

論文 高強度ポリマーセメントモルタル製マンホールの構造性能

福澤 公夫*1・林 志翔*2・三井 雅一*3・猿木 浩二*4

要旨：接着剤を用いて組み立てるポリマーモディファイドモルタル(以下PMMと略す)製マンホールの開発に関連して,モルタル接合部の接着性能を明らかにするとともに,接着により一体化したマンホールの構造試験およびFEMによるシミュレーションを行った。その結果 本研究に取り上げた接着システムは 接着面の湿り具合に鈍感な接着方法であること,接着により組み立てたマンホールはひび割れが発生するまで弾性的な挙動を示すこと線形FEM解析によりひび割れ強さの推定が可能であることを示した。

キーワード：高強度ポリマーモディファイドモルタル,コンクリート製品,接着,FEM解析

1. はじめに

これまでの一連の研究^{1),2)}で,蒸気養生により優れた曲げ・引張・接着性能を発揮するPMMを開発した。現在,この特長を活かし,分割されたPMM部材を設置場所で接着剤を使って連結し,製品を完成させるPMM製マンホールの開発を進めている。本研究では,表面処理および接着面の含水状態を変化させるときのPMM同士の接着性能を明らかにするとともに,その接着特性を利用したマンホールについて,実物の約1/2模型を用いた構造試験およびFEM解析の両方から性能を検証した。

2. 高強度ポリマーセメントモルタルの接着性能

2.1 試験方法

(1) 接着強さ試験用供試体の作製

使用材料を表-1に示す。表-2に示す配合のモルタルをホバートミキサを用いて90秒間練り混ぜ,寸法40×40×160mmの型枠に流し込み,蒸気養生(前置2h 昇温20/h 最高温度65℃×3h 自然放冷)を行い,脱型した。その後,寸法40×40×80mmにダイヤモンドカッターで切断し,20℃,80%RHの室内に13

日間静置して接着強さ試験用供試体とした。なお,普通モルタルの配合は,マンホール製造用普通コンクリートの配合から粗骨材を抜いたものである。

(2) 接着方法

接着強さ試験用供試体の長さ方向の型枠側端面(接着面)を表-3に示す処理を行い,その上で含水状態を変化させ,片方の端面に接着剤を塗布し,もう一方の端面を押し付けるよう接着し,20℃,60%RHの室内で24時間養生した。

表-1 使用材料

種類	材料名	記号	主成分・性能等
セメント	早強ポルトランドセメント	C	密度3.14g/cm ³ , 比表面積4500cm ² /g
細骨材	静岡県小笠産陸砂	S1	表乾密度2.60g/cm ³ , 吸水率1.5%, F.M. 2.75
	島根県簸川郡湖陵産陸砂	S2	表乾密度2.60g/cm ³ , 吸水率1.21%, F.M. 1.66
	島根県出雲市古志産砕砂	S3	表乾密度2.74g/cm ³ , 吸水率1.38%, F.M. 3.19
混和剤	ポリマーディスパージョン	PD	ポリ(メタ)アクリル酸エステル, 固形分50.0%
	高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル
	消泡剤	AN	特殊非イオン界面活性剤
接着剤	プライマー	-	エポキシ樹脂2液型
	接着剤	-	エポキシ樹脂2液型(ET-828, 無溶剤系) 曲げ強さ40MPa以上, 引張強さ20MPa以上, 可使時間(20℃)70min

*1 茨城大学 工学部都市システム工学科教授 工博(正会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所研究開発部コンクリート技術チーム主任研究員 工修(正会員)

*3 (株)CRCソリューションズ 社会基盤ソリューション部地盤・耐震課 工博(正会員)

*4 (株)イズコン 技術開発部課長

表 - 2 配合

試験名	モルタル種類	W/C (%)	P/C (%)	S/C	SP/C (%)	AN/PD (%)	砂の種類
接着強さ試験	PMM	20.5	11.0	1.5	1.7	3.0	S1
	普通モルタル	44.4	-	2.2	0.3	-	
マンホール試験	PMM	22.0	10.0	1.5	2.2	3.0	S2:S3=3:1の混合品

注) P/C: ポリマー (固形分) セメント比、S/C: 砂セメント比

なお、接着層の厚みを 1.5 mm および密着 (0.2 mm 程度) とした。その後、土中に埋めるマンホールの使用を考慮して、20、100% RH の恒温恒湿槽内で 7 日間養生した。

(3) 接着強さ試験

JIS R 5201 (セメントの物理試験方法) の曲げ試験方法に準拠した曲げ試験において、接着層を中央載荷ロールの下に合わせて試験を行い、曲げ強さを求め接着強さとした。

(4) 組織構造の観察

接着強さ試験用供試体をダイヤモンドカッターで接着層を含んだ 20 × 20 × 10mm に切断し研磨した後、EPMA を用いて接着層付近の組織構造を観察した。また、接着面を含んだ 5mm 角に切断し、接着面を 3% の塩酸でエッチングした後、SEM を用いて観察した。

2.2 試験結果および考察

表 - 4 に、母材の曲げ強さ、接着強さおよび破壊位置を示す。なお、破壊位置における「母材」とは、接着面より 1mm 程度の位置である。PMM の接着強さは、同一条件の普通モルタルに比べて 2 倍以上の値を示した。普通モルタルの場合は、アセトン拭きよりもプライマー処理の方が接着強さが著しく増加した。後者は、100% 母材破壊であり、プライマー塗布の効果であることがわかる。PMM の場合は、接着面気乾、接着層 1.5mm という条件で、アセトン拭き、プライマー処理およびグラインダー処理の影響を比較した。破壊位置は、いずれの供試体も母材であり、接着強度もほぼ等しい。これは、図 - 1 から分かるように、PMM の表面にかなりの割合でポリマーフィルムが存在しており、かつ、表面から内部まで連続的に分布していることが

表 - 3 接着面の処理方法と含水状態

接着面の処理方法	アセトン拭き	汚れ、油脂分をアセトンで拭き取った。
	グラインダー処理	ダイヤモンドディスクを使い、表面 1mm 程度を削りとり、表面に残った粉塵は、高压エアで除去した。
	プライマー処理	アセトン拭きの後、表 - 1 に示すプライマーを塗布量を 100g/m ² になるよう塗布し、摂氏 20℃、相対湿度 60% の室内で 24 時間養生した。
接着面の含水状態	気乾	20℃、60%(RH) の室内で 24 時間以上置いた状態
	湿潤	20℃ の水中に 30 分以上浸けた供試体を水中から取り出し、ウェスで接着面の水を拭き取り、20℃ の室内に 10 分間程度置き、表面だけ乾いた (白くなった) 状態
	濡れ (雨天模擬)	20℃ の水中に 30 分以上浸けた供試体を水中から取り出した直後の状態 (接着面の水を拭き取らないまま)

表 - 4 PMM および普通モルタルの接着強さ

母材種類	接着面の処理	接着面の含水状態	接着層厚み	母材曲げ強さ (MPa)	接着強さ (MPa)	接着強さ/母材曲げ強さ (%)	破壊位置 (面積%)		
							母材	界面	接着剤
普通モルタル	アセトン拭き	気乾	1.5mm	4.9	3.5	71.4	77	23	0
	プライマー処理				4.4	89.8	100	0	0
PMM	グラインダー処理	気乾	1.5mm	14.7	10.4	70.7	100	0	0
	プライマー処理				10.6	72.1	93	7	0
	アセトン拭き	気乾	1.5mm		10.2	69.4	95	5	0
			密着		8.2	55.8	77	23	0
		湿潤	1.5mm		10.7	72.8	100	0	0
			密着		9.0	61.2	79	21	0
		濡れ	1.5mm		12.0	81.6	93	7	0
			密着		10.1	68.7	82	18	0

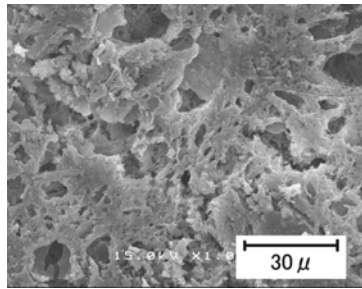
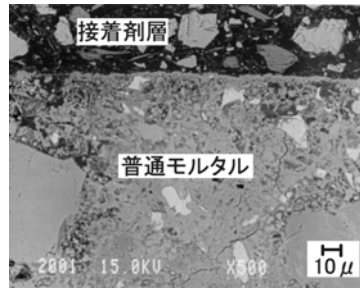
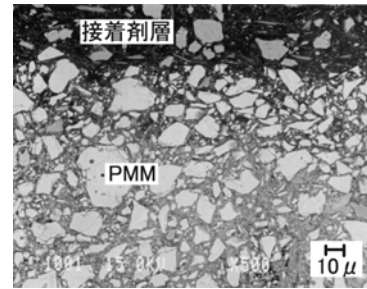


図 - 1 3%HClでエッチングしたPMM表面のSEM写真



普通モルタルと接着層の断面



PMMと接着層の断面

図 - 2 EPMAによる接着層付近の背面反射像

ら、プライマー処理をしなくても処理と同様な効果が得られるものと考えられる。ディスクグラインダー処理の効果も顕著ではなかった。これも、上述のようにPMM接着面付近にポリマーが存在するためと思われる。

図 - 2には、接着断面のEPMA写真を示す。普通コンクリートの場合、接着層との界面がはっきりしているのに対して、PMMの場合、このようなはっきりした界面が認められなかった。これは、ポリマーが母材内部に分散し、接着層との差が小さいこと、表面処理を行っていないことによると推定される。

PMMの場合、表 - 4より乾燥および湿潤状態の接着面よりも濡れた状態の方が、接着強さが大きい結果が得られた。接着層の厚みが1.5mmの接着強さは、密着よりも高い。実験に用いた接着剤はパテ状のもので、エポキシ樹脂に骨材を混合したものである。密着にすると、PMM間に骨材のみが存在する部分が増え、接着剤と母材の接触面積が減り、強さを低下させる原因と考えられる。破壊位置も密着にすると、界面破壊の部分が20%もあり、上記を裏付けている。

3. 接着性を活かした高強度ポリマーセメントモルタル製マンホールの構造性能

3.1 試験方法

(1) マンホールの形状

PMM製マンホールの一体化性能の検討には、内部寸法 W1300 × D3720 × H1800mmのマンホールの6/13縮小模型を用いた。

(2) マンホール部材の作製

性能試験に用いる部材は、表 - 1に示す材料を用い、表 - 2に示す配合を用いて製作した。モルタルは、容量100Lのパン形強制練りミキサーを用いて90秒間練り混ぜ、図 - 3および図 - 4に示す寸法に無振動で成形した後、接着用供試体と同様な養生を行い、マンホール部材とした。マンホール部材の接合は、表 - 1に示すエポキシ樹脂系接着剤を用い、試験に先だつ7日前に行った。なお、雨天時の施工条件も考慮し、連結面が乾燥した状態で接着した乾式接着と連結面に多量に水分が残る濡れ状態で接着した湿式接着の2水準を設けた。

(3) 外圧試験および輪荷重試験

JIS A 5363 - 2001(プレキャストコンクリート製品 - 性能試験方法通則)の規定に則り、図 - 3(a)に示すような箱形ラーメンの線荷重試験(以下、通常設置外圧試験という)および図 - 3(b)に示すような90°回転させ、接着部に最大の曲げ

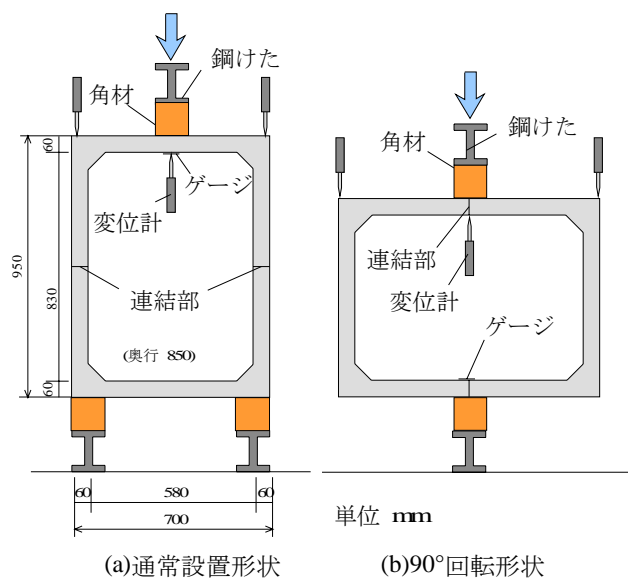


図 - 3 外圧試験方法

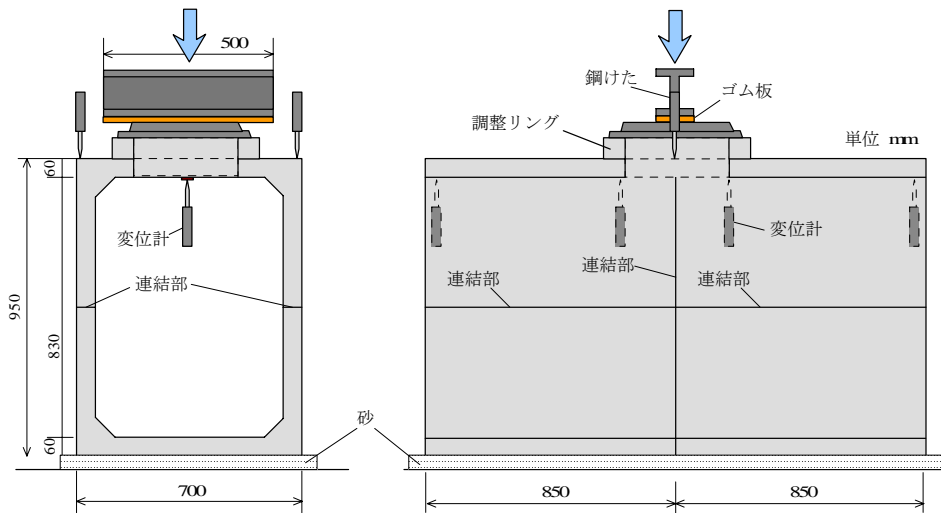


図 - 4 輪圧荷重試験方法

モーメントが作用する試験(以下、90°回転設置外圧試験という)を行った。また、部材4つを接着し、その上面中央部に集中荷重を作用させ、実物の荷重状態を模擬する試験(以下、輪荷重試験という)を行った。

(4) FEMによるシミュレーション

力学的挙動のシミュレーションを行うべく、FEM解析を試みた。弾性解析(モルタルの弾性係数30GPa、ポアソン比0.2)とし、主応力値が母材の引張強さ(7.5MPa)に達した時点をしび割れ発生とした。また、接合部については、表-4の結果から30%の低減を考慮した値(5.25MPa)を用いた。

3.2 試験結果および考察

(1) PMMの基本物性

PMMの基本物性を把握するために、マンホール部材と同一バッチから採取したPMMのフレッシュ・硬化特性を表-5に示す。なお、強度試験は、構造試験と同じ日に行った。PMMの曲げ強さは15.5MPa、圧縮強さは69.5MPaである。

表 - 5 マンホール製造用PMMの基本物性

フロー(mm)	236
空気量(%)	3.3
曲げ強さ(MPa)	15.5
圧縮強さ(MPa)	69.5
引張強さ(MPa)	7.5
弾性係数(MPa)	29928
ポアソン比	0.22

(2) 通常設置外圧試験結果

表-6および図-5(a)には、しび割れ発生荷重および発生位置を示す。しび割れ発生荷重は、乾式接着とした試験体の方が大きい結果となった。しび割れ発生位置は両者とも頂版の内面中央位置であった。しび割れ発生以降、荷重を増加させると、側版の外面上部にしび割れが発生し、最大荷重を示した。

図-6には、頂版内面の中央位置のコンクリートひずみと載荷荷重との関係を示す。図に示すように接着方法に因らず、頂版のコンクリートひずみが約250μにて最大荷重を示した。図-7には、頂版の中央位置の鉛直変位量と載荷荷重との関係を示す。接着方法の違いに因らず鉛直変位量と載

表 - 6 性能試験結果とFEM解析結果の比較

試験方法		性能試験結果		FEM解析結果	
		連結方法	ひび割れ 位置 荷重(kN)	ひび割れ 位置 荷重(kN)	
外圧試験	(a)	乾式	頂板中央内面 46.6	性能試験と同じ	37.3
		湿式	頂板中央内面 39.7	性能試験と同じ	
	(b)	乾式	下連結部内面 14.8	性能試験と同じ	14.4
		湿式	下連結部内面 15.0	性能試験と同じ	
輪荷重試験	乾式	底板中央	123.0	性能試験と同じ	105.0
	湿式	底板中央	108.0	性能試験と同じ	

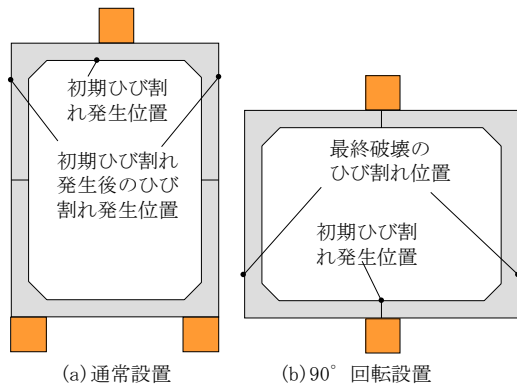


図 - 5 外圧試験のひび割れ発生位置

荷荷重との関係は変化せず、0.3 ~ 0.4mm程度にてひび割れ発生荷重に達していることが確認できる。これらの図から、FEM解析が実際の挙動を精度よく再現できることが確認できた。

(3) 90° 回転設置外圧試験結果

表 - 6 および図 - 5 (b)には、ひび割れ発生荷重およびひび割れ発生位置を示す。ひび割れ発生荷重は、接着方法に因らず約15kNの値を示した。初

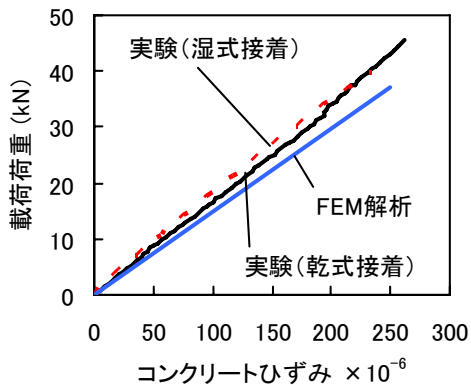


図 - 6 通常設置外圧試験における頂版内面の中央位置のコンクリートひずみと載荷荷重との関係

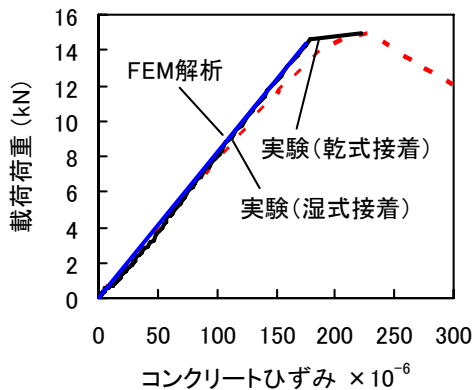


図 - 8 90° 回転設置外圧試験における頂版内面の中央位置のコンクリートひずみと載荷荷重との関係

期ひび割れ発生位置は両者とも部材の接着部内面であった。さらに試験機に油を送ると、荷重は増加せずに、接着面のひび割れが開きはじめ、最終的に側面（通常設置形状にて頂版部分）の外側にてひび割れが発生し最終破壊に至った。

初期ひび割れ発生箇所が下側接着位置であったため、その位置のコンクリートひずみと載荷荷重との関係を図 - 8 に示す。図に示すように接着部分の含水状態に因らず、接着位置のコンクリートひずみが約 200 μにて最大荷重となった。図 - 9 には、上下接着面の鉛直変位量と載荷荷重との関係を示す。接着方法の違いに因らず上下接着面の鉛直変位量と載荷荷重との関係は変化ない。これらの図から、FEM解析が実際の挙動を精度よく再現できることが確認できた。

(4) 輪荷重試験結果

表 - 6 に、ひび割れ発生荷重を示す。ひび割

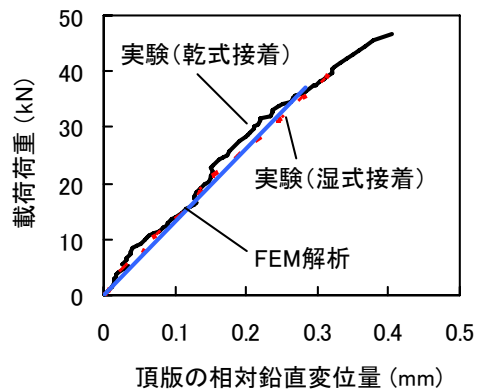


図 - 7 通常設置外圧試験における頂版中央位置の鉛直変位量と載荷荷重との関係

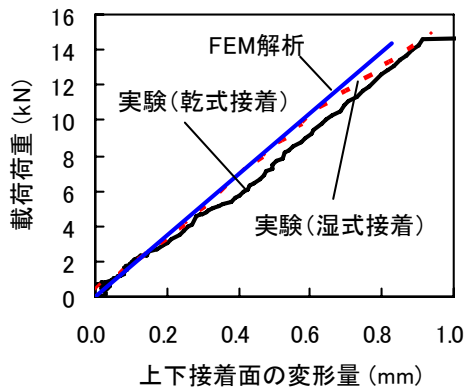


図 - 9 90° 回転設置外圧試験における上下接着面の鉛直変位量と載荷荷重との関係

れ発生荷重は、乾式接着の場合の方が湿式接着の場合に比べ大きい値を示し、初期ひび割れ発生位置は底版中央であった。これは、砂の上に設置した状態で試験を行ったため底版には中央位置が最も大きくなるような接地圧分布となる。そのため、底版の中央位置にて初期ひび割れが生じたものと考えられる。

図 - 10 に、頂版の鉛直変位量と載荷荷重との関係を示す。この図より、輪荷重試験においてはひび割れ発生以後にも変形は大きいものの徐々に荷重が増加し、乾式接着で 167kN、湿式接着で 140kN が最大荷重であった。外圧試験の場合は、ひび割れ荷重が最大荷重でありかつ破壊荷重となることと相違する。応力が引張強度になる範囲が限定するためと考えられる。

図 - 10 より、ひび割れ発生荷重は乾式接着の場合が湿式接着の場合に比べ若干大きいものの、ひび割れ発生時の頂版の相対変位量は、ともに約 0.2mm であり、接着方法の影響は少ない。これらの図から、FEM 解析が実際の挙動を精度よく再現できることが確認できた。

(5) 接着面の含水状態の影響

接着性能試験では、接着面が濡れた状態の方が高い接着強さが得られたが、構造性能試験では、乾燥の場合の方が高耐荷力が得られた。この理由については、今後さらなる検討を要するが、接着性能試験では、強さ試験直前まで相対湿度 100% の環境中に養生したため、試験時の乾燥程度が構造性能試験の場合に比べて十分でなかったこと、構造性能試験体の接着部は広いため、十分に濡れた状態を再現できなかったこと、母材・接着部強度のばらつきなどが考えられる。

4. 結論

1) PMM の接着強さ試験から以下の知見を得た。

(1) PMM 同士をエポキシ樹脂で接着した場合の接着強さは、普通モルタルの 2 倍以上の値が得られる。接着層の厚みが 1.5mm の場合の接着強さは、10.2 ~ 12.0MPa であり、母材の曲げ強さに対する割合は、69.4 ~ 81.6% である。

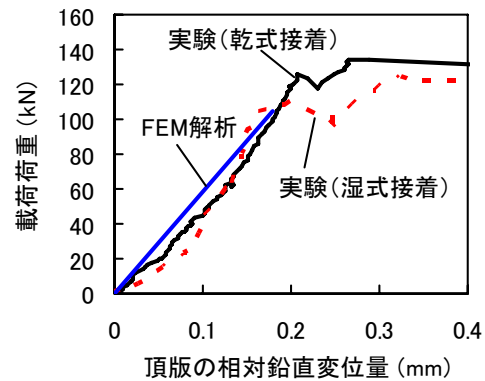


図 - 10 輪荷重試験における頂版中央位置の鉛直変位量と載荷荷重との関係

(2) PMMの接着強さは、接着面の処理方法による著しい差が認められない。すなわち、特殊な表面処理をしなくても、高い接着強さを得ることができる。また、湿潤状態の接着により気乾状態で接着する場合と同等以上の強度が得られる。

2) 接着剤で接合した1/2PMM製マンホール模型の性能試験およびFEM解析から以下の知見を得た。

(1) コンクリートのひずみおよび変形は、ひび割れ発生までは、荷重の増加とともに直線的に増加する。

(2) 部材の接着面が湿潤状態で接合する場合の構造性能は、乾燥状態で接合する場合と比べ、低いもののほぼ同等の値が得られる。濡れた状態の接着強度が高いという1)(2)の結論と異なった原因についてはさらに検討を行いたい。

(3) 線形FEM解析により、ひび割れ荷重およびそこに至るまでのひずみおよび変形量を精度良く再現できる。

参考文献

- 1) 林志翔, 唐沢明彦, 福田康昭ほか: 高強度ポリマーセメントモルタルの開発 - 配合, 材料および養生条件 - , 土木学会年次講演概要集, Vol.59-V, pp.311-312, 2004.9
- 2) 福田康昭, 林志翔, 唐沢明彦ほか: 高強度ポリマーセメントモルタルの開発 - フレッシュ性状, 力学的性質および耐久性 - , 土木学会年次講演概要集, Vol.59-V, pp.309-310, 2004.9