

高靱性繊維補強セメントミルクの埋込み杭工法への 適用性と補強効果

新名 正英^{*1} 渡部 憲^{*2} 岩崎 史英^{*3}

Applicability and the Reinforcement Effect of Ductile-fiber-reinforced Cement Milk to the Bored Precast Pile Method

by

Masahide NIINA^{*1}, Ken WATANABE^{*2} and Fumihide IWASAKI^{*3}

(Received on Mar. 31, 2020 and accepted on Jul. 24, 2020)

Abstract

With the recent achievement of high bearing capacity in the embedded pile method, the importance of ensuring the quality and performance of the foot protection part has increased. Although the bearing capacity has been increasing, the construction machines and materials used for the embedded pile method have not changed significantly. Especially, there is concern about damage due to cracking because of the lack of reinforcement in the foot protection part. Therefore, we tried to improve the toughness of the foot protection part using ductile-fiber-reinforced cement milk (FCM). In this study, we evaluate the workability using FCM by a mortar flow and pumping test. In addition, we verified the reinforcing effect by conducting a pile model experiment. As a result, it was found that FCM can be pumped sufficiently and is likely to be used at site. Furthermore, the pile model experiment showed that FCM offers significantly improved resistance to cracking and toughness compared with conventional cement milk.

Keywords: FCM, Foot protection part, Workability, Compressive strength, Bearing strength

1. はじめに

既製コンクリート杭工法は、近年、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。しかしながら、高支持力化が進む一方で、施工機械や使用材料については、従来工法から大きく変化していない。根固め部においても、特別に補強がされている訳ではないため、根固め部にひび割れが発生した場合、脆性的な破壊モードに直結することが懸念される。また、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なっており、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付与することが可能であると考えられる。しかしながら、繊維混入による作業性の低下は否めず、この問題を解決しなければ現場適用は困難であると言える。

本研究では、高靱性化した繊維補強セメントミルク(以下、FCMと略記)を埋込み杭工法の根固め部に適用することを見据え、その作業性および補強効果に関する基礎実験を実施している。本稿においては、現場適用時の作業性の評価のため、モルタルフローおよびポンプ圧送試験を行った。また、補強効果を確認するため、実寸の杭および根固め部の縮小モデルを用いた根固め部支圧試験を行ったので、その結果について報告する。

^{*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

2. 埋込み杭工法への適用性

筆者らは、これまでの検討において、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を行ってきた。その結果、繊維体積混入率(以下、 V_f と略記)が同じ場合、繊維径および繊維長が大きいものを使用した方が繊維径および繊維長が小さいものを使用した場合に比べ、流動性の評価指標であるフロー値の低下する割合が小さくなることに加え、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ことを確認している³⁾。そこで、本稿においては、更なる流動性改善のため、モルタルフロー試験を実施し、従来に比べ V_f を小さくした水準の流動性の確認を行った。それに加え、現場適用を想定した試料のポンプ圧送試験を実施し、作業性の評価を行った。

2.1 モルタルフロー試験

モルタルフロー試験の使用材料は、普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm³)、繊維 L(PVA 繊維, 径:0.2mm, 長さ:18mm, アスペクト比:90, 密度:1.30 g/cm³, 引張強度:975N/mm²)および繊維 S_m (鋼繊維, 径:0.2mm, 長さ:13mm, アスペクト比:65, 密度:7.85 g/cm³, 引張強度:2000N/mm²)とし、混和材料は分離低減剤(以下、SRA と略記)を使用した。なお、水セメント比は 60%とした。繊維混入については、繊維 L のみを使用する水準に加え、繊維 L と S_m を 7:3 の比率で混合使用した 2 水準を、 $V_f=2\%$ および $V_f=3\%$ とした計 4 水準とした。試験水準を Table 1 に示す。

練り混ぜは Fig. 1 に示す手順で行い、練り混ぜ終了後、

Table 1 Outline of specimens.

Specimen	Water-cement ratio (W/C) (wt.%)	Fiber volume fraction (V_f) (Vol.%)	Fiber volume mixing ratio (V_m) (L: S_m)
2FCM60-L-10	60	2.0	10:0
2FCM60-L: S_m -7:3			7:3
3FCM60-L-10		3.0	10:0
3FCM60-L: S_m -7:3			7:3

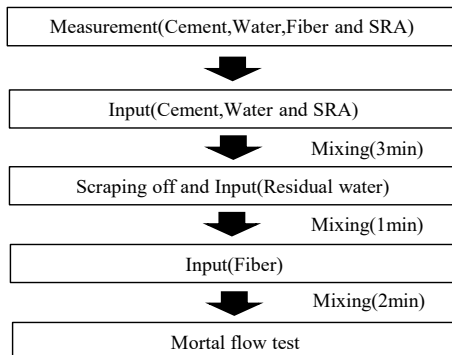


Fig. 1 Mixing method.

JIS R 5201 に準じてモルタルフロー試験を実施した。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、材料分離の有無を確認した。なお、SRA 添加率は、セメント質量の 2.5～4.0%の範囲において、0.5%ずつ添加量を変化させ試験を実施した。

2.2 ポンプ圧送試験

ポンプ圧送試験は、スクイズ式ポンプ(最大吐出圧: 1.5MPa)を用いて、10m のグラウトホース(内径: 38.1mm)に試料を圧送することで実施し、圧送開始からグラウトホース吐出口から試料が排出されなくなるまでの時間を測定した。なお、試験に用いた水準は、2FCM60-L: S_m -7:3, 3FCM60-L: S_m -7:3 の 2 水準に加え、水およびセメントミルク(以下、CM と略記)について実施した。試験概要を Fig. 2 に示す。また、力学特性把握のため、圧送前後の試料を採取し、Fig. 3 に示す 1 軸圧縮試験を行った。1 軸圧縮試験に用いた供試体は、 $\phi 100 \times 200$ mm の円柱供試体とし、試験時(材齢 28 日)まで標準養生を行った。



(a) Squeeze pump (b) Overall view

Fig. 2 Pumping test.

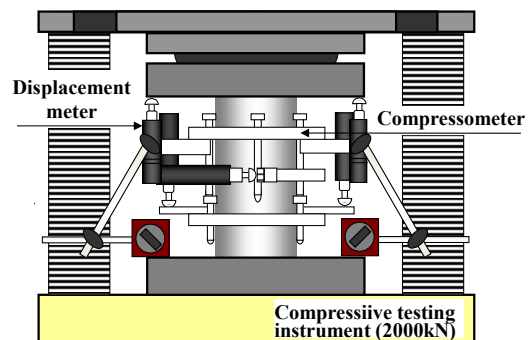


Fig. 3 Uniaxial compression test.

2.3 試験結果

(1) モルタルフロー試験

モルタルフロー試験によって得られたフロー値と SRA 添加率の関係を Fig. 4 に、フロー値と分離評価を Table 2 にそれぞれ示す。Fig. 4 および Table 2 によると、2FCM60-L-10 および 2FCM60-L: S_m -7:3 は、SRA 添加率が 3.0%の場合、ペースト分と繊維の材料分離が生じており、3.5 および 4.0%の添加率においては、材料分離は確認されなかった{Fig. 5 (a),(b)}。3FCM60-L-10 および

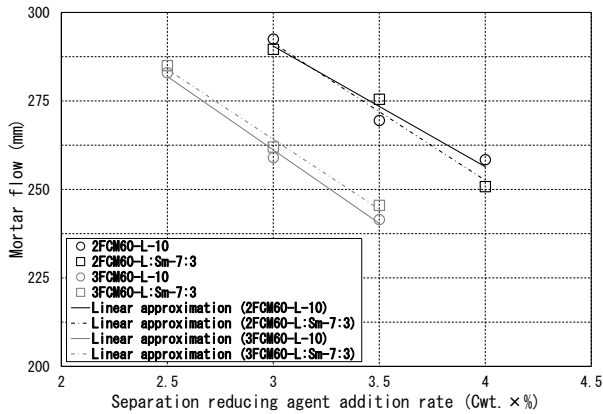


Fig. 4 Mortar flow – ratio of SRA to cement amount relationship.

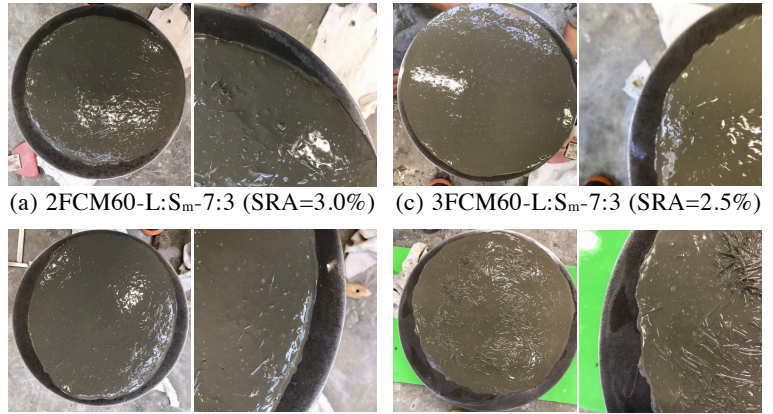


Fig. 5 Mortar flow. (Left Fig : general view, Right Fig : enlarged view)

Table 2 Mortar flow and Separation evaluation.

Specimen	Water-cement ratio (W/C) (wt.%)	Fiber volume fraction (V _f) (Vol.%)	Separation reducing agent addition (Sra) (Cwt.×%)	Flow (mm)	Separation evaluation※
2FCM60-L-10	60	2.0	3.0	293	×
			3.5	270	○
			4.0	258	○
2FCM60-L:Sm-7:3			3.0	290	×
			3.5	276	○
			4.0	251	○
3FCM60-L-10		3.0	2.5	283	×
			3.0	259	○
			3.5	242	○
3FCM60-L:Sm-7:3			2.5	285	×
			3.0	262	○
			3.5	246	○

※ ○: No separation ×: Separation

3FCM60-L:Sm-7:3 については、SRA 添加率が 2.5% の場合、ペースト分と繊維の材料分離が生じており、3.0 および 3.5% の添加率においては、材料分離は確認されなかった {Fig. 5 (c),(d)}。これより、試験を実施した水準の範囲においては、繊維体積混合比(以下、 V_m と略記)によらず、 $V_f=2\%$ の場合の材料分離を生じない SRA の最小添加率は 3.0～3.5% の範囲内にあることがわかった。また、 $V_f=3\%$ の場合は、2.5～3.0% の範囲内であり、 V_f を小さくすると材料分離を抑制するために SRA を多く添加する必要があることがわかった。

モルタルフロー値に着目すると、SRA 添加率が 3.5% の場合、2FCM60-L-10 が 270mm、2FCM60-L:Sm-7:3 が 276mm、3FCM60-L-10 が 242mm、2FCM60-L:Sm-7:3 が 246mm となっており、 $V_f=2\%$ の水準が $V_f=3\%$ の水準に対し、おおよそ 12% 程度大きい値を示している。また、 V_m の相違により、フロー値には明確な差は確認されなかったものの、繊維 S_m を混合した水準の方が若干の増加傾向にも見てとれる。以上より、FCM の流動性改善には、アスペクト比の小さい繊維を使用するというこれまでの知見に加え^{3),4)}、 V_f の低減が効果的であることを確認した。

(2) ポンプ圧送試験

ポンプ圧送試験結果を Table 3 に、圧送後の試料の状況を Fig. 6 に示す。なお、各水準における SRA 添加率は、

Table 3 Pumping test results.

Specimen	Pumping	Separation reducing agent addition rate (SRA) (Cwt.×%)	Flow (mm)	Sample volume (l)	Time (sec)	Discharge amount (l/min)	Compressive strength σ_B (N/mm ²)	Young's modulus E (kN/mm ²)
Water	—	—	—	100	48.6	123.5	—	—
CM60	Before	2.0	—	100	49.6	121.0	—	—
	After							
2FCM60-L:Sm-7:3	Before	3.4	292	60	38.0	94.7	28.2	9.88
	After		300				25.4	9.17
3FCM60-L:Sm-7:3	Before	2.7	261	60	39.7	90.7	26.9	9.86
	After		269				28.7	10.06



Fig. 6 Sample after pumping.

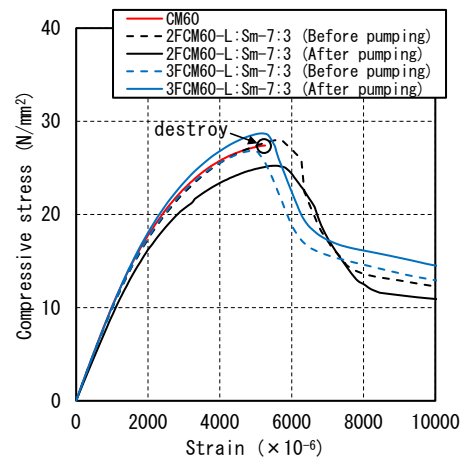


Fig. 7 Uniaxial compression test results.

Fig. 4 の結果を参考に、試験前にフロー試験を行って調整を行った。また、セメントミルクにおいても SRA を 2% 添加した試料を用いた。

Table 3 より、水とセメントミルクの吐出量については、大きな差異は確認されず、ほぼ同等であると考え

られる。2FCM60-L:S_m-7:3 と 3FCM60-L:S_m-7:3 の吐出量に注目すると、セメントミルクの吐出量に比べ、2FCM60-L:S_m-7:3 が 88%、3FCM60-L:S_m-7:3 が 78% の値となった。これより、試験を実施した両水準とも、セメントミルクに比べると作業性が低下しているといえるが、グラウトホース内で繊維が詰まり圧送不可能となるような現象は発生せず、圧送可能であることが確認できた。また、V_fを低減し、フロー値が大きくなることにより、圧送時間が短くなることがわかった。

しかしながら、Fig. 6 より、3FCM60-L:S_m-7:3 の試料が圧送後においても材料分離を生じていないのに対し、2FCM60-L:S_m-7:3 の試料は、ペースト分と繊維が分離傾向であることが確認された。これは、SRA 添加率が大きい水準は、試料の粘性が大きく、グラウトホース内での摩擦の影響を大きく受けたことが原因であると考えられる。

各試料の 1 軸圧縮試験結果を Fig. 7 に示す。なお、比較のため、既往の研究⁹⁾において実施したセメントミルクの圧縮試験結果を合わせて図中に示した。Table 3 および Fig. 7 によると、圧送前の圧縮強度は、セメントミルクが 27.4(N/mm²)、2FCM60-L:S_m-7:3 が 28.2(N/mm²)、3FCM60-L:S_m-7:3 が 26.9(N/mm²)であった。それに対し、圧送後の圧縮強度は、2FCM60-L:S_m-7:3 が 25.4(N/mm²)、3FCM60-L:S_m-7:3 が 28.7(N/mm²)であり、V_fの相違により、圧送前後の強度増減が異なる結果となった。ここで、V_f=2% の試料は、前述のとおり、圧送後の材料分離が確認されている。したがって、V_f=2% の試料は、V_f=3% の試料に比べ SRA の添加率が大きく粘性が高いため、グラウトホース内にセメントペーストがより多く付着してしまったことが強度低下に繋がったものと推測される。しかしながら、一般的な高支持力杭工法の根固め部に必要とされる 15~20(N/mm²)程度の強度⁹⁾は満足しているのに加え、セメントミルク場合、圧縮強度に達した直後に脆性破壊しているのに対し、FCM では圧縮強度到達以降も脆性破壊せず、圧縮応力を保持しながらひずみが増大しており、圧縮靱性の改善効果が確認できた。

以上より、FCM の流動性改善には、V_fを小さくすることやアスペクト比の小さい繊維を使用することが有効であり、V_fの低減が最も効果的であることがわかった。しかしながら、V_f=2% とした水準においては、圧送性の向上が確認されたものの、圧送後の試料については材料分離と圧縮強度の低下が確認された。本実験では、圧送時のグラウトホース長は 10m としているが、現場適用時は 5~10 倍程度の長さとなる可能性も想定されるため、圧送距離を更に長くした際の検討が今後の課題である。

3. FCM の補強効果

杭の鉛直支持力は、杭体の強度、地盤の強度、根固め部の強度のうち、最も小さいもので決定される。本研究においては、FCM の根固め部適用時の補強効果の検証のため、杭根固め部が破壊することで杭の鉛直支持力が決定するケースを想定し、実寸の縮小モデルを用いた根固め部の支圧試験により評価を行った。

3.1 試験概要

根固め部支圧試験は、Fig. 8 に示す実寸の 1/10 縮小モデルで実施した。ここで、支圧試験に用いた杭モデルは、杭径 φ1000mm の既製杭を想定し、鋼製の中空型の円柱(φ100×50mm、板厚:13mm)とした。また、根固め部モデルは、既存の埋込み杭工法³⁾を参考に、根固め部径(D2)が杭径(D1)の 1.25~2.0 倍となる範囲で、根固め部径を φ125、150 および 200mm の 3 水準に設定した。根固め部高さは、既往の研究⁷⁾を参考に D1 の 1.5 倍の 150mm に設定した。根固め部モデル試験体は、セメントミルクのみ(以下、CM と略記)、PVA 繊維(L)を混入させた FCM および PVA 繊維と鋼繊維(S_m)を 7:3 で混入させた FCM の計 3 水準を各 3 体ずつ作製し、試験時まで標準養生(材齢 28 日)とした。なお、杭モデルの中空部は、載荷時も充填することではなく、杭先端を開放した状態で試験を行った。

計測項目は、荷重、杭頭および根固め部変位に加え、Fig. 9 に示す埋込みゲージ(根固め部モデル中央 1 箇所配置)により測定する根固め部の内部ひずみとした。また、強度管理用試験体として、1 軸圧縮試験用に 100φ×200mm の円柱供試体を 6 体作製した。作製した試験体の材料特性を Table 4 に示す。

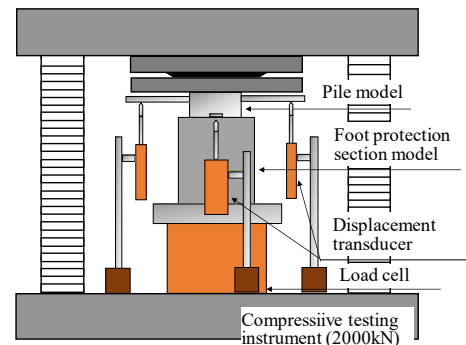


Fig. 8 Foot protection part bearing test.

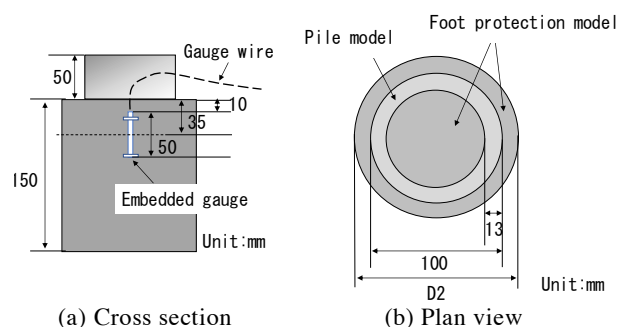


Fig. 9 Specimen overview.

Table 4 Material test results.

Specimen	Water-cement ratio (W/C) (wt.%)	Fiber volume fraction (V _f) (Vol.%)	Fiber volume mixing ratio (V _m) (L:Sm)	Compressive strength F _c (N/mm ²)	Young's modulus E (kN/mm ²)
CM	—	—	—	26.9	9.17
FCM-L-10	60	3.0	10:0	23.6	8.50
FCM-L:Sm-7:3	—	—	7:3	24.3	9.28

3.2 試験結果

(1) 荷重-杭頭変位および内部ひずみ関係

根固め部支圧試験結果を Table 5 に示す．ここで，支圧強度 F_B は，最大荷重を支圧面積(杭モデル外径から算出した面積－中空部面積)で除して算出した．また，実験結果に加え，六車・岡本らのコンクリートを対象とした実験式⁸⁾を杭径($D1$)と根固め部径($D2$)に改めた式{式(1)}およびプレストレストコンクリート造建築物の性能評価型設計施工指針(案)・同解説⁹⁾の PC 基準における既往の実験結果を基にした算定式{式(2)}による計算結果を合わせて示した．

Table 5 によると，支圧強度は根固め部径が大きくなると共に増加し，CM に比べ PVA 繊維を混入した水準が大きい値となり，鋼繊維を混入した水準は更に大きい値を示している．また，式(1)および式(2)の計算結果が CM の実験結果を良好に評価しているのに対し，FCM の実験結果については過小評価する結果となった．

Table 5 Bearing test results.

Specimen		Maximum load	Pile head displacement at Pmax	Bearing strength experiment result	Muguruma Okamoto formula	AIJ formula
		P_{max} (kN)	δ (mm)	F_B (N/mm ²)	F_{B1} (N/mm ²)	F_{B2} (N/mm ²)
CM	φ125	133	0.64	37.0	32.6	33.6
	φ150	162	0.64	46.0	38.1	40.3
	φ200	188	0.75	53.0	48.8	47.2
FCM-L-10	φ125	151	2.11	42.0	28.6	29.5
	φ150	182	2.54	51.0	33.4	35.4
	φ200	253	4.59	71.0	42.8	47.2
FCM-L:Sm-7:3	φ125	180	2.49	51.0	29.4	30.4
	φ150	219	3.08	62.0	34.4	36.4
	φ200	326	7.57	92.0	44.1	48.6

$$F_{B1} = F_c \cdot (D2/D1)^{0.86} \quad (1)$$

ここに，

F_{B1} : 式(1)より得たコンクリートの支圧強度(N/mm²)

F_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

$D1$: 杭径(D1)

$D2$: 根固め部径(D2)

$$F_{B2} = F_c \cdot \sqrt{A_c/A_1} \quad (2)$$

ここに，

F_{B2} : 式(2)より得たコンクリートの支圧強度(N/mm²)

F_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

A_c : コンクリートの支圧面積(mm²)

(杭モデルの断面積)

A_1 : コンクリートの支圧面積(mm²)

(根固め部モデルの断面積)

Fig. 10 に支圧試験で得られた荷重-杭頭変位関係，Fig.11 に荷重-内部ひずみ関係を示す．Fig.10 より，CM は根固め部径によらず杭頭変位が 0.6～0.7mm 程度で最大荷重となり，急激に荷重が低下したのに対し，FCM は杭頭変位が 0.6～0.7mm 程度で P- δ 曲線の勾配が緩やかになった後も荷重が増加し，最大荷重到達以降も緩やかに荷重が低下していることが確認できる．また，Fig. 11 においても，CM に比べ，FCM がより大きな荷重を下方へ伝達していることが読み取れる．これは，CM が Fig. 12(a)のように，載荷板底面からの斜めひび割れ発生と同

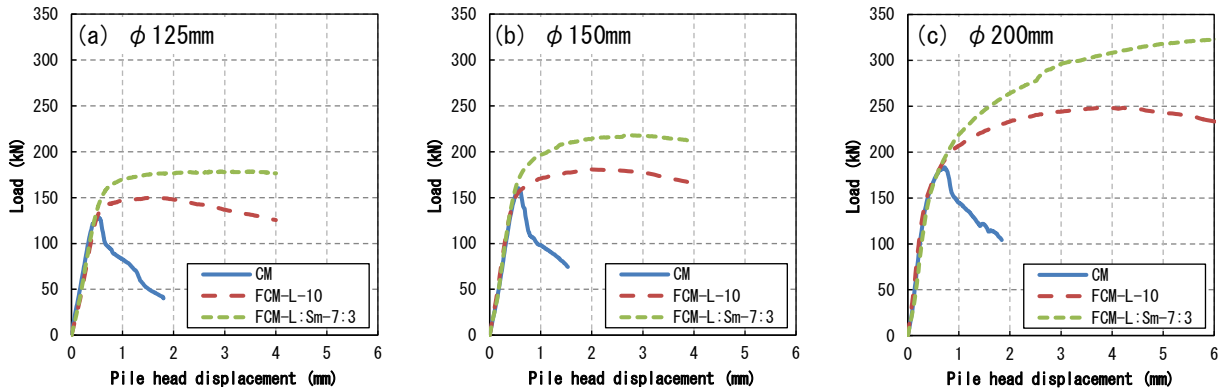


Fig. 10 Load - pile head displacement relationship.

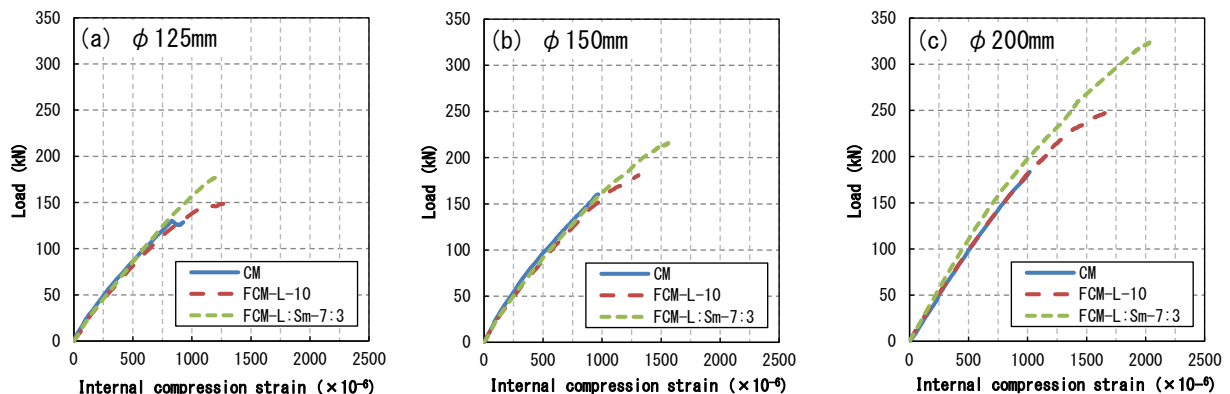


Fig. 11 Load - internal compression strain relationship.

時に支圧破壊したのに対し、FCM は Fig. 12(b)および Fig. 12(c)から確認できるように、ひび割れに対して繊維が抵抗したことで、斜め方向押し抜きせん断破壊となったためであると考えられる⁹⁾、これより、CM に繊維を混入することで、杭先端支持力の向上が期待できるだけでなく、根固め部の破壊靱性改善が確認できた。

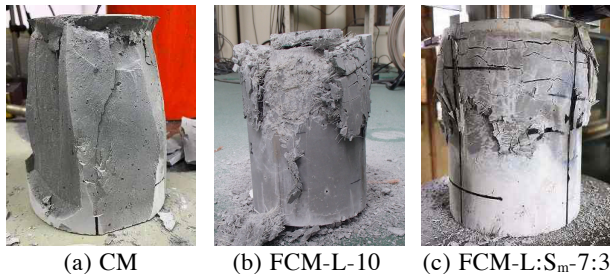


Fig. 12 Specimens after test.

(2) 支圧強度比-根固め部径関係

Fig. 13 に支圧強度比(F_B/F_C)—根固め部径関係を示す。これより、根固め部径を $\phi 125\text{mm}$ から $\phi 200$ まで大きくすると、支圧強度比はCMで1.4から2.0、FCM-L-10は1.8から3.0、FCM-L:Sm-7:3は2.1から3.8に増加した。これは、根固め部径を拡大して築造することで、より大きな杭先端支持力を確保する高支持力杭工法において、FCMの適用は、根固め部径の拡大効果をより効率的に得ることが可能であることを示している。

以上より、根固め部にFCMを適用することで、CMよりも優れた杭先端支持力と破壊靱性を確保できることが確認でき、その補強効果は、CMにPVA繊維のみを混入するより、PVA繊維と鋼繊維を混合使用した方がより大きいことが確認できた。また、FCMを用いることで、従来工法より根固め部径を小さくしても同様の杭先端支持力を得ることが可能であることを示した。

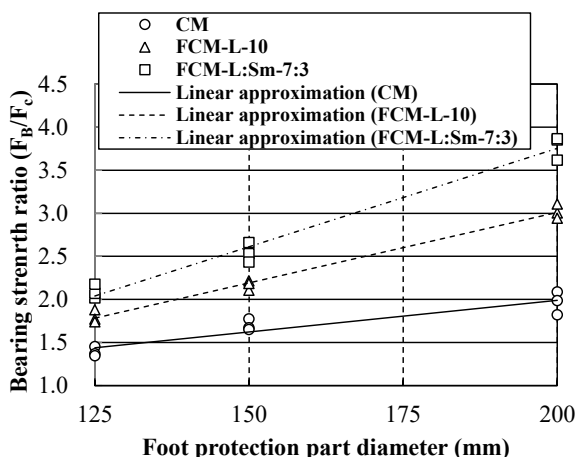


Fig. 13 Bearing strength ratio - foot protection part diameter relationship.

4. まとめ

本稿においては、埋込み杭工法へのFCMの適用を目的とし、その作業性と補強効果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) FCMの流動性改善には、 V_f を小さくすることやアスペクト比の小さい繊維を使用することが有効であり、 V_f の低減が最も効果的である。
- 2) $V_f=2\%$ とした水準においては、圧送性の向上が確認されたものの、圧送後の試料については材料分離と圧縮強度の低下が確認された。
- 3) 根固め部にFCMを適用することで、CMよりも優れた杭先端支持力と破壊靱性を確保できることが確認でき、その補強効果は、CMにPVA繊維のみを混入するより、PVA繊維と鋼繊維を混合使用した方がより大きいことが確認できた。
- 4) FCMの適用は、根固め部径の拡大効果をより効率的に得ることが可能であり、従来工法より根固め部径を小さくしても同様の杭先端支持力を得ることが可能であることを示した。

FCMの作業性は $V_f=2\%$ とすることで向上したが、圧送時の摩擦の影響による強度低下を生じた可能性があるため、今後は圧送距離がより長い場合の検証を行うのに加え、 $V_f=3\%$ と同様の根固め部支圧試験を行っていく予定である。

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) Niina, M, Watanabe, K, Mamoru, F, Kajiwarra, D and Kadera, M, “Study on Fluidity and Mechanical Characteristics of Fiber-Reinforced Cement Milk”, Proc 29th Int Offshore and Polar Eng Conf, Honolulu, Hawaii, USA, ISOPE, pp.2402–2408 (2019).
- 4) 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).
- 5) 新名正英, 渡部憲, 藤井衛: 繊維補強セメントミルクの流動性と力学特性，日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)，pp.161-162 (2019.9).
- 6) 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.45-59 (2014.10).
- 7) 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).
- 8) 近藤泰夫, 板静雄: コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，pp.300-301, (1963.10).
- 9) 日本建築学会：プレストレストコンクリート造建築物の性能評価型設計施工指針(案)・同解説，(2015).