# 論文 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

浅井 陽一\*1・渡部 憲\*2・冨田 健太郎\*3

要旨:既製杭根固め部の支持力機構解明を目的とし,模型支圧実験を実施した。根固め試験 体形状は高さ:150mm(一定),径: 125~200mm である。材料は,プレーンモルタルと高 靭性セメント複合材料(以下,DFRCC。天然および再生細骨材を使用)とした。プレーンモル タルの場合,根固め部下端面のテフロンシートの有無により支圧強度が異なった。DFRCC(テ フロン有)は,径の増加に伴い支圧強度が増加し,破壊靱性が大きくなった。また,天然およ び再生細骨材の結果に大差はなかった。非線形 FEM 解析は,破壊靱性実験結果から引張軟化 挙動を評価し,テフロン有を対象とした。結果,DFRCCの補強効果をある程度再現できた。 キーワード:既製杭,有限要素法,再生細骨材,高靱性セメント複合材料

1. はじめに

既製コンクリート杭は,プレボーリング拡大 根固め工法により施工されることが多くなって いる。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 撹拌しながら根固め部および杭周固定部を築造 後,所定位置に杭を設置する(図 - 1 参照)。近年, 杭先端の根固め部を杭先端部径の 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(Rp)を発揮させる工法が開発されている。 杭先端支持力(Rp)は,杭の付着力(R1),杭先端抵 抗力(R2),地盤耐力(R3)および根固め球根形状等 の複合的な要因で決定される。根固め部の支持 力機構の研究は,山崎らの研究<sup>1)</sup>,筆者らのFEM 解析を用いた研究<sup>2,3)</sup>などで進められているが, まだ不明な点が多い。

さて,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靭性を有 する「高靭性セメント複合材料(以下,DFRCC と略記)」が注目を集めており<sup>4)</sup>,この材料を根 固め部に適用することにより,支持力や破壊性 状の改善効果が期待できるものと思われる。

本研究では,杭と根固め部(図-1の斜線部分)

\*1 (㈱トーヨアサノ (正会員)

\*2 東海大学 工学部建築学科講師 工博 (正会員)

\*3 (㈱トーヨアサノ (非会員)

に着目し,根固め部径が支圧強度に及ぼす影響 を調べるため,支圧実験を実施した。

地中部の根固め部下端面には、地盤間との摩 擦力が作用し、支圧強度に影響を及ぼすと考え られる。今回、基礎的な検討項目として、摩擦力が ある場合(試験体を直接,載荷盤に接触させた場 合:テフロン無)と、摩擦力がない場合(試験体下 端面と載荷盤の間にテフロンを設置:テフロン 有)を想定した。

DFRCC では,天然および再生細骨材を使用した場合の影響についても検討した。非線形 FEM 解析は,テフロン有を対象とした。



図 1 プレボーリング拡大根固め工法

## 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表 - 1 お よび表 - 2 に示す。また,根固め試験体の概要 を図-2 に示す。模型杭は中空の鋼管コンクリ ート複合杭とした。 杭径は 100(D1)×50mm(た だし,杭径の実測値は 101.6mm)である。根固 め部の高さを 150mm(1.5D1), 根固め部径を 125(1.25D1), 150(1.5D1), 175(1.75D1), 200mm(2.0D1)とした。根固め部は,実施工では セメントミルクを注入後,先端地盤と撹拌混合 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比で 5:5の割合で混合使用した。

支圧実験は、根固め部の強度が 30N/mm<sup>2</sup>とな

る材齢2週で実施した。計測項目は,荷重,杭 頭および根固め部変位,根固め部の内部および 表面ひずみである。なお,試験体の下端面を直 接、載荷盤に接触させた場合(テフロン無)と試験 体と載荷盤の間にテフロンを設置した場合(テ フロン有)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。



図-2 根固め試験体の概要

2.2 破壊靭性実験

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。

根固め 試験体	既製杭根固め部モデル試験体						実験時強度管理試験結果					
	計画寸法				毎日を覚	テフロン	圧縮	圧縮強度時	ヤング	ポアソ	割裂	
	杭径 D1	杭高さ	根固め径 D2	根固め高さH	低回の印	シートの	強度	縦ひずみ	係数	ン比	強度	
No.	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	区用洞口	有・無	$(N/mm^2)$	(µ)	(kN/mm <sup>2</sup> )		$(N/mm^2)$	
1	100	50	125	150	NM	有・無	34.9	4225	16.0	0.213	2.61	
2			150									
3			175									
4			200									
5			150			有 }	27 0	1723	10.0	0 203	2 12	
6			200		NIMETINGG		21.0	4725	10.9	0.203	2.42	
7			150		MRMDFRCC		26 1	4609	11 3	0 206	2 51	
8			200				20.1	4000	11.0	0.200	2.01	

表 - 1 実験概要

#### 表-2 根固め部の調合

锢合夕	根固め	水セメント比	細骨材セメント比	繊維体積混入率		混和剤				
에 다 다	試験体No.	W/C(wt.%)	S/C(wt.%)	(Vol.%)	水W	セメントC	細骨材S1	細骨材S2	(Cwt.×%)	
NM	1~4		97.8	0.0	441	802	549	235	0.0	
NMDFRCC	5,6	55.0	60.0	3.0	470	855	359	154	1.5	
MRMDFRCC	7,8				465	846	254	254	1.5	

セメントC:普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm<sup>3</sup>)

細骨材S1:NMおよびNMDFRCCは,砕砂(密度:2.64g/cm<sup>3</sup>,吸水率:1.46%,粗粒率:3.03,最大寸法:5.0mm),MRMDFRCCは,再生粗目 (密度:2.51g/cm<sup>3</sup>,吸水率:4.71%,粗粒率:3.18,最大寸法:5.0mm)

細骨材S2:NMおよびNMDFRCCは,山砂(密度:2.56g/cm<sup>3</sup>,吸水率:1.78%,粗粒率:1.79,最大寸法:5.0mm),MRMDFRCCは,再生中目 (密度:2.47g/cm<sup>3</sup>,吸水率:5.03%,粗粒率:2.34,最大寸法:5.0mm) 細骨材質量混合割合:NMおよびNMDFRCCは,S1:S2=7:3,MRMDFRCCは,S1:S2=5:5

繊維 :ビニロン繊維(直径0.20mm,長さ24mm,比重1.3,弾性係数29kN/mm<sup>2</sup>,引張強度975N/mm<sup>2</sup>) :分離低減剤 混和剤



図-3 圧縮試験概要

まず, 圧縮破壊実験では, 100×200mm 円 柱試験体を使用し, 一軸圧縮載荷を行った。載 荷計測方法を図 - 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, 渡部等の示す手法<sup>5)</sup>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 <sup>6)</sup>に準じ,100×100×400mm 角柱試験体を使用 し,切欠き梁の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。載荷計測方法を図 - 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 <sup>7)</sup>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<sup>8)</sup>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 解析の概要を表 - 3 に示す。また,根固 め試験体の要素分割モデルを図 - 5 に示す。

杭および根固め部の各要素は4節点アイソパ



図-4 切欠き梁3点曲げ試験概要

表-3 解析概要



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/mm<sup>2</sup>,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/mm<sup>2</sup>,ポアソン比0.20と設定した。根 固め部には,表-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,圧縮強度以降を図-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,引張強度以降を図-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。

解析上の載荷方法は,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。根固め部の下端面 の拘束条件は,ローラーである。

#### 4.結果と考察

4.1 支圧強度比 - 根固め部径関係

図 - 7 に支圧強度比(支圧強度(F<sub>B</sub>)/円柱供試体 の圧縮強度(F)) - 根固め部径(D2)関係図を示す。 支圧強度比とは,最大荷重を杭面積で除した強 度 (F<sub>B</sub>)を 100×200mmの円柱供試体の圧縮強



度(F)で除した比である。図中には,六車・岡本 らのコンクリートを対象とした実験式<sup>9)</sup>および NSP協会で行った石膏を利用した根固め部の実 験式<sup>10)</sup>の結果をそれぞれ併記する。なお,杭径 (D1)と根固め部径(D2)を用いた式に改めている。

NM のテフロン無は,根固め部径が大きくな るほど支圧強度比が増加する傾向にある。一方, テフロン有の強度は,根固め部径が 150mm か ら 175mm に増加した場合は,増加するが, 200mm になると強度が増加しなかった。また, 根固め径が 150~200mm の場合,テフロン無 の強度は,テフロン有より高い。これらのことは, 根固め部支端面と載荷盤間の摩擦力に起因して いると考えられる。

DFRCC(テフロン有)は,根固め部径の増加と ともに支圧強度比が増加した。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。

DFRCC の天然と再生細骨材の試験結果は,

ほぼ同じ傾向を示しており,骨材の違いによる 大きな差はみられない。

図 - 8に実験およびFEM 解析で得られた支圧 強度比 - 根固め部関係図(テフロン有)を示す。 NM の場合, VM は根固め部径が増加しても支 圧強度比は,ほぼ一定であるが,DR は下がる 傾向にある。DFRCC の場合,VM,DR ともに 根固め部径の増大に伴い支圧強度比が増加する。 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

図 - 9 に荷重 - 杭頭変位図(テフロン有)を示 す。DFRCC は NM 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。また,NMDFRCC と MRMDFRCC の変形性 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 2~3 割程度高めに評価しているが,DFRCC を使用し た場合の補強効果を,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

No.2 NM150(テフロン有)の破壊状況を写真-1 に示す。D2 に関わらず杭先端直下に D1 程度のコ ーン領域が形成されていた。

FEM 解析によるひび割れひずみ図を図 - 10 に示す。図中の丸印は半径方向,直線は円周方 向のひび割れである。解析からも杭直下に同様 なコーン領域が確認できる。写真 - 2 に DFRCC の破壊状況例(NMDFRCC150)を示す。円周方向 のひび割れは 1,2 箇所と少なく,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。





図-10 ひび割れひずみ図

-541-

写真 - 1 破壊状況



写真-2 DFRCCの破壊状況例(NMDFRCC150)

4. まとめ

本研究は, 杭先端の根固め部に着目し, 根固 め部径を要因とした支圧実験および非線形 FEM 解析を実施した。得られたまとめを以下に 示す。

- NM テフロン無の場合は,根固め部径の増加とともに支圧強度比も増加し,テフロン 有より高くなる傾向にある。これは,根固め部下端面と載荷盤との摩擦力が支圧強度に影響を与えたためと考えられる。
- 2) DFRCC(テフロン有)は,根固め部径の増加 にともない支圧強度比が増加する。これは, 根固め部に作用する引張力に対し,ビニロ ン繊維が有効に抵抗するためである。
- 3) DFRCC は,最大荷重後,急激な荷重低下は せず,延性的な破壊性状を示した。根固め 部に DFRCC を使用すれば,破壊靱性の向 上が期待できる。また,天然細骨材と再生 細骨材を使用した DFRCC の性状は,ほぼ 同じであった。
- チフロン有の実験結果を対象とした非線形 FEM 解析は,3)に示す根固め部にDFRCCを 使用した場合の補強効果をある程度再現で きた。

地中部に施工された根固め部には,土圧によ る拘束圧および下端面-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

- 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,第491号,pp.73-80,1997.1
- 浅井陽一,林隆浩,冨田健太郎,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) 冨田健太郎,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) 高靭性セメント複合材料の性能評価と構造 利用研究委員会:高靭性セメント複合材料を 知る・作る・使う,高靭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,pp.128,2002.1
- 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
- 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,橘高義典,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,第 529号,pp.1-6,2000.3
- 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, 平成5年3月