

高靱性セメント複合材料を用いた杭根固め部の力学特性について

渡部 憲^{*1}・浅井 陽一^{*2}・富田 健太郎^{*2}・加藤 雄介^{*3}

Mechanical Property of the Pile-Tip Protection Using the Ductile-Fiber-Reinforced Cementitious Composite

by

Ken WATANABE^{*1}, Yoichi ASAI^{*2}, Kentaro TOMITA^{*2} and Yusuke KATO^{*3}

(Received on Mar. 31, 2007, accepted on July 4, 2007)

Abstract

Recently, the research and development of ductile-fiber-reinforced cementitious composites (DFRCC) superior to existing composites has been actively conducted. DFRCC is a cementitious composite material reinforced with fibers, and it exhibits crack-dispersing properties under tensile, flexural or compressive stress. The use of DFRCC as an energy absorption device will reduce the seismic response of structures. Using DFRCC instead of concrete will also enhance the durability of reinforced concrete structures. In this study, to investigate the applicability of DFRCC to the pile-tip protection of precast piles, experiments and the finite element analysis of precast piles were conducted. Results suggest that the use of DFRCC for the pile-tip protection of precast piles improves the bearing ductility of the tip of precast piles. The present finite element analysis was able to simulate the effect of the use of DFRCC for the pile-tip protection of precast piles.

Keywords: Bearing Strength, Ductile-Fiber-Reinforced Cementitious Composite, Recycled Fine Aggregate, Precast Pile, Finite Element Method

1. はじめに

既製コンクリート杭の施工法は、プレボーリング拡大根固め工法が主流である。この工法は、あらかじめ地盤を掘削し、セメントミルク(根固め液、杭周固定液)を注入、攪拌し根固め部および杭周固定部を築造する。その後、杭を設置する(Fig. 1 参照)。近年、鉛直支持力性能向上のため、杭先端の根固め部を杭先端部径(D1)の1.5倍程度に拡大して築造することにより、大きな杭先端支持力を発揮させる工法が開発されている。Fig. 1の例は、杭先端から2.0D1区間を、軸径D3より拡張した杭を示しており、根固め部は、長さ3.5D1(杭先端部から下方に1.5D1、上方に2.0D1)、根固め径(D2)は杭径の1.5D1である。また、杭は、杭先端部径(D1)程度の距離を支持層に貫入するように設定している。杭先端支持力(Rp)は、杭と根固め部の付着力(R1)、杭先端の抵抗力(R2)および地盤支持力(R3)など多くの複合的要因で決定される。

根固め部の支持力機構は、杭、根固め部および地盤の複合的な要因で決まる。根固め部の支持力機構の研究は、山崎らの研究¹⁾、筆者らのFEM解析を用いた研究^{2,3)}などで進められているが、根固め部中の杭の付着力が支持力に与える影響や、根固め部構成材料の圧縮および引張軟化挙動が破壊性状に与える影響等、不明な点が多い。

ところで、最近、既存の繊維補強コンクリートをはるかに上回るひび割れ分散性や破壊靱性を有する「高靱性セメント複合材料(以下、DFRCCと略記)」が注目を集めている⁴⁾。DFRCCは、

コンクリートもしくはモルタル中にビニロン繊維等の短繊維を混入し、圧縮応力下における破壊靱性および引張応力下における引張強度や破壊靱性が著しく改善された材料である。一方、根固め部を構成する材料(モルタル)は脆性破壊材料である。根固め部の破壊が想定されるような非常に堅い支持層に根固め部を設置する場合には、DFRCCを根固め部に適用し、破壊靱性を改善することにより、支持力性能の向上が期待できるものと思われる。実施工時には、DFRCCは、根固め部(杭先端部から下方に1.5D1、上方に2.0D1)に施工されることとなる。

本研究では、杭先端から下方の根固め部(Fig. 1の斜線部分)に着目し、根固め高さを一定とし径を要因とした支圧実験を実施した。この中で、根固め部に天然細骨材および再生細骨材を

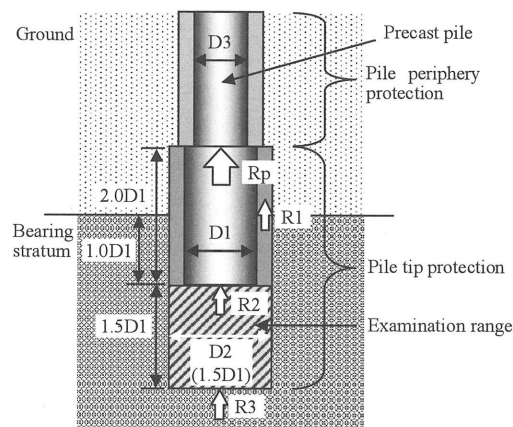


Fig. 1 Precast pile and pile tip protection

* 1 工学部建築学科准教授

* 2 株式会社トーヨーアサノ

* 3 工学研究科建築学専攻博士課程前期

Table 1 Outline of specimens

Pile tip protection specimen No.	Pile tip protection specimen				Strength test						
	Shape				Name of mix	Teflon sheet	Compressive strength (N/mm ²)	Vertical strain at compressive strength (μ)	Young's modulus (kN/mm ²)	Poisson's ratio	Split tensile strength (N/mm ²)
	Diameter of pile: D1 (mm)	Height of pile (mm)	Diameter of pile tip protection: D2 (mm)	Height of pile tip protection: H (mm)							
1	100	50	125	150	NM	○, ×	34.9	4225	16.0	0.213	2.61
2			150								
3			175								
4			200								
5			150		NMDFRCC	○	27.0	4723	10.9	0.203	2.42
6			200								
7			150								
8			200								

Table 2 Mix proportions

Name of mix	No. of pile tip protection specimen	Water-cement ratio W/C (wt.%)	Sand-cement ratio S/C (wt.%)	Fiber volume fraction (Vol.%)	Mass per unit volume (kg/m ³)				Admixture (Cwt.%)
					W	C	S1	S2	
NM	1~4	55.0	97.8	0.0	441	802	549	235	0.0
NMDFRCC	5,6		60.0	3.0	470	855	359	154	1.5
MRMDFRCC	7,8		465	846	254	254	1.5		

C: Ordinary Portland cement (Density: 3.16g/cm³)

S1: Crushed sand (Density: 2.64g/cm³, Percentage of absorption: 1.46%, Fineness modulus: 3.03, Maximum size: 5.0mm) for NM and NMDFRCC,

Coarse recycled fine aggregate (Density: 2.51g/cm³, Percentage of absorption: 4.71%, Fineness modulus: 3.18, Maximum size: 5.0mm) for MRMDFRCC

S2: Pit sand (Density: 2.56g/cm³, Percentage of absorption: 1.78%, Fineness modulus: 1.79, Maximum size: 5.0mm) for NM and NMDFRCC,

Medium recycled fine aggregate (Density: 2.47g/cm³, Percentage of absorption: 5.03%, Fineness modulus: 2.34, Maximum size: 5.0mm) for MRMDFRCC

The mixing proportion of S1 and S2 are 7:3 for NM and NMDFRCC, 5:5 for MRMDFRCC.

Admixture: Reducing segregation admixture

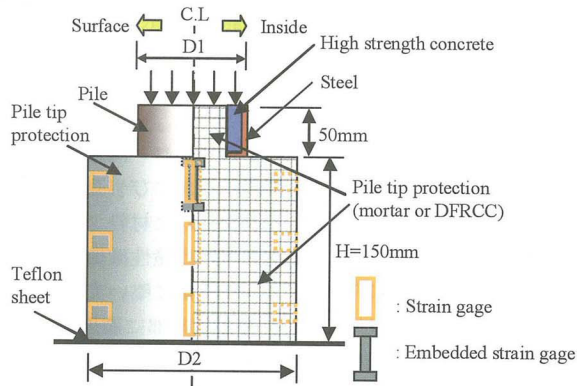


Fig. 2 Pile tip protection specimen

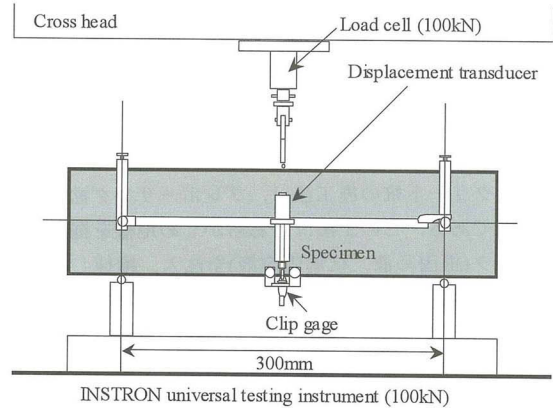


Fig. 4 3-point loading system

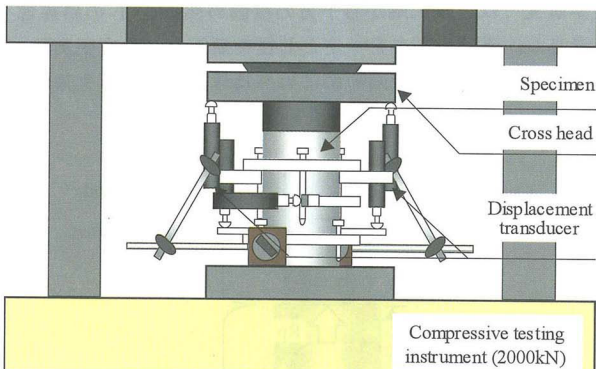


Fig. 3 Compressive loading system

用いた DFRCC を使用した場合の影響についても検討した。また、実験結果を対象とした非線形有限要素解析 (以下、FEM 解析と略記) についても併せて実施した。

2. 実験方法

2.1 支圧実験

実験の概要および根固め部の調合を Table 1 および Table 2 に示す。また、根固め試験体(杭および根固め部により構成)の概要を Fig. 2 に示す。杭は中空の鋼管コンクリート複合杭とした。杭はφ100(D1)×50mm(ただし、D1の実測値は101.6mm)である。根固め部は、高さ(H)を150mm(1.5D1)、径(D2)を125(1.25D1)、150(1.5D1)、175(1.75D1)、200mm(2.0D1)とした。根固め部では、実施工においてセメントミルクを注入後、先端地盤と攪拌混合するため、1~3割程度の砂が混入される。従って、プレーンモルタル(NM)は、水セメント比(W/C)=55%、細骨材の混入率を体積比で30%とし、砕砂と山砂を質量比で7:3の割合で混合使用した。また、天然細骨材を使用したDFRCC(NMDFRCC)では、W/C=55%、ビニロン繊維体積混入率=3.0%、砕砂と山砂を質量比で7:3の割合で混合使用した。さらに、再生細骨材を使用したDFRCC(MRMDFRCC)では、W/C=55%、ビニロン繊維体積混入率=3.0%、再生細骨材粗めと再生細骨材中目を質量

Table 3 Outline of Analysis

Analytical model	Specimen to be analyzed	Pile tip protection			Compressive yield criterion				
		Diameter (mm)	Height (mm)	Type of aggregate					
NMDFRCC150VM	No. 5 (teflon)	150	150	○	Natural	Von-Mises			
NMDFRCC150DR						Drucker-Prager			
NMDFRCC200VM	No. 6 (teflon)	200				○	Natural	Von-Mises	
NMDFRCC200DR								Drucker-Prager	
MRMDFRCC150VM	No. 7 (teflon)	150		150	○	Recycled	Von-Mises		
MRMDFRCC150DR							Drucker-Prager		
MRMDFRCC200VM	No. 8 (teflon)	200					○	Recycled	Von-Mises
MRMDFRCC200DR									Drucker-Prager
NM150VM	No. 2 (teflon)	150	150		×	Natural	Von-Mises		
NM150DR							Drucker-Prager		
NM200VM	No. 4 (teflon)	200					×	Natural	Von-Mises
NM200DR									Drucker-Prager

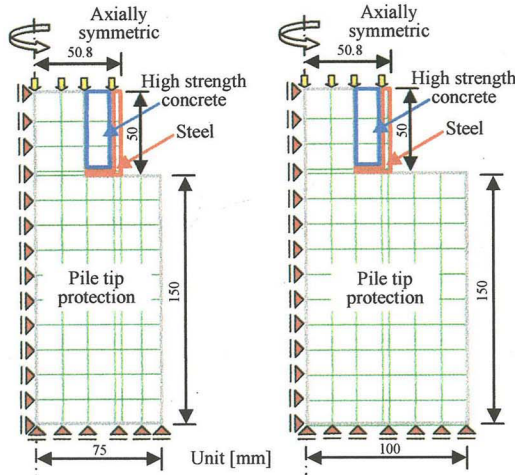


Fig. 5 Finite element division

比で5:5の割合で混合使用した。なお、杭の中空部は、根固め部と同一材料とした。また、各DFRCCの繊維体積混入率は、過去の実績（ビニロン繊維が効果的に作用する混入率）より決定した。

支圧実験は、根固め部の強度が30N/mm²となる材齢2週で実施した。計測項目は、荷重、杭頭変位、根固め部変位、根固め内部ひずみおよび根固め部表面ひずみである。なお、載荷時において、試験体下端面を、直接、載荷盤に接触させた場合（テフロン無）および試験体下端面と載荷盤の間にテフロンシート設置した場合（テフロン有、実際には根固め部底面－地盤間の摩擦係力が考慮されるべきであるが、基礎的な検討項目の一つとして、摩擦係数がない場合を想定）の2種類の載荷を実施した。各試験体は、モルタル打設後1日で脱型し、所定材齢まで実験室内で湿布養生した。

2.2 破壊靱性実験

本研究では、支圧実験と同時にプレーンモルタルおよびDFRCCの圧縮軟化挙動および引張軟化挙動を計測するために、圧縮破壊および曲げ破壊実験を実施した。

まず、圧縮破壊実験では、φ100×200mm円柱試験体を使用し、一軸圧縮載荷を行った。載荷計測方法をFig. 3に示す。計測項目は、荷重、縦・横ひずみおよび載荷盤間変位である。圧縮軟化挙動の評価は、渡部らの示す手法⁹⁾に準じて行った。なお、得られる圧縮軟化挙動は2直線近似圧縮応力－塑性変形関係である。

次に、曲げ破壊実験では、NMについては文献⁶⁾に準じ、100×100×400mm角柱試験体を使用し、切欠き梁3点曲げ試験を行い、引張軟化挙動を評価した。ただし、切欠き深さは50mmとした。載荷計測方法をFig. 4に示す。計測項目は、荷重、中央部たわみおよび切欠き開口変位である。なお、得られる引張軟化挙動を大岡等の手法⁷⁾により単純化し、3直線近似結合応力（引張応力）－開口変位関係となる。NMDFRCCおよびMRMDFRCCについては文献⁸⁾に準じ、100×100×400mm角柱試験体を使用し、切欠き無し梁3等分点曲げ試験を行い、引張軟化挙動を評価した。計測項目は、荷重、中央部たわみおよび等曲げ区間内上・下部の横方向変位である。なお、得られる引張軟化挙動は引張強度以降、引張応力を終局ひずみまで一定値（引張強度）とするものである。

3. 解析方法

FEM解析の概要をTable 3に示す。また、根固め試験体の要素分割をFig. 5に示す。

杭および根固め部の各要素は、4節点アイソパラメトリック軸対象ソリッドリング要素を用いてモデル化した。杭体は弾性体とし、鋼材部分は、ヤング係数を200kN/mm²、ポアソン比を0.30、また、高強度コンクリート部分は、ヤング係数を40kN/mm²、ポアソン比を0.20と設定した。根固め部には、Table 1に示す材料定数を与えた。圧縮側は、圧縮強度までを圧縮強度の1/3を折れ点とする2直線モデル、圧縮強度以降をFig. 6(a)に示す、2.2節の手法により得られた圧縮軟化挙動とした。圧縮軟化挙動の塑性変形は、要素面積を2倍した値の平方根で除してひずみに変換して用いた。引張側は、引張強度までを弾性、引張強度以降をFig. 6(b)および(c)に示す、2.2節の手法により得られた引張軟化挙動とした。NMの引張軟化挙動の開口変位は、要素面積を2倍した値の平方根で除してひずみに変換して用いた。DFRCCでは終局ひずみ値以降、前述の手法では負勾配が得られない。そのため解析では、終局ひずみ以降を終局ひずみと同値で応力0となるように負勾配を設定して用いた。

圧縮側の塑性基準は、Von Mises(以下、VM)またはDrucker-Prager(以下、DR)(内部摩擦角および膨張角を30°)とし、引張側をテンションカットオフとした。なお、ひび割れは分布ひび割れモデルとした。

解析では、鉛直方向の等変位増分を杭頭部の各載荷節点に負荷する変位制御型の単調漸増載荷を行った。非線形解析の求解法は、Newton-Raphson法を用いた。

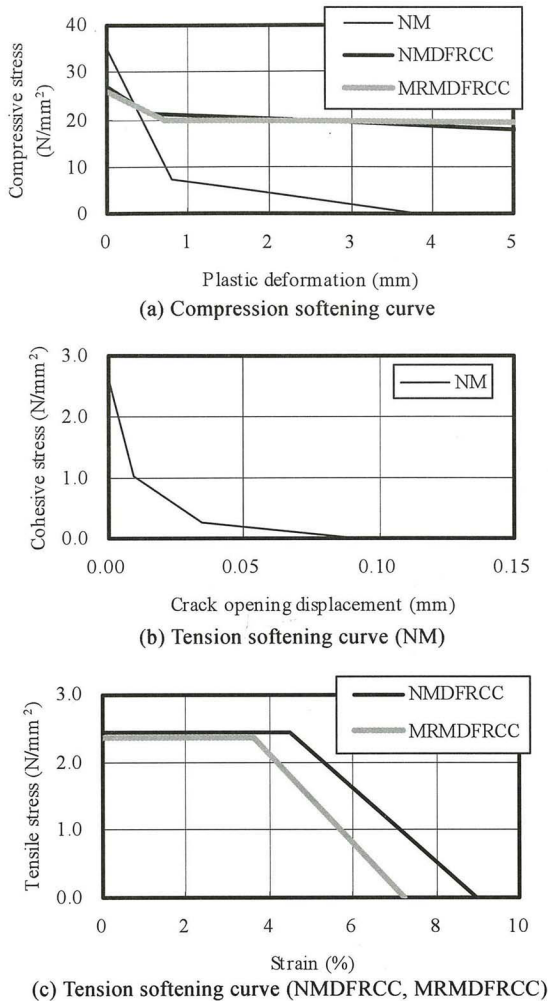


Fig. 6 Softening curve

4. 結果と考察

4.1 支圧強度比—根固め部径関係

Fig. 7 に、支圧実験により得られた支圧強度比—D2 関係を示す。支圧強度比とは、最大荷重を杭面積で除した強度 (F_B) を、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 実験時強度管理用円柱試験体の圧縮強度 (F) で除した値である。図中には、支圧強度に関する六車・岡本らのコンクリートを対象とした実験式⁹⁾および NSP 協会で行った石膏を利用した根固め液の実験式¹⁰⁾の結果を、それぞれ併記する。なお、両式は $D1$ と $D2$ を用いた式に改めて示している。

まず、NM を根固め部に使用した場合の結果に注目すると、テフロン無の場合、 $D2$ の増大に伴い支圧強度比が増加する傾向にある。一方、テフロン有の場合、 $D2$ の増大に伴う支圧強度比の増加は確認できない。なお、 $D2$ が $150 \sim 200\text{mm}$ の範囲では、支圧強度比は、テフロン無 > テフロン有となっている。これらのことは、根固め部底面と載荷盤間の摩擦力に起因していると考えられる。

次に、DFRCC を根固め部に使用した場合の結果に注目すると、テフロン有の場合でも $D2$ の増大に伴い支圧強度比が増加している。これは、ビニロン繊維が根固め部に作用する引張力に対し、有効に抵抗したためと思われる。なお、骨材種類の異なる DFRCC を根固め部に使用した場合の結果を比較すると、 $D2$ に

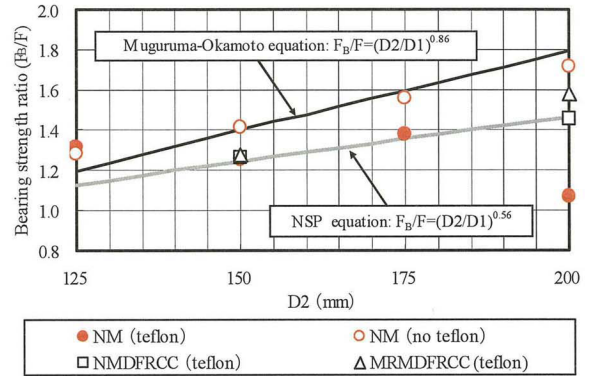


Fig. 7 Bearing strength ratio-D2 relationship (experiment)

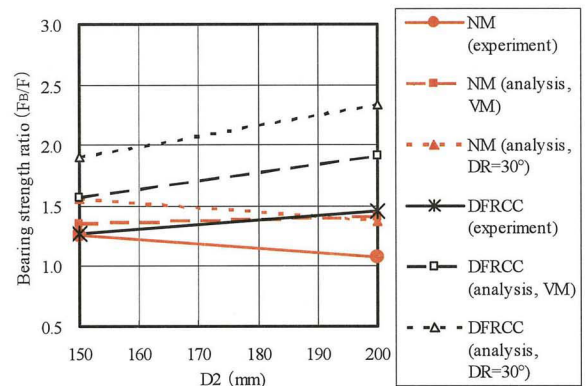


Fig. 8 Bearing strength ratio-D2 relationship (analysis)

係わらず、ほぼ同じ値を示しており、骨材種類の相違による大きな差は見られない。

Fig. 8 に、実験および FEM 解析で得られた支圧強度比— $D2$ 関係(テフロン有)を示す。NM を対象とした解析結果では、 $D2$ が増大しても支圧強度比は、ほぼ一定もしくは下がる傾向にある。しかしながら、NMDFRCC を対象とした解析結果では、 $D2$ の増大に伴い支圧強度比が増加している。この傾向は、実験結果と概ね近似している。

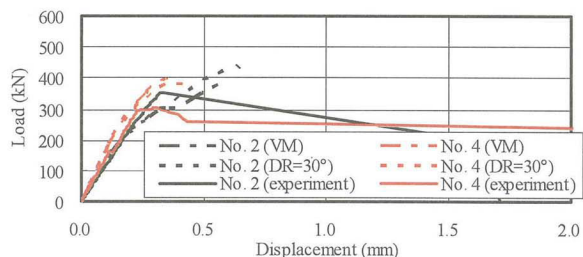
4.2 荷重—杭頭変位関係

Fig. 9 に、実験および FEM 解析で得られた荷重—杭頭変位関係(テフロン有)を示す。DFRCC を根固め部に使用した場合の実験結果は、NM を根固め部に使用した場合の実験結果と比較して、最大荷重後、急激な荷重低下もなく、延性的な変形状を示している。また、NMDFRCC を根固め部に使用した場合の実験結果と MRMDFRCC を根固め部に使用した場合の実験結果には、変形状に大きな差は認められない。なお、いずれの解析結果も実験結果と比較して最大荷重を高め評価しているものの、根固め部に DFRCC を使用した場合の補強効果を、本 FEM 解析においても、ある程度再現できている。

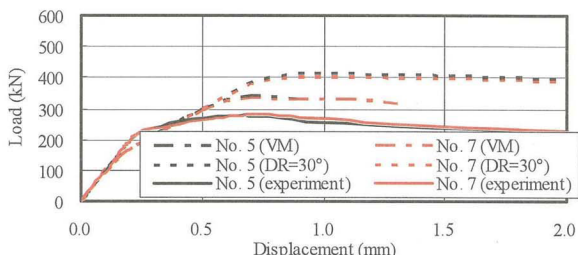
4.3 破壊状況

Fig. 10 に、実験により得られた、NM を根固め部に使用した試験体の、最終破壊状況の一例(No.2 (テフロン有)試験体)を示す。いずれの $D2$ においても杭先端直下に $D1$ と同程度の深さを持つコーン領域が形成されていた。

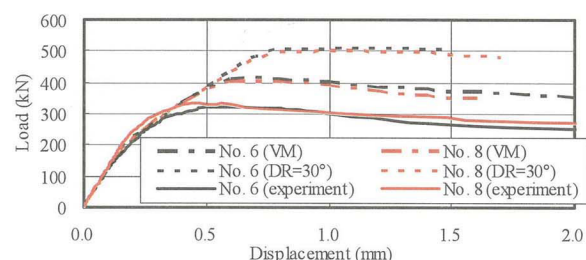
No.2 (テフロン有)試験体を対象とした FEM 解析(NM150VM)により得られたひび割れひずみ図を、Fig. 11 に示す。図中の丸



(a) No. 2 (D2=150mm) and No. 4 (D2=200mm), NM



(b) No. 5 (NMDFRCC) and No. 7 (MRMDFRCC), D2=150mm



(c) No. 6 (NMDFRCC) and No. 8 (MRMDFRCC), D2=150mm

Fig. 9 Load-displacement relationship

印は半径方向、直線は円周方向のひび割れであり、直線の方向は、ひび割れの方向を示している。解析結果からも、杭先端直下に実験結果と同様なコーン領域が確認できる。

Fig. 12 に、DFRCC を根固め部に使用した試験体の、最終破壊状況の一例(No.5 (テフロン有)試験体)を示す。最終的には、1, 2 箇所の円周方向のひび割れ幅が拡大し、破壊に至るが、繊維が根固め部に作用する引張力に抵抗していることが伺える。

5. まとめ

本研究で得られた結果を要約すると、およそ次のようにまとめられる。

- (1) プレーンモルタルを根固め部に使用した場合、テフロン無では、根固め部径の増大に伴い支圧強度比が増加した。しかし、テフロン有では、根固め部径の増大に伴う支圧強度比の増加は確認できなかった。
- (2) DFRCC を根固め部に使用した場合、テフロン有の場合でも、根固め部径の増加に伴い支圧強度比が増加した。これは、根固め部に作用する引張力に対し、ピニン繊維が有効に抵抗するためである。
- (3) DFRCC を根固め部に使用した場合の実験結果は、プレーンモルタルを根固め部に使用した場合の実験結果と比較して、最大荷重後、急激な荷重低下もなく、延性的な変形性状を示した。以上のような、根固め部に DFRCC を使用した場合の補強効果を、本 FEM 解析においても、ある程度再現できた。また、根

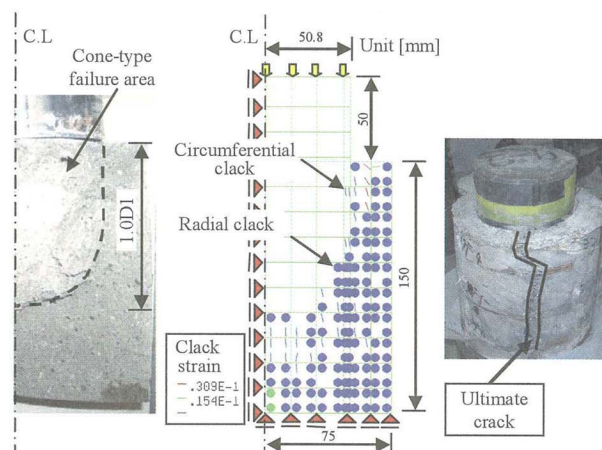


Fig. 10 Fracture state of No. 2 specimen (experiment) Fig. 11 Crack state of No. 2 specimen (analysis) Fig. 12 Fracture state of No. 5 specimen (experiment)

固め部の破壊が想定されるような非常に堅い支持層に根固め部を設置する場合には、DFRCC を根固め部に適用し、破壊靱性を改善することにより、支持力性能の向上が期待できるものと思われる。

地中部に施工された根固め部には、土圧による拘束圧および底面―地盤間の摩擦力が作用する。今後、これらを考慮した解析を行っていく予定である。

謝辞：解析に際してご助力を得た、東海大学学生の石井弘二君に謝意を表します。なお、本研究の一部は科学研究費補助金(若手研究(B)課題番号：17760462、代表者：渡部憲)の助成を受けて行われたものである。また、一部は東海大学工学部 2006 年度学部等研究教育補助金(代表者：渡部憲)の助成を受けて行われたものである。

参考文献

- 1) 山崎雅弘, 長岡弘明: 既製コンクリート杭根固め部の構造耐力機構, 日本建築学会構造系論文集, No.491, pp.73-80, 1997.1
- 2) 浅井陽一, 林隆浩, 富田健太郎, 渡部憲: FEM 解析による埋込み杭の先端支持力機構の解明 その1 解析方法および線形解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.511-512, 2006
- 3) 富田健太郎, 林隆浩, 浅井陽一, 渡部憲: FEM 解析による埋込み杭の先端支持力機構の解明 その2 非線形解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.513-514, 2006
- 4) 高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会: 高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う, 高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 128pp., 2002. 1
- 5) 渡部憲, 大岡督尚, 白井伸明, 森泉和人: 各種コンクリートの圧縮軟化挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.2, 2000.6
- 6) JCI 規準: 切欠きはりを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法(JCI-S-001-2003), コンクリート工学協会, 14pp., 2003
- 7) 大岡督尚, 橋高義典, 渡部憲: コンクリートの破壊パラメータに及ぼす短繊維混入および材齢の影響, 日本建築学会構造系論文集, No.529, pp.1-6, 2000.3
- 8) JCI 規準: 繊維補強セメント複合材料の曲げモーメント―曲率曲線試験方法(JCI-S-003-2005), コンクリート工学協会, 7pp., 2005
- 9) 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
- 10) NSP 協会: 根固め杭の破壊・支持機構に関する実験的研究, 1993.3