

埋込み杭工法における高靱性繊維補強セメントミルクの 適用に関する基礎実験

新名 正英^{*1} 渡部 憲^{*2} 梶原 大輔^{*3}

Basic Experiment on the Application of Ductile-Fiber-Reinforced Cement Milk in Bored Precast Pile Method

by

Masahide NIINA^{*1}, Ken WATANABE^{*2} and Daisuke KAJIWARA^{*3}

(Received on Sep. 29, 2018 and accepted on Jan. 10, 2019)

Abstract

High bearing capacity piles, a type of bored piles, were developed in Japan about twenty years ago. The foot protection section is constructed by enlarging the ground near the tip of the pile. The most important factor of this type of pile is the nature of the foot protection liquid, which must have very large fluidity and be distributed heterogeneously inside the solidified body. We conducted basic experiments on the applicability of ductile-fiber-reinforced cementitious composite (DFRCC) to improve the fracture toughness of the footing protection liquid. DFRCC has far superior ability compared to conventional fiber-reinforced concrete. However, it is concerned that mixing fibers reduce fluidity and workability. Therefore, we examined ductile-fiber-reinforced cement milk (FCM) mortar flow test. These tests were conducted using two levels. One is a sample mixed with only polyvinyl alcohol (PVA) fiber, and the other is a sample mixed with PVA fiber and micro steel fiber. As a result, it was found that the fluidity of the mixing sample is improved by replacing the PVA fiber having a large aspect ratio with the micro steel fiber having a small aspect ratio.

Keywords: DFRCC, FCM, Foot protection section, Foot protection liquid, Mortar flow

1. はじめに

既製コンクリート杭工法は、1960年代後半の騒音規制法の改正により、それまで多く用いられていた打込み杭工法から、杭先端付近に根固め部と呼ばれるセメントミルク固化体を築造する埋込み杭工法へと変遷してきた。近年においては、従来工法よりも杭先端付近の鉛直支持力を飛躍的に増加させた高支持力杭工法が開発され、既製コンクリート杭自体の高強度化も併せて進んでいる。

高支持力杭工法とは、杭先端付近の杭形状を従来のストレート杭から異形杭に変えること、杭先端付近の地盤を拡大掘削することで拡大根固め部を築造することおよびこれらを併用することで大きな杭先端支持力を得ることができる工法である。高支持力杭工法の開発により、適切な施工管理を行えば、高支持力化により低コストを実現でき、設計の自由度も高くなった。しかし、各施工現場において先端地盤を構成する土質が異なることや、施工法の違い、セメントミルクの材料分離などにより、品質にバラツキが生じる可能性があること、一般的な工法であれば杭先端付近は無補強であり、根固め部のひび割れは脆性的な破壊モードに直結することなどの問題点

も存在する。近年の高支持力化により、杭基礎は、経済性を重視した柱1本に対して杭1本で支持する1杭/1柱方式が採用されることが多く、これらのリスクはさらに高まっているといえる。

一方、近年においては、既存の繊維補強コンクリートに比べ、曲げ、引張、圧縮破壊時の靱性が大幅に向上した高靱性セメント複合材料(以下、DFRCCと略記)が開発されている¹⁾。DFRCCについては、既往の研究²⁾において、PVA繊維および鋼繊維を混合使用した実績が報告されており、材料分離をさせることなく繊維の分散性を確保した上で、ひび割れ発生時の変形に対して、剛性の高い鋼繊維とPVA繊維の架橋による相乗効果による靱性の改善効果が確認されている。したがって、埋込み杭工法において使用されるセメントミルクについても繊維を混入させることで、杭根固め部に靱性を確保させ、破壊モードの改善および材料分離の抑制ができるものと考えられる。既往の研究³⁾においては、DFRCCを根固め部に適用した際の支持力および靱性の向上の可能性について言及した報告もなされているが、流動性を損なうことによる作業性の低下やコストの上昇などを理由に現場採用されていないのが現状である。

本研究は、高靱性化した繊維補強セメントミルク(以下、

*1 総合理工学研究科総合理工学専攻博士課程

*2 工学部建築学科教授

*3 工学研究科建築土木工学専攻修士課程

FCM と略記)を埋込み杭工法の根固め部に適用する際、前述の問題点のうち、作業性、杭根固め部の靱性および材料分離抵抗性に着目しこれらを改善した材料開発を行うことを目的としている。本稿においては、従来のセメントミルクを使用した埋込み杭工法の現状と問題点をまとめると共に、繊維混入時のセメントミルクの作業性を改善した材料開発に関する基礎実験結果を報告する。

2. 埋込み杭工法の現状

2.1 埋込み杭工法の施工手順

埋込み杭工法は、その施工手順および方法の違いから、様々な工法に分類される。その中でも、プレボーリング根固め工法は最も採用頻度の高い工法である。Fig. 1 にプレボーリング根固め工法の施工サイクルタイムの例を示す。ここで、施工サイクルタイムの縦軸は掘削深度、横軸は施工時間を示し、グラフ点線部はアースオーガ先端の軌跡、グラフ実線部はセメントミルクの注入工程をそれぞれ示している。また、施工サイクルタイムには挿入する杭の模式図と掘削深度の関係を合わせて示した。

プレボーリング根固め工法は、アースオーガで掘削液(主に清水)を用いて所定深度まで掘削後{Fig.1 内 1)工程}、根固め液を注入{Fig.1 内 2)工程}する。その後オーガを引上げながら杭周固定液を注入し{Fig.1 内 3), 4)工程}、杭を掘削孔内に建込み、根固め液中に定着する。そして、施工後に根固め液(杭模式図赤塗部)と杭周固定液(杭模式図青塗部)が硬化することによって、支持力を発現させる工法である⁴⁾。

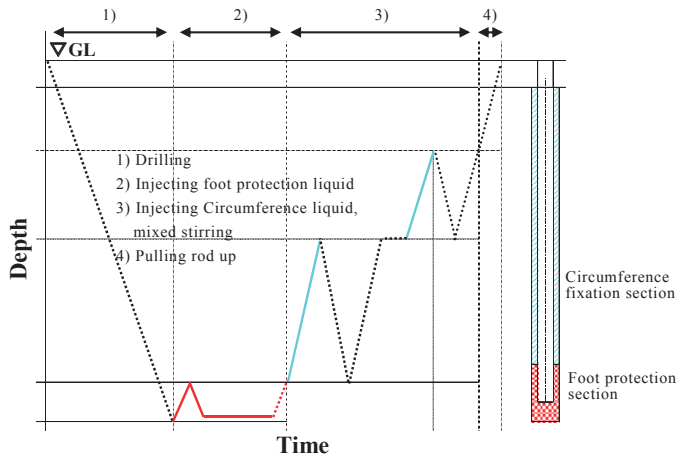


Fig. 1 Cycle time example.

杭の支持力発現において最も重要である根固め部は、Fig. 1 中の 2)の工程で築造される。この工程は、掘削孔の最深部で行われるため、根固め部のセメントミルク固化体の強度管理は、コスト面および技術的に困難である等を理由に、根固め部から試料を直接採取するのではなく、プラントから採取した試料を代用して管理するケースが多い。しかしながら、実際の根固め部には掘削土砂や掘削水が混入する可能性があり、根固め部の強度に影響すると考えられる。したがって、近年においては、根

固め部を築造後に、根固め部から Fig. 2 に示す未固結試料を採取して強度管理を行う直接的な手法が提案され始めている。以上より、FCM の適用時の強度評価を検討するには、土砂および掘削水混入の影響を考慮することが必要であると考えられる。



Fig. 2 Sampler and specimen of fresh soil-cement.

2.2 根固め部の破壊モード

杭先端支持力を確保するには、根固め部が想定している荷重まで破壊しないことが必要である。したがって、杭先端部に作用する荷重に対して、根固め部内で破壊が生じないための強度を有していることが前提となる。根固め部の想定される破壊モードは、Fig. 3 に示す(a)付着せん断破壊+支圧破壊、(b)付着せん断破壊+鉛直方向押抜きせん断破壊、(c)付着せん断破壊+斜め方向押抜きせん断破壊であり、以下に力の釣り合い式⁵⁾を示す。

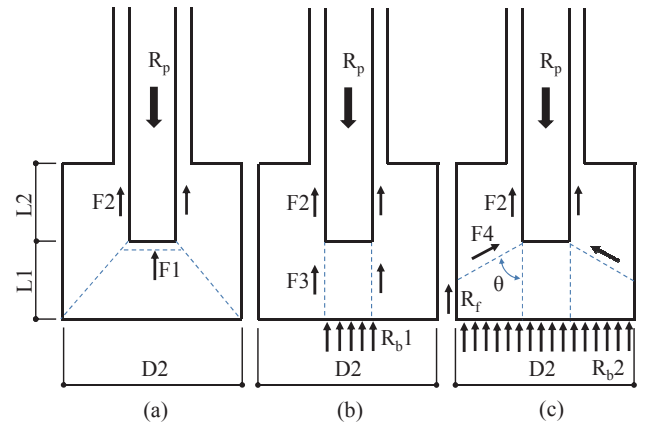


Fig. 3 Destruction mode of foot protection part⁵⁾.

$$R_p = F_1 + F_2 \quad (1)$$

ここに、

R_p : 根固め部上端位置に作用する荷重(kN)

F_1 : 杭先端と根固め部の支圧力(kN)

F_2 : 杭と根固め部の付着力(kN)

$$R_p = R_{b2} + F_2 + F_3 \quad (2)$$

ここに、

R_{b2} : 根固め部円筒底面支持力(kN)

F_3 : 根固め部の鉛直方向せん断力(kN)

$$R_p = R_{b1} + R_{f1} + F_2 + F_4 \cos \theta \quad (3)$$

ここに,

R_{b1} : 根固め部先端支持力(kN)

R_{f1} : 根固め部周面摩擦力(kN)

F_4 : 根固め部の斜め方向せん断力(kN)

これらの釣り合い式により, 根固め部上端位置に作用する荷重 R_p に対して, (a)~(c)の破壊モードのうち, 最も大きい値から根固め部の必要強度を算出することが一般的な考え方である. よって, R_p に抵抗する Fig. 3 内に示す $F_1 \sim F_4$ の力に対して補強を行うことができれば, 杭先端の鉛直支持力を向上させることができると考えられる. また, いずれの破壊モードにおいても杭先端以深部の根固め部にひび割れが発生した場合, 通常の RC 構造とは異なり, 根固め部はセメントミルクが固化しただけの状態であるため, 終局時は脆性的な破壊となるといえる. よって, 根固め部に注入するセメントミルクの固化時に, ひび割れに対する抵抗性を付与するような補強を行うことができれば, 終局時においても脆性的な破壊を回避できるものと考えられる.

2.3 根固め部の強度分布

Fig. 4 に高支持力杭工法である A 工法において, 杭径 D が $\phi 600 \sim 1100$ mm の範囲の杭を施工し, 材齢 28 日以上経過した後, 根固め部の掘出し調査を行い, 採取したコアの深度方向における強度分布を示す. なお, 施工深度は 13.5~66.4 m の範囲であり, 杭ごとに施工長が異なるため, Fig. 4 内における縦軸は, 根固め部内における杭先端からの深度方向の距離を杭径で除した値を示した. プロットデータは, 全て関東において施工されたもので, 支持層の地盤が砂質土であるものが 39 データ/7 現場, 礫質土が 34 データ/6 現場の計 73 データを, A 工法で規定されている根固め球根長の範囲(杭先端から上方に $2D$, 下方に $1.2D$)で示した.

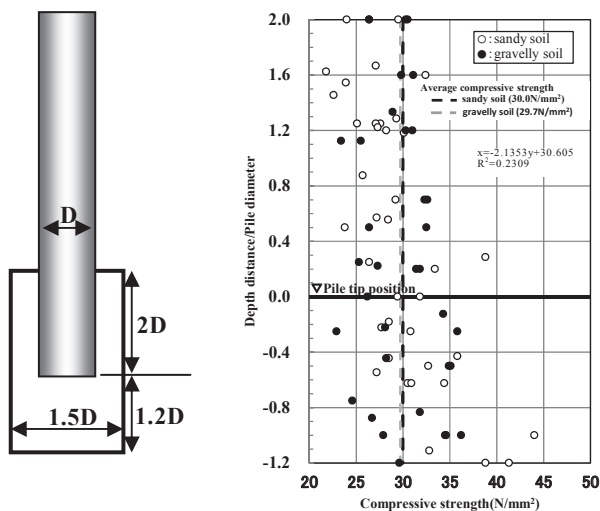


Fig. 4 Relationship between depth/pile diameter and compressive strength.

Fig. 4 より, 根固め部のコア強度は, おおよそ $20 \sim 45$ N/mm^2 の範囲で分布している. また, 全 76 データのコア強度と深度方向の相関係数 r は, $r = -0.48$ であり,

深度が浅くなるほどコア強度が低下する傾向を示している. A 工法においては, 支持層となる先端付近の地盤を杭径の 1.5 倍の径で掘削し, 発生した土砂とセメントミルク ($W/C=60\%$) を混合攪拌して根固め部を築造する. 根固め部の強度分布は, 施工方法や根固め液の水セメント比の違いにより工法ごとに異なるが, A 工法においては, 強度分布より, 先端地盤の違いにより強度のパラツキに加え, セメントミルクの材料分離が根固め部の上方部分と下方部分に生じている可能性があることが推測される. これより, セメントミルクの材料分離を抑制することで, より高品質な根固め部を築造できるものと考えられる.

2.4 埋込み杭の現状に関するまとめ

埋込み杭工法は近年, 高支持力化が進んでおり, 高支持力を確保するために根固め部の強度および品質を確保することが必須であり, 根固め液に用いるセメントミルクの材料分離を抑制することは, 根固め部の品質を安定させるのに有効であると考えられる. また, 従来, 無補強である根固め部のひび割れの発生する方向に見合った補強を施すことで, 支持力および靱性の向上を図ることが可能である. よって, 根固め部の品質および性能向上のために, 根固め液として FCM を適用することは有効な手法となり得ると考えられる.

3. 実験方法

FCM を埋込み杭工法に適用する際, 繊維を混入することにより, 流動性や圧送性などの作業性低下が懸念される. したがって, 本研究においては作業性評価の第一段階として, FCM の試し練り試験およびモルタルフロー試験を実施した.

3.1 試し練り試験

高支持力杭工法においては, 根固め部に $W/C=60\%$ のセメントミルクを用いる工法が数多く存在する⁶⁾. したがって, 本研究においては, 高支持力杭工法に適用される範囲を $W/C=60 \pm 10\%$ と想定し, この範囲を対象として試し練り試験を $W/C=50, 60, 70\%$ の 3 水準で行った. ここで, Table 1 に各水セメント比における試し練り試験を行った試験水準およびモルタルフロー試験結果を示す.

試し練り試験の使用材料において, セメントは, 普通ポルトランドセメント(密度: 3.16 g/cm^3)を使用し, 混和材料は, 分離低減剤(Sra)を使用した. 繊維は, 繊維 L(PVA 繊維, 径: 0.2 mm , 長さ: 18 mm , アスペクト比: 90, 密度: 1.30 g/cm^3 , 引張強度: 975 N/mm^2), 繊維 M(PVA 繊維, 径: 0.1 mm , 長さ: 12 mm , アスペクト比: 120, 密度: 1.30 g/cm^3 , 引張強度: 1200 N/mm^2), 繊維 Sm(鋼繊維, 径: 0.2 mm , 長さ: 13 mm , アスペクト比: 65, 密度: 7.85 g/cm^3 , 引張強度: 2000 N/mm^2)を使用した.

繊維体積混合比は, PVA 繊維のみを混入する水準に加え, PVA 繊維と鋼繊維を体積比で 7:3 および 5:5 の割合で混合した計 3 水準とした. また, 繊維体積混入率は全ての水準において 3% で固定とした. なお, 分離低減剤の添加率については, $W/C=50$ および 60% についてはセ

メント質量の 2~4 %, W/C=70 %においてはセメント質量の 3~5 %とした。練混ぜ方法を Fig. 5 に示す。

Table 1 Specimens and mortar flow test results.

(a) FCM50

Specimen	Water-cement ratio (W/C) (wt.%)	Fiber volume fraction (V _f) (Vol.%)	Fiber volume mixing ratio (V _m) (LorM:Sm)	Separation reducing agent addition rate (Sra) (Cwt.%)	Flow (mm)	Separation evaluation
FCM50-L-10	50	3.0	10:0	2.0	272	△
				3.0	230	○
				4.0	190	○
FCM50-L:Sm-7:3			7:3	2.0	280	○
				3.0	228	○
				4.0	193	○
FCM50-L:Sm-5:5			5:5	2.0	270	○
				3.0	233	○
				4.0	197	○
FCM50-M-10			10:0	2.0	237	○
				3.0	195	○
				4.0	183	○
FCM50-M:Sm-7:3			7:3	2.0	246	○
				3.0	203	○
				4.0	186	○
FCM50-M:Sm-5:5			5:5	2.0	257	○
				3.0	210	○
				4.0	187	○

(b) FCM60

Specimen	Water-cement ratio (W/C) (wt.%)	Fiber volume fraction (V _f) (Vol.%)	Fiber volume mixing ratio (V _m) (LorM:Sm)	Separation reducing agent addition rate (Sra) (Cwt.%)	Flow (mm)	Separation evaluation
FCM60-L-10	60	3.0	10:0	2.0	300	×
				3.0	259	○
				4.0	224	○
FCM60-L:Sm-7:3			7:3	2.0	300	×
				3.0	262	○
				4.0	229	○
FCM60-L:Sm-5:5			5:5	2.0	300	×
				3.0	256	○
				4.0	223	○
FCM60-M-10			10:0	2.0	262	○
				3.0	212	○
				4.0	183	○
FCM60-M:Sm-7:3			7:3	2.0	277	△
				3.0	227	○
				4.0	195	○
FCM60-M:Sm-5:5			5:5	2.0	275	△
				3.0	233	○
				4.0	208	○

(c) FCM70

Specimen	Water-cement ratio (W/C) (wt.%)	Fiber volume fraction (V _f) (Vol.%)	Fiber volume mixing ratio (V _m) (LorM:Sm)	Separation reducing agent addition rate (Sra) (Cwt.%)	Flow (mm)	Separation evaluation
FCM70-L-10	70	3.0	10:0	2.0	300	×
				3.0	285	△
				4.0	251	○
FCM70-L:Sm-7:3			7:3	5.0	223	○
				3.0	281	○
				4.0	243	○
FCM70-L:Sm-5:5			5:5	5.0	215	○
				3.0	285	○
				4.0	250	○
FCM70-M-10			10:0	5.0	223	○
				3.0	244	○
				4.0	203	○
FCM70-M:Sm-7:3			7:3	5.0	188	○
				3.0	247	○
				4.0	209	○
FCM70-M:Sm-5:5			5:5	5.0	189	○
				3.0	264	△
				4.0	227	○
				5.0	200	○

練混ぜは、モルタルミキサーを用いて、セメントと分離低減剤を添加した水の練混ぜを 3 分間行い、ミキサー内の材料の掻き落としと残留水の添加を行った後、更に 1 分間練混ぜを行った。その後、繊維を混入しながら 2 分間練混ぜを行い、計 6 分間で練混ぜ終了とした。予め、セメントと分離低減剤を添加した水の練混ぜを行う目的は、十分に粘性を確保したセメントミルクに繊維を投入することができ、ファイバボールを抑止し分散性を確保するためである。

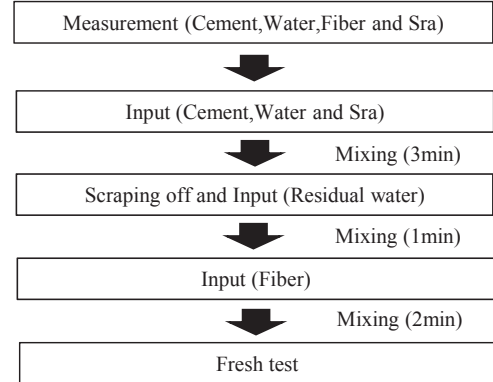


Fig. 5 Mixing method.

3.2 モルタルフロー試験

試し練り試験を行った試料に対して、JIS R 5201 に準じてモルタルフロー試験を実施してフロー値の測定を行った。なお、フロー値は、フローコーンを垂直方向に取り去った後、15 秒間に 15 回の落下運動を与え、モルタルが広がった後の径を最大と認める方向と、それに直交する径を測定したものの平均値とした。また、フロー値の測定に加え、測定後の試料の状態を目視にて観察し、試料中心から端部に至るまでのペースト分と繊維の混合状況から分散性の良否判定を行った。なお、判定基準は 1)セメントミルク全体に繊維が分散しており、試料端部までペーストと繊維が混合しているもの{Fig. 6 内 (a),(b) : 判定○}, 2)セメントミルク全体に繊維は分散しているが、試料端部にペーストと繊維の分離が確認できたもの{Fig. 6 内(c),(d) : 判定△}および 3)ペーストと繊維が完全に分離しているもの{Fig. 6 内 e),f) : 判定×}の 3 水準とした。

4. 結果と考察

モルタルフロー試験により、得られたフロー値と分離低減剤の添加率の関係を Fig. 7 に示す。以下に、試験結果に関する考察を示す。

4.1 モルタルフロー値

Table 1 のフロー値測定結果および状態の目視観察結果によると、FCM50 において、セメントミルクと繊維の材料分離を生じることなく、フロー値が最大となった試料は、FCM50-L:Sm-7:3(Sra=2 %)であり、フロー値は 280 mm であった。また、FCM50-M:Sm-5:5(Sra=4 %)のフ

ロー値が最小となり、フロー値は 187 mm であった。FCM50～70 の全ての試料において、Fig. 7 に示すように、分離低減剤の添加率が増加するとフロー値の低下が確認された。フロー値と分離低減剤の添加率における相関関係 r はそれぞれ、 $r_{50}=-0.91$ 、 $r_{60}=-0.87$ 、 $r_{70}=-0.85$ であり強い負の相関が確認でき、分離低減剤を添加することにより、セメントミルクの粘性が大きくなり流動性の低下に繋がると考えられる。

Fig. 7 によると、全ての水準において、分離低減剤の添加率が同じであれば、繊維 L のみを使用した場合のフロー値が、繊維 M のみを用いた場合に比べ 13～15% 程度大きくなっていることが読み取れる。既往の研究⁷⁾においては、繊維補強コンクリートに使用する繊維のアスペクト比が大きい程、流動性を低下させることが知られている。本実験においても、繊維 L のアスペクト比が 90 であるのに対し、繊維 M のアスペクト比が 120 と大きいため、繊維 M の混合率が大きい水準の方が流動性の低下割合が大きくなったと考えられる。

繊維 Sm の混合使用が流動性に及ぼす影響については、繊維 L については大きな変化は確認されなかったが、繊維 M については混入割合が大きくなる程、流動性が改善される傾向であった。これは、繊維 Sm のアスペクト比が使用した繊維の中で最も小さく、アスペクト比が繊維 L よりも大きい繊維 M が、より流動性の改善効果がより得られたと考えられる。

4.2 繊維の分散性

FCM50 および FCM60 については、分離低減剤の添加率が 2 % の水準において、6/12 ケースにおいてペーストと繊維の材料分離が確認された。FCM70 においては、添加率が 2 % の場合は、予備実験時に全てのケースにおいて

材料分離を生じてしまったため、FCM70-L-10 以外の水準は 3～5 % の範囲での試験実施としたが、分離傾向であった 2 ケースを除けば分散性は良好であった。水セメント比の大きいセメントミルクは流動性が高いため、繊維を混入しても流動性を確保しやすいといえるが、材料分離を生じる可能性も大きくなるため、それぞれの水準に応じた分離低減剤の添加率設定が必要であるといえる。繊維の分散性を確保するために、セメントミルクに粘性を付与することは必須であるが、分離低減剤の添加率を増やすことは流動性を損なうことに加え、材料のコストアップにも繋がる。したがって、材料分離を生じない最小の添加率が各水準の最適調合となる。本稿における実験の範囲では、繊維 L を用いた場合、FCM50 で 2 % 前後、FCM60,70 で 3% 前後が最適添加率であることが分かった。また、繊維 M を用いた場合は、FCM50,60 においては 2 % 以下となる可能性があり、FCM70 においては 3 % 前後であることが分かった。ただし、本稿においては、フレッシュ時の流動性の評価のみを行っているため、材料硬化後の力学特性および圧送後の繊維の分散性も含め最適添加率を見極める必要があり、今後の検討課題である。

4.3 モルタルフロー試験結果まとめ

各水セメント比において、ペースト分と繊維の材料分離を生じず、最も大きいフロー値を確保することができた水準は、FCM50-L:Sm(Sra=2 %), FCM60-L:Sm(Sra=3 %) および FCM70-L:Sm(Sra=3 %) であった。これより、流動性のみを考えると、PVA 繊維を単体混入する場合は、アスペクト比の小さい繊維 L のみを用いた場合の方が流動性を確保しやすく、アスペクト比のさらに小さい鋼繊維を混合使用することで更なる流動性改善効果を期待できることがわかった。

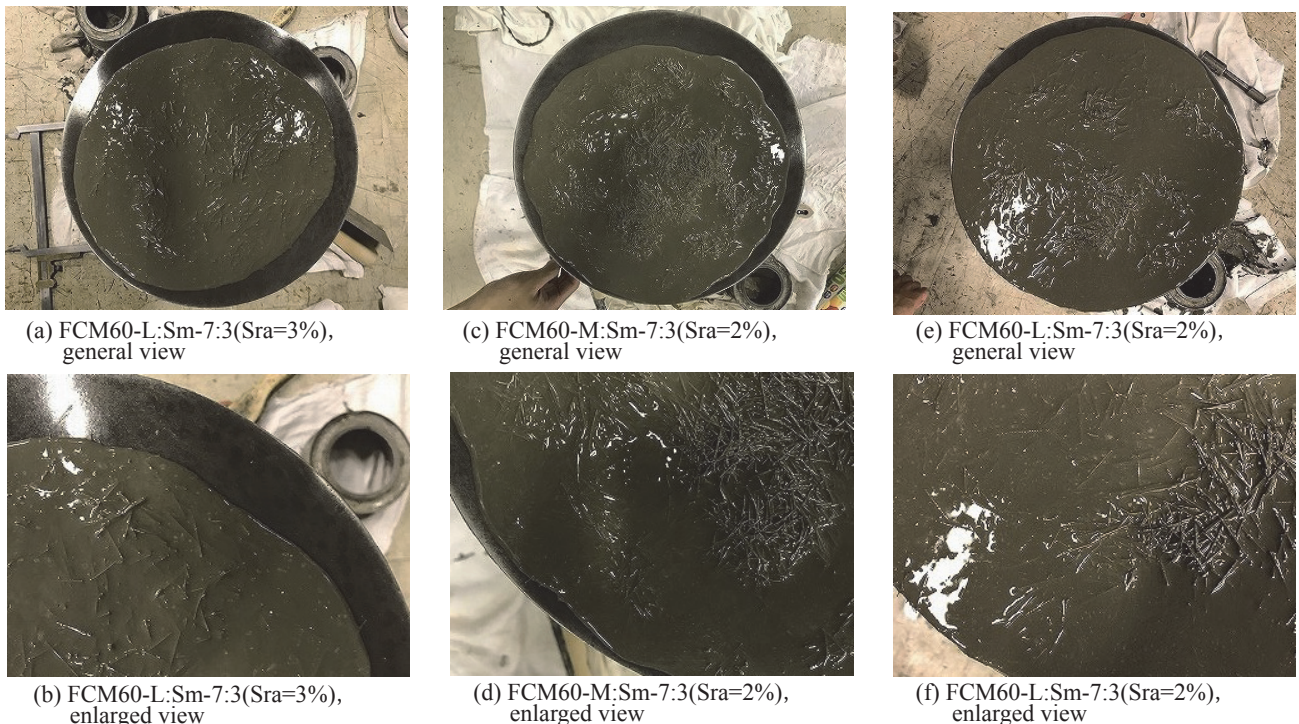


Fig. 6 Mortar flow test.

繊維 M のみを使用した場合においては、繊維 L のみを使用した場合に比べ、分離低減剤の添加率が同じ場合のフロー値は劣るものの、圧送可能であれば靱性は高くなることが期待できると推測される。したがって、最適水準の判定は、圧送性および圧送後の力学特性を考慮して行うことが必要である。

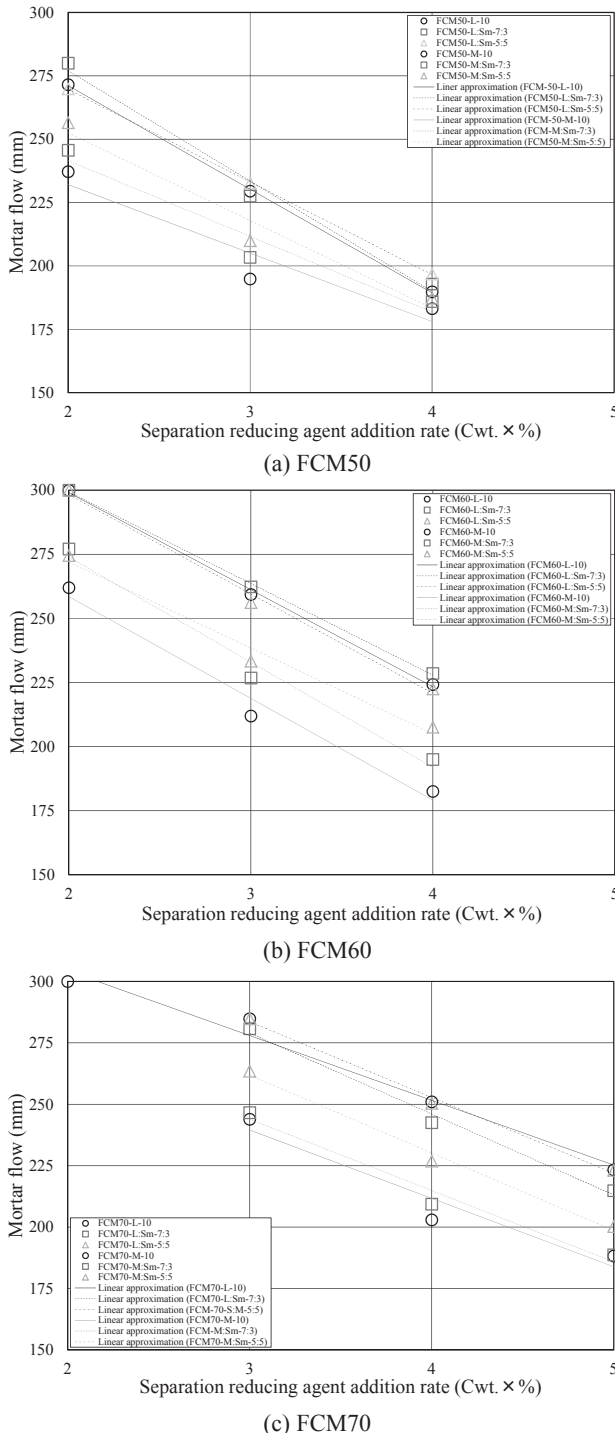


Fig.7 Relationship between of mortar flow and ratio of separation reducing agent to cement amount.

5. まとめ

本稿においては、埋込み杭工法への高靱性繊維補強セメントミルクの適用を目的とし、埋込み杭工法の現状と問題点の調査および繊維混入時のセメントミルクの作業性を評価する基礎実験を行った。以下に、これらの検討により得られた知見を示す。

- 1) 各破壊モードによって根固め部内の要求される力がことなるため、支持力改善および靱性向上には、各破壊モードに対応する補強が必要である。
- 2) 繊維の混入量が同質量である場合、繊維径および繊維長が大きいものを使用した方が流動性の低下する割合が小さくなる。
- 3) 流動性のみを考えると、PVA 繊維を単体混入する場合は、アスペクト比のより小さい繊維のみを用いた場合の方が流動性を確保しやすく、アスペクト比のさらに小さい鋼繊維を混合使用することで更なる流動性改善効果を期待できる。
- 4) 材料分離を生じることなく、最も流動性を確保することができた際のフロー値は 260~280 mm であった。また、各水セメント比において、最大のフロー値が得られた水準は、FCM50-L:Sm(Sra=2 %), FCM60-L:Sm(Sra=3 %)および FCM70-L:Sm(Sra=3 %)であった。

6. 今後の予定

本稿では、フレッシュ時の流動性の評価のみを行ったため、材料硬化後の力学特性および圧送後の繊維の分散性も含め最適添加率の評価を行う。

参考文献

- 1) 社団法人日本コンクリート協会：高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う，p.3 (2002.1).
- 2) 中村允哉,渡部憲:再生骨材を使用した高靱性コンクリートの材料特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.335-340 (2011).
- 3) 浅井陽一,渡部憲,富田健太郎:高靱性セメント複合材料の既製杭根固め部への適用性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，p.537 (2007).
- 4) 富永晃司:建築基礎構造，オーム社，pp.143-145 (2014.9).
- 5) 高支持力杭の根固め部品質管理研究会：根固め部の未固結資料採取・調査・試験マニュアル(Ver.2.0)，pp.51-53 (2014.10).
- 6) 一般社団法人 コンクリートパイル建設技術協会：COPITA NO.51 号 (2018.4).
- 7) 浦野登志雄,山口信,村上聖,武田浩二：高流動コンクリートマトリックスを適用した繊維補強コンクリートの力学特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，p.249 (2008).