ジオテキスタイルを用いた 既設オイルタンク基礎の補強に関する基礎的検討

佐藤崇¹・間昭徳²・鶴山昇³・佐藤雄太⁴・鈴木久美子⁵・金子賢治⁶・熊谷浩二⁷

日本は地震災害を多く受ける地域であり、近年もその被害について対策案が種々考えられている。現在各建築法令が改訂されているなか、既設オイルタンクの基礎に関しても地震時の被害を低減するための比較的簡易な補強工法が求められている。本研究では比較的簡易な補強工法として、耐久性・強度特性・施工性にすぐれたジオテキスタイルを使用した工法の開発を目指して基礎的・実験的な検討を行った。まず、構造物直下の地盤にジオグリッドを縦方向に使い基礎地盤を囲むことによるジオグリッドの引張り材としての基礎の沈下に対する補強効果の確認を行った。次に、地震時の液状化による構造物基礎の沈下抑制効果の検討のために振動台を用いた液状化実験を実施した。

キーワード：既設基礎の補強，ジオテキスタイル，液状化，模型支持力試験，振動台模型実験

1. はじめに

我が国は多くの諸外国と異なり、地震が多発する地域であり過去何度となく大きな被害を受けており、対策案が種々考えられている。この被害の中で地下水位の高い、港湾地域における耐震補強・液状化対策工法についても、さまざまな対策工が構築されている。これらの工法の多くは、固化改良工法，地盤置換工法，排水工法など大規模かつコストが大きい工法が主流である^{1)~6)}。一方，現

在各建築法令が改訂されているなか，比較的重要度の低い既存の建築・土木構造物に対しては，より安価で簡易な液状化被害を低減する工法が求められている。

本研究では既設のオイルタンク基礎を対象として，支持力補強と液状化被害の低減を兼ねた比較的簡易な工法として，耐久性，強度特性，施工性にすぐれたジオテキスタイル（ジオグリッド）を使用した新しい工法について検討する。本工法の概念を図-1に示す。構造物直下の地盤をジオテキスタイルを縦方向に使用して囲むことで，支持力向上と液状化時の沈下抑制を図る。上部は基礎と補強材を結合することで，また，下部については支持層に根入れすることで補強材は拘束されている。構造物基礎が沈下する際に縦方向に挿入されたジオテキスタイルを引張り，構造物直下の地盤が側方に変位しようとする際に円周方向に補強材が力を発揮する。これらのことによりジオテキスタイルが引張材として機能し効果を発揮すると考えられる。なお，本工法の目的は完全に液状化を防ぐことを目指しているのではなく，中規模の地震により液状化が発生した場合にも上部の構造物の完全な崩壊を防ぐことである。本論文では，このような簡易な既設基礎の補強工法について，静的な支持力試験を行ってその効果や基本的構造について検討を行う。さらに，液状化時の挙動を検討するために，振動台模型実験を行い，その沈下抑制効果についても確認する。

なお，本工法の開発に際して，ジオテキスタイルを地盤中に縦方向に挿入するための手法についても現在検討を継続中であるが，ジオテキスタイルを地盤中に縦に挿入可能であることを実物を用いて確認している。

図-1 ジオテキスタイルを用いた側方流動対策の概念図

¹ 学生会員，八戸工業大学大学院工学研究科，修士課程（〒031-8501 八戸市大字妙字大開88-1）

² 正会員，三菱樹脂(株)，土木資材事業部技術開発グループ（〒103-0021 東京都中央区日本橋本石町1-2-2）

³ 非会員，三菱化学エンジニアリング(株)，建築・ファシリティ事業部（〒108-0023 東京都港区芝浦4-2-8）

⁴ 学生会員，八戸工業大学大学院工学研究科，修士課程（〒031-8501 八戸市大字妙字大開88-1）

⁵ 非会員，八戸工業大学大工学部，博士研究員（〒031-8501 八戸市大字妙字大開88-1）

⁶ 正会員，八戸工業大学大学院工学研究科，准教授（〒031-8501 八戸市大字妙字大開88-1）

⁷ 正会員，八戸工業大学大学院工学研究科，教授（〒031-8501 八戸市大字妙字大開88-1）

図-2 静的載荷実験ケース

2. 静的支持力試験

(1) 実験の概要と使用した材料

本論文では、ジオテキスタイルを縦方向に使った簡易補強工法の有効性を確認するために、静的な支持力試験を実施した。実験には幅1000mm×奥行200mm×600mmの鉄製の土槽を用いた。地盤材料として、珪砂5号を用いた。使用した珪砂5号の基本的性質を表-1に示す。乾燥した珪砂5号を相対密度40%（乾燥密度 1.43g/cm^3 ）になるように、深さ50mm毎に密度管理を行いながら作成し、1層毎に飽和度100%となるように水を投入した。全7層を作成し、地盤の深さを350mmとした。載荷板は直径100mm、高さ20mm、質量615gの円柱を使用した。補強材としては園芸用のポリエチレン製ネット（目合33mm×33mm）を使用した。この補強材の引張り強度は50kN/mである。載荷板上部から4mm/minの載加速度で鉛直変位を加え、ロードセルにより反力を測定した。また、実験終了後には、丁寧に試料を取り除き、補強材の様子を観察した。

表-1 実験に用いた試料の基本的性質

試料名	ケイ砂5号
土粒子の密度(g/cm^3)	2.603
均等係数	2.29
曲率係数	1.21
最小密度(g/cm^3)	1.321
最大密度(g/cm^3)	1.624
内部摩擦角(CD, $\text{Dr}=40\%$)	37.5°
変形係数(側圧100kPa) (MPa)	14.1

(2) 実験ケース

図-2に各実験ケースの概略図を示す。ケース0は補強材を使用しない無補強のケースである。ケース1は直径100mmの円形の載荷板に対して直径140mmの円形の補強材を基礎直下に敷いている。ケース2は直径140mm、高さ200mmの上下面が開いた円柱を地盤中に挿入したケースである。このケースについては、基礎と補強材は結合されていない。ケース3はケース1と2を合わせたケースであり、基礎直下に敷いた円形の補強材と縦方向に差し込んだ円柱状の補強材を結合している。ケース4は縦方向に差し込んだ円柱状補強材の長さを伸ばし、折り曲げて基礎と補強材をステンレス製のホースバンドで結合している。ケース5は、マットレス工法を模擬しており、直径140mm、高さ20mmの平たい円柱の補強材中に粒径9.25mm以下の碎石を詰めたケースであり、比較のために行った。ケース2～4において補強材を設置する際には、3層まで地盤を作成した後、補強材を置き、その後、補強材を仮固定して立ち上げながら残りの4層を作成した。

(3) 実験結果・考察

各ケースの支持力試験結果を図-3に示す。横軸は、沈下量 S を載荷板の直径 B で正規化して示しており、縦軸は鉛直荷重を載荷板断面積で割った支持力を表している。全く補強をしていないケース0の場合には局部せん断のような沈下量と支持力の関係を示しており、 S/B が0.6の時点で支持力は約 5N/mm^2 である。これに対して、補強材を地盤と基礎の間に敷いただけのケース1においても若干支持力が大きくなっている。これは、基礎より直径の大きい補強材を敷設したことで、荷重が分散されるためだと考えられる。

図-3 支持力試験結果

図-5 各ケースの初期剛性

(a) ケース3

(b) ケース4

図-4 載荷後の補強材

上下面が空いた円柱状の補強材を基礎周辺に縦方向に挿入したケース2の場合には、初期の剛性はケース0,1とほとんど変わらないものの、支持力は大幅に大きくなっている。ケース2では補強材上部と基礎は結合されていないため、鉛直方向には鉛直方向の張力は発揮されないと考えられるが、基礎直下の地盤が側方に変位する際に円周方向に張力が発生し補強の効果を示していると推測される。試験終了後には、補強材と補強材の結合部でいくつかの破断が観察されたが、 S/B が0.4程度以降に支持力が低下する部分があり、この時に破断が生じて支持力が低下していると考えられる。

ケース3は、ケース1と2の補強を合わせたもので、基

礎直下に敷設した補強材と鉛直方向に挿入した円柱状の補強材を結合している。このケースは、本研究で実施したケースの中で最大の極限支持力を示しており、 18N/mm^2 程度となっている。これは、無補強のケース0と比較して約4倍、ケース2と比較しても約1.5倍となった。基礎直下に補強材を敷くことで荷重が分散すること、補強材の円周方向の張力が発揮されることに加えて、縦に挿入した補強材の鉛直方向にも張力を発揮しているためと考えられる。鉛直方向の張力は、基礎直下に水平方向に敷設した補強材が鉛直方向の補強材を引っ張り上げることにより発生するものと推測される。なお、ケース3のグラフ中には所々支持力が急激に低下する部分が見られているが、これらは、補強材と基礎の境界や補強材結合部などで破断（図-4(a)）が生じたためと考えられる。

ケース4はケース3と類似の補強メカニズムと考えられるが、基礎と補強材の結合の仕方を変化させている。ケース3と比較して初期の剛性は若干大きい極限支持力は若干低い結果となった。ただし、ケース2などと比較すれば、支持力も大幅に増加している。これらのことから、補強材は基礎部分と結合して拘束することでより支持力補強の効果は発揮されることがわかる。既設基礎の場合には、基礎と地盤の間に補強材を敷くことは非常に困難であり、基礎と補強材をどのように結合するかが実際の施工においては重要になる。また、ケース3と同様に支持力が急激に低下する部分があるが、これについても基礎と補強材の結合部分や補強材と補強材の結合部分が破損したためである（図-4(b)）。

ケース5は比較のために行ったマットレス工法を模擬したケースである。ジオテキスタイル補強材を縦方向に挿入したケース3や4は、マットレス工法と比較して初期の剛性は若干小さいが大きな極限支持力を得られることがわかる。

図-5には、各ケースの初期剛性を示した。ここでの初期剛性は、 S/B が0.1の時の支持力を S/B で除した割線剛性として定義した。ケース0と比較して、提案工法であるケース3,4は4~5倍程度大きくなっている。ただし、既存のマットレス工法と比較すると若干小さくなっている。

以上より、円柱状の補強材を縦方向に挿入する工法は、

支持力補強に効果があることがわかった。また、補強材と基礎を結合するとより効果的であり、同じ補強材を用いた場合のマットレス工法と比較すると初期の剛性は低いが極限支持力は大きくなる。また、補強材の強度や基礎と補強材の結合方法が重要であることがわかった。補強メカニズムについても補強材のひずみを測定するなどの方法により、より詳細に検討する必要がある。

3. 振動台模型実験

(1) 実験の概要

ここでは、ジオテキスタイルを縦方向に使った簡易的な基礎の補強工法の地震時の液状化に対する有効性を確認するために、振動台を用いた模型液状化実験を実施して定性的な検討を行う。実験に用いた振動台は水平・垂直の2方向の加振が可能であるが、本研究では水平方向加振のみとした。振動台のサイズは1200mm×1200mmであり、この振動台上にアルミ製土槽(幅800mm×奥行き510mm×深さ500mm)を剛結し内部に模型を作成した。

模型の概要を図-6に示す。まず、支持力試験に用いたものと同様の乾燥した硅砂5号を相対密度90%になるように2層に分けて突き固めることで、非液状化層を土槽底面から100mmまで作製した。その後、飽和度100%となる量の水を静かに投入した。次に、硅砂5号を非液状化層の上部に相対密度40%になるように3層に分けて液状化層150mm作成した後、飽和度85%となる分量の水を層毎に投入した。本研究では、飽和度100%にすると液状化の度合いが大きくケースによる差が出にくくなるため飽和度を85%とした。また、深さ方向については飽和度に若干差がでる可能性があるが、全てのケースで同条件であるとみなして実験を行った。補強材を設置する際は非液状化層を作成後、補強材を20mm根入れし、補強材を立ち上げながら液状化層を3層に分けて作成した。

本研究では、構造物は港湾地域に見られるオイル・タンクを想定し、直径10m、接地圧力50kN/m²と設定した。模型実験の縮尺を1/100とし、構造物の模型として高さ20mm×直径100mmのコンクリート製の円柱を用いた。この構造物の模型の質量は400gであり、接地圧力は0.5kN/m²となる。構造物模型は地盤模型作成後、土槽の中心に接地した。

入力波形は、図-7に示すような振幅4mm、周波数5Hz、最大加速度395Galの正弦波を用いて、10秒間加振した。加振前後にレーザー変位計により所定の高さから構造物中心の距離を測定し、構造物中心の沈下量を算定した。また、図-6に示す位置に、間隙水圧計p1～p4を設置して加振中の過剰間隙水圧を測定した。

(2) 実験ケース

実施した実験ケースを図-8に示す。ここで実施した実験ケースは、前章で述べた静的な支持力試験結果を参考に、補強効果の大きい縦方向の補強材と基礎を結合したケースと比較のため実施する無補強およびマットレス工法とした。ケース0は前章と同様に無補強の場合であり、

図-6 振動台模型実験に用いた模型

図-7 入力波形

ケース1は前章のケース5と同様のマットレス工法である。また、ケース2は前章におけるケース3、ケース3は前章におけるケース4である。なお、ケース3においては、ステンレス製のホースバンドを用いて補強材と構造物模型を結合した。

(3) 実験結果・考察

加振前後の各ケースの構造物模型の沈下量を図-9に示す。全く対策をしない無補強のケース0の場合には、加振前後で約27mm沈下した。これに対して、マットレス工法を模擬したケース1の場合には、21mmの沈下量となり、ケース0と比較して20%程度沈下量を抑制されている。これは構造物よりも地盤に接する断面積が広く、根入れも20mm程度しているため、構造物の荷重が液状化層に分散して伝わるためと考えられる。補強材を縦方向に使い構造物直下の地盤を囲み構造物と液状化層の間に

図-8 振動台模型実験ケース

図-9 各ケースの加振後の構造物沈下量

敷設した補強材と結合したケース2については、沈下量が15mm程度となった。また、地盤との間に敷設した補強材の上に構造物模型を置いただけの状態で行っており、補強材が傾き、構造物模型がすべり落ちるような挙動が見られた。沈下量は、ケース0の場合の1/2程度に抑えられていて、構造物が沈下しようとする際に張力が発生し、構造物直下の地盤が拘束される事によって側方流動が抑制されるためと思われる。ケース3は補強材と構造物模型を結合している場合であるが、沈下量は5mmと非常に小さく、ケース0の沈下量に対して約80%以上低減することができた。これは、ジオテキスタイルの張力により構造物直下の液状化時の側方流動が妨げられること、補強材と構造物を結合しているため一体となって挙動することなどから沈下量が抑制されると考えられる。

最も沈下量が小さいケース3の加振前後の様子を図-10に示す。加振前と比較して加振後には液状化により水が地表面に現れているが、補強材に結合された構造物模型は安定を保っている様子がわかる。ケース2とケース3については、静的な支持力試験の際にはそれ程差が現れてい

ケース3加振前

ケース3加振後

図-10 加振前後の様子

ないが、液状化に伴う構造物の沈下の場合には、不等沈下が生じることが多く、完全に補強材と構造物を結合することがその抑制に非常に効果があることが確認された。

無補強のケース0と最も沈下量が少ないケース3の場合の実験中の過剰間隙水圧比の変化を図-11に示す。ジオテキスタイルにより補強したケース3の場合には、補強領域の外側のp2, p4ではそれほど変わらないのに対して、構造物直下で補強材に囲まれた領域p1, p3の過剰間隙水圧比が、ケース0と比較して大きく現れている。特にp3については、非常に大きい過剰間隙水圧比が加振中に発

図-11 各ケースの過剰間隙水圧比

生している。このような過剰間隙水圧比の上昇は、基礎周辺地盤を取り囲み、側方流動抑制・側方拘束力向上を主メカニズムとする他の工法（例えば文献7）など）でも示されている。

以上の結果から、ジオテキスタイル補強材により補強を行うと、構造物直下の地盤が側方への変形に対する拘束力が大きくなり、過剰間隙水圧比は大きく現れる。したがって側方への変形量が小さくなり沈下量が抑制されることが考えられる。また、沈下しようとする際のジオテキスタイルの張力や地盤の側方変位に伴う周方向の張力によりせん断破壊を遅らせ、構造物の安定が保たれるものと考えられる。

4. おわりに

本研究では、ジオテキスタイルを用いた既設オイルタンク基礎の補強の可能性について、簡単な支持力試験および振動台模型実験を行って検討した。その結果、ジオテキスタイルを用いた対策工法が、支持力および液状化時の構造物の沈下抑制に効果がある可能性が確認された。その主たる補強メカニズムは、基礎直下の地盤の側方変位の拘束力向上と補強材張力によるものと推測される。今後、補強材の剛性とその効果の違いや地震動の波形の影響、補強メカニズムの解明など種々の問題について検討する必要がある。本研究で対象としている対策工法は、他の液状化対策工法と比較しても非常に安価にできると推測され、今後詳細な検討を継続したい。

参考文献

- 1) 高橋 直樹・岸下 崇裕・山本 陽一・兵動 正幸・三浦 房紀・吉本 憲正：液状化対策としての多層固化改良に関する振動台実験，土木学会論文集, Vol. 62(2), pp. 502-518, 2006.
- 2) 今村 眞一郎・平野 孝行・萩原 敏行・高橋 章浩・竹村 次朗：注入固化工法を用いた既設タンク基礎地盤の液状化対策効果に関する遠心模型実験，土木学会論文集, 764, pp. 101-120, 2004.
- 3) 田中 宏征・日下 裕貴・安田 進・飯田 毅：鋼矢板締切りによる地中構造物の液状化対策に関する実験的研究，土木学会論文集, No 792, pp. 87-102, 2005.
- 4) 浜田 信彦・後藤 茂・真野 英之・大西 有三：遮水壁を用いた地中構造物の液状化時浮き上がり対策効果の定量化，土木学会論文集, 62(1), pp. 12-21, 2006.
- 5) 田中 智宏・安田 進・石井 隆志：対策杭を用いた液状化時の護岸背後地盤の流動被害低減に関する研究，土木学会論文集, 62(3), pp. 593-604, 2006.
- 6) 佐藤 友美・前田 健一・林 宏一・村田 芳信・高原 利幸：液状化対策地盤の巨視的動的応答特性とその調査法に関する検討，材料, Vol. 54, No. 11, pp.1141-1146, 2005.
- 7) 藤本 広一・渡辺則雄・森利弘・村田均・濱田尚人・仙頭紀明：ソイルセメント柱列壁による既設屋外タンクの液状化対策工に関する研究，土木学会論文集, No.595/VI-39, pp.51-65, 1998.

FUNDAMENTAL STUDY OF REINFORCEMENT METHOD USING GEO-TEXTILES FOR EXISTING OIL STRAGE TANKS

Takashi SATOH, Akinori HAZAMA, Noboru TSURUYAMA, Yuta SATOH,
Kumiko SUZUKI, Kenji KANEKO and Koji KUMAGAI

Various reinforcement methods as a technique for decreasing the liquefaction damage have been proposed. However, most of them are large scale and very expensive such as soil improvement techniques and drain methods. Then simple and low-cost method are required. In this study, we carried out a series of experiments for a reinforcement method, which uses geotextiles, of existing oil storage tank foundations. At first, bearing capacity tests were performed to verify the reinforce effectivity of the method. Next, we carried out the shaking table tests to examine the effectivity of a new method by using the geotextile for decreasing the liquefaction damage. As the results, we could observe that the proposed method is effective for reinforcement of foundations of existing oil storage tanks.