

補強土工法の液状化抑止効果に関する 実験的研究

阿知波文夫*・水谷俊孝**・上野 誠***・
松尾 稔****

既設構造物の液状化対策に補強土工法が適用できれば、それは非常に有効な方法となることが期待される。本論文では、種々の補強方法を想定して模型実験を行い、補強効果の把握と有効な補強方法について検討した結果、地盤の液状化に対し、地盤と補強材間の摩擦を大きくし、補強材の頭部を固定するのが有効であることが明確になった。また、静的な補強土の補強のメカニズムが動的な問題にも適用できることを示した。

Key Words : soil reinforcement, liquefaction, model test, friction

1. はじめに

わが国では、1948年の福井地震や1951年の尼崎地震の際に噴砂等の現象が認められた。これらを最上・久保¹⁾は、実験を行い、砂の“液化”と名づけている。その後1964年の新潟地震の地盤の液状化によって、多大の被害がもたらされ、同時に液状化現象に関する調査・研究が活発に行われるようになった。地盤の液状化が耐震設計に最初に取り入れられたのは、1966年の土地改良事業計画設計基準²⁾であり、それ以降、道路橋耐震設計指針³⁾、建築基礎構造設計規準⁴⁾、港湾の施設の技術上の基準⁵⁾等の各学会、官公庁等の諸基準に反映されている。しかし、これら諸基準が制定される以前に建設された構造物では、地盤の液状化対策がなされていない。そのため、最近では既設構造物での液状化を含めた耐震対策も大きな課題となっている。

ところで、サンドコンパクションパイル工法をはじめとする従来の液状化対策工法は、新設の構造物を対象にした場合がほとんどである。これらの工法を既設構造物に適用した場合、施工時の地盤変位や騒音・振動など周辺環境への影響が大きいこと他に、機械が大型であるために施工上場所的な制約が大きいことや、その構造物の機能を停止させずに耐震性能を向上させることが出来ない等、対策工法としては適さない面が多い。

近年傾斜地や盛土等に細長比の大きい補強材を挿入して、地盤の安定性を増加させる補強土工法が注目され、各種の補強土工法が実用に供されている^{6), 7)}。中でも鉄筋類を挿入する補強土工法は、ボーリングマシンのよ

うな小型の穿孔機を使って施工でき、しかもレキや転石の多い地盤だけでなく既設のコンクリート等も貫通して補強することも可能である。このような補強土工法が液状化抑止効果も発揮すれば、既設構造物に影響を与えることなく構造物の周囲やその直下を補強することが可能となり、有力な対策工法となる。また、護岸や河川堤防などの既設構造物では、地震時には液状化の他に、すべりによる破壊も重要な問題となることも多い。この点についても補強土工法は大きな利点を有している。

望月⁸⁾は、針金で補強した砂の非排水繰返し試験や振動実験を行い、また古賀⁹⁾は、小杭を挿入した豊浦砂の非排水繰返しねじりせん断試験を実施して、補強地盤の液状化特性を検討して、補強土工法の液状化対策工法としての有効性を示唆している。しかし、補強材の仕様（周面摩擦、剛性など）および補強材頭部の固定方法の液状化抑止効果に及ぼす影響を分析して補強メカニズムを検討した例は少ない。

本論文では、種々のタイプの補強材を地盤に挿入した振動実験を行い、その効果を調べるとともに、効果に寄与する要因を抽出し、適切な補強方法について検討する。このようにして得られた成果に基づいて、液状化現象に対する補強土工法の基本的なメカニズムについて考察を加えている。

2. 模型振動実験

補強材の効果を検討するために、液状化模型実験を実施した。実験は、補強効果に関する定性的な傾向を把握する目的で、種々の補強方法を設定して実施した。

(1) 実験方法

土槽の大きさは、長辺方向100 cm、短辺方向40 cm、高さ65 cmであり、今回の実験では、この土槽の短辺方向を2つに区切り、一回の加振で同時に2つの供試体を加振した。実験地盤の寸法は、長辺方向が100 cm、短

* 正会員 工修 中部電力(株) 川越火力建設事務所 副
所長 (〒512 三重郡川越町大字新田字朝明 87-1)

** 正会員 工修 中部電力(株) 土木建築部

*** 正会員 工博 大日本土木(株) 技術研究所

**** 正会員 工博 名古屋大学教授 工学研究科 地圏環境工
学専攻

表-1 相似則と相似比

量	相似則	相似則から決まる相似比	実験で用いた相似比
長さ	l_m/l_p	1/30	1/30
密度	ρ_m/ρ_p	1	1/1.9
弾性係数	$(l_m/l_p)(\rho_m/\rho_p)(\alpha_m/\alpha_p) \times (\varepsilon_m/\varepsilon_p)^{-1}(\nu_m/\nu_p)$	1/30	1/70
ポアソン比	ν_m/ν_p	1	1
ひずみ	$\varepsilon_m/\varepsilon_p$	1	1
加速度	α_m/α_p	1	1
引張り剛性	$(l_m/l_p)^2(\rho_m/\rho_p)(\alpha_m/\alpha_p) \times (\varepsilon_m/\varepsilon_p)^{-1}(\nu_m/\nu_p)$	$\frac{1}{27000}$	$\frac{1}{36075}$
曲げ剛性	$(l_m/l_p)^3(\rho_m/\rho_p)(\alpha_m/\alpha_p) \times (\varepsilon_m/\varepsilon_p)^{-1}(\nu_m/\nu_p)$	$\frac{1}{2.4 \times 10^7}$	$\frac{1}{2.6 \times 10^7}$

m:model p:prototype

表-2 代表的な補強条件

項目	想定する実構造	模型
補材	鋼管、鉄筋	アクリル棒
強寸法	$\phi=114.3\text{mm}, \ell=6\text{m}$	$\phi=2\text{mm}, \ell=200\text{mm}$
材構造	外周面をグラウトした構造	外周部に砂を付着
面板	厚さ100mmのコンクリート床版	厚さ2mmのアクリル板

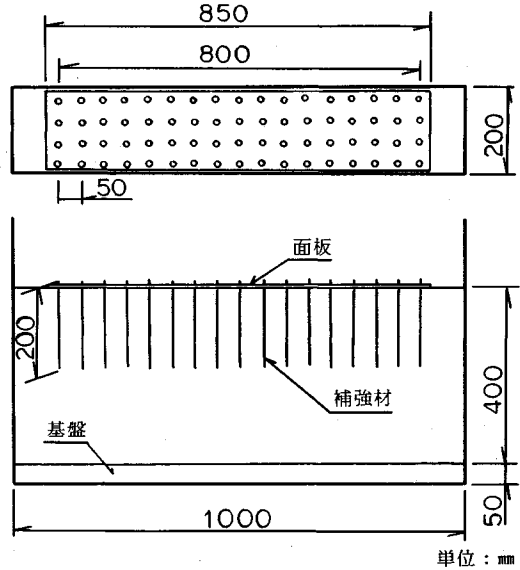


図-4 代表的な補強ケースの概要

表-3 実験ケース一覧

実験ケース	頭部条件			補強材条件				補強材挿入条件						実験上の着目点	記号			
	固定方法		面板剛性	摩擦		補強材剛性		挿入角度			挿入ピッチ							
	固定	水平拘束	自由	小	大	小	標準	大	標準	大	0度	30度	45度			3cm	5cm	10cm
1																	無補強	○
2	○				○		○				○					○	標準補強	▲
3		○			○		○				○					○	頭部固定方法	▽
4			○				○				○					○	面板剛性	◇
5	○			○			○				○					○	補強材摩擦	△
6	○				○	○					○					○	補強材剛性	□
7	○				○		○				○					○	頭部・摩擦条件	■
8	○				○			○			○					○	挿入角度	◇
9			○				○				○					○	摩擦・挿入角度	⊗
10	○				○		○				○					○	挿入ピッチ	×
11	○				○		○				○		○			○		+
12	○				○		○				○					○		
13	○				○		○				○			○		○		
14	○				○		○				○					○		

(2) 実験パラメータ

実験では直径2mm、長さ20cmの補強材を用い、補強材頭部の固定条件、補強材周面と砂地盤との摩擦の大きさ、補強材剛性、補強材挿入角度、補強材挿入間隔(配置密度)の各条件を変化させ、液状化に対する補強効果を検討した。実験の規模は、想定する実構造に対し1/30の寸法比とし、補強条件については表-1に示す相似則³⁾を満足するように設定した。弾性係数の相似則を満たす材料が得られなかったため、補強材については、

作用する力を考慮し引張り剛性に関する相似比を、面板については、曲げ剛性に対する相似比を極力満たす仕様のものを選定した。地盤については、せん断剛性等の小さい模型を作成するのが困難であったので、液状化時のひずみ面振幅が5%程度(深度40cmに対しては2cm)となるように土槽の内壁と振動台の外壁の間のスプリングを調整した。表-2に、実構造を想定して設定した代表的な補強条件を示す。図-4は、この代表的な補強方法に相当する模型地盤の概要を表す。これは代表的な摩

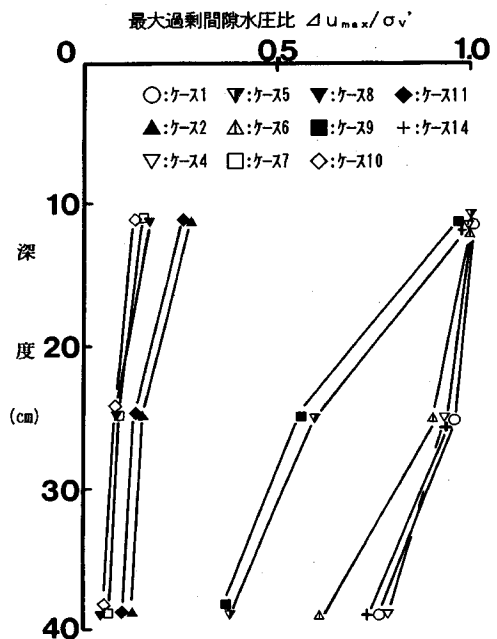
表—4 補強材の摩擦特性

補強材摩擦 タイプ	最大引き抜力 (N)		摩擦係数 μ
	平均値	変動係数	
小	1.96	0.12	2.11
標 準 アクリル棒	4.35	0.10	4.38
鋼棒	4.32	0.16	4.55
大	12.01	0.18	9.74

擦を有する長さ 20 cm の補強材を 5 cm 間隔で 68 本挿入し、その頭部を長さ 80 cm、幅 19.4 cm のアクリル板（面板）によって固定したものである。なお、予備実験において補強材が基盤近くまで挿入された状態では振動が直接補強材に伝達し、地盤の応答倍率が大きく増大することが確認されたため、補強材挿入深さは土槽深さの 1/2 (20 cm) とし、下部の 20 cm 区間は緩衝帯とした。

表—3 に実験ケース一覧を示す。表に示すように、補強材の頭部の条件として、面板との「固定」、「水平拘束」、「自由」の 3 条件を設定した。補強材頭部の固定は、あらかじめ所定の位置に補強材径よりやや大きい穴（直径 3 mm）をあけた厚さ 2 mm のアクリル板を「面板」として、補強材挿入後に設置する方法を用いた。表中「自由」とは補強材のみでこのアクリル板を設置しない場合、「固定」とはアクリル板設置後、補強材頭部とアクリル板を接着剤で固定した場合、「水平拘束」とはアクリル板の穴に補強材の頭を差し込んだ場合である。これにより、「自由」では、補強材はそれぞれ独立に動くのに対し、「水平拘束」では補強材頭部は水平方向には面板と同様な動きをし、鉛直には全くフリーである。また「固定」では、補強材頭部と面板が完全に一体となって動く構造になっている。補強材頭部を固定する面板は、厚さ 2 mm のアクリル板（曲げ剛性： $EI=16 \text{ kN}\cdot\text{cm}^4$ ）を標準とし、比較のために厚さ 0.5 mm の塩ビ板（曲げ剛性： $EI=0.35 \text{ kN}\cdot\text{cm}^4$ ）も用いた。

補強材周囲の摩擦の大小は、補強材に付着させる砂粒の粒径を変化させたり、付着させる範囲を減らすことで設定した。表—3 の摩擦「大」は粒径 2~3 mm の荒砂を、「標準」は実験地盤に用いた粒径約 0.2 mm の豊浦標準砂をそれぞれアクリル棒全面に接着剤で付着したもので、「小」は豊浦標準砂を縞状に付着させ、付着範囲を全体の約 1/2 としたものである。摩擦「標準」の条件は、実際の補強土工法において鉄筋あるいは鋼管などの補強材の周囲をグラウトした場合に相当する。表—4 は摩擦「大」、「標準」、「小」の補強材を 10 本ずつ選んで静的な引抜き試験を行い、各補強材と砂地盤との摩擦係数を求めたものである。標準摩擦に対する各補強材の静的な摩擦係数の比は、摩擦「大」で約 2 倍、「小」で約 1/2 程度である。補強材の材質としては、相似則を満たすアクリル（弾性係数： $E=300 \text{ kN/cm}^2$ ）を標準に、鋼線（ E



図—5 最大過剰間隙水圧比分布の代表例 (100 gal)

$=2.1 \times 10^4 \text{ kN/cm}^2$) も用いた。したがって、鋼線はアクリルの 70 倍の引張り剛性を有する。

補強材の挿入条件については、挿入角度と挿入ピッチをパラメータとした。補強材の挿入角度に関しては、 0° （鉛直）を標準とし、加振方向に鉛直軸より 30° 、 45° の角度で挿入した実験を行った。ただし斜めに補強材を挿入する場合、供試体長手方向 4 列とも同方向に挿入するのではなく、一列毎に鉛直軸に対し反対方向に挿入した。これは振動実験が両振れであることを考慮したためである。補強材の挿入ピッチは 5 cm を標準的なものとし、3 cm、10 cm についても比較した。

3. 補強材の仕様と過剰間隙水圧

実験結果の代表例として、図—5 に最大過剰間隙水圧を鉛直有効土被り圧 (σ'_v) で正規化した最大過剰間隙水圧比 ($\Delta u_{\max}/\sigma'_v$) の深度分布を示す。この図は、入力加速度が 100 gal の場合のもので、無補強とほとんど変わらないグループ、深度が深いところでは、液状化が見られないグループ、全層にわたって液状化しないグループの 3 つに大きく分けられる。

ここでは、ある一定の加速度レベルにおいて、加振の繰返し回数 (N) と加振中に発生する過剰間隙水圧 (Δu) を加振前の鉛直有効土被り圧 (σ'_v) で正規化した過剰間隙水圧比 ($\Delta u/\sigma'_v$) との関係に着目して補強効果を検討した。また、過剰間隙水圧 (Δu) が加振前の鉛直有効土被り圧 (σ'_v) と等しくなった時点に液状化と規定した。なお、間隙水圧は、補強材の打設した範囲の中間

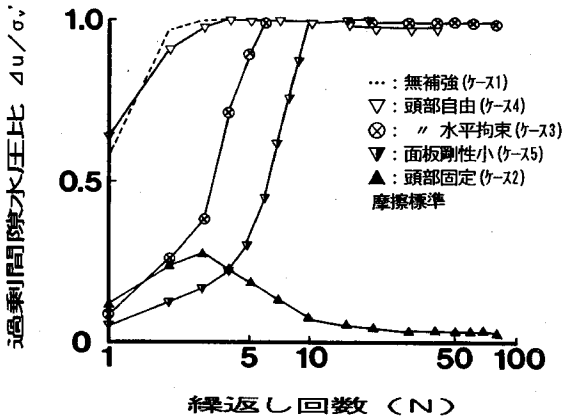


図-6 頭部条件の違いによる過剰間隙水圧の発生状況 (補強材摩擦標準, 100 gal, 深度 11 cm)

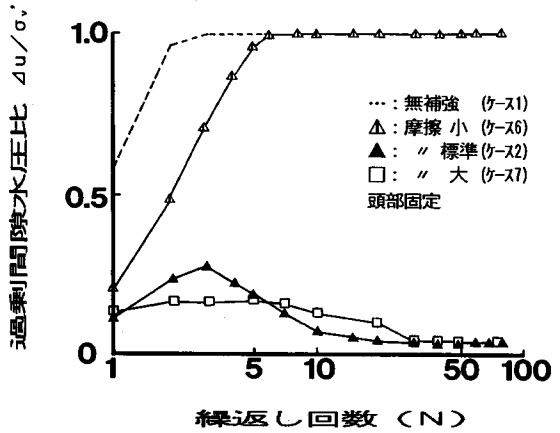


図-7 摩擦条件の違いによる過剰間隙水圧の発生状況 (補強材頭部固定, 100 gal, 深度 11 cm)

にある深度 11 cm の間隙水圧計のデータに着目して検討した。

(1) 補強材頭部条件の影響

図-6 は無補強と摩擦「標準」の補強材の頭部条件を変化させた場合の入力加速度 100 gal, 深度 11 cm における過剰間隙水圧比 ($\Delta u/\sigma'_v$) - 繰返し回数 (N) の関係を示したものである。無補強の場合、液状化に至るまでの繰返し回数が 3 回で $\Delta u/\sigma'_v=1.0$ に達して液状化を生じた。頭部条件が「自由」の場合、無補強とほぼ同様な傾向を示し、補強効果は見られない。頭部条件が「水平拘束」の場合は無補強と比較して N が 3 回増加し、わずかではあるが補強効果がみられる。これに対し、補強材頭部をアクリル板により完全に固定した場合、最大過剰間隙水圧比 ($\Delta u_{max}/\sigma'_v$) は約 0.3 で、液状化よりはるかに低いレベルにあり、顕著な補強効果が認められる。このケースにおいては、繰返し回数が 3 回を過ぎたところで過剰間隙水圧の低下が起きている。このような現象は、地盤を補強したことにより液状化抵抗が大きくなり、間隙水圧の蓄積スピードが抑制されること、および模型寸法が小さいため排水距離が短く、間隙水圧の消散が起りやすい構造となっていたことの 2 つの現象が起こったためと考えられる。

剛性の低い塩ビ板を面板に用いた場合、無補強と比較して N が 6 回大きくするものの最終的には液状化を生じている。

以上より、補強材頭部を面板 (アクリル板) と結合し、頭部を固定することにより、過剰間隙水圧の上昇を抑制する効果を有し、顕著な補強効果を発揮する。また、面板はある程度以上の剛性をもたせた方が効果的であることが判明した。

(2) 補強材周面摩擦の影響

図-7 は補強材頭部条件を「固定」した場合に、摩擦の程度を変化させた場合の入力加速度 100 gal, 深度 11

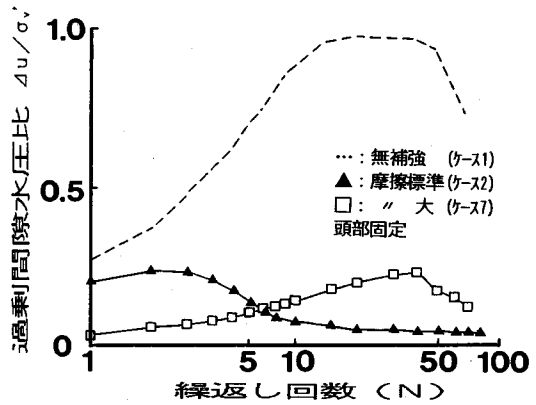


図-8 摩擦条件の違いによる過剰間隙水圧の発生状況 (補強材頭部固定, 80 gal, 深度 11 cm)

cm における ($\Delta u/\sigma'_v$) - N の関係を示したものである。部分的に摩擦を有する「小」の場合、無補強と比較して N が 4 回ほど増加するが、わずかな補強効果しか現れていない。しかし、摩擦が標準の場合には、加振中の最大過剰間隙水圧比は約 0.3 以下と低いレベルにあり、補強効果は顕著である。摩擦「大」のケースも、「標準」とほぼ同様な傾向を示している。図-8 は、同様のケースで入力加速度を 80 gal, 深度 11 cm の ($\Delta u/\sigma'_v$) - N の関係を示したものである。この場合もおおむね 100 gal の場合と同様に無補強では液状化しているのに対し、摩擦が「標準」および「大」では、過剰間隙水圧比は低い値となっている。

図-9 は、入力加速度 100 gal で補強材の頭部条件を「自由」とした場合、摩擦の程度を変化させた条件における深度 11 cm の ($\Delta u/\sigma'_v$) - N の関係を表す。この加速度レベルにおいては、頭部が「自由」で摩擦が「標準」の場合は過剰間隙水圧比の発生が無補強とほとんど差がない。これに対し、補強材周面の摩擦を大きくしたケー

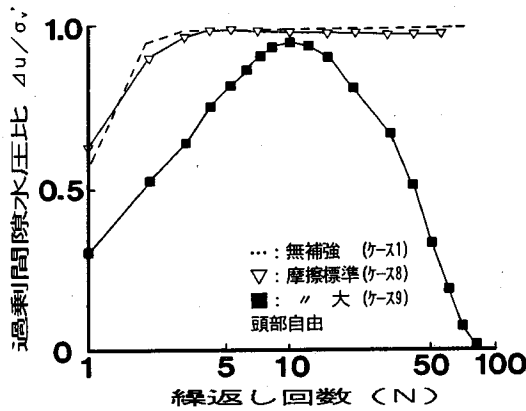


図-9 摩擦条件の違いによる過剰間隙水圧の発生状況 (補強材頭部自由, 100 gal, 深度 11 cm)

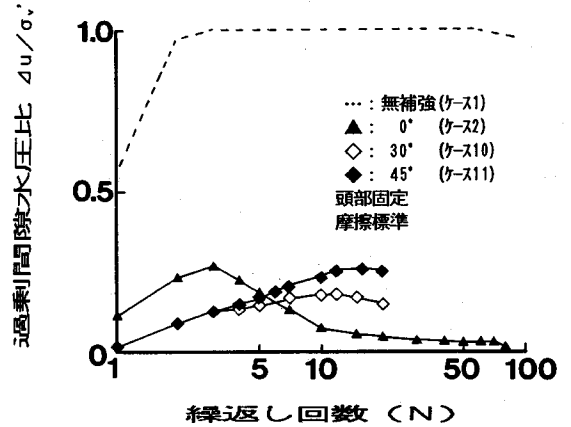


図-11 挿入角度の違いによる過剰間隙水圧の発生状況 (頭部固定, 摩擦標準, 100 gal, 深度 11 cm)

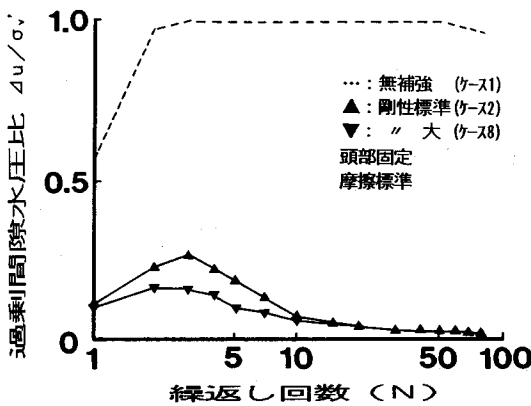


図-10 補強材剛性の違いによる過剰間隙水圧の発生状況 (頭部固定, 摩擦標準, 100 gal, 深度 11 cm)

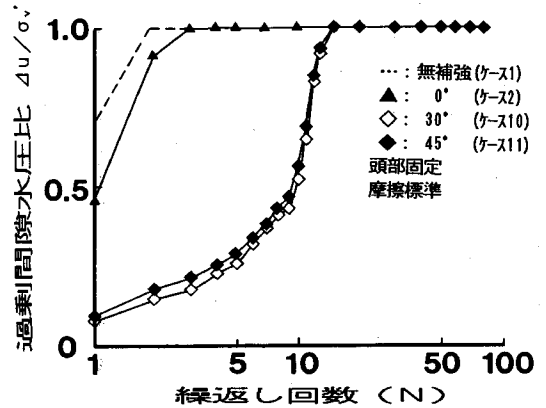


図-12 挿入角度の違いによる過剰間隙水圧の発生状況 (頭部固定, 摩擦標準, 120 gal, 深度 11 cm)

スでは、最大過剰間隙水圧比は約 0.9 と大きくなるものの、液状化には至っておらず、補強効果が十分期待できる。

以上の結果より、補強材周面の摩擦が大きくなるほど補強効果も大きくなり、摩擦の効果は認められる。特に、補強材の頭部条件が「自由」の場合は、大きな摩擦を必要とするのに対し、「固定」の場合は、相対的に小さな摩擦で補強効果が顕著に現れる。

(3) 補強材剛性の影響

図-10 は入力加速度 100 gal, 補強材頭部条件を「固定」、補強材周面の摩擦を「標準」として、補強材の剛性を变化させた時の深度 11 cm における $(\Delta u/\sigma'_v) - N$ の関係を示したものである。鋼線は、アクリル棒に比較して、引張り剛性、曲げ剛性とも約 70 倍大きく、剛性の高い方が補強効果は認められるが、剛性の差ほどには補強効果に大きな差はない。

(4) 補強材挿入角度の影響

図-11 は入力加速度 100 gal, 補強材周面摩擦「標準」とした条件で、補強材の挿入角度を变化させた場合の深

度 11 cm における $(\Delta u/\sigma'_v) - N$ 関係を示したものである。補強材を鉛直 (挿入角度 0°) に挿入した場合よりも挿入角度 30° , 45° の方が過剰間隙水圧の上昇が遅く、補強効果に差が見られる。また図-12 は、入力加速度が 120 gal の場合である。この場合は、挿入角度 30° , 40° のケースとも最終的には液状化しているが、打設角度が 0° と比較して、繰返し回数 (N) が増加しており、補強効果が大きい。なお、今回の実験では、補強材の長さを一定としているので、 30° , 45° では、鉛直に挿入した場合より、補強した深さが若干小さくなり、鉛直と同様の深さを補強したと仮定するとさらに大きな補強効果が得られるものと考えられる。

一般に、Jewell¹⁴⁾によれば、静的なせん断試験において、補強材の設置角度が最小主ひずみ増分の方向と一致している時に、せん断強度が最も大きくなり、その角度は鉛直軸に対し、 $\theta = 45^\circ - (\phi/2)$ (ϕ : 土の内部摩擦角) であることが報告されている。今回の実験では、相対密度が約 40% でかなり緩い砂地盤であることから ϕ は約

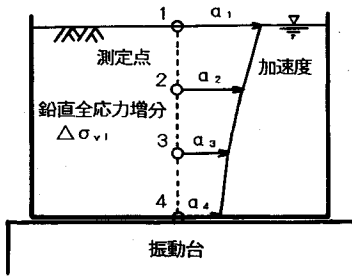


図-13 せん断応力の計算方法 (佐々木ら¹⁵⁾による)

平均せん断応力 $\tau = \frac{|\tau_{i1}| + |\tau_{i2}| + \dots + |\tau_{in}|}{m}$

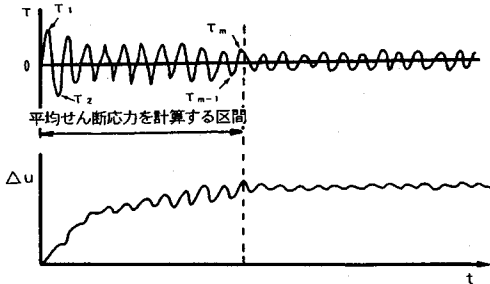


図-14 平均せん断応力の計算方法の模式図

30°前後であると推定され、これより、鉛直軸に対する角度 θ も約 30°となる。このように本実験の結果も、Jewell の実験と同様の傾向を示していると考えられる。

4. 補強効果の評価

(1) 評価方法

室内振動実験の結果を整理して、補強効果の評価方法の検討を行う。補強効果を評価する方法としては、最大過剰間隙水圧比、液状化までの繰返し回数、せん断強度比等のパラメータに着目する方法、あるいはこれらを考慮して、等価なせん断強度比で統一的に評価する方法などがある。本論文では、地盤に発生したせん断応力比と最大過剰間隙水圧比との関係に着目して、補強効果を評価する方法を選定した。

地盤に発生したせん断応力は、佐々木らが提案した実測加速度に質量を乗じる方法により求めた^{15), 16)}。これは、図-13 に示すように、測定点間ごとの平均加速度にその間の全応力増分を掛け、地表から順に重ね合わせる方法である。

計算式は次のとおりである。

$$\tau_n(t) = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\alpha_i(t) + \alpha_{i+1}(t)}{2g} \cdot \Delta\sigma_{vi} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、

$\tau_n(t)$: 地表面から n 番目の地点におけるせん断応力

g : 重力加速度

$\Delta\sigma_{vi}$: 地表面から i ~ i+1 番目の鉛直全応力増分

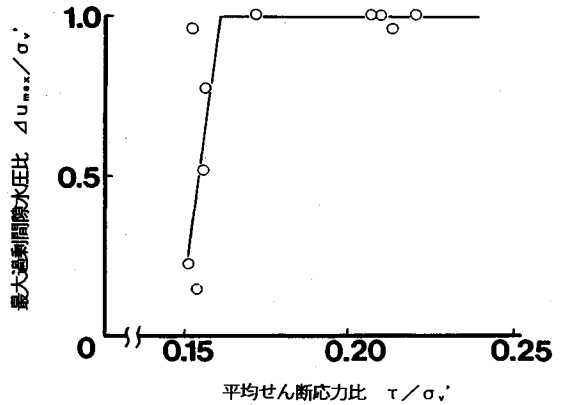


図-15 平均せん断応力比-過剰間隙水圧比関係 (ケース 1)

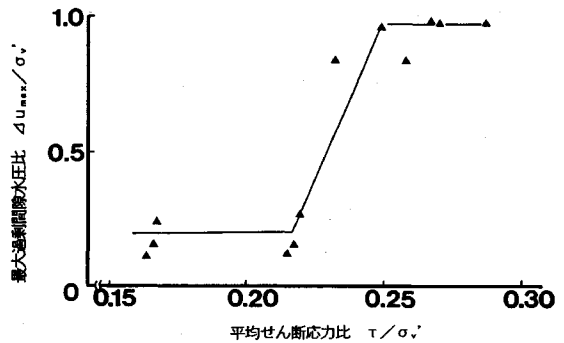
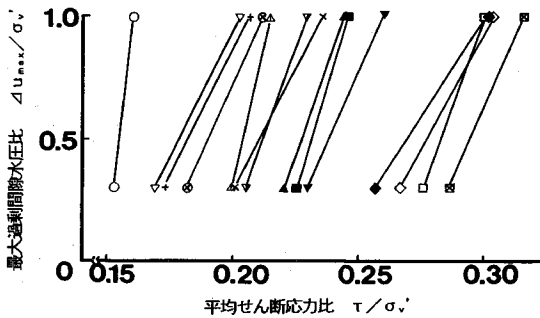


図-16 平均せん断応力比-過剰間隙水圧比関係 (ケース 2)

$\alpha_i(t)$: 地表面から i 番目の加速度計の応答加速度
この方法によれば各測定点に位相差があれば、それを反映したものになる。このようにして求めたせん断応力は図-14 に示すように時間とともに変化するため、その振幅の平均値を平均せん断応力とする。ただし、平均値を計算するまでの時間は、最大過剰間隙水圧の発生した時点までとした。また、平均せん断応力は測定点の深度が異なるため、鉛直有効土被り圧 (σ'_v) で正規化し、これを平均せん断応力比 (τ/σ'_v) と呼ぶ。同様に最大過剰間隙水圧も鉛直有効土被り圧 (σ'_v) で正規化し、最大過剰間隙水圧比 ($\Delta u_{max}/\sigma'_v$) と呼ぶ。

補強効果の評価は、最大過剰間隙水圧比に対応する平均せん断応力比の大小で行う。すなわち、ある最大過剰間隙水圧比での平均せん断応力比を各ケースで求め、補強ケースと無補強ケースの両者を比較して、各実験パラメータに対する補強効果を表す。前述した手法に基づいて、平均せん断応力比と最大過剰間隙水圧比との関係をプロットした例を、図-15, 16 に示す。図-15 は無補強 (ケース 1) を、図-16 は代表的な補強ケース (ケース 2) である。これらの図から平均せん断応力比と最大過剰間隙水圧比との関係を表す曲線 (折れ線) が得られる。このようにして求めた平均せん断応力比と最大過剰間隙水圧比の関係を図-17 に示す (図中の記号は表-5



図一七 平均せん断応力比-過剰間隙水圧比関係 (全ケース)

表一五 平均せん断応力比および補強率

ケース	せん断応力比		補強率		記号
	0.5 [*]	1.0 [*]	0.5 [*]	1.0 [*]	
1	0.156	0.161	—	—	○
2	0.228	0.244	0.462	0.516	▲
3	0.192	0.212	0.237	0.317	⊗
4	0.179	0.203	0.147	0.261	▽
5	0.213	0.229	0.365	0.422	▼
6	0.193	0.215	0.237	0.335	△
7	0.282	0.300	0.808	0.863	□
8	0.239	0.260	0.532	0.615	▼
9	0.231	0.246	0.481	0.588	■
10	0.276	0.303	0.769	0.882	◇
11	0.269	0.300	0.725	0.863	◆
12	0.297	0.315	0.903	0.956	⊠
13	0.215	0.235	0.378	0.460	×
14	0.184	0.207	0.179	0.286	+

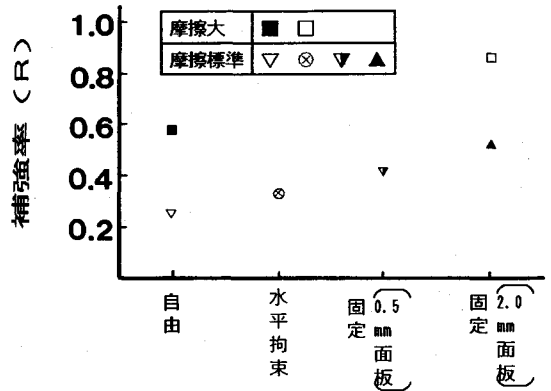
*): 着目する最大過剰間隙水圧比を表す

参照)。ところでこれらの図は同一の最大過剰間隙水圧比が発生するのに必要な平均せん断応力比を示している。従って、この関係がこの図の右側に移動するほど地盤の液状化抵抗が大きくなる。また、同一の最大過剰間隙水圧比に対応する平均せん断応力比の値を折れ線から求めることにより、液状化に対する補強効果を求めることができる。このようにして、最大過剰間隙水圧比 1.0, 0.5 に対応する平均せん断応力比をまとめたのが表一五である。なお、表中の平均せん断応力比は図一七から求めた。

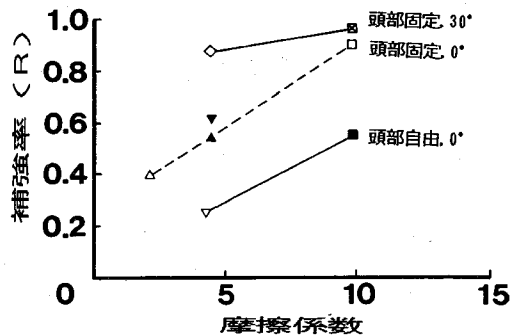
(2) 補強率の算定

振動実験から得られたせん断応力比と最大過剰間隙水圧比の関係より、補強効果について検討する。検討に当たり、ある着目する最大過剰間隙水圧比に対応するせん断応力比において、補強と無補強の比較により式(2)で表される補強率 R を定義する。

$$\frac{\tau_r}{\sigma'_v} = (1+R) \cdot \frac{\tau_n}{\sigma'_v} \dots\dots\dots (2)$$



図一八 頭部条件と補強率の関係



図一九 補強材周囲の摩擦 (補強材摩擦係数) と補強率の関係

ここに、

τ_r/σ'_v : 補強地盤のせん断応力比

τ_n/σ'_v : 無補強地盤のせん断応力比

R: 補強率

最大過剰間隙水圧比 1.0, 0.5 に対応する各ケースの補強率もまた、表一五に示すとおりである。

(3) 補強条件と補強率の関係

補強条件と補強率の関係について以下に示す。なお、ここで用いる補強率は、最大過剰間隙水圧比が 1.0 に対応したものである。

図一八は、補強材の頭部固定条件と補強率の関係を示す。摩擦が「標準」の条件で、頭部が「自由」の場合に比べ、頭部固定 (面板 2mm) では 2 倍以上、頭部固定 (面板 0.5mm) でも 1.5 倍以上の補強率が得られている。また頭部「水平拘束」のケースでも、頭部「自由」に比べて補強率は増加している。

補強材周囲の摩擦の大小は、本来ならば動的な条件下で比較すべきであるが、今回の実験規模では動的な補強材周囲摩擦力の計測が困難であった。ただし、動的な摩擦力の大小は静的な摩擦力の大小と相関すると考えても妥当であろう。そこで、補強材周囲摩擦力は静的な摩擦係数を指標として評価することにし、静的な摩擦係数は静的な引抜き試験から求めた。図一十九は、表一四で示した補強材の摩擦係数と補強率の関係を、補強条件の違い

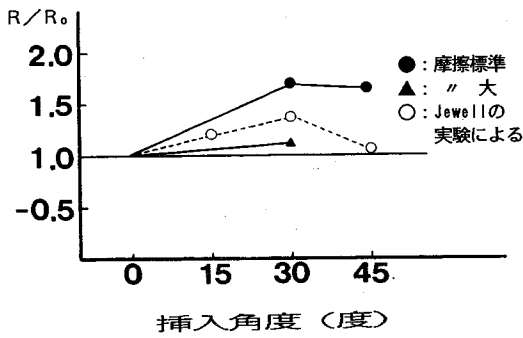


図-20 挿入角度による補強率の変化

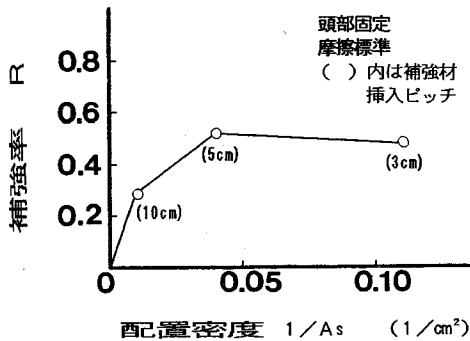


図-21 補強材配置密度と補強率の関係

に対して示したものである。鉛直に補強材を挿入した場合、頭部「固定」および頭部「自由」では補強材の摩擦係数が増加するのに比例して、補強率も増加する傾向にある。鉛直軸に対し斜めに挿入したケースでは、全体に大きな補強効果が得られているが、鉛直挿入に比べ摩擦係数による補強率の変化の割合は低い。

補強材の引張り剛性と補強率の関係については、表-3、表-5におけるケース2、8を比較することで明らかとなる。表-5にも示したように最大過剰間隙水圧比1.0で、引張り剛性が「標準」の場合、補強率が0.516であるのに対して引張り剛性が70倍である「大」でも補強率が0.615と0.1程度の増加にとどまっている。このことは、補強材に働く引張り力が補強材と地盤の摩擦に伴って生じていると考えれば、補強材に生じている引張り力に相当するような補強材の剛性を確保すれば、それ以上の剛性を補強材が持っても補強効果への寄与は少ないと考えられる。

補強材の挿入角度と補強効果の関係について、図-20に示す。図は鉛直に補強材を挿入したケースでの補強率に対する斜め挿入時の補強率の比をとったものである。図には、基準ケースである標準「摩擦」の場合の他に、摩擦の大きなケースについても示している。また、静的な補強土に関する Jewell¹⁴⁾の実験結果も合わせて示す。標準摩擦のケースでは、Jewellの実験結果と同様に挿

入角度30°で最大となる傾向を示している。なお、摩擦大の場合は補強材を斜めに挿入する効果は、相対的に低い。既設構造物の補強は、構造物直下の補強が重要となり、構造物の周辺から補強材を斜めに挿入しなければならない場合も生じる。上記の結果は、このような場合でも補強効果が低下せず、むしろ補強対策上有利な特性であると判断される。

図-21は、補強材の頭部条件「固定」、補強材周面摩擦「標準」の場合の、補強材の配置密度 $1/A_s$ と補強率の関係を示したものである。なお、 A_s は補強材1本あたりの分担面積を表す。補強材の配置が密になるに従って補強率は増加するが、あるレベルに達してからは増加が見られなくなる。このレベルは、補強の飽和点という見方も考えられる。

(4) 考察

以上のように、補強率を指標として補強効果について検討を行った。また、その検討結果から液状化抑止に対して効果のある補強方法として、補強材と地盤の間の摩擦を大きくすることと、面板により補強材頭部を固定することがわかった。

静的な場合でも地盤と補強材の摩擦を大きくすれば補強効果が大きくなるように、今回のような動的な場合でも同様の傾向となり、補強率は摩擦係数が大きくなるのに比例して増加することが確認された。このことは、静的な補強土のメカニズム¹⁷⁾が動的な場合でも適用できることを示唆している。すなわち、地盤のせん断変形に伴い、補強材に摩擦が働き、これが地盤を拘束し、鉛直拘束圧を増加させることにより、液状化抵抗が増すものと考えられる。

次に面板による補強材頭部の固定効果については以下のように考えられる。地盤のせん断変形時において、地盤と補強材の摩擦からモビライズされる補強材力は、補強材頭部が自由な場合には、頭部で“0”となると考えられるのに対し、頭部が固定されている場合は、頭部で大きくなっているものと考えられる。その結果、補強材全長にわたって補強材による地盤の拘束効果が高められ、補強効果が大きくなるものと推定される。特に、表層地盤ではその拘束効果が顕著で、補強効果の増大に寄与しているものと考えられる。

5. まとめ

液状化対策工法として種々の補強タイプにより振動実験を行い、補強効果に寄与する要因を検討し、以下の成果を得た。

(1) 地盤との摩擦を有する補強材を地盤に挿入し、その頭部を面板で固定する方法を取ることにより顕著な補強効果が得られ、液状化対策工としての有効性が確認された。

(2) 無補強では、低い加速度レベルで、数回の繰返し回数により液状化が生じている。これに対し、(1)の方法で補強すると、加振時の過剰間隙水圧の上昇が抑制され、液状化抑止効果が顕著になる。

(3) 本実験では、補強材に関するパラメータ(頭部条件、周面摩擦、剛性、挿入角度)を変化させ、その定性的な傾向を把握した。また、補強効果の評価方法として平均せん断応力比-最大過剰間隙水圧比関係に着目した補強率を用いて、補強効果の評価を行った。その結果、摩擦係数の大小と補強率の大小がよく対応しており、動的問題でも静的な補強土工法と同様のメカニズムが想定されることが確認された。また、補強材頭部を固定することで補強効果が大きくなるのは、頭部で大きな補強材力が発揮され、補強材による地盤拘束効果が高くなったことによるものと解釈できる。

(4) 静的な補強土の実験と今回の結果は対応が良好であり、静的な補強土の原理が動的問題に適用できる可能性が高い。

今回実施した模型実験では、補強土工法が液状化対策工法として有効であることが明らかになり、新しい知見を得たと考えている。この結果より、補強土工法を用いた液状化対策工の実用化が可能となるものと確信している。

最後に、本研究は著者の一人である松尾 稔教授を中心とした研究会の中の成果の一部であり、研究会のメンバーである不動建設株式会社 末松直幹氏をはじめとする関係各位には有益なご助言を頂いた。ここに深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) T. Mogami and K. Kubo : The Behavior of Sand during Vibration, Proc. 3rd International Conference on Soil Mech. and Found. Eng, Vol.1, pp.152~155.
- 2) 農林省農地局：土地改良事業計画設計規準，第3部設計，第1編フィルダム，1966年6月。

- 3) 日本道路協会：道路橋耐震設計指針，1972年4月。
- 4) 日本建築学会：建築基礎構造設計規準・同解説(1974改)，1974年11月。
- 5) 日本港湾協会：港湾の施設上の基準・同解説，1979年3月。
- 6) 松尾稔・上野誠・関野英男・加藤十良：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，土木学会論文集 第379号／VI-6 1987年3月。
- 7) M. Matsuo and M. Ueno : Development of ground reinforcing type foundation, Proceedings of Twelfth International Conference on Soil Mechanics and Foundation engineering. Volume 2, pp.1205~1208, 1989.
- 8) 望月美登志・福島伸二・香川和夫：液状化防止対策としての補強土工法の適用性，第19回地震工学研究発表会講演概要，pp.257~260, 1986.
- 9) 古賀泰之・谷口栄一・越智健三・岡本正広：小杭を挿入した豊浦差のねじりせん断強度，第21回土質工学研究発表会，pp.599~602, 1985.
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，pp.38~42, 1990年2月。
- 11) Seed, H. B. and Idriss, I. M. : Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, Jour. SMF Div., Proc. ASCE, Vol.97, No. SM9, pp.1249~1273, 1971.
- 12) Seed, H. B. : Evaluation of soil liquefaction effects on level ground during earthquakes, State-of-the-art Report for ASCE Annual Convention and Exposition, Liquefaction Problems in Geotechnical Eng., Philadelphia, 1976.
- 13) 吉川正昭・黒岩真彦・山田善一：模型地盤を用いた鉄塔-基礎-地盤の非線形連成振動に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第334号，pp.53~61, 1983.
- 14) Jewell, R. A. : Some Effects of Reinforcement on the Mechanical Behavior of Soils, Ph. D. Thesis, Cambridge Univ., 1980.
- 15) 近藤益央・佐々木康・松本秀應：飽和砂層の振動台実験における過剰間隙水圧比と動的せん断応力比の関係，第42回土木学会年次学術講演会(第3部門)，pp.132~133, 1987年9月。
- 16) 佐々木康・増井仁：振動台実験における間隙水圧の発生特性，第23回土質工学研究発表会，1988年6月。
- 17) 土質工学会編：補強土工法，pp.27~52, 1986.

(1993.2.18 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF SOIL REINFORCEMENT AGAINST LIQUEFACTION

Fumio ACHIWA, Toshitaka MIZUTANI, Makoto UENO and Minoru MATSUO

The soil reinforcement is expected to become an effective protection method in case that the soil liquefaction is anticipated to occur for the existing facility. In this paper, the authors have investigated the effectiveness and reinforcing method by model test for various pattern of reinforcement. As a result, it has been became clear that the large friction and fixed head of reinforcement bars are very effective for prevention of soil liquefaction. Based upon the experimental results, they have also studied on the mechanism of reinforcement against liquefaction and suggested its evaluation.