きいほど基準ケースに対する耐力が大きいことを表わす。表-5から明らかなように，砂質地盤での補強効果は顕著である。鉛直引揚に関しては無補強の基礎に対し，最大で2~3倍の支持力増加がみられる。水平載荷でも相当効果がある。

次に，ユニット1，3をまとめて基礎体の支持力を比較した結果を図-8に示す。図-8は，表-5中の降伏，終局荷重を無補強(ケースV1)における値を基準(荷重比=1.0)として荷重比で表わし，補強材質，本数との関係を調べたものである。なお，ユニット間での地盤条件の差の影響を除くため，同じケースV3，V4の荷重比は同一としている。 $\phi 6$ mmの補強材では，補強材密度(本数)の増加率に比べて支持力増加率はやや

表-5 降伏，終局荷重の比較

ユニット	ケース	降伏荷重 Py (kgf)	終局荷重 Pmax (kgf)	降伏荷重比	終局荷重比
1	V1	35	85	1.00	1.00
	V2	71	109	2.02	1.26
	V3	102	128	2.91	1.50
2	H1	35	65	1.00	1.00
	H2	51	82	1.45	1.26
	H3	64	84	1.83	1.26
3	V4	96	116	1.00	1.00
	V5	127	147	1.32	1.27
	V6	110	125	1.15	1.08

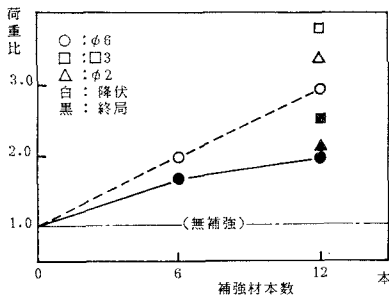


図-8 換算した補強効果

低いようである。補強材質に関しては，ユニット3の結果より $\square 3$ mm アクリル棒の荷重比が最も大きくなっている。しかしながら，補強効果に関する補強材の密度，形状の影響についてはなお検討の余地があると考えられる。

b) 荷重～変位関係

ユニット1~3における基礎体の荷重と天端変位の関係を，図-9~11に示す。各ケースで補強効果には差がみられるが，荷重～変位関係はいずれもよく似ている。終局荷重に至る変位は，鉛直引揚で3mm程度であるのに対し，水平では10~20mmとかなり大きな値である。各ユニットとも，初期の剛性が大きい基礎ほど，降伏荷重，終局荷重が大きくなっている。

c) 補強材応力

鉛直引揚載荷実験(ユニット1，3)のうち，補強材応力測定を行ったケースV2，V4に関して，軸応力，曲げ応力と基礎体に作用する荷重の関係を，図-12，13に示す。ケースV3，V5も同様な傾向を示している。

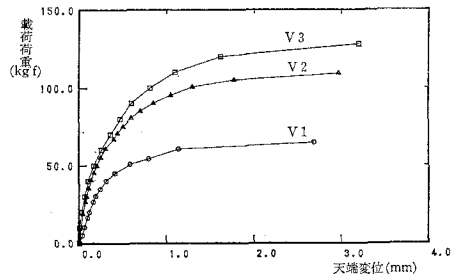


図-9 荷重-天端変位関係 (ユニット1)

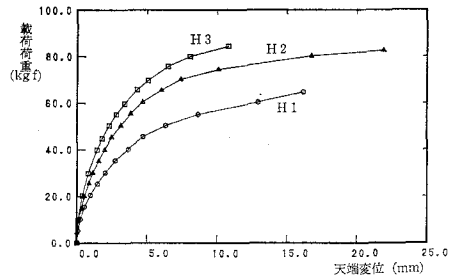


図-10 荷重-天端変位関係 (ユニット2)

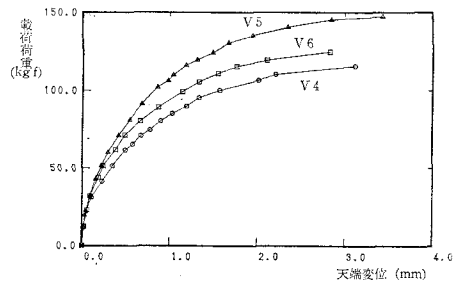


図-11 荷重-天端変位関係 (ユニット3)

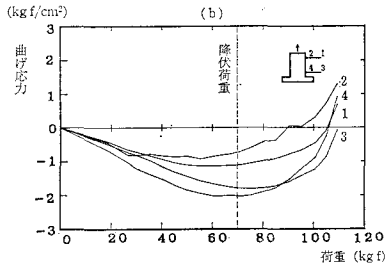
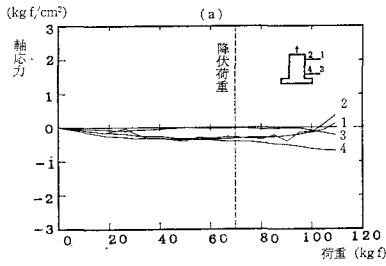


図-12 荷重-補強材応力関係 (ケース V2)

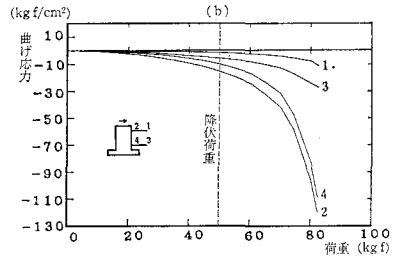
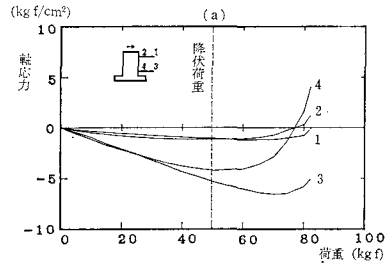


図-14 荷重-補強材応力関係 (ケース H2)

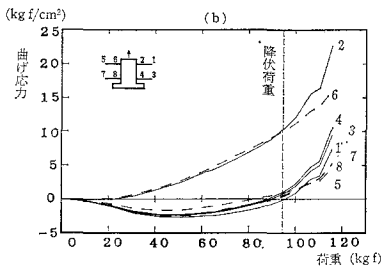
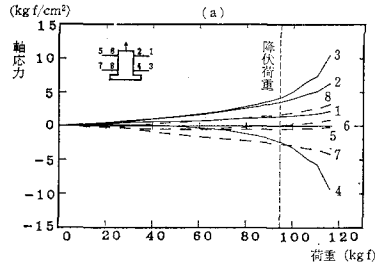


図-13 荷重-補強材応力関係 (ケース V4)

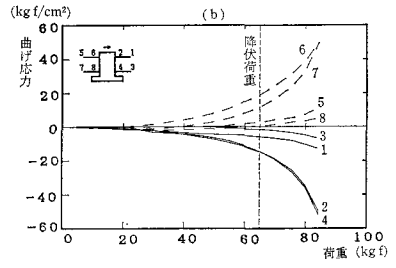
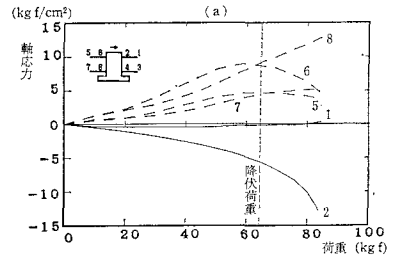


図-15 荷重-補強材応力関係 (ケース H3)

軸応力は引張を正、曲げ応力は上側引張を正と定義した。鉛直引揚では補強材に発生する応力は低く、補強材自体が構造的に抵抗する効果が小さいことがうかがえる。それにもかかわらず大きな補強効果が得られることは十分注目に値することであり、それは、後述のような補強土効果によるものと考えられる。

水平載荷実験(ユニット2)のケース H2, H3 における補強材応力を、それぞれ 図-14, 15 に示す。水平実験では、鉛直引揚実験に比べて大きな引張応力、曲げ応力が発生している。これは、載荷方向と補強材打設方向が一致していることにより、山側補強材が引抜抵抗を、谷側補強材が曲げ圧縮抵抗を発揮したためと考えられる。水平載荷に伴い基礎体が回転しようとするが、補強

材の存在により回転に対する抵抗が増加することが考えられ、これも曲げ応力発生に寄与しているのであろう。

再度、図-12~15 をみると、鉛直引揚載荷、水平載荷にかかわらず、基礎が降伏荷重に達するのを境に応力が急変する傾向がみられる。これは、基礎周辺地盤の降伏に伴い、補強材によって拘束されていた荷重が解放されたためと考えられる。この傾向は、地盤補強型基礎では降伏荷重の前後で地盤の力学的挙動に大きな変化が現われることを示唆しており、今後この種の基礎の設計や力学的評価にあたって、降伏荷重の重要性を示すものと考えてよいであろう。

d) 地表面の変状

補強材の有無による地盤の破壊機構への影響をみるた

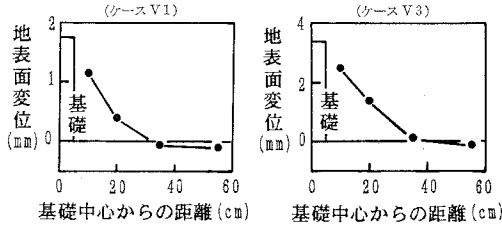


図-16 地表面変位分布 (鉛直引揚時)

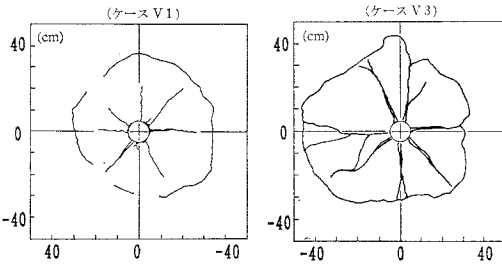


図-17 地表面クラック発生状況 (鉛直引揚)

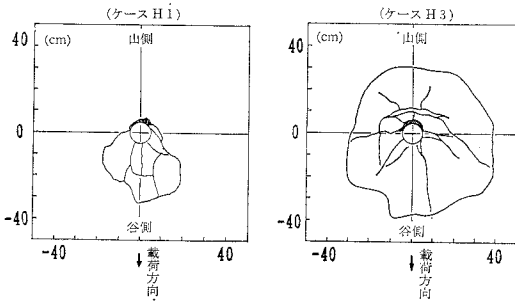


図-18 地表面クラック発生状況 (水平載荷)

めに、地表面変位分布、クラック発生状況を調べた。その代表として、図-16, 17 に鉛直引揚実験におけるケース V1 と V3 の地表面変位分布と、クラック発生状況図を示した。無補強のケース (V1) では基礎体周辺で地表面変位が大きく、基礎から離れるにつれて急減しているのに対し、補強基礎 (ケース V3) ではかなり広い範囲にわたって大きな地表面変位が生じている。この傾向は 図-17 に示すクラック発生状況からも明瞭である。この結果より、補強材を打設することにより周辺地盤が補強され、地盤のせん断に対する抵抗が増加するため、広い範囲で基礎体荷重に抵抗することがうかがえる。

水平載荷実験における地表面クラックの発生状況を、図-18 に示す。無補強のケース (H1) では谷側にしかクラックの発生がみられず、谷側地盤だけで抵抗する。これに対し、補強ケース (H3) では山側のかなり広い範囲までクラックが発生しており、補強材により荷重が山側地盤に伝達され、山側地盤も抵抗することがわかる。これが水平荷重に対する主要な補強効果である。

3. 地盤補強型基礎の補強メカニズム

(1) 既往の研究^{3), 4)}

今回の実験結果をもとにして砂質地盤における地盤補強型基礎の力学的メカニズムを分析するのに先立ち、既往の類似した研究成果について触れる。龍岡らは⁴⁾、補強土における補強メカニズムを考察し、補強材に発生する応力によって補強材を次の3つに分類している。

- ① 引張補強材：補強材内に引張力が働くタイプ
- ② 圧縮補強材：補強材内に圧縮力が働くタイプ
- ③ 中間的な補強材：①と②の中間的なタイプ

通常の補強土工法では①の引張補強材が用いられており、補強材の打設方向、材質、打設密度と補強効果の関係などに関して多くの実験や研究が行われている。龍岡らは⁴⁾、これらの補強方法と補強効果の関係について、以下のように指摘している。

- a) 補強材が、土のせん断破壊に至る最小主ひずみの増分方向と一致しているときに最も補強効果が大きく、伸び縮みのない方向と一致しているときは補強効果は全くない。
- b) 補強密度が増加するほど補強効果は大きくなる。しかし、密度がある値以上になると補強効果は頭打ちとなるため、経済的な補強密度が存在する。
- c) 補強効果を発揮させるためには、土の剛性に対してある程度以上の補強材の弾性係数が必要である。
- d) 補強材と地盤の間には、ある程度以上の付着力(摩擦力)が必要である。

e) 内部摩擦角が大きく、ダイレイタンスー傾向が強い地盤ほど、補強効果は大きい。

今回の実験結果も、龍岡らの指摘とよく対応している。たとえば b) の傾向は図-8 から読み取れるし、補強材が最小主ひずみ方向に近い鉛直引揚実験の方が水平実験より補強効果が大きく現われている。また、実験に用いた砂質土は正のダイレイタンスー特性を示していることも実験結果を裏付けている。

(2) 補強メカニズムの分析

既往の研究成果と今回の実験から、地盤補強型基礎の力学的効果は次の a), b) 2つに集約されるものと考えられる。

a) 構造効果

補強材が構造的に機能することによる力学的効果であり、通常のアンカーのような効果がこれにあたる。引張補強材は、作用する引張力を引抜抵抗力によって支持し、基礎の耐力や剛性を高める。補強材が曲げ部材となる場合、すなわち水平力を受ける杭のように機能する場合は、補強材に作用する荷重や曲げモーメントを曲げ抵抗力で支持することにより力学的効果を発揮する。この

ような効果を補強材の構造効果と名付けることにする。

b) 補強土効果

補強材により周辺地盤が改良され、力学的性質が向上する効果を、補強土効果と名付けることにする。(1)の既往の研究における龍岡らの指摘は、ここで述べる補強土効果に関するものである。引張補強材による補強土効果の発生メカニズムは、次のように考えられている⁴⁾。まず、補強材が地盤のせん断破壊時において最小主ひずみ増分 $\Delta\epsilon_3$ の絶対値(膨張)を小さく抑えることにより、最小主応力 σ_3' を増加させる。これは、最大主応力 σ_1' に対するせん断強度 $(\sigma_1' - \sigma_3')/2$ の増加を促し、地盤を強化するというわけである。したがって、この補強土効果は一般に、地盤の見掛けの粘着力の増加という形で現われることが多い。正のダイレイタンスが生じない地盤や、 $\Delta\epsilon_3$ の増加が小さい地盤では補強土効果が小さく、 $\Delta\epsilon_3$ が大きい(正のダイレイタンス効果が大)地盤では大きな補強土効果が発生するのである。

実験に用いた砂質土のダイレイタンス特性そのものは試験していないが、等体積一面せん断試験を行っているので、ダイレイタンス特性がある程度評価できる。図-19は等体積一面せん断試験結果の一例を示す。図より明らかなように、せん断が進むにつれて垂直応力 σ が増加しており、これはせん断に伴う正のダイレイタンスを抑えていることを意味する。すなわち、等圧せん断では当然体積膨張(正のダイレイタンス)が生ずるはずである。このような地盤で補強を行えば、先述のように $\Delta\epsilon_3$ の抑制(σ_3' の増加)の効果により、地盤の力学的性質が改良されるわけである。

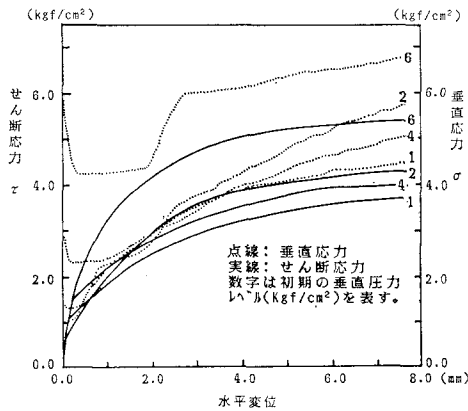


図-19 等体積一面せん断試験の例

e) 実験における補強効果

先に述べた a), b) の内容をふまえ、砂質土地盤の模型実験における補強効果をまとめたのが表-6である。まず構造効果に関しては、補強材方向を載荷

表-6 各ケースの補強効果の分析

載荷方向	構造効果	補強土効果
鉛直	少ない	大きい
水平	大きい	少ない

方向と一致させるのが最も効果的であると考えられる。すなわち、補強材が引張抵抗力を最大限発揮するのがこの方向である。したがって、補強材を水平に打設した場合、鉛直引揚載荷では載荷方向が直角となるので構造効果が低く、水平載荷では載荷方向に近いために構造効果が顕著となったものと解釈できる。

補強土効果に関しては、次のように考えられる。まず、鉛直引揚実験では最小主ひずみ方向が水平方向よりいく分傾いた方向であり、補強材の方向に近いので、ダイレイタンス抑制による補強土効果が大きく発揮されたものであろう。水平載荷実験では、最小主ひずみ方向が鉛直に近いのに対し、補強材が水平に打設されているので補強土効果がさほど現われなかったのではないかと考えられる。

いま、補強による基礎の支持力の増分 ΔP を、次式で表わす。

$$\Delta P = \Delta P_S + \Delta P_R \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 ΔP_S : 構造効果による基礎支持力の増分

ΔP_R : 補強土効果による基礎支持力の増分

今回の鉛直引揚載荷実験では ΔP_R が、水平載荷実験では ΔP_S が卓越しており、全体的には両実験とも ΔP が大きく現われた。今後補強材の打設方向を変化させることにより、 ΔP_S と ΔP_R の和が最大となるような最適な補強材配置も見出せるであろう。

(3) 模型実験の解析

a) 解析の概要

模型実験のうち、基本ユニット(1, 2)に対し、有限要素法(FEM)解析によるシミュレーションを行い、地盤補強型基礎の力学的評価法について検討を加えた。FEMモデルとして、鉛直引揚載荷実験(ユニット1)については軸対称、水平載荷実験(ユニット2)に関しては三次元モデルを用いた。

実験結果より明らかなように、無補強のケースも補強のケースもともに基礎の荷重~変位関係は双曲線的な形状を示している(図-9~11)。そこで、地盤のモデル化にあたり、応力~ひずみ関係を双曲線近似する Duncan-Chang⁵⁾ の非線形モデルを用いた。このモデルでは、三軸圧縮試験における軸ひずみ ϵ_a と、軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ の関係式を次式で表わす。

$$\frac{\epsilon_a}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\epsilon_a \dots \dots \dots (2)$$

a, b はパラメーターであり、三軸圧縮試験より与えられる。次に、初期接線係数 E_i と側圧 σ_3 の関係は、次式で与えた。

$$E_i = E_0 + K(\sigma_3/P_{atm})^n \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $E_0: \sigma_3 = 0$ のときの初期接線係数

K, n : 三軸圧縮試験から求められる係数

P_{atm} : 大気圧

各応力レベルに対応する接線弾性係数 E_t は、

$$E_t = \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin \phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \phi + \sigma_3 \sin \phi} \right] E_s \dots\dots\dots (4)$$

となる。ここに、 R_f は破壊比、 c 、 ϕ は地盤の粘着力、せん断抵抗角である。

b) 補強効果のモデル化

補強効果のうち、構造効果は補強材自体のモデル化により評価できる。鉛直引揚実験に対する軸対称解析では間隔をもって配置された補強材を曲げ剛性が等価な板でモデル化している(図-20)。この点に関しては、補強材を線材でモデル化した三次元解析を別途実施して比較したが、ほとんど差がみられなかったため、計算が容易な軸対称モデルを採用した。また、水平載荷実験に対しては三次元モデルを用いているため、補強材は地盤と完全に接着した線材でモデル化している。

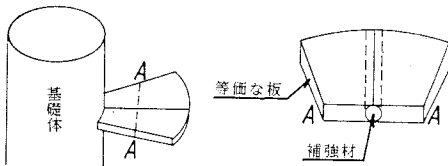


図-20 軸対称解析における補強材のモデル化

補強土効果に関しては、次のように考えた。Duncan-Chang モデルでは地盤のダイレイタンス特性が評価できないため、補強土効果の評価が難しい。他にダイレイタンス特性を評価できる構成式はあるが、実験によるパラメーターの決定が難しく、解析プログラムも整備されていない。そこで、図-21 に示すように、補強材の打設された範囲を補強領域と考え、この領域で補強土効果により地盤の粘着力と初期接線係数が増加するものとした。増加した初期変形係数 (E_0^*) は、次式によって与えた。

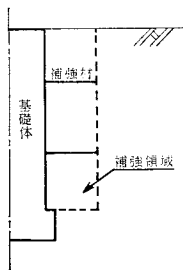


図-21 補強地盤のモデル化

$$E_0^* = \frac{E_S V_S + E_R V_R}{V} \dots\dots\dots (5)$$

- ここに、 E_S : 地盤の初期接線係数
- E_R : 補強材の弾性係数
- V : 補強領域の体積
- V_R : 補強領域に占める地盤の体積
- V_S : 補強領域に占める補強材の体積

補強地盤の増加粘着力を与える適当な方法がないので、補強材を埋め込んだ地盤(同じ砂質土を使用)を作成し、図-22 に示すような平板載荷試験から粘着力を推定した。すなわち、平板載荷試験結果に Terzaghi の

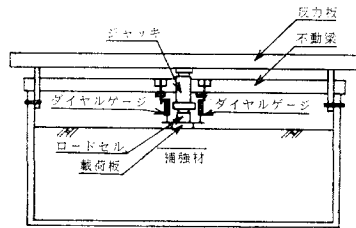


図-22 平板載荷試験概要

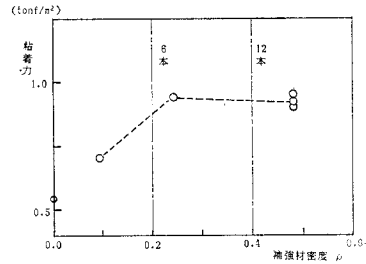


図-23 補強材密度と粘着力

表-7 見掛けの粘着力

ケース	補強材本数	平板載荷試験による粘着力 (tf/m ²)	比率	補強領域の粘着力 (tf/m ²)
V1	0	0.52	1.0	0.45
V2	6	0.82	1.67	0.75
V3	12	0.93	1.79	0.81

極限支持方式を適用し、必要となる粘着力を逆算して求めたわけである。その結果を図-23 に示す。図-23 中の横軸に示す密度 (ρ) とは、次式で換算したものである。

$$\rho = A_R / A \dots\dots\dots (6)$$

- ここに、 A_R : 補強材の表面積の和
- A : 補強領域の面積

図-23 より、無補強地盤(ケース V1)に対するケース V2, V3 の粘着力増加率を換算すると、1.67, 1.79 倍となる。したがって、ユニット1の補強地盤の粘着力は、表-7 に示す値を採用した。モデル地盤の補強領域の粘着力増分量は小さな値であるが、もし仮に粘着力の増分に相似律がそのまま適用できるならば、その増分量は実地盤では相当な値となるであろう。ただし、相似律の単純な適用についてはモデル地盤と実地盤でのダイレイタンス特性の違いや拘束応力の差などから、いまだ議論もある。したがって実地盤での補強による粘着力の増分については今後検討が必要であろうと考えている。

(4) 解析結果

a) 鉛直引揚載荷実験解析

鉛直引揚載荷実験の解析では、図-21 のように構造効果、補強土効果ともに考慮した。図-24 に、基礎体の荷重~変位関係を示す。補強、無補強のケースのいずれも、解析が実験を非常に精度よくシミュレートできており、補強効果の評価が正当であったことを示してい

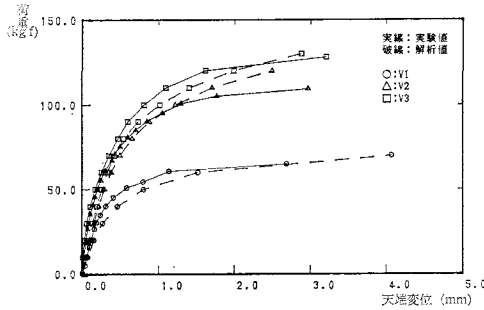


図-24 荷重-天端変位関係 (ユニット1)

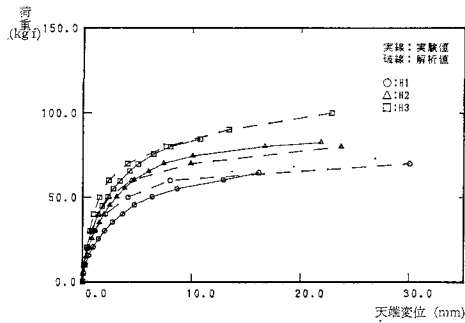


図-25 荷重-天端変位関係 (ユニット2)

る。また、このような解析が今後の地盤補強型基礎工法の力学的評価を可能にするものと考えられる。

b) 水平載荷実験解析

水平載荷実験解析では、補強材の配置が最小主ひずみ方向とほぼ直角になるため、補強土効果は考慮に入れずに解析した。図-25 が基礎の荷重～変位関係を表わすが、初期段階から破壊まで高精度で実験結果のシミュレーションが行われている。この解析では構造効果だけがモデル化されているが、龍岡らの指摘するように最小主ひずみ方向と垂直に近い方向に補強材が打設されているケースでは、補強土効果がほとんど発生しないという見解を裏付けている。

以上、鉛直引揚、水平載荷実験とも、構造効果と補強土効果の適切なモデル化より、FEM を用いて高精度でシミュレーションできることが判明した。ただし、実基礎への適用にあたっては、規模効果や相似律の影響も考慮しなければならないと考えている。

4. ま と め

地盤補強型基礎工法の開発にあたり、模型実験と数値

解析により砂地盤における補強効果の解明を進めてきたが、得られた主要な成果を以下にとりまとめて示す。

(1) 模型レベルではあるが、補強材を打設することにより基礎の耐力(降伏、終局荷重)が大幅に増加し、変形量の抑制が顕著であることが確認された。特に効果の高いケースでは、無補強基礎に比べ3倍を越す耐力の上昇が認められた。

(2) 実験の範囲内で補強材の密度を高めるほど効果は大きくなる傾向にある。また、補強材の剛性が適当なとき効果が大きく現われることが実験結果より読み取られた。

(3) 補強効果は、構造効果と補強土効果に分けられる。構造効果は、載荷方向と同じ方向に補強材を打設したときが有効で、直角方向に打設した場合の効果は少ない。これに対し補強土効果は、地盤の最小主ひずみ方向に補強材を打設したときが最も有効であることが鉛直引揚載荷実験と解析で確認された。補強土効果は正のダイレイタンス抑制による地盤改良効果ともよぶべきものであり、ダイレイタンスの著しい地盤では特に有効であると考えてよい。

(4) 地盤補強型基礎の力学的特性は、構造効果、補強土効果をモデル化したFEMなどの手法で評価することができる。ただし、補強地盤の強度や変形係数をどう合理的に評価するかは今後の課題である。

最後に本研究の遂行にあたり、ご助言、ご助力をいただいた名古屋大学 浅岡 颯助教授、東京都立大学 西村和夫助手、ならびに大日本土木(株)東京支社機材センターの関係各位に深甚の謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 土質工学会編：補強土工法，pp. 25～83，1986。
- 2) 土質工学会：クイの鉛直載荷試験基準・同解説，昭和54年。
- 3) 龍岡丈夫・三木五三郎・児玉秀文・松尾恵一：鉄筋により補強された砂地盤の支持力特性 I～VII，生産研究，Vol. 33，No. 10～Vol. 34，No. 4，1981～1982。
- 4) 龍岡丈夫・金藤浩司・三木五三郎・生原 修・浜田英治・佐藤剛司：引張り補強材による砂の補強についての基礎的研究，土と基礎，Vol. 31，No. 9，pp. 11～19，1983。
- 5) Duncan, J.M. and Chang, C.Y.: Nonlinear analysis of stress and strain in soils, Proc. of the ASCE, Vol. 96, No. SM5, pp. 1629～1651, 1970。

(1986.9.22・受付)