

論文 プレボーリング拡大根固め工法の根固め部の支持力機構に関する基礎的研究

浅井 陽一*1・渡部 憲*2・藤井 衛*3・加藤浩文*4

要旨：既製杭根固め部の支持力機構解明を目的とし、杭先端より下部の根固め部を対象とした支圧実験、根固め部中の付着実験および根固め全体実験を実施した。材料は、プレーンモルタルと高靱性セメント複合材料（以下DFRCC）とした。杭形状は、直杭と溝部および凸部を有する杭（以下溝杭）とし、側圧は0.2および0.4N/mm²とした。根固め部全体実験の結果から、杭形状が溝杭で側圧が大きいほど、強度比（杭頭最大応力/円柱供試験体強度）が大きくなった。3次元非線形FEMは、根固め部の材料特性から圧縮および引張軟化挙動を評価することにより、プレーンモルタルおよびDFRCCを使用した場合とも実験結果をある程度再現できた。

キーワード：既製杭、根固め部、側圧、有限要素法、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の施工法は、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後、杭を設置するプレボーリング拡大根固め工法が主流である。

図-1(a)は、杭先端から2.0D1区間を、軸径D2より拡大した杭を用いた場合の根固め部形状例を示している。根固め部は、高さ3.5D1(杭先端部から下方に1.5D1、上方に2.0D1)、根固め径は1.5D1である。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。根固め部中の杭は、溝部や凸部などを設けることにより付着力を高める工夫をされていることが多い。

一方、根固め部が設置される深度は、杭が施工される地盤や建築物によって様々であるが、概ね10m~70m程度の範囲内である。根固め部が設置される深度が深くなるに従って、根固め部に作用する土圧は大きくなると考えられる。

杭先端支持力(R_p)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^{2,3,4,5)}などで進められているが、根固め部に作用する土圧、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、コンクリートもしくはモルタル中にピ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「高靱性セメント複合材料(以下、DFRCC

と略記)」⁶⁾が注目されている。

本研究では、杭先端より下部の根固め部を対象とした支圧実験(図-1(b))、根固め中の杭の付着を対象とした付着実験(図-1(c))および根固め全体を対象とした根固め全体実験(図-1(d))を実施した。また、根固め部に作用する側圧およびDFRCCを使用した場合の影響についても検討した。さらに、実験結果を対象とした3次元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。

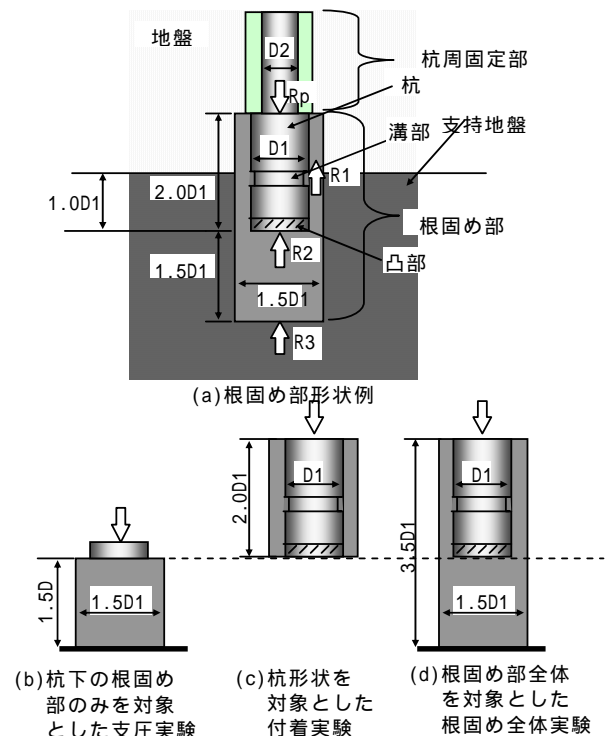


図-1 根固め部形状例および各実験概要

*1 (株)トーヨーアサノ(正会員)

*2 東海大学 工学部建築学科准教授 工博(正会員)

*3 東海大学 工学部建築学科教授 工博(非会員)

*4 東海大学 工学部建築学科 (正会員)

2. 実験方法

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。杭および根固め部の形状は、杭径 900mmの約1/10スケールとした。なお、杭は中空の鋼管コンクリート複合杭とした。杭は、89.1mm×20mm×230mm(根固め部中の距離は180mm)とした。杭形状は、溝部がない直杭および図-3に示す溝杭の2種類である。溝杭は、深さ2mm、幅20mmの溝部と杭先端付近に高さ2.0mmの凸部がある。根固め部幅は135mm(杭径の約1.5倍)とし、根固め高さは、支圧実験時135mm(杭径の約1.5倍)、付着実験時180mm(杭径の約2.0倍)、根固め全体実験時315mm(135mm+180mm)とした。

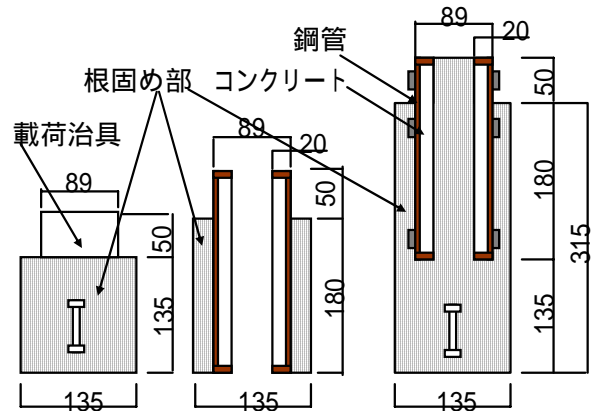
プレーンモルタルは、水セメント比(W/C)=55%、実施の根固め部の状態を考慮し、細骨材の混入率を体積比で30%とし、砕砂と山砂を質量比で7:3の割合で混合使用した。また、DFRCCでは、W/C=55%、ピニロン繊維体積混合率=3.0%、砕砂と山砂を質量比で7:3の割合で混合使用した。なお、根固め部全体実験の杭の中空部は、根固め部と同一とした。また、DFRCCの繊維体積混入率は、過去の実績(ピニロン繊維が効果的に作用する混合率)より決定した。

各実験は、材齢2週間経過後に実施した。計測項目は、荷重、杭頭変位、杭表面および根固め部内ひずみである。

実験体数は、プレーンモルタルの場合2体、DFRCCの場合は1体とした。モルタル打設後2日で脱型し、所定材齢まで、実験室内で湿布養生した。

図-4に側圧装置概要図を示す。装置内部には、ゴムスリーブが設置されており、エアを注入し側圧を作用させる。側圧は0.2および0.4N/mm²とした。

■ ひずみゲージ ■ 埋め込みゲージ [単位mm]



(a) 支圧実験 (b) 付着実験 (d) 根固め全体実験

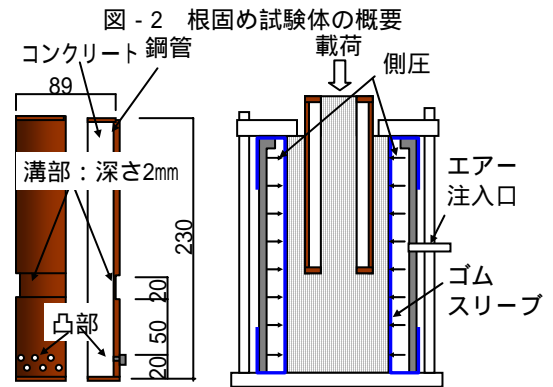


図-3 溝杭形状

図-4 側圧装置概要図

表-1 実験概要

試験体名	実験要因			実験時強度管理試験結果				
	調合名	杭形状	側圧 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	圧縮強度時 縦ひずみ (μ)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	割裂強度 (N/mm ²)
PS2-U/PS2-F/PS2-N	NM	直	0.2	39.7	4075	19.0	0.24	2.74
PS4-U/PS4-F/PS4-N			0.4	43.0	3659	18.7	0.23	3.15
PM2-U/PM2-F/PM2-N		溝	0.2	43.7	4122	17.6	0.21	3.87
PM4-U/PM4-F/PM4-N			0.4	42.1	3528	19.5	0.24	3.70
DS2-U/DS2-F/DS2-N	DFRCC	直	0.2	30.0	4030	13.2	0.21	2.83
DM2-U/DM2-F/DM2-N			0.4					
DS4-U/DS4-F/DS4-N		溝	0.2	27.9	4135	12.7	0.24	2.40
DM4-U/DM4-F/DM4-N			0.4					

「注」試験体名記号は、P:プレーンモルタル、D:DFRCC、S:ストレート杭、M:溝杭、2:側圧0.2N/mm²、4:側圧0.4N/mm²、U:支圧試験、F:付着試験、N:根固め全体試験を示す。

表-2 根固め部の調合

調合名	水セメント比 W/C(wt.%)	細骨材セメント比 S/C(wt.%)	繊維体積混入率 (Vol.%)	単位質量(kg/m ³)				混和剤 (Cwt.%)
				水W	セメントC	細骨材S1	細骨材S2	
NM	55.0	98.0	0.0	439	798	547	235	0.0
DFRCC		60.0	3.0	468	850	357	153	1.5

セメントC:普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm³)

細骨材S1:砕砂(密度:2.65g/cm³,吸水率:1.27%,粗粒率:2.95,最大寸法:5.0mm),

細骨材S2:山砂(密度:2.51g/cm³,吸水率:2.45%,粗粒率:1.47,最大寸法:5.0mm),

細骨材質量混合割合:S1:S2=7:3

繊維V:ピニロン繊維RFS400(径:0.20mm、長さ:24mm、比重1.3、弾性係数:29kN/mm²、引張り強度:975N/mm²)

混和剤:分離低減剤

3. 解析方法

図 - 5 に要素分割を示す。FEM 解析では、8 節点アイソパラメトリック・ソリッド・ブロック要素を使用し、対称性を考慮し 1/4 モデルとした。杭と根固め部間には、根固め部中の附着挙動を考慮するためインターフェイス要素を導入した。杭体は弾性とし、鋼材部分は、ヤング係数を 200kN/mm^2 、ポアソン比を 0.3、高強度コンクリート部分は、ヤング係数を 40kN/mm^2 、ポアソン比を 0.2 と設定した。根固め部には、表 - 1 に示す材料定数を採用した。圧縮側は、圧縮強度までは圧縮強度の 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。圧縮強度以降は、表 - 1 に示す材料定数を用いて、渡部らの示す手法⁷⁾に準じて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、要素体積と等値な体積をもつ球の直径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)、図 - 6(c) に示す。プレーンモルタルの場合は、破壊エネルギーを大岡らの示す手法⁸⁾に準じて評価した引張軟化挙動とした。引張軟化挙動の開口変位は、要素体積と等値な体積をもつ球の直径で除してひずみに変換して用いた。一方、DFRCC の場合は、同一配合で実施した切り欠き無し梁 3 等分曲げ試験結果⁵⁾に対し、文献⁹⁾付属書(参考)の手法で得られた引張強度と終局ひずみを解析に用いた。しかし、文献⁹⁾付属書(参考)では、引張強度以降の下降域の設定方法が示されていないため、解析では終局ひずみを 2 倍とする値で応力 0 となるような負勾配を設定した。

圧縮側の塑性基準は Drucker - Prager、摩擦角および膨張角は、白井らの RC 造柱・梁接合部を対象とした研究¹⁰⁾を参考として 10° とした。なお、膨張角は、塑性ポテンシャルを設定する際に用いるパラメータ¹¹⁾で、摩擦角と膨張角を同値に設定することにより、関連流れ則を採用した。また、引張側はテンションカットオフとし、ひび割れは分布ひび割れモデルとした。

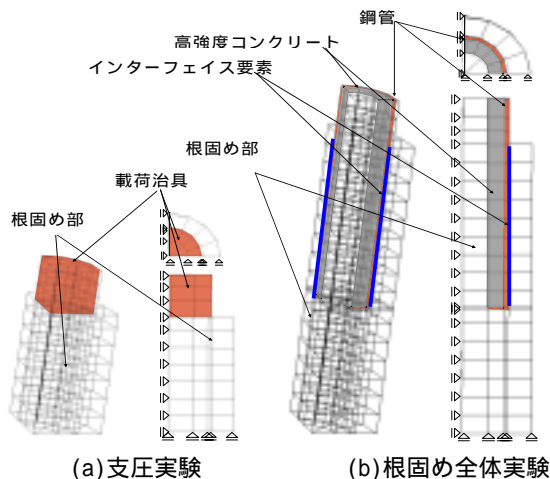
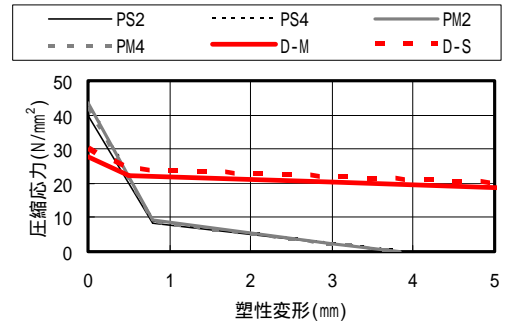
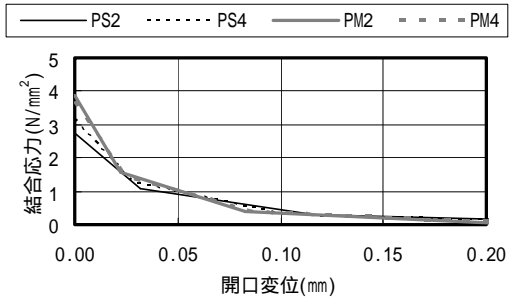


図 - 5 解析モデル

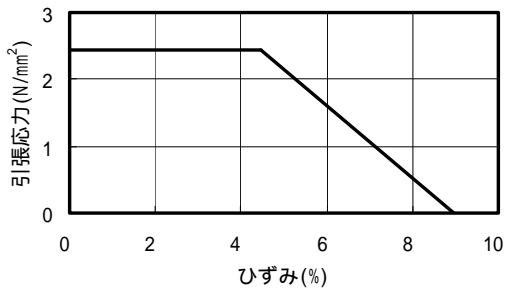
根固め全体試験解析で用いるインターフェイス要素は、直、溝杭ともに、解析対象と同じ側圧 0.2 および 0.4N/mm^2 を与えた状態の実験結果から得られた附着応力 - 変位関係に基づいて設定した。図 - 7 に側圧 0.4N/mm^2 の試験体 PS4-F および PM4-F の実験値(2 体)および解析用モデルを示す。直杭(PS4-F)は、一旦附着応力が減少した後、変位の増加とともに附着応力が増加する。



(a) 圧縮軟化挙動



(b) 引張軟化挙動 (プレーンモルタル)



(c) 引張軟化挙動 (DFRCC)

図 - 6 設定した軟化挙動

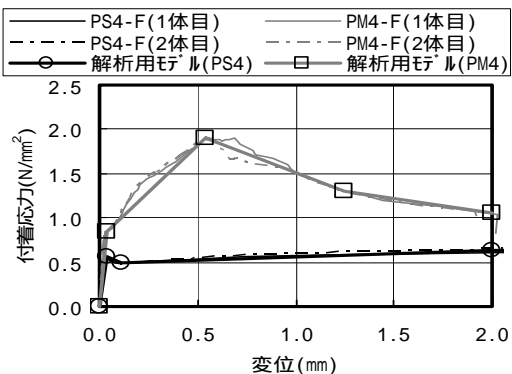


図 - 7 インターフェイス要素の附着応力 - 変位関係

一方、溝杭は、0.5mm程度で最大付着応力に達した後に、緩やかに減少する。そのため、直杭の場合は、荷重が減少し始める点、増加し始める点、2mm変位時の多直線でモデル化した。一方、溝杭は、初期折れ点、最大付着応力度、1.25mm変位時、2.0mm変位時の多直線でモデル化した。また、直応力は、高い剛性を有する線形弾性挙動と設定した。なお、根固め全体試験と同じ側圧が作用した付着実験には、直方向の開口による付着応力の低下などの影響も含まれていると考えられる。従って、この結果に基づいたインターフェイス要素を用いて解析を行えば、開口など影響も考慮されることになると考えられる。

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。解析は、三次元有限要素解析プログラム DIANA¹¹⁾を用い、非線形解析の求解法は、Newton - Raphson法を用いた。

4. 結果と考察

4.1 付着実験

図-8に側圧と付着実験により得られた強度比関係図を示す。強度比とは、最大付着荷重を杭表面積(50,385mm² = 89.1 × × 180)で除した付着応力(F_F)を100×200mm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。

杭の違いに着目すると、溝杭(PM, DM)の強度比は、直杭(PS, DS)の強度比よりプレーンモルタルおよびDFRCCを使用した場合いずれも高く、その範囲は2.31~2.86倍である。これは、溝杭には溝部と凸部があるため、付着応力が増加したためである。また、DFRCCを根固め部に使用した場合の強度比は、プレーンモルタルを使用した場合の強度比より高く、その範囲は1.13~1.40倍である。これは、ピニロン繊維が引張力に対し、有効に抵抗するためであると考えられる。

一方、側圧の違いに着目すると、プレーンモルタルおよびDFRCC、また、直杭および溝杭共に、側圧の増大に伴い、強度比が増加する傾向にあり、その範囲は1.07~1.27倍である。

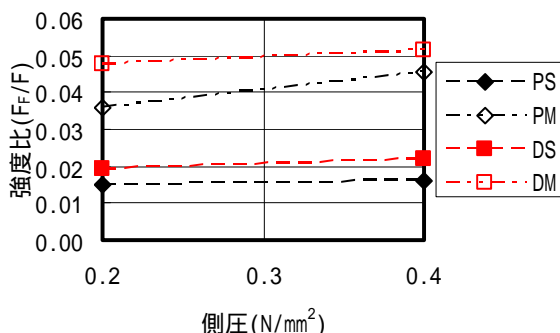


図-8 側圧と強度比関係図(付着実験)

4.2 支圧実験および根固め全体実験

表-3に支圧実験および根固め全体実験強度比一覧表を示す。実験時の強度比は2体の平均値であるが、試験体PS2およびPM2の場合、載荷荷重の偏心などの影響が実験結果に大きく反映されたため、1体のみの結果である。なお、表中にはFEM解析で得られた強度比も記載している。

図-9に支圧実験および根固め全体実験により得られた側圧-強度比関係図を示す。また、図中には、FEM解析で得られた強度比も示している。支圧実験の強度比とは、最大荷重を杭面積(6235mm² = 89.1 × 89.1 × /4)で除した強度(F_B)を100×200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。根固め全体実験の場合には、杭頭の最大荷重を杭面積(6235mm²)で除した強度(F_A)を用いて、強度比(F_A/F)を求めた。

まず、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について注目すると、根固め全体実験の強度比は、支圧実験の強度比より大きくなっている。また、溝杭を用いた場合(PM2およびPM4)は、直杭を用いた場合(PS2およびPS4)より強度比が大きくなっている。これは、根固め部中の付着力の向上が根固め全体の強度比向上に寄与することを示している。

また、支圧実験および根固め全体実験いずれも側圧の増大に伴い、強度比が増大する傾向にある。

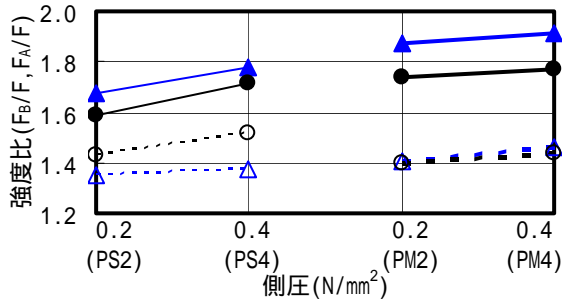
次に、DFRCCを根固め部に使用した場合の実験結果について注目すると、プレーンモルタルを使用した場合と同様の傾向を示している。

根固め全体実験を対象としたFEM解析結果は、プレーンモルタルおよびDFRCCいずれも、強度比を大きめに評価しているが、支圧実験を対象としたFEM解析結果より大きくなり、概ね実験結果と同様の傾向を示している。

表-3 支圧および根固め全体実験強度比一覧表

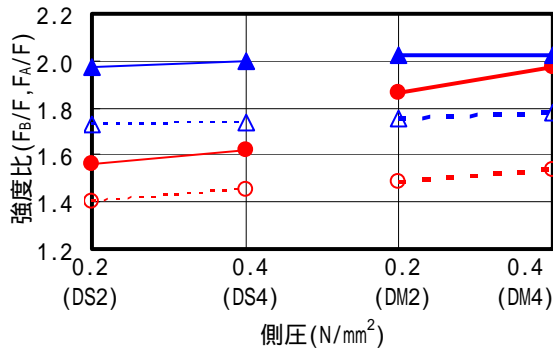
試験体名	モルタル種類	実験種類	杭形状	側圧(N/mm ²)	実験時強度比	FEM解析強度比
PS2-U	プレーンモルタル	支圧	直	0.2	1.43	1.35
PS4-U				0.4	1.51	1.38
PM2-U			0.2	1.40	1.41	
PM4-U			0.4	1.44	1.46	
PS2-N		根固め全体	直	0.2	1.59	1.68
PS4-N				0.4	1.72	1.78
PM2-N			0.2	1.74	1.87	
PM4-N			0.4	1.77	1.91	
DS2-U	繊維	支圧	直	0.2	1.40	1.73
DS4-U				0.4	1.45	1.74
DM2-U			0.2	1.49	1.75	
DM4-U			0.4	1.53	1.78	
DS2-N		根固め全体	直	0.2	1.56	1.97
DS4-N				0.4	1.62	2.00
DM2-N			0.2	1.86	2.02	
DM4-N			0.4	1.97	2.02	

支圧試験(実験), 根固め試験(実験)
支圧試験(FEM), 根固め試験(FEM)



(a) プレーンモルタルを使用した場合

支圧試験(実験), 根固め試験(実験)
支圧試験(FEM), 根固め試験(FEM)



(b) DFRCC を使用した場合

図 - 9 側圧と強度比関係図(支圧, 根固め全体実験)

4.3 荷重 - 変位関係

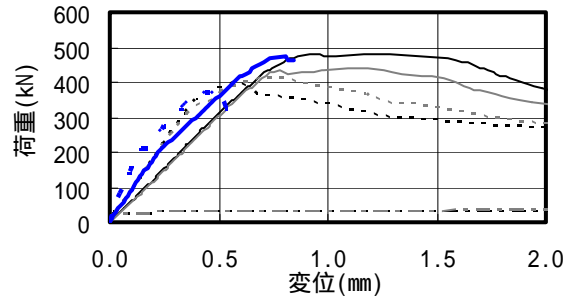
図 - 10 に支圧実験, 付着実験および根固め全体実験で得られた荷重 - 杭頭変位関係 (側圧 0.4N/mm^2) を示す。なお, プレーンモルタルの凡例で 1 は 1 体目, 2 は 2 体目の実験結果を表している。

図中には, 支圧実験および根固め全体実験を対象にした FEM 解析で得られた荷重 - 変位関係も併せて示す。

支圧実験の初期剛性は, いずれのケースにおいても根固め全体実験の初期剛性と比べて高い。また, 支圧実験の最大荷重時の杭頭変位は, 0.6mm 程度であるのに対し, 根固め全体実験の杭頭変位は, 0.8mm 程度である。これは, 根固め全体実験の杭頭変位には, 杭体の変形量も含まれるためと考えられる。

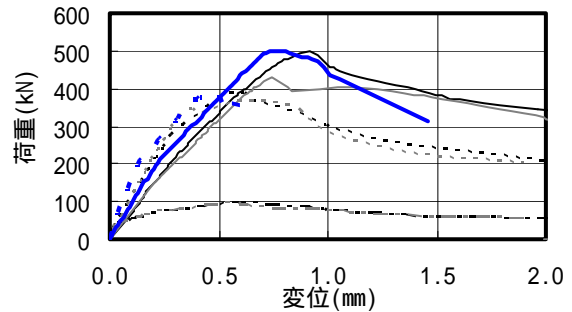
根固め全体実験を対象とした FEM 解析の初期剛性および最大荷重は, プレーンモルタルおよび DFRCC いずれも実験値より高めに評価する傾向にあるが, 荷重 - 変位挙動は, 概ね再現できていると考えられる。また, DFRCC の最大荷重以降のビニロン繊維による補強効果による延性的な変性性状を, よく再現できている。

----- PS4-U1 ——— PS4-N1 ----- PS4-F1
----- PS4-U2 ——— PS4-N2 ----- PS4-F2
- - - - FEM-U ——— FEM-N



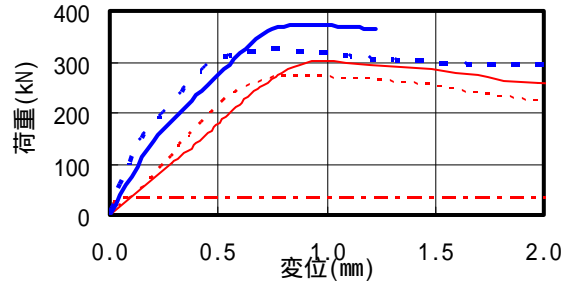
(a) プレーンモルタル, 直杭

----- PM4-U1 ——— PM4-N1 ----- PM4-F1
----- PM4-U2 ——— PM4-N2 ----- PM4-F2
- - - - FEM-U ——— FEM-N



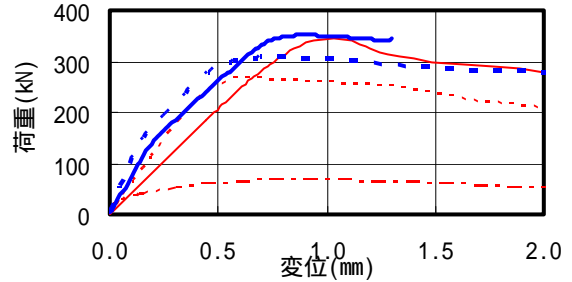
(b) プレーンモルタル, 溝杭

----- DS4-U ——— DS4-N ----- DS4-F
- - - - FEM-U ——— FEM-N



(c) DFRCC, 直杭

----- DM4-U ——— DM4-N ----- DM4-F
- - - - FEM-U ——— FEM-N



(d) DFRCC, 溝杭

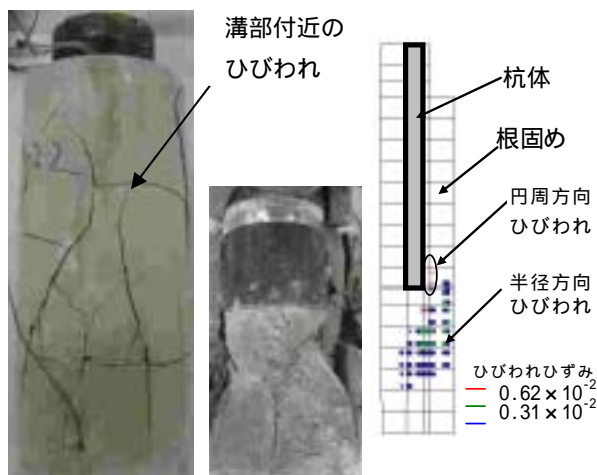
図 - 10 荷重 - 杭頭変位図

4.4 破壊状況

写真 - 1 に実験により得られたプレーンモルタルを根固め部に使用した試験体の最終破壊状況の一例 (PM2: プレーンモルタル, 溝杭, 側圧 $0.2N/mm^2$) を示す。また, PM2 試験体を対象とした FEM 解析により得られた最大荷重時のひび割れひずみ図を図 - 11 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り, 直線の方向は, ひび割れの方向を示している。

写真 - 1 (a) では, FEM 解析と同様に杭先端付近に縦方向のひび割れが確認できる。しかし, 溝付近にも横方向のひび割れが確認できる。これは, FEM 解析では溝部や凸部の形状をモデル化せず, インターフェイス要素として溝杭の付着強度 - 変位関係を設定しているため, この位置のひび割れが評価できないためである。

写真 - 1 (b) は, 杭先端直下に杭径程度の深さを持つコーン領域の形成が確認できるが, FEM 解析においても同様にコーン領域が確認できる。



(a) 全景 (b) 杭先端部

写真 - 1 破壊状況

図 - 11 ひびわれ図

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) 直杭と溝杭の付着応力度 - 変位特性が異なり, 溝杭の最大付着応力は, 直杭より大きい。
- (2) 溝杭を使用した根固め全体実験結果は, 直杭の場合よりも強度比が大きくなる。
- (3) 側圧が増加するに従い, 支圧強度比および根固め全体の強度比が大きくなる。
- (4) 根固め部の材料特性から圧縮軟化および引張軟化挙動を評価し, 付着実験から得られた付着応力 - 変位関係をインターフェイス要素として設定した 3 次元

FEM 解析は, プレーンモルタルおよび DFRCC いずれも実験結果をある程度再現できた。

- (5) DFRCC は, 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。以上の様な補強効果を本 3 次元 FEM 解析でもある程度再現できた。

今後は, 試験体スケールに対するビニロン繊維径および長さなどの影響についても, 検討していく予定である。

謝辞

実験および解析に際してご助力を得た東海大学学生, 氏原毅, 河内章, 田中輝君に謝意を表します。

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, 第 491 号, 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) 浅井陽一, 林隆浩, 渡部憲, 藤井衛: FEM 解析による既製杭の先端支持力に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.419-420, 2009.8
- 5) 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報告集, Vol.29, No.1, pp.537-542, 2007.7
- 6) 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, pp.128, 2002.1
- 7) 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, pp.493-498, 2000.6
- 8) 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, 第 529 号, pp.1-6, 2000.3
- 9) JCI 規準: 繊維補強コンクリート複合材料の曲げモーメント - 曲率曲線試験方法 (JCI-S-003-2007), 日本コンクリート工学協会, 8pp.2007
- 10) 白井伸明, 尾崎龍太郎, 三島隆路, 森泉和人: RC 造柱・梁接合部の破壊モードと変形性状に関する 2-D および 3-D 解析 (その 1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.445-446, 2003.9
- 11) DIANA Foundation Expertise Center for Computational Mechanics (DIANA Version-8): DIANA finite Element ANALYSIS Users Manual, TNO Building and Construction Research