

液状化対策工法としての筋交い固化工法の有効性の検証

鹿島技術研究所 山田岳峰* 林 寛*
 深沢栄造* 鄭 京哲**

地盤の液状化対策工法として、部分固化工法の一つに分類される「筋交い固化工法」の有効性を2次元有効応力解析を実施して検証した。検討の結果、i)筋交い固化工法は、鉛直固化壁のみの改良に比し、改良体内部の液状化抑制効果が大きいこと、及びii)筋交い固化工法の場合、比較的強い地震に対しても改良体内部地盤の液状化の発生を抑制できることが分かった。また、筋交い固化工法の遠心模型実験を実施して、解析結果と比較することにより、今回用いた解析方法の妥当性を確認した。

1. はじめに

阪神・淡路大震災では、臨海部埋立て地盤を中心とした広範な地域で地盤の液状化が発生した。著者等は、地盤の液状化対策工法として、部分固化工法の一つに分類される「筋交い固化工法」を提案している。当工法は、図-1に示すように、セメント系固化材を用いた原位置地盤攪拌混合により、斜め方向の固化壁（以下、筋交い固化壁と称す）を地盤中に構築し、適宜鉛直固化壁と組み合わせるものである。これにより、地震時に地盤に作用するせん断力（水平力）の一部を筋交い固化壁に分担させ、効率的に地盤の液状化を抑止するとともに構造物の変形を抑制することができる。

今回、当工法の有効性を検証するため、2次元有効応力解析を実施するとともに、遠心模型実験を行った。本稿では、これらの検討結果を示し、筋交い固化工法の液状化抑制効果を明らかにする。

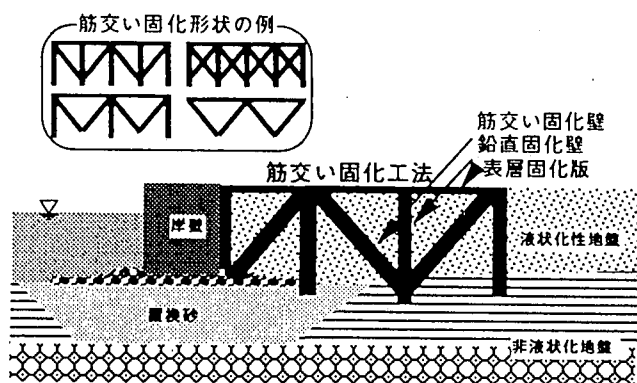


図-1 筋交い固化工法の概要

2. 解析方法

(1) 想定した地盤モデル

筋交い固化工法の液状化抑制効果を定量的に把握するため、図-2に示す地盤モデルを想定した。同図に示すように、想定した地盤モデルは、表層に層厚10mの液状化しやすい砂地盤（相対密度 D_r が60%程度相当の砂地盤で、以下、液状化性地盤と称す）を、基礎層に層厚20mの密な砂地盤（ $D_r \approx 95\%$ 、以下、基礎地盤と称す）を有す水平地盤であり、地下水面は地表面に一致する状態を仮定した。

(2) 検討した液状化対策工法

液状化性地盤の液状化対策工法として、図-2に示す「筋交い固化構造を構築した場合」と

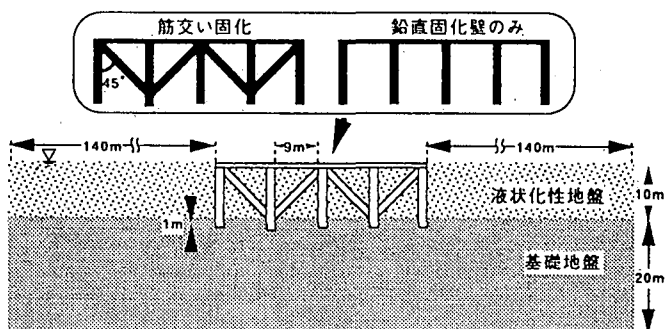


図-2 検討した固化形状

表-1 解析ケース

ケース	固化形状	鉛直固化壁厚(m)	筋交い固化壁厚(m)	固化体変形係数(MN/m ²)	改良率(%)	
CASE1	鉛直固化壁のみ	2	-	981	2.2	
CASE2		4			3.4	
CASE3		6			4.3	
CASE4	筋交い固化	1	1	981	2.6	
CASE5		1	1.5		3.1	
CASE6		2	1		3.2	
CASE7		2	1.5		3.8	
CASE8		3	1		3.8	
CASE9		3	1.5		4.3	
CASE6d		2	1		1471.5	3.2
CASE8d		3	1		1471.5	3.8

キーワード：筋交い固化工法、液状化対策、岸壁
 * 鹿島技術研究所第二研究部、0424-89-7067
 ** 第一研究部、0424-89-7077

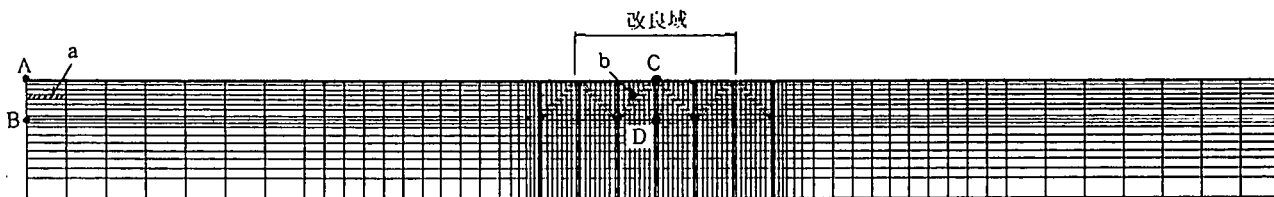


図-3 解析で用いたメッシュ

「鉛直固化壁のみを構築した場合」を想定した。それぞれの構造について、固化壁厚をパラメータとして、解析を実施した。解析ケースを表-1に示す。解析に用いた地盤の改良率（固化体置換率）は、最終的に22~43%の範囲となる。

固化体は、ポアソン比を0.49、変形係数 E は一軸圧縮強さ q_u が $2.9MN/m^2$ 程度のセメント改良土を想定して $981MN/m^2$ とし、弾性体でモデル化した。なお、固化体の剛性の影響を把握するため、一部のケースについて、 $E=1471.5MN/m^2$ ($q_u=4.9MN/m^2$ 程度のセメント改良土に相当)の解析も実施している。

液状化性土盤、基礎土盤は、弾塑性構成モデルの一つであるMULTI-YIELDモデル¹⁾で各地盤密度に相当する液状化抵抗を考慮してモデル化した。

なお、固化壁の基礎土盤への根入れ長さは1mである。

(3) 解析方法

液状化解析プログラムDYNAFLOWを用いて、2次元平面ひずみ条件で解析を実施した。解析に用いたFEMメッシュを図-3に示す。

解析では、自重解析の後、解析モデルの両側面の変形を同一とする条件下で解析モデル底面から地震波を入力した。地震波は、図-4に示す、エルセントロ インパリアルハレー地震NS成分を初期微動部分をカットして最大加速度振幅が150Galになるように振幅調整した波を用いた。

3. 解析結果と考察

(1) 設定した地震動のレベル

自由土盤の水平応答加速度（図-3中A、B）及び過剰間隙水圧比（図-3中a）の時刻歴を図-5に示す。図-5から、自由土盤では、液状性土盤の液状化の発生により、地表面の加速度は180Gal程度をピークとし加速度振幅は小さくなっていることが分かる。なお、層境の最大水平加速度 α_{max} は300Gal程度である。

改良部では、根入れ部で（図-3中D） $\alpha_{max}=200Gal$ 程度、表面（図-3中C）の α_{max} は鉛直固化壁のみの場合300Gal程度、筋交い固化の場合210Gal程度を示す。

以下、今回設定した地震動の入力レベルにつ

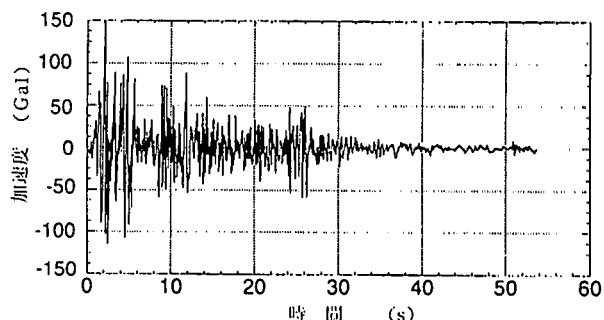


図-4 入力地震波

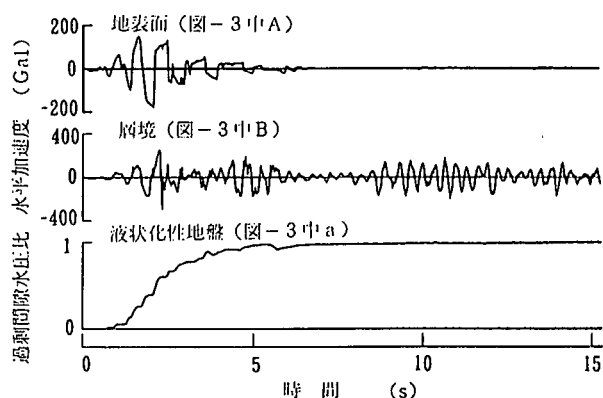


図-5 自由土盤での応答値

いて考察する。地盤の応答加速度の低減率 r_d に関する慣用式 $r_d=1-0.015Z$ （ここで Z :深度(m))を用いて地表面の応答加速度を推測すると、今回の解析($Z=30m$, 基盤の最大入力加速度150Gal)では、273Galとなる。ここで、重力式岸壁の震度と地盤加速度の関係式 $e_A=1/3 \times (\alpha/g)^{1/3}$ （ここで、 e_A :作用震度, α :地盤加速度(Gal), g :重力加速度(980Gal))²⁾を用いて、相当する震度を推定すると $e_A=0.22$ 程度となる。

(2) 過剰間隙水圧の挙動

CASE2, CASE7の改良部周辺の10秒後の過剰間隙水圧比の分布を図-6に示す。また、各ケースの改良部内部（図-3中b）の最大過剰間隙水圧比を改良率で整理すると図-7となる。これらの図から、次のことが分かる。

i) 今回の寸法では、鉛直壁のみの場合、改良率を大きくしても液状化の発生は抑制されない。これは、固化壁の加振方向断面の細長比が大きいと耐変形性能が小さくなること、及び液状化

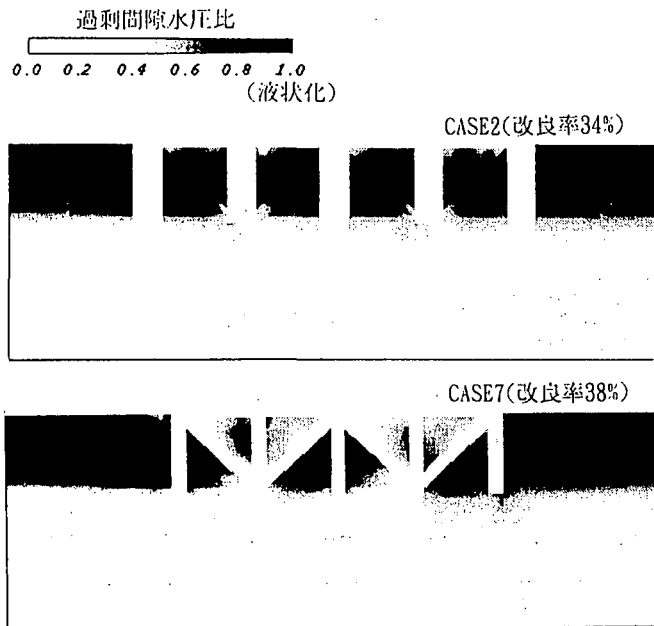


図-6 改良部周辺の過剰間隙水圧比の分布

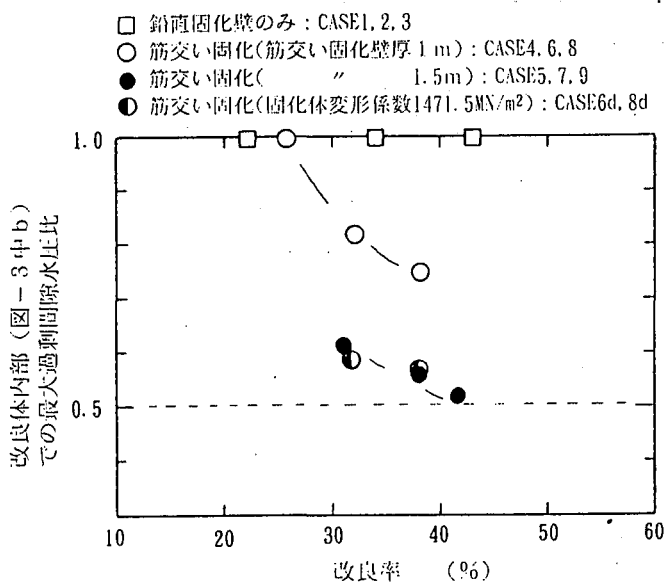


図-7 最大過剰間隙水圧比と改良率の関係

層厚に比し改良ピッチが大きく改良体内部地盤の変形が抑制されないためと考えられる。以上から、鉛直壁のみの構造の場合には、液状化の発生を抑制するためにはより大きな改良率が必要となることが分かる。

ii)一方、筋交い固化的場合、全般的に改良率が大きくなると液状化抑制効果が発現されることが分かる。その効果は筋交い固化的壁の壁厚、固化的体の変形係数を大きくすることにより特に顕著となる。今回の解析では、一つの仕様として、 $E = 981 \text{ MN/m}^2$ ($q_u = 2.9 \text{ MN/m}^2$ 相当)の改良土で鉛直固化的壁厚2m、筋交い固化的壁厚1.5m、改良率で40%程度の改良を行うと、改良体内部の過剰間隙水圧比を0.5程度に抑制できることが分かる(ここで、過剰間隙水圧比が0.5以下の場合、水圧上昇に伴う地盤定数の

低下は小さく、道路橋示方書³⁾ではその範囲において地盤定数の低減は行わない)。なお、前述の傾向から、筋交い固化的壁厚、改良土の剛性等を変化させることにより、改良率をより低減させることも可能と考えられる。

iii)鉛直壁のみの場合、改良体内部地盤は全面的に液状化に至るが、筋交い固化的の場合、液状化が抑制され、特に、固化的壁に閉合された地盤の液状化抑制効果が顕著となる。ただし、今回の解析条件では、改良体内部地盤においても固化的壁に閉合されない地盤は変形抑制効果が小さく液状化抑制効果も小さくなっている。

(3) 固化的体に作用する応力度

セメント改良土がグリブの破壊規準に従うと仮定して、固化的体に作用する応力度について検討した。その結果、脆性度(一軸圧縮強さ/引張り強さ)としてコンクリート相当の8を採用した場合、 $q_u = 2.9 \text{ MN/m}^2$ のセメント改良土であれば、固化的体に破壊に至るような応力は発生しないことが確認できた。

4. 解析結果の妥当性の確認

以上示した解析結果の妥当性を検証するため、筋交い固化工法の遠心模型実験を実施し、実験結果と解析結果の比較・検討を行った。

(1) 遠心模型実験の概要

実験モデルの概要を図-8に示す。地盤は密度が異なる2層(液状化性地盤: $D_r = 65\%$ 、基礎地盤: $D_r = 95\%$)からなる飽和砂地盤で試料は豊浦標準砂を用いている。固化的体は、壁体及び表層固化的版をセメント改良土($q_u \approx 5.9 \text{ MN/m}^2$, $E \approx 1471.5 \text{ MN/m}^2$)で作製し、地盤の作製に従いこれらを地盤内に設置し、接着剤で接着することにより作製した(改良率約27%、実験後に取り出した固化的体モデルを写真-1に示す)。ここで、接着部強度は改良土の強度より大きくなることを確認している。模型縮尺は実物の1/50とし、これに対応して遠心加速度は、

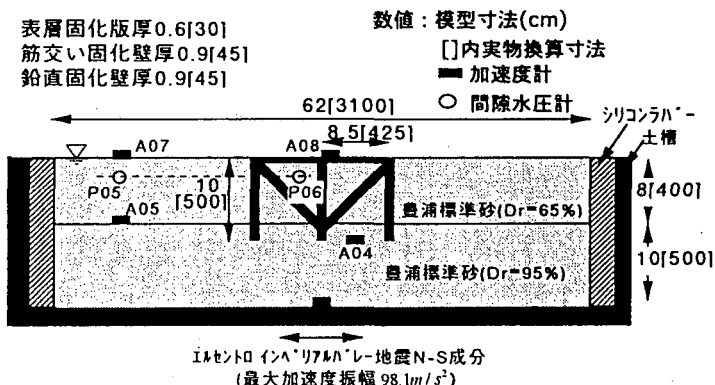


図-8 実験モデルの概要

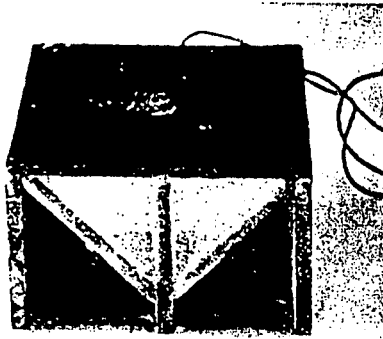


写真-1 遠心模型実験に用いた筋交い固化モデル

490.5m/s², 間隙流体はシリコンオイル (50cP)とした。なお、土槽側壁の境界処理としてシリコンパターを用いている。

地震波はエルセントロ インパリアルパレー地震NS成分を、最大加速度振幅が約98.1m/s²(実物換算で200Gal), 時間刻みを1/50倍に調整して、入力した。

(2) 解析結果の妥当性確認

実験結果と実験の解析結果を図-9に示す。この図から、解析結果は、実験結果に対して、液状化後の固化体の応答加速度を過大評価する傾向にあるが、間隙水圧の挙動を含めて実験結果をほぼ表現できており、今回用いた解析方法とそれによる解析結果は妥当なものと判断できる。また、実験後の固化体モデルの観察で、固化体が破壊していないことも確認した。

5. おわりに

筋交い固化工法の液状化対策工法としての有効性を検証した。検討の結果、i)筋交い固化工法は、鉛直固化壁のみの改良に比し、改良体内部の液状化抑制効果が大いこと、及びii)筋交い固化工法の場合、比較的強い地震に対しても改良体内部地盤の液状化を抑制できることが

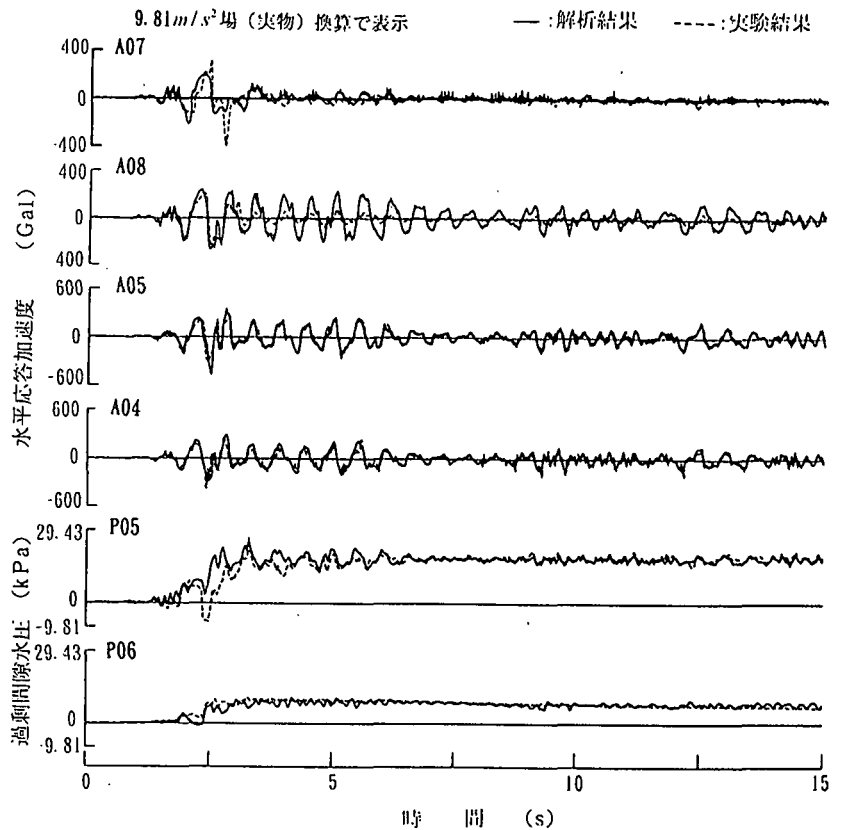


図-9 実験結果と解析結果の比較

分かった。

今後、当工法の液状化抑制効果をさらに明確にするとともに、阪神・淡路大震災で被害を受けた岸壁・護岸等の港湾構造物への適用も配慮して、設計法の構築を行う予定である。

【参考文献】

- 1) J. H. Prevost : DYNAFLOW ; A nonlinear transient finite element analysis program, Dept. of Civil Eng. and Op. Research, Princeton University, last update 1992
- 2) 野田, 上部, 千葉 : 3. 重力式岸壁の震度と地盤加速度, 港湾技術研究所報告第14巻第4号, 1975年
- 3) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1990年

Effectiveness of Brace-Reinforced Vertical Soil-Mixing-Walls as a Anti-Liquefaction Method
Takemine Yamada, Hiroshi Hayashi, Eizo Fukazawa, Jingzhe Zheng

The authors have proposed a new anti-liquefaction method, SUJIKAI-KOKA-METHOD, which has braced soil-mixing-walls coupled with vertical ones. The effectiveness of the method has been clarified through numerical analysis and centrifuge modeling test. The main conclusions of the study are as follows: i)SUJIKAI-KOKA-METHOD is much more effective than the method using only vertical walls, and ii)SUJIKAI-KOKA-METHOD could prevent the occurrence of soil liquefaction between the reinforced walls when subjected to strong earthquakes.