論文　垂直‐せん断荷重を受ける断面修復材の付着強度に関する研究

朴　同天[*1]・兼松　学[*2]・野口　貴文[*3]

要旨：ポリマー含有率や基板コンクリートの表面粗さ及び吸水率が付着強度に及ぼす影響を評価するため，様々な角度の圧縮‐せん断試験と引張‐せん断試験を行った。その結果，圧縮-せん断荷重を受ける部位の補修は，力学的な強度が高い補修材料を，引張-せん断荷重を受ける部位の補修は，付着力が高い補修材料を使用するのが望ましいと言う結論が得られた。あわせて，補修材の保水係数や基板の粗さの影響も検討した。

キーワード：圧縮‐せん断試験，引張‐せん断試験，表面粗さ，保水係数

1．はじめに

様々な劣化因子の浸透による鉄筋コンクリート構造物の中の鉄筋腐食やそれに伴うかぶりコンクリートの剥落などの補修に際して，一般的にポリマーセメントモルタルを用いた断面修復工法が数多く使用されている。しかしながら，付着性に優れていると言われるポリマーセメントモルタルであっても，ポリマーの含有率や基板コンクリートの状態，補修後の養生，環境条件，施工の技術などによって性能のばらつきが多く，信頼性の高い補修を行なうためには構造物の応力，補修の条件，補修材の性能を考慮した付着試験方法が必要である。

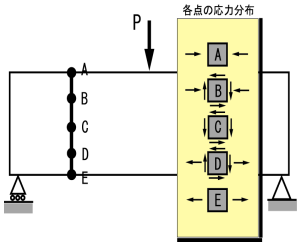
試験方法としても，既往の研究でよく見られる単純引張接着試験または建研式せん断試験では，**図－1** のような梁の応力状態を合理的に再現できないので，多軸荷重を支える補修材の付着界面の挙動及び特性を表現するに困難であると考えられる。また，付着の要因は一つだけではなく，アンカー効果，補修材の分子と基板の分子の化学結合，被着材の中への拡散接着などが複合的に作用するので，一つの実験として付着性能を特定できない[1)]。

したがって，本研究ではポリマー含有率や基板コンクリートの表面粗さ及び吸水率が付着強度に及ぼす影響を評価するため，様々な角度の圧縮‐せん断試験と引張‐せん断試験を行った。また，その結果に基づき，実際の構造物の補修への適用性を検討した。

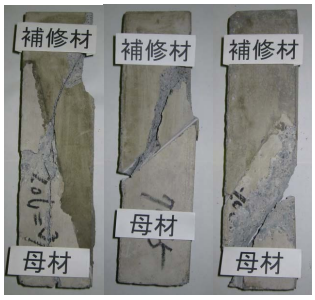
2．実験概要

多軸荷重下の付着界面の強度特性が表現できる理想的な方法が**図－2** のような付着破壊包絡線である。同時に**図－2** に試験方法及び試験概要に関する概念図を示す。

図からわかるように，引張‐せん断試験は，多く付着界面で破壊が生じるので，様々な角度での付着強度の測定が可能であるが，圧縮‐せん断試験の場合，付着界面の強度の測定が困難

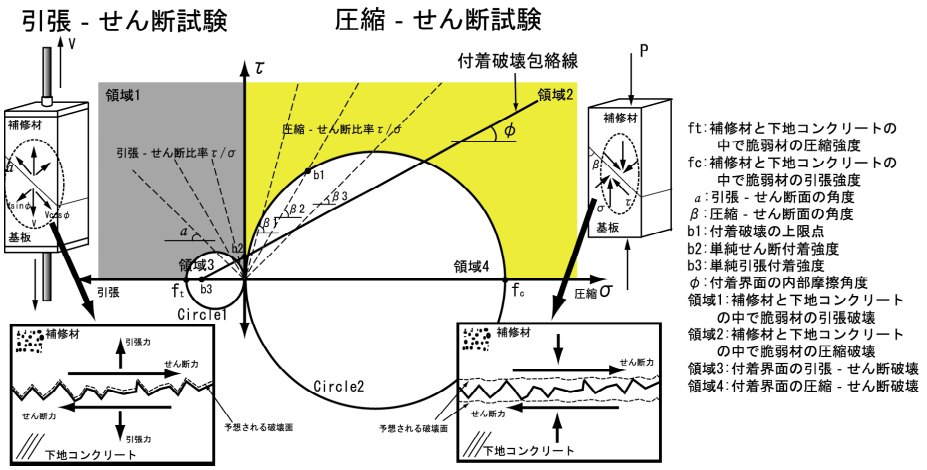


図－1　梁の応力分布



写真－1　圧縮-せん断試験の破壊パターン

*1　東京大学　工学研究科建築学専攻　工修　(正会員)
*2　東京大学　工学研究科建築学専攻　工修　(正会員)
*3　東京大学　工学研究科建築学助教授　工博　(正会員)



図－2　試験方法及び付着破壊の概念図

であり，求められる強度は，補修材と基板コンクリートの中で脆弱材の強度と高い関係性があると考えられる(**写真－1**)。

2.1 使用材料及び基板作製

(1)圧縮‐せん断試験の基板の作成

基板の調合を**表－1** に示す。基板のサイズは 4×4×16(cm)とし，24 時間で脱型した後，20±2°C の水中で 3 日間，20±2°C，湿度 60±5%の恒温恒湿室で 5 日間気乾養生した。ドライアウト現象の確認のため，別の W/C=70%の基板を作製し，補修材の打設前，6 時間の水浸漬を行い，3.7%に含水率を増加させ，ドライアウト現象が起こらないように基板を用意した(W70%)。圧縮‐せん断の応力分布の変化のため，角度 15°，30°，45°となるように，予めプラスチック板を挟んで基板モルタルを打ち込んだ。約 45°以上では付着しなない状態でも荷重を支える可能性があるので，測定は付着角度 45°まで行った[2)]。プラスチック板を用いて作製した様々な付着角度を持つ基板の表面は，ディスクサンダーと 150 番研磨紙を用いて表面処理を行った。

表－1　圧縮-せん断試験用の基板

W/C(%)	セメント/細骨材	高性能 AE 減水剤(%)	圧縮強度 (MPa)
30	1/3	0.38	84.6
50		-	49.8
70		-	28.1

(2)引張‐せん断試験の基板の作成

普通ポルトランドセメントを用い，**表－2** に示す調合で W/C を 30，50，70%の 3 水準とした。基板は 10×10×40(cm)の型枠を用いて作製し，補修材の打設まで 1 ヶ月の水中養生と 2 ヶ月の 20±2°C，60±5%(RH)の気乾養生を行った。材齢 90 日以上の基板コンクリートを角度 90°，75°，60°，45°に割裂した後，ワイヤブラシを用い脆弱部を除去することで基板を作製した。

(3)ポリマーセメントモルタル

実験に使用したセメント混和用再乳化形粉末樹脂の特性を**表－3** に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを，細骨材は大井川産陸砂(密度：表乾 2.57g/cm^3)を使用した。ポリマーセメントモルタルの調合を**表－4** に示す。

表－2　引張‐せん断試験の基板の作成

W/C(%)	単位水量 (kg/m^3)	細骨材率 (%)	粗骨材(kg/m^3) 大	中	小	混和剤 (g/m^3)	空気量 (%)	スランプ (cm)	圧縮強度 (MPa)
30	185	38	417	232	278	1500	4.5	16.5	84.1
50	185	43	435	242	290	833	4.5	20.0	54.7
70	178	48	424	235	283	2000	3.2	12.5	17.8

2.2 試験方法

(1)ポリマーセメントモルタルの物性値試験

実験は JIS A 1171(ポリマーセメントモルタルの試験方法)に準じて行った。養生は封かん養生である。補修材料の保水係数の測定に関しては日本建築仕上げ材工業会規格(NSK 規格)NSKS - 003 に準じて測定を行った。測定方法は内径 50㎜×高さ 10㎜の型枠内のポリマーセメントモルタルからろ紙(直径 185㎜)への水分の広がり(D)をもとめ，次式で算出した。

保水係数=50/ D　　(1)

(2)基板の毛細管吸水試験

吸水された水が側面から蒸発することを防ぐため，側面だけエポキシ樹脂防水材を塗布した後，防水材のない下面 3㎜ 程度が水に浸漬されるように設置し，吸水した水量を 30 分ごと，3 時間まで測定した。

(3)基板の表面粗さ測定

引張-せん断試験のため用いた基板コンクリートの割裂表面の粗さは接触式 3D スキャナ(ROLAND PIX-30 PICZA)を使用し，40㎜×40㎜の領域を縦横方向ともに 0.05㎜ピッチ，高さ方向に 0.025㎜ピッチで測定した。測定結果より各資料の算術平均粗さ(Sa)を算定した。

$$S_a = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{j=1}^{N} \sum_{i=1}^{M} \left| \eta\left(x_i, y_j\right) dxdy \right| \qquad (2)$$

ここで，　M，N は測定範囲における縦横の各ピッチを示す。　$\eta(x_i, y_j)$ は測定表面上の点 (x_i, y_j) における平均面から測定曲面目での偏差を示す。

(4)ポリマーセメントモルタルの付着強度試験

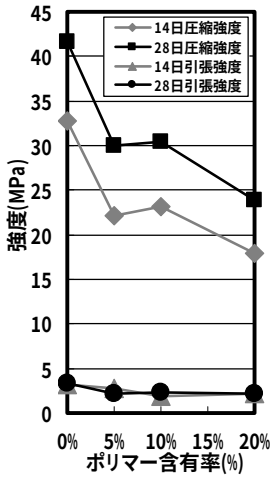
ポリマーセメントモルタルを打ち込んだ後，24 時間後脱型，14 日，28 日の測定まで 20±2°C，60±5%(RH)の恒温恒湿室で封かん養生した。載荷は変位で制御を行い，1㎜/min の速度として載荷，荷重を測定した。 引張-せん断試験はエポキシ接着材を用い，引張試験軸を付着させ後，偏心がかからないように注意して測定を行った。以下の結果は補修後封かん養生した場合の結果であるので，現場においては，補修後，性能を十分発揮するまで充分な養生を前提とする。

表－3　再乳化ポリマーの特性

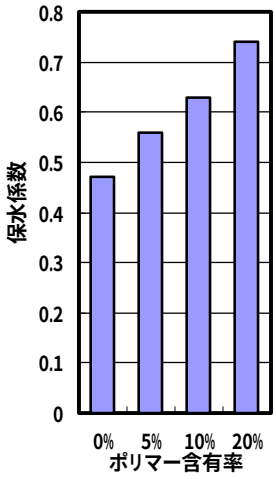
主成分	酢酸ビニル・ベオバ・アクリル共重合樹脂
不揮発分 (105°C×3 時間乾燥)	99±1%
見かけ密度 (JIS K 5101)	500±100g/l
ガラス転移温度(Tg)	14°C
粒子径 (315μm フルイ上残分)	3%以下
最低造膜温度	約 0°C

表－4　ポリマーセメントモルタルの調合

ポリマー含有率	セメント/細骨材	W/C (%)	消泡剤	フロー (cm)	空気量(%)
0%	1/3	50	0.7 (%)	16.0	6.2
5%				18.5	7.5
10%				19.1	8.2
20%				19.5	8.9



図－3 補修材の圧縮及び引張強度

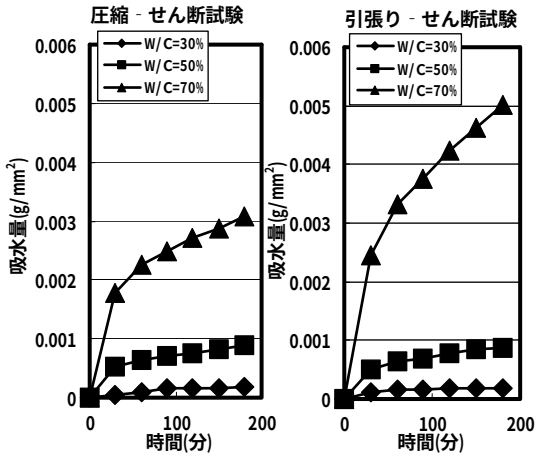


図－4　保水係数

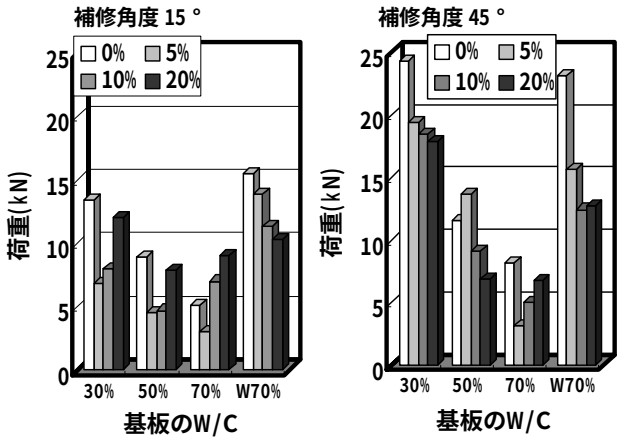
3．実験結果

3.1 ポリマー含有セメントモルタルの物性

ポリマー含有率の変化による材齢14日及び28日の圧縮強度，引張強度を**図－3** に示す。水セメント比 50%で封かん養生した補修材の力学的強度は，ポリマー含有率が増加すると共に，圧縮強度が低下する傾向を示した。但し，含有率 5%と 10%の差はあまり見えなかった。また，ポリマ



図－5　基板の吸水量



図－7　圧縮 - せん断試験の結果(材齢 28 日)

ー含有率 0%の場合が最も高い圧縮強度を示した。ポリマー含有率が増加するほど，含有率 0%に比べ，引張強度/圧縮強度比が高くなり，ポリマー含有セメントモルタルの特徴が顕著に観察された。補修材のフロー値および空気量は**表－4** のようにポリマー含有率と比例し増加した。保水係数も同様にポリマー含有率が多くなるほど高い値を示した(**図－4**)。

3.2　基板の吸水試験及び表面粗さ試験

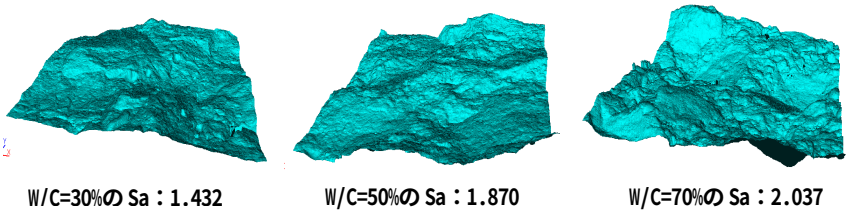
図－5 に圧縮-せん断試験および引張-せん断試験の基板の吸水量を示す。3 時間の測定では W/C=50%以下の基板は，0.01g/mm² を超えず，吸水の低い基板材であったが，W/C=70%の場合，測定終了まで吸水が収まらなかった。

割裂した基板コンクリートの表面の粗さを測定した結果，W/C が高くなるほど，表面の粗さが高くなる結果が得られた。**図－6** の S_a の数値は大きいほど表面は粗い。

3.3 圧縮-せん断付着試験の結果

表－5 は圧縮-せん断付着試験の結果である。**図－7** は圧縮-せん断試験の中で補修角度 15 ° と 45 ° の結果であり，実構造物では，それぞれ薄い補修と厚い補修に相当すると想定できる。**図－7** の補修角度 15 ° に対する付着強度は，補修材料の力学的な強度に依存しながら補修材の付着性能の影響を受け，0%の場合に最も高い付着強度を示し，他はポリマー含有率に比例した。補修角度 45 ° の場合は補修材の力学的な強度に大きく支配され，力学的に高い強度の材料ほど，結果的に高い付着強度として現れた。本研究ではポリマー含有によって強度が下がったので，付着強度も低下した。

図－8 は基板の W/C=30%と 70%に対する補修材の圧縮-せん断破壊包絡線である。W/C=70%のように吸水量が多い基板の場合は，吸水量が少ない基板(W/C=30%)に比べ低い付着強度を示した。それは既往の研究 [3)]でも指摘されているとおり，付着界面でドライアウト現象が発生した結果であると考えられる。一方，**図－7** から分かるように，基板が内部飽水・表面乾燥状態になると(W/C=W70%)，補修材からの水の吸水がなくなり，付着界面の補修材は充分に水和反応ができ，結果，高い付着強度を示したと考えられる。したがって，吸水量が多いく，凹凸がない面の基板に対して補修を行なう場合は，補修前に，補修材からの吸水を遮断するため，表面の水湿しだけでなく，完全飽水かプライマー処理などの方



図－6　引張-せん断試験の基板コンクリートの割裂表面の粗さ

法を使用するのが望ましいと考えられる。また，材料選択においても，保水係数や付着強度が高い補修材を選定し，付着界面で十分付着強度の発現が出来るようにするのが重要であると考えられる。

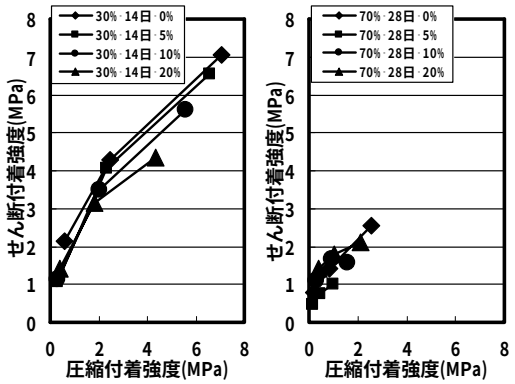
3.4　引張-せん断付着試験の結果

図－9 は引張-せん断付着試験から求めた引張-せん断破壊包絡線である。基板の W/C=70%以外の場合はポリマー含有率の増加とともに付着力も高くなった。**図－10** はポリマー含有率 5%の材齢別の付着強度を表わす破壊包絡線であるが，材齢 28 日は 14 日よりやや高い付着強度を示したが，さほどおおきな変化は見られなかった。

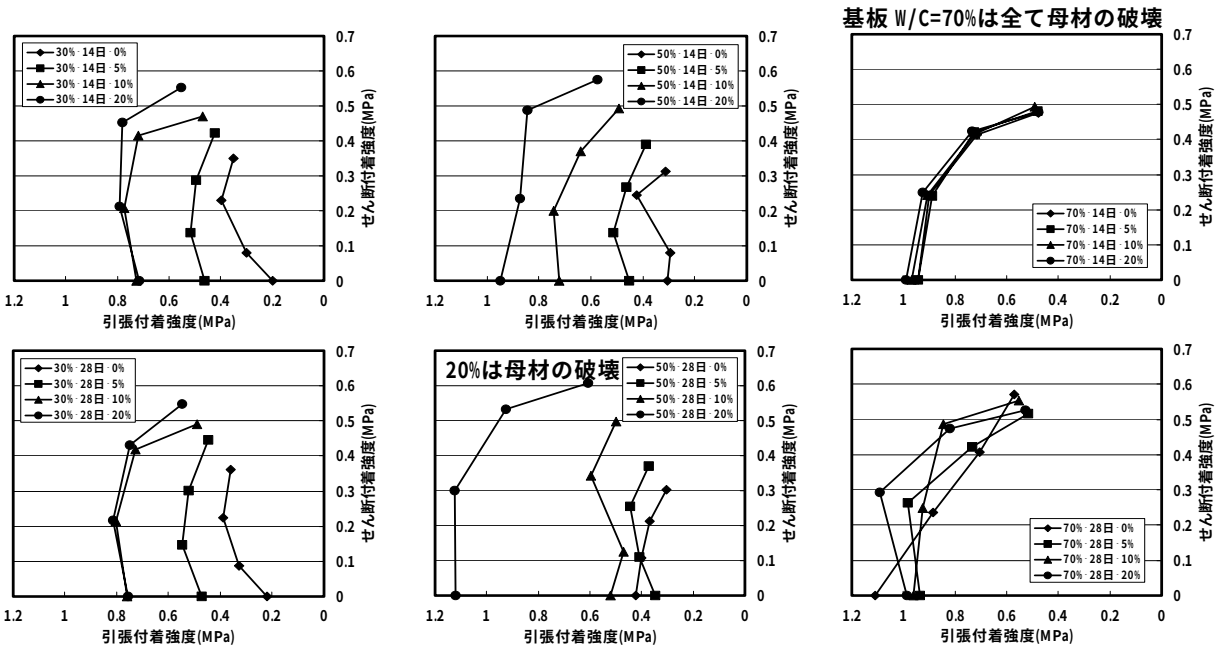
図－11 は付着角度 90°と 45°の結果である。基板のW/Cが70%の場合はすべての補修材に対して高い付着強度を示し，その破壊状況も付着界面ではなく，補修材か基板の引張破壊で,付着界面ではなく，補修材か基板の引張破壊であった。その理由は W/C=70%は割裂表面が粗く，ドライアウト現象の発生にもかかわらず，吸水力による拡散付着が大きく作用した結果であると考えられる。基板の W/C=30%，50%の場合は，補修材のポリマー含有率が増加するほど，高い保水係数や分子付着力に起因し，高い付着強度を発現した。また，W/C=70%の基板との付着強度より低い値が出たのは，基板の吸水量が少ないので拡散付着を期待し難く，表面の粗さ(S_a)の程度も低いので，アンカー効果がほとんど働かなかったことが原因であると考えられる。

表－5　圧縮‐せん断付着試験の結果(単位(kN))

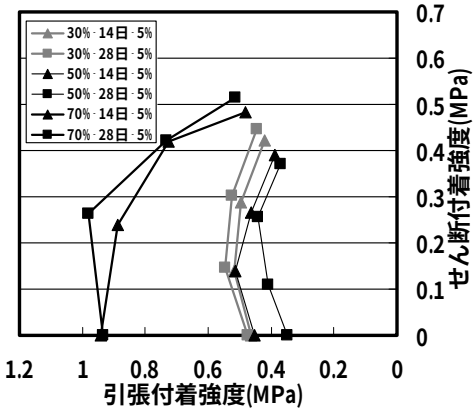
基板モルタルのW/C	ポリマー含有率	垂直荷重と付着界面の角					
		15°		30°		45°	
		材齢14日	材齢28日	材齢14日	材齢28日	材齢14日	材齢28日
30%	0%	13.62	13.40	15.84	16.22	22.58	24.36
	5%	6.94	6.81	15.00	10.33	20.94	19.39
	10%	7.29	7.97	12.96	12.96	17.92	18.42
	20%	9.07	12.08	11.62	15.00	13.91	17.91
50%	0%	6.67	8.92	5.18	6.76	13.78	11.58
	5%	3.53	4.50	5.97	5.19	12.05	13.70
	10%	5.23	4.72	3.13	4.78	7.26	9.13
	20%	4.69	7.85	3.19	4.35	5.89	6.92
70%	0%	5.08	5.13	4.94	5.19	7.17	8.20
	5%	4.32	3.06	4.08	2.75	3.76	3.18
	10%	7.85	7.03	6.80	6.12	6.64	5.05
	20%	8.83	9.03	6.51	6.59	7.59	6.77
W70%	0%	9.26	15.47	12.08	17.29	12.93	23.15
	5%	5.96	13.90	8.85	15.15	13.06	15.65
	10%	5.07	11.37	8.42	10.60	8.76	12.43
	20%	4.15	10.31	11.62	12.14	9.52	12.72



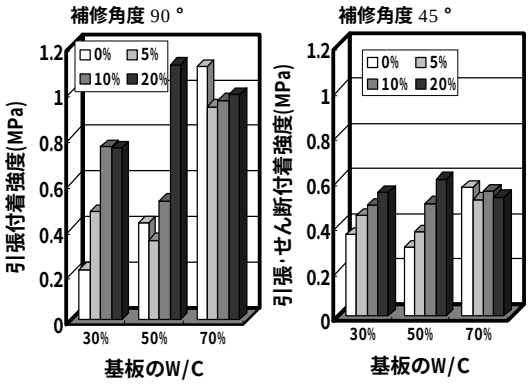
図－8　圧縮‐せん断試験の付着破壊包絡線



図－9　引張-せん断試験の付着破壊包絡線



図－10　ポリマー含有率 5%の材齢別の付着強度を表わす包絡線



図－11　引張-せん断試験結果(材齢 28 日)

4．考察

部材の圧縮側の応力をほとんど受けない薄い補修では，補修材の付着力が補修の成否を左右するので力学的な強度より補修材の保水係数やポリマー含有率などに着目し補修材を選択するのが望ましいものと考えられる。また，吸水量が高い基板に対しては，ドライアウト現象によって，十分に補修材の水和が妨げられる懸念があるので，基板の表面処理や補修材の保水係数などを考慮する必要があると考えられる。

圧縮-せん断荷重を受ける表面が粗く，厚い補修の場合は，付着界面の破壊より脆弱材の破壊によって付着強度が決定されるので，高い力学的な性能を持つ材料を使用するのが望ましいと考えられる。また,この部分ではドライアウト現象が起きても，それによる悪影響はほとんどない。引張-せん断荷重を受ける部分の補修材の付着強度は，基板の吸水量や表面の粗さによって大きく変化する。本実験の基板の W/C が 70%は,割裂表面が粗く，吸水量が多いので，拡散付着がうまく働き，補修材の性能の影響はほとんどみられず, 同程度の破壊強度を示した。しかし,基板の W/C が 50%または 30%の場合は,保水係数や付着力が低い材料を使用すると，ブリーディングによって付着界面で十分付着できない可能性もあるので，注意する必要がある。

5．結果

(1)補修材の付着特性は，単純引張試験や建研式せん断試験のみでは十分表現できず，実際の現場での適用性を考慮した場合,圧縮-せん断や引張-せん断試験を通じ付着包絡線を求めるのが，合理的な方法であると考えられる。

(2)ポリマー含有率が高くなると，圧縮強度の低下，引張強度/圧縮強度比の増加，保水係数の増加，付着強度の増加などの現象が起こる。

(3)基板コンクリートの W/C が高くなるほど，割裂した面は粗くなる。

(4)圧縮-せん断試験は，付着表面が平らではないと，破壊は付着界面ではなく基板と補修材のうちの脆弱材で発生するので，力学的な強度を考慮した補修材の選択が必要である。しかし，引張-せん断荷重を受ける部材の補修では，力学的な強度より,付着力に着目し補修材を選定することが重要であると考えられる。

本研究で用いた再乳化形ポリマーはクライアンドポリマー株式会社から提供いただき，ここに記して謝辞を表わす。

参考文献

1) 三刀　基郷：接着の本，日刊工業新聞社，2003.5
2) Simon Austin : Shear bond testing of concrete repair, Cement and Concrete Research, Vol.29, pp.1067-1076, 1999
3) 榊原　弘幸，佐々木　孝彦：ポリマーセメントモルタルの接着強度に及ぼすコンクリート下地処理法の影響，材料，Vol.52，No.9，pp.1082-1088，Sep.2003