

高圧噴射攪拌工法による繊維混合地盤改良工法の開発 —（その2）ファイバージェット工法の施工実験—

三反畑勇^{*1}・浦野和彦^{*1}・足立有史^{*2}・木村 誠^{*3}

近年、地盤改良によって地下構造物や杭基礎を耐震補強する事例も増えてきている。著者らはセメント系地盤改良に短繊維を混合した場合の引張強度や靱性の改善効果に着目し、既設構造物周囲などの狭隘箇所でも利用できる高圧噴射攪拌工法に応用することを目指している。これまでに、室内配合試験および地下構造物の耐震補強を想定した2次元動的FEM解析等によって、繊維補強の効果を検討し、従来に比べて地盤改良の範囲が最大3割程度低減できることを確認した。本論文では、実施工と同等の条件での実施した施工実験により確認した、短繊維混合・高圧噴射工法（ファイバージェット工法）の施工性、地盤改良体の出来形・品質等について述べる。

キーワード：地盤改良、繊維、高圧噴射、耐震補強、既設構造物

1. はじめに

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震では、地盤災害に起因する多くの被害が生じたことも教訓の一つとして挙げられている。そして、旧基準や旧技術で建設された土構造物に対しても、今日の技術レベルに応じて経済的かつ耐災性の高い構造に強化する必要があることが提言されている¹⁾。そのような背景の中、近年は地盤改良によって地下構造物や杭基礎を耐震補強する事例が増えている。特に既設構造物の補強では、狭隘な作業ヤードでも施工が可能な高圧噴射攪拌工法を選択する例が多い。

著者らは高圧噴射攪拌工法を用いて地中に短繊維混合地盤改良体を造成する工法の開発に取り組んできた^{2)~16)}。これまでに短繊維を混合したセメント系地盤改良は、引張強度や剛性等の改善効果によって効率的な地盤補強が可能になることを配合試験や動的解析を通じて確認している。また、模擬地盤（砂質土）での施工試験も実施した。

本報告では、実施工と同等の条件で実施した、短繊維混合・高圧噴射攪拌工法（以下、ファイバージェット工法と呼ぶ）の施工実験^{14)~16)}の成果を取りまとめたものである。まず、施工実験で実証したファイバージェット工法の施工手順と施工性等を示す。そして、コアボーリングや掘出し調査によって確認した短繊維混合地盤改良体の出来形・品質等について述べる。

2. ファイバージェット工法の概要

ファイバージェット工法の施工には、新規に開発した四重管式ロッドと噴射モニターを使用する。噴射モニ

ターとは、ロッド先端部に取り付ける高圧噴射用の長さ1m程度の管で、本工法では高圧噴射用のノズルの他に短繊維吐出口と先端削孔ビットを有している。図-1に短繊維混合改良体の造成手順を、図-2に噴射モニターによる改良体造成の模式図を示す。

短繊維を混合した地盤改良体は、噴射モニターの先端ビットによる削孔後、通常の高圧噴射工法と同様に噴射モニターを引き抜きながら造成する。まず上段ノズルから噴射した高圧水（写真-1参照）で地盤を水で緩めてから、中段の吐出口（φ1.5インチ）から短繊維を圧入する。短繊維はシェービングクリーム状の気泡と混ぜてグラウトポンプで圧送する（写真-2参照）。その後、下段ノズルから超高压硬化材をエアと一緒に噴射し地盤をさらに大きく切削しながら短繊維と地盤を攪拌して改良体を造成する。気泡は硬化材に消泡剤を添加して消泡させる。なお、ファイバージェット工法は図-3の機械フロー図に示すように、従来の高圧噴射攪拌工法の施工設備に、短繊維と気泡の混合・圧送システムを組み合わせることで施工することができる。また、短繊維と気泡の混合にはY字形の合流管（管中混合方式）を用いることでコンパクトな設備とした。

ファイバージェット工法の標準施工仕様を表-1に示す。造成速度（引上）は15分/m、ロッド回転数は8回/分を標準とする。硬化材の配合例、短繊維の仕様および気泡の標準配合を表-2、表-3、表-4に示す。短繊維は地盤改良体との体積比で0.25%相当を混合させることを標準とする。ただし、短繊維が排泥に混入して地上に排出されることも考慮して、体積比0.5%相当の短繊維を吐出することとする。表-5、表-6には、設計に使用する標

*1 土木研究部 *2 技術第二部 *3 東北支店

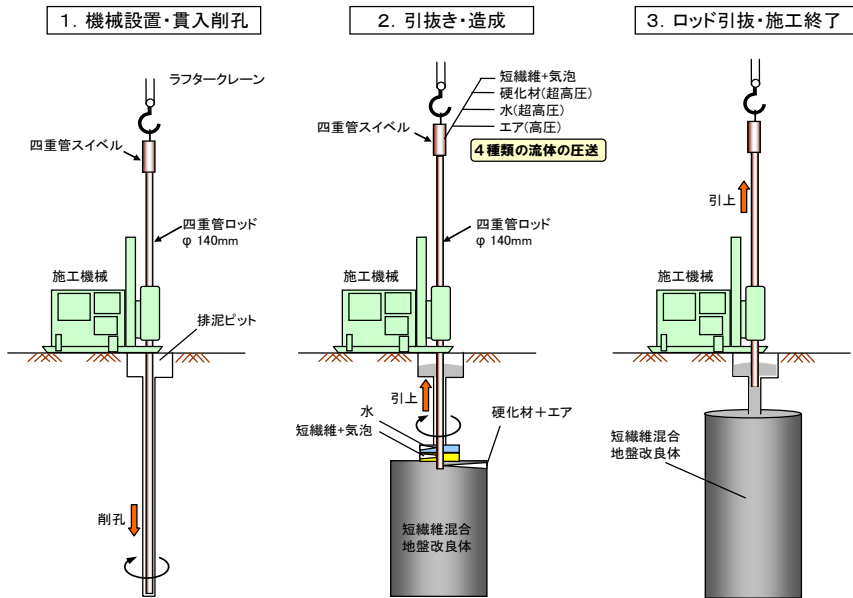


図-1 ファイバージェット工法の施工手順

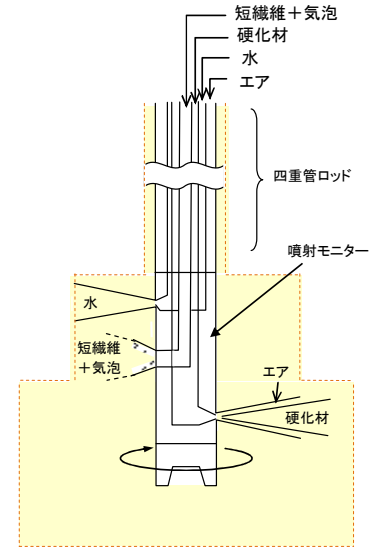


図-2 地盤改良体造成の模式図



写真-1 高圧水の噴射

写真-2 気泡の吐出

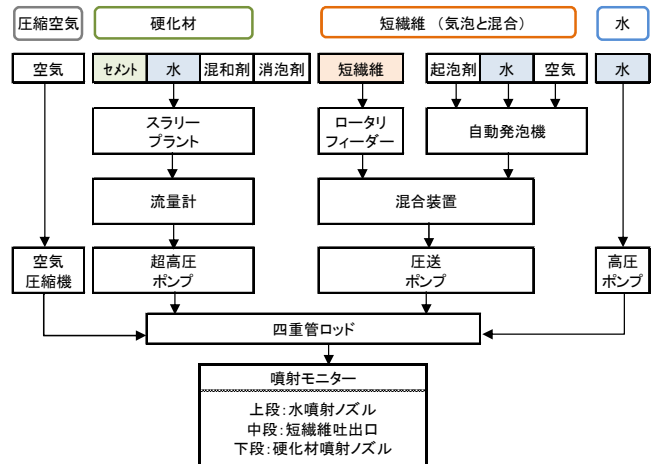


図-3 短繊維混合改良体造成の機械フロー

表-1 ファイバージェット工法の標準施工仕様

吐出位置	項目	吐出量	吐出圧力
上段ノズル	高圧水	100 ℓ/min	40 MPa
	短繊維	2~4 kg/min	0.3~0.9 MPa
中段吐出口 (φ1.5インチ)	気泡	100 ℓ/min	
下段ノズル	硬化材	190 ℓ/min	40 MPa
	圧縮空気	6~10 Nm ³ /min	0.7 MPa

表-2 硬化材の配合例

水セメント比	高炉セメントB	水	混和剤
100%	754 kg	746 kg	8.0 kg

表-3 短繊維の仕様

材質	直径	長さ	引張強度	弾性係数	切断伸度
ビニロン	16 μm	12 mm	1.57 GPa	36.3 GPa	5.0%

表-4 気泡の標準配合

名称	起泡剤	希釈倍率	発泡倍率
アルキルサルフェート系界面活性剤	2 kg/m ³	20倍	25

表-5 標準設計有効径

対象地盤	項目	施工条件と標準設計有効径		
		N ≤ 15	15 < N ≤ 30	30 < N ≤ 50
砂質土	砂質土:N値	N ≤ 15	15 < N ≤ 30	30 < N ≤ 50
	粘性土:粘着力 kN/m ²	C ≤ 10	10 < C ≤ 30	30 < C ≤ 50
造成時間(引上時間)		15分/m	15分/m	15分/m
標準設計有効径		2.8 m	2.6 m	2.4 m

表-6 短繊維混合改良体の設計基準強度

土質	一軸圧縮強度 qu (MN/m ²)	粘着力 C (MN/m ²)	付着力 f (MN/m ²)	曲げ引張強度 (MN/m ²)	変形係数 E ₅₀ (MN/m ²)
砂質土	3.5	0.65	1/3 C	C	350
粘性土	1.5	0.5			150

標準設計有効径と設計基準強度を示す。既往研究や今回の施工実験結果より、一軸圧縮強度は従来工法（短繊維なし）と同等とし、曲げ引張強度は従来工法の2倍を標準とする。

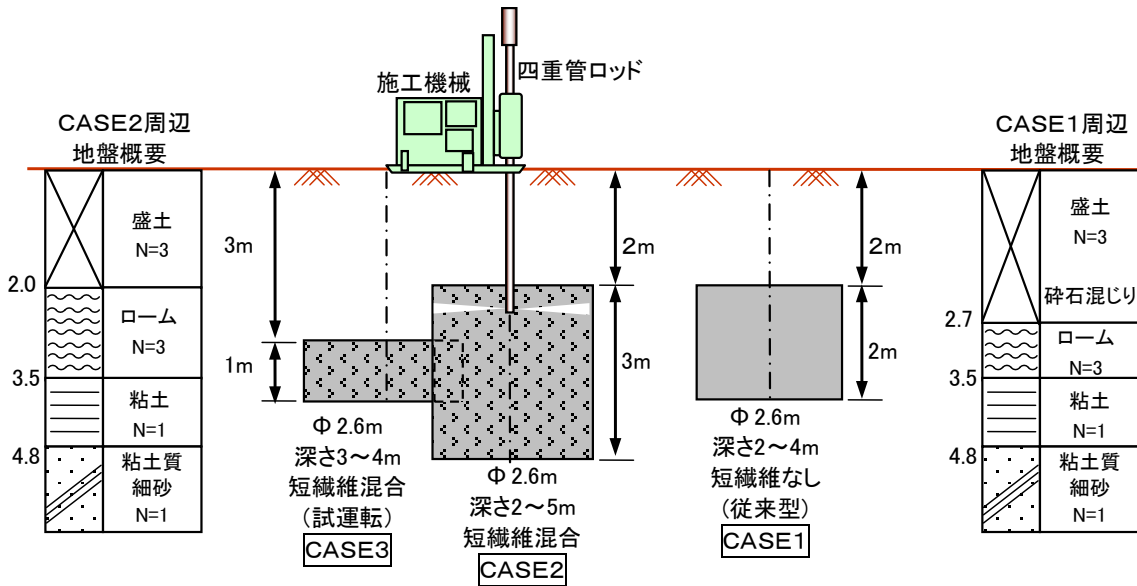


図-4 施工実験の概要

3. 施工実験の概要

施工実験は、安藤ハザマ技術研究所（つくば市）の屋外実験場で実施した。前述の四重管ロッド等を使用して、図-4に示すように短繊維を混合した改良体2本（CASE 2, CASE 3）の他に、短繊維を混合しない従来型の改良体（CASE 1）も1本造成した。施工順序は、まず新しい四重管ロッド方式の施工性確認も兼ねてCASE 1（短繊維を吐出せずに2m造成）を施工し、次にCASE 3（短繊維吐出の試運転のために1m造成）、CASE 2（短繊維混合改良体の本施工3m）の順とした。表-7に施工仕様を示す。硬化材や短繊維は標準仕様のものを使用した（表-2～表-4参照）。

短繊維を混合したCASE 2（造成3m, 45分間）は、配管内での短繊維の閉塞等も発生せず、短繊維なしのCASE 1と同じ速度で造成できた。なお、目視観察によると、改良体の深い部分（GL-2.5m以深）を造成している間は排泥に繊維があまり含まれていなかったが、施工後半の上部0.5m程度を造成中には比較的多くの短繊維が排泥に含まれた。

地盤条件は、図-4の左側に示す地層構成を想定し、いずれのケースも比較的軟弱な粘性土層に改良体を造成する予定であった。しかし、改良体の掘出し調査時に確認したところ、CASE 1付近は図-4の右側に示すように盛土層が厚く碎石も混入していた。そのため、CASE 1では改良体の上端から約1m下までの範囲に碎石の混入が確認された。掘出し調査時にCASE 2周辺地盤から採取した土の物理特性を表-8に、粒度分布を図-5に示す。このように改良対象とした地盤は高含水比で乾燥密度も小さく、細粒分を多く含む高塑性な粘性土が主体であった。ま

表-7 施工仕様

施工仕様			備考
造成速度(引上)	分/m	15	2.5cmステップ施工
ロッド回転数	回/分	8	3回転/ステップ
水(先行削孔)	吐出圧力	MPa	目標削孔径 1.2m
	吐出量	ℓ/分	
硬化材	吐出圧力	MPa	目標造成径 2.6m (面積 5.31m ²)
	吐出量	ℓ/分	
圧縮空気	吐出圧力	MPa	
	吐出量	Nm ³ /分	
短繊維	吐出量	kg/分	混合率 0.25vol%相当
気泡	吐出圧力	MPa	
	吐出量	ℓ/分	

表-8 CASE 2 周辺地盤の物理特性

土質	ローム	粘土	粘土質細砂	
試料採取深度 GL-	m	3.0	4.0	4.9
土粒子の密度 ρ _s	Mg/m ³	2.76	2.68	2.64
液性限界 w _L	%	146.9	78.9	39.7
塑性限界 w _P	%	89.2	52.7	30.8
塑性指数 I _P		57.7	26.2	8.9
強熱減量 L _i	%	13.25	8.61	4.16
細粒分含有率 F _C	%	83.5	65.9	25.2
地盤工学的分類	火山灰質粘性土 VH2: II型	高塑性限界シルト MH	細粒分質砂 SF	

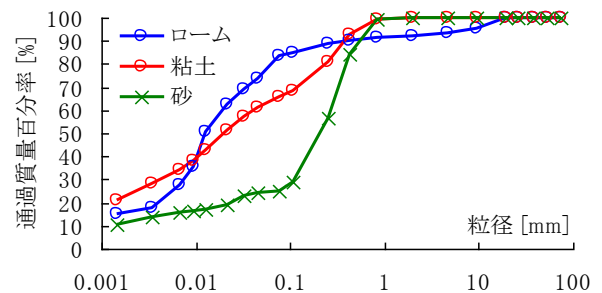


図-5 CASE 2 周辺地盤の粒度分布

た、強熱減量が最大 13%程度と有機分を比較的多く含む土であった。

4. 掘出し調査結果

造成から約 4 週間後に改良体を掘り出し、写真-3 のように改良径を確認し、オールコアボーリングでφ5cm のコアを採取した。その後、改良体をバックホウで解体しながら混合攪拌状態などを目視確認するとともに、0.5m 毎に改良径を測定した。

改良体の直径は、頭部付近は地盤が盛土（砕石混じり土砂）であったため、CASE 1、CASE 2 ともに約 2.8m と目標とした 2.6m を上回っていた。しかし 0.5m 以深では、表-9 のように CASE 2 の改良径は深度方向にはほぼ一定であるが約 2.5 m と目標値を若干下回った。CASE 1 との改良径の差は、前述のように地盤条件が異なっていたことによる影響と考えられるが、CASE 2 に混合した短繊維や気泡の影響等についても今後検討していきたい。

目視確認では、CASE 2 は短繊維がほぼ均一に混合されていることが確認でき、コア採取率も 100%であった（写真-4）。

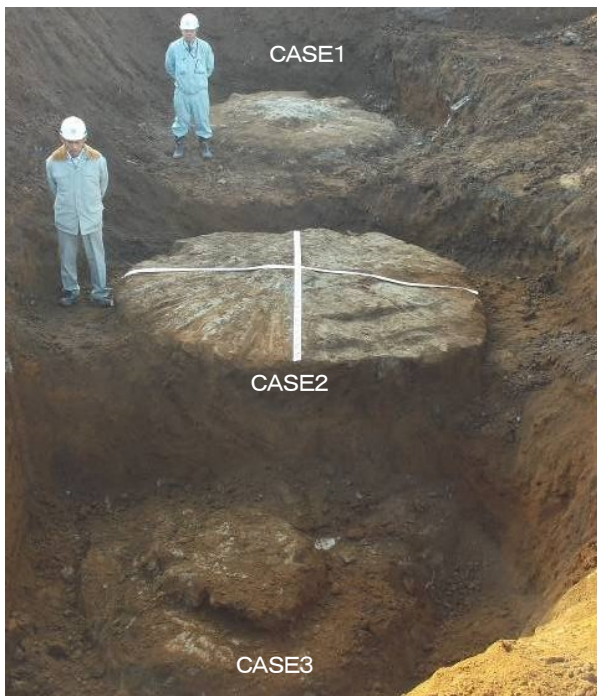


写真-3 改良体の掘出し状況

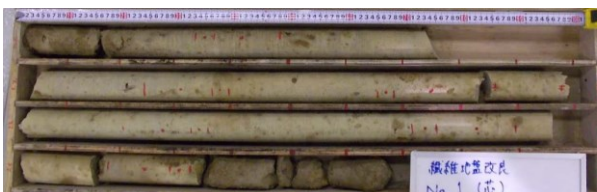


写真-4 CASE2 改良体のコアボーリング試料

表-9 改良体の出来形測定結果

改良体 上端からの 深さ (m)	改良径 測定値 (m)			改良径 測定値 (m)		
	CASE1			CASE2(短繊維混合)		
	東西	南北	平均	東西	南北	平均
0.5	2.98	2.80	2.89	2.45	2.42	2.44
1.0	2.84	2.75	2.80	2.50	2.45	2.48
1.5	2.65	2.65	2.65	2.45	2.47	2.46
2.0				2.50	2.52	2.51

5. 改良体の品質確認

施工約 4 週間後に地盤改良体からコアボーリングして採取したφ5cm の供試体に対して、一軸圧縮強度試験と圧裂試験を行って圧縮強度と引張強度などを確認した。コアボーリングは、図-6 に示すように改良体の中心 (CL)、中心から 600mm 位置、中心から 1200mm 位置の 3 箇所で行った。そして、深度方向には 0.5m 間隔を目標に供試体を整形した。

図-7 に各 CASE 1、CASE 2 のコア供試体の乾燥密度、圧縮強度、引張強度の深度分布を示す。なお、凡例の末尾

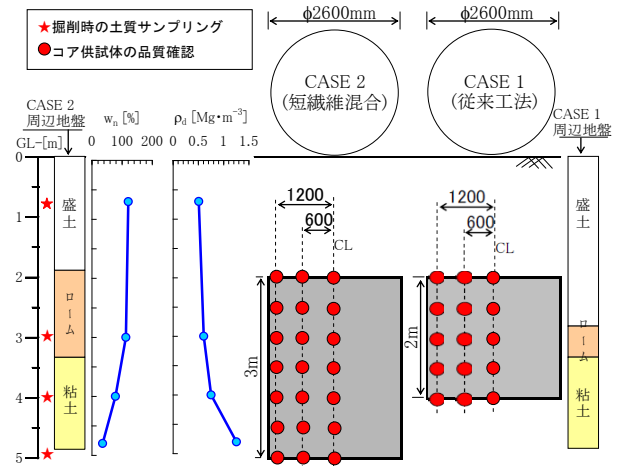


図-6 CASE 2 周辺地盤と改良体品質確認の概要

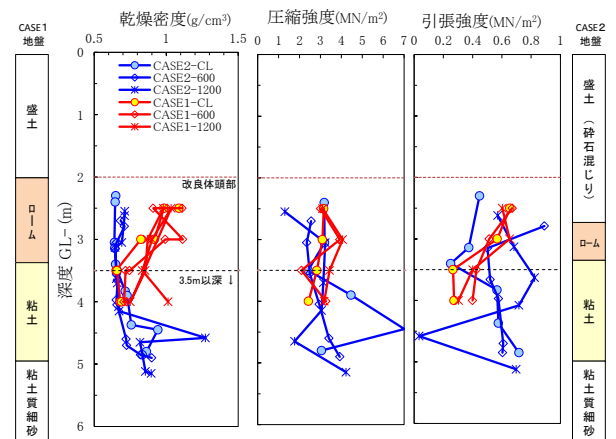


図-7 強度試験結果の深度分布

のCLは改良体中心のコアを示し、600および1200は中心から600mm、1200mm位置のコアを示している。

改良体頭部から1m(GL-3m)程度までは、前述したように埋土層にバラツキがあったため、碎石混じりのCASE 1(短繊維なし)の乾燥密度がCASE 2(短繊維あり)に比べて大きく、圧縮強度なども大きい傾向にある。

一方、両者の地盤条件がほぼ同等となるGL-3.5mより下の粘土層では、CASE 2の強度がCASE 1に比べて大きい傾向がある。特に引張強度については、CASE 2の方が最大2.3倍程度大きく、短繊維による補強効果が確認できた。

以上のように、深度方向の土質の違いの影響もあって圧縮強度や引張強度には局所的な強度差が認められるものの、概ね様な地盤改良体が造成できているといえる。

次に、ほぼ同一の地層と考えられるGL-3.5mより下の改良体に着目し、この部分で採取したコア試料の一軸圧縮試験と圧裂試験の応力-変位関係を図-8、図-9に示す。CASE 2の圧縮強度はCASE 1と同程度であるが、靱性(ねばり強さ)が改善されている。そして、CASE 2の圧裂試験では靱性が顕著に表れており、引張強度も2倍程度に増加している。これらの結果は、写真-5に示すように、せん断面において繊維補強の効果が発揮されたためである。

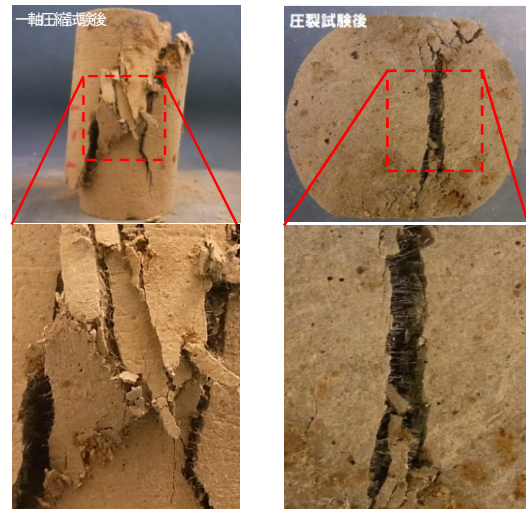


写真-5 強度試験のせん断断面

6. 改良体内の繊維混合量の推定

改良体内のビニロン短繊維の混合量は、短繊維ありとなしの場合の強熱減量試験による減量差から推定できる可能性があることを、これまでに模擬砂地盤での施工試験で確認している⁸⁾。しかし、今回の施工実験を実施した地盤は有機分含有量が比較的多いロームや粘性土であったため、後述するようにこの推定方法はあまり有効ではなかった。そこで、改良体の示差走査熱量分析(DSC分析)を行って、ビニロン繊維が融解する際の熱量をもとに繊維混合量を推定することを試みた。

図-10に短繊維混合改良体(CASE 2)のDSC分析結果の一例を示す。上2つのグラフは時間を横軸にとってプロットした図で、下2つのグラフは温度を横軸にとってプロットした図である。吸熱ピークを明確にするために、今回使用したビニロン繊維の融点(約240℃)よりも低い温度領域で2サイクルの昇温を繰返す前処理を行っている。拡大して示した曲線の網掛け部分(温度上昇に伴う吸熱)が繊維融解熱量を示し、この値をビニロン繊維単体の融解熱量と比較することで改良体に含まれる繊維混合量の体積比(ビニロン体積比)を算出した。なお、ビニロン繊維単体のDSC分析も図-10と同様に実施した。また、1回のDSC分析に供するサンプルは数10mg程度と少量であることから、分析結果のバラツキを鑑みて同一深度で各3回の分析を行い平均化した。DSC分析用サンプルは、乾燥したコア供試体の表面をカッターナイフで薄く切り取って作成したが、各3回の分析結果には顕著なバラツキは認められなかった。

図-11には、改良体の強熱減量と強熱減量から推定したビニロン繊維の体積比、DSC分析から推定したビニロン繊維の体積比を示す。図の右側には、短繊維補強の効果が

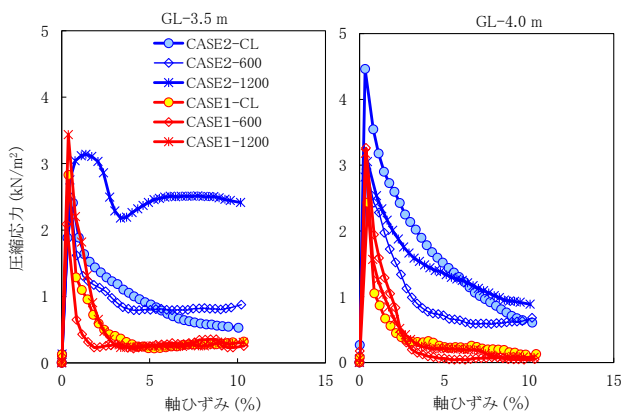


図-8 圧縮強度試験の応力-変位関係

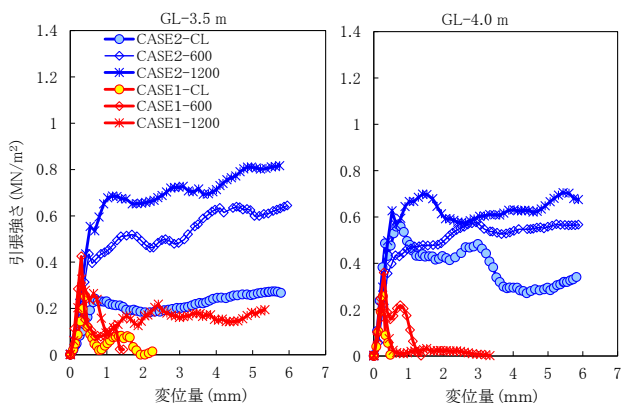


図-9 引張強度試験の応力-変位関係

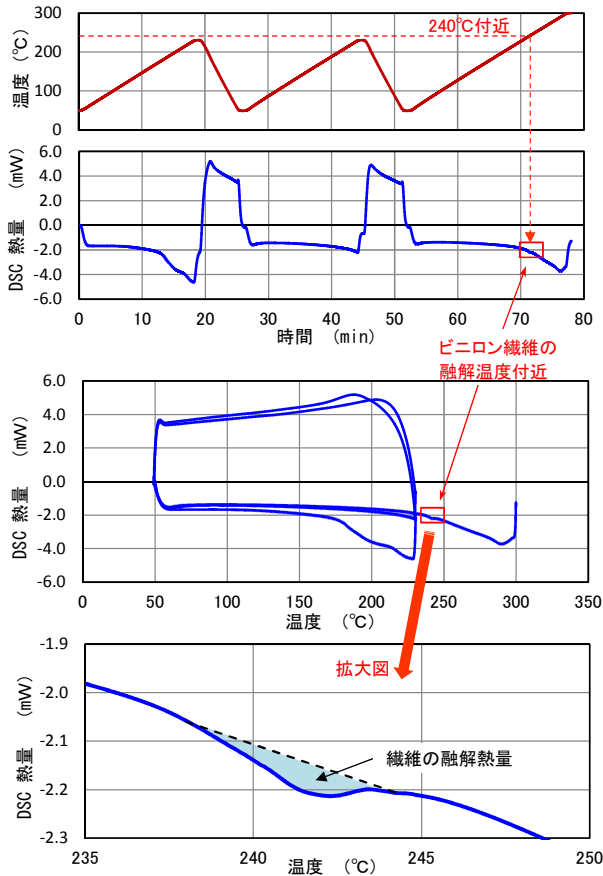


図-10 DSC分析結果例(短繊維混合改良土)

顕著に現れる引張強度を併せて示した。

CASE 2の強熱減量の深度分布は、原地盤の値に比べて相対的に上昇しており、改良体全体に繊維が混入していることがある程度確認できる。しかし、今回の施工実験を行った地盤は有機分を多く含む粘性土主体で強熱減量が大きくてバラツキもあるのに対し、混合した繊維量は体積比で0.25%程度と少ない。そのため、強熱減量の増加から推定した繊維量には大きなバラつきがあり、負の値となることもあり、今回は適切な推定手法とはなりえなかった。

一方、DSC分析による融解熱量から換算したビニロン繊維の体積比は、CASE 2(繊維あり)では0.13~0.31vol%の幅に分布しており、施工仕様の短繊維配合量0.25vol%と概ね整合が得られた。なお、CASE 2で1箇所だけ引張強度の出いていない試料(深さ4.6m, 中心から1200mm位置)があったが、DSC分析で推定したビニロン体積比もほぼ0vol%となり、噴射攪拌が不十分なコア試料であると判定できた。また、CASE 1(繊維なし)では、繊維の融解温度付近での吸熱ピークは認められず、DSC分析でもビニロンが含まれていないことが確認された。

図-12には、地盤条件がほぼ同一であるGL-3.5m以深の、ビニロン体積比(DSC分析)と引張強度の関係を示す。

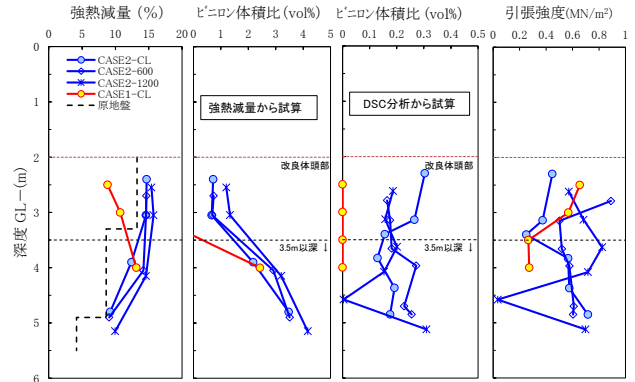


図-11 強熱減量, ビニロン体積比, 引張試験の深度分布

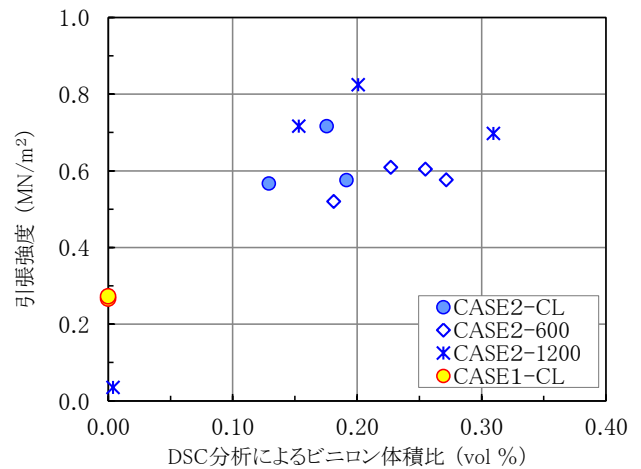


図-12 ビニロン体積比(DSC分析)と引張試験の関係

両者の関係は比較的良好で、繊維の混合量に応じて引張強度が高くなる傾向が認められる。

以上のような結果から、改良体に含まれる短繊維の量を推定するのにDSC分析が有効であることが確認できた。

7. まとめ

短繊維混合・高圧噴射攪拌工法(ファイバージェット工法)の施工実験を実施して以下のことを確認した。

- (1) 四重管ロッドを用いた施工システムを用いることで、配管内での短繊維の閉塞等を発生させることなく、従来の高圧噴射攪拌工法(短繊維なし)と同等の施工手順・施工速度で短繊維混合地盤改良体を造成することができる。
- (2) コア採取した改良体の一軸圧縮試験結果より、短繊維混合地盤改良体の圧縮強度は、短繊維なしの場合と同程度であったが、靱性(ねばり強さ)が大きく向上した。
- (3) コア採取した改良体の圧裂試験結果より、短繊維混合地盤改良体の引張強度は、短繊維なしの場合に比べて最大2.3倍程度の改善効果が認められ、靱性(ね

ばり強さ)も大きく向上した。

- (4) 示差走査熱量分析(DSC分析)によって、改良体中の繊維混合量を推定することが可能である。
- (5) 短繊維混合地盤改良体のオールコアボーリングによるコア採取率は100%であり、掘出し調査や強度試験などの品質確認試験からも、短繊維が改良体の中にほぼ均一に混合していることが確認できた。

以上のように、ファイバージェット工法は、新開発の四重管式・高圧噴射攪拌工法を使用し、短繊維を気泡と混ぜて圧送することによって、従来工法と同様の施工手順で、短繊維がほぼ均一に混合した改良体が造成できることが実証された。短繊維を混合することで地盤改良体の強度・変形特性を改善し、改良範囲を低減することで、厳しい用地制限への適用幅の向上や工期短縮、改良体積や排泥量の低減に伴うコスト縮減・環境負荷の低減などの効果が期待できるものと考えている。今後は試験施工や実工事への展開を経て、より合理的な設計・施工・品質管理方法を確立し、既設構造物の耐震補強などに役立てていきたい。なお、本工法は東興ジオテック(株)との共同開発によって実用化されたものであり、関係各位に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 地盤工学会：地震時における地盤災害の課題と対策 2011年東日本大震災の教訓と提言(第二次), 2012.
- 2) 山田淳夫, 三反畑勇, 足立有史, 浦野和彦: 繊維混合改良土の静的・動的力学特性に関する基礎的検討, 第45回地盤工学研究発表会, pp. 839-840, 2010.
- 3) 山田淳夫, 足立有史, 浦野和彦, 三反畑勇: 繊維補強した地盤改良体の静的力学特性に関する基礎的検討, 土木学会第65回年次学術講演会, pp. 937-938, 2010.
- 4) 足立有史, 浦野和彦, 山田淳夫, 三反畑勇, 河邑眞: 繊維混合改良土による杭基礎構造物の耐震補強効果の試験解析, 土木学会第65回年次学術講演会, pp. 939-940, 2010.
- 5) 浦野和彦, 足立有史, 山田淳夫, 三反畑勇, 河邑眞: 繊維混合改良土による地下構造物の耐震補強効果の検討, 土木学会第65回年次学術講演会, pp. 941-942, 2010.
- 6) 三反畑勇, 木村誠: 高圧噴射攪拌工法による繊維混合地盤改良の施工試験(その1 施工試験の概要と出来型確認), 第46回地盤工学研究発表会, pp. 1163-1164, 2011.
- 7) 木村誠, 三反畑勇: 高圧噴射攪拌工法による繊維混合地盤改良の施工試験(その2 品質確認試験), 第46回地盤工学研究発表会, pp. 1165-1166, 2011.
- 8) 木村誠, 三反畑勇: 高圧噴射工法による繊維改良地盤の造成, 土木学会第66回年次学術講演会, pp. 47-48, 2011.
- 9) 木村誠, 三反畑勇, 足立有史, 大野喜代孝: 高圧噴射攪拌工法による繊維混合改良土の強度特性に関する室内検討, 第47回地盤工学研究発表会, pp. 813-814, 2012.
- 10) 木村誠, 三反畑勇, 足立有史, 浦野和彦: 繊維混合改良土による杭基礎構造物の耐震補強効果の試験解析(その2 改良範囲低減効果), 第47回地盤工学研究発表会, pp. 815-816, 2012.
- 11) 木村誠, 三反畑勇, 足立有史, 大野喜代: 高圧噴射攪拌工法による繊維混合改良土の強度特性に関する室内検討, 第47回地盤工学研究発表会, pp. 813-814, 2012.
- 12) 木村誠, 三反畑勇, 浦野和彦, 足立有史: 繊維混合改良土による地下構造物の耐震補強効果の検討(その2 改良範囲低減効果), 土木学会第67回年次学術講演会, pp. 551-552, 2012.
- 13) 木村誠, 三反畑勇, 足立有史, 浦野和彦: 高圧噴射攪拌工法による繊維混合地盤改良工法の開発, ハザマ研究年報, 2012. 12
- 14) 足立有史, 三反畑勇, 木村誠, 浦野和彦, 佐久間孝夫, 大野喜代孝: 短繊維混合・高圧噴射攪拌工法の施工実験(その1: 施工概要と出来形), 第48回地盤工学研究発表会, pp. 915-916, 2013.
- 15) 木村誠, 三反畑勇, 足立有史, 浦野和彦, 佐久間孝夫, 岡田宙: 短繊維混合・高圧噴射攪拌工法の施工実験(その2: 品質確認), 第48回地盤工学研究発表会, pp. 917-918, 2013.
- 16) 木村誠, 三反畑勇, 浦野和彦, 足立有史, 佐久間孝夫, 大野喜代: 短繊維混合・高圧噴射攪拌工法(ファイバージェット工法)の施工実験と混合繊維量, 土木学会第68回年次学術講演会, pp. 137-138, 2013.

Development of Ground Improvement with Fiber by Using Jet Grouting — (Part 2) Field Test Results on Fiber-Jet Grouting—

Isamu SANDANBATA, Kazuhiko URANO, Yuji ADACHI and Makoto KIMURA

The use of reinforcement against earthquake for underground structures and pile foundations is increasing. In the case of ground improvement for existing structures in narrow spaces, the jet grouting method is often used. We consider improvement of resistance for compression and tension forces by using fiber. We have already carried out laboratory tests and FEM analysis to clarify the reduction effect for areas to be improved in the case of using fiber reinforcement. In this paper, the results of a field test on this new ground improvement method (named fiber-jet grouting) are described.