

論文 自己充填モルタルのせん断付着強度

安井 一貴*1・森實 直人*1・大内 雅博*2

要旨: 被着体表面の形状、水の存在、付着面での生成物の観点から自己充填モルタルのせん断付着強度の要因を明らかにした。被着体表面の形状がせん断付着強度に及ぼす影響は、機械的なかみ合わせの有無によって大きく異なった。機械的なかみ合わせが生じる場合は、被着体のせん断強度と自己充填モルタルのせん断強度の平均値がせん断付着強度の目安になることが分かった。機械的なかみ合わせが生じない場合、被着体表面の形状はせん断付着強度に関係がなく水の存在が支配要因であったが、付着面での生成物の影響も認められた。

キーワード: 自己充填モルタル、表面の形状、水の存在、付着面での生成物、せん断付着強度

1. はじめに

自己充填モルタルを補修材料として適用させた場合、必要な性能の一つは、既存コンクリートと補修材料との十分な付着強度である。付着強度には、引張付着強度とせん断付着強度がある。既往の研究では、引張付着強度に着目し、引張付着強度の要因が付着面への水の供給であることが明らかになっている¹⁾。

本研究の目的は、被着体表面の形状、水の存在、付着面での生成物の観点からせん断付着強度の要因を明らかにすることである。

2. 試験方法

2.1 供試体の作製方法

供試体はφ100×H200 mmの円柱供試体とした。供試体を写真-1に示す。被着体は、高さ寸法の半分とした。被着体を作製し、試験材齢まで水中養生した。湿潤状態の被着体を鋼製円柱型枠に設置し、その上に自己充填モルタルを打継いだ。自己充填モルタルの使用材料を表-1に示す。1ケースに対し供試体数を5本とした。

シリーズ1, 2は型枠にラップをかけ、24時間後に脱枠した。その後、材齢3日まで水中養生後、材齢7日まで20℃、湿度60%の恒温室内で気中養生した。シリーズ3, 4は材齢7日まで封緘養生し、材齢7日まで封緘養生後、脱枠し、シリーズ3は温度95℃に、シリーズ4は温度60℃に設定した恒温恒湿器内で気中養生した。

2.2 せん断付着強度試験方法

作製した供試体をせん断付着強度試験用に開発した直接引張せん断試験治具に取り付け、万能圧縮試験機で試験を行った。この治具ではせん断面に正確に加力することにより曲げモーメントの影響を極力除外するように工夫した。

直接引張せん断試験治具を写真-2に示す。せん断荷

重を加える速度は、「コンクリート割裂引張試験方法 (JIS A 1113: 1999)」を参考にした。載荷速度は、せん断応力度の増加が毎秒0.06±0.04 N/mm²となるように引張荷重をかけ、破断した時の荷重を最大荷重として断面積で除しせん断付着強度を求めた。せん断付着強度は5本の平均値とし、さらに標準偏差を求めた。

表-1 自己充填モルタルの使用材料

種類	物性値又は成分
セメント	普通ポルトランドセメント 比重: 3.15
細骨材	石灰石砕砂 比重: 2.68 吸水率: 0.81%
混和剤	高性能AE減水剤 ポリカルボン酸系



写真-1 せん断付着強度試験用供試体

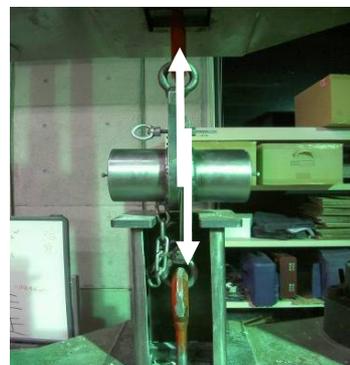


写真-2 直接引張せん断試験治具

*1 高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻 社会システム工学コース (正会員)

*2 高知工科大学准教授 工学部社会システム工学科 博士 (工学) (正会員)

3. 仮説の設定

自己充填モルタルのせん断付着強度の要因は、被着体表面の機械的なかみ合わせの有無によって大きく異なると考えた。そこで、機械的なかみ合わせが生じる場合と生じない場合に分け、それぞれ仮説を設定した。

(1) 表面に機械的なかみ合わせが生じる場合

仮説「供試体のせん断付着強度は、被着体と自己充填モルタルのせん断強度の平均値が目安になる」を設定した。界面に機械的なかみ合わせが生じる場合、被着体と自己充填モルタル側が直列ではなく並列であるため、界面強度はその平均値となると予想した。

(2) 表面に機械的なかみ合わせが生じない場合

仮説「せん断付着強度の要因は、水の存在と付着面での生成物である」を設定した。被着体の表面に機械的なかみ合わせが生じない場合には付着面で破断するため、表面の形状はせん断付着強度に影響を及ぼさないと考えたからである。付着面を遷移帯と同質であると見なした場合、水和生成物と骨材粒子との間の接着はファンデルワールス力による。そのため、遷移帯の強度はその中に存在する空隙の大きさとその量とで決まる⁴⁾ことから、供試体が乾燥することにより、被着体と自己充填モルタルの界面の水が蒸散しその部分が空隙となることでひび割れが進行し、遷移帯の強度が低下、または水が水和生成物間に存在することにより二者の距離を縮め接着力を生んでいた水が抜けることによってせん断付着強度は減少すると考えられる。

一方、森野は引張付着強度が特に弱い供試体の断面には $\text{Ca}(\text{OH})_2$ とされる白色の析出物が多い場合があるとしている²⁾。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の析出している面積が全体の50%を超えると著しく強度が低下する傾向があり、骨材の側に強度低下を起こすような鉱物が認められないときには $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の挙動と見なしでもよいとしている²⁾。よってセメントとの反応による生成物も影響していると考えた。

4. 表面の機械的なかみ合わせが付着強度に及ぼす影響

被着体の表面の機械的なかみ合わせが付着強度に及ぼす影響について検証した。機械的なかみ合わせが生じる場合の被着体をシリーズ1とした。

4.1 被着体の作製方法

鋼製円柱型枠の底に遅延剤含浸シートを敷き、その上にコンクリートを JIS A 1132 に従って打設した。機械的なかみ合わせの程度を変化させるために、打設から洗い出し作業までの時間を変化させた。打設から洗い出しまでの作業時間は6時間から24時間までと変化させた。遅延剤含浸シートと接していた円柱供試体の底面のモルタル分を高圧水で洗い出した。洗い出しの道具として、ホース内径が15 mm、吐き出し水量が6リットル/分の高圧洗浄機を用いた。ホース先から試験体までの距離は100 cmとした。洗い出しの時間は、2分とした。なお、洗い出しによって被着体の角の粗骨材が飛ぶのを防ぐために、型枠の底板のみを外し、外周側の型枠を残したまま洗い出しを行った。被着体の詳細を表-2に、自己充填モルタルの配合を表-3に示す。

4.2 表面形状の定量化方法

被着体表面の形状の定量化方法として、粗骨材の平均露出高さ、及び粗骨材の露出面積割合を用いた。粗骨材の平均露出高さを、洗い出し後の表面から露出している粗骨材の高さの平均と定義した。露出している粗骨材高さをノギスで十点測定し、平均値を粗骨材の平均露出高さとした。粗骨材の露出面積割合は洗い出しした表面を垂直方向からデジタルカメラで撮影し、仕上げ面表面積に対する粗骨材の露出面積割合を画像解析ソフトで算出した。その際、直径とみなされる長さが5 mm以下のものは露出面積には加えなかった。

4.3 実験結果

せん断力の載荷位置は、洗い出しによる露出した粗骨材の高さの平均位置から、粗骨材の平均露出高さの値を引いた位置とした。粗骨材の露出割合とせん断付着強度との関係を図-1に示す。

表-2 各被着体の詳細 (シリーズ1)

被着体の名称		示方配合							各種性状と強度				表面仕上げとその性状		
		W/C	s/a	単体量 (kg/m ³)					スランブ	空気量	水中養生	圧縮強度	洗い出し時間	粗骨材の平均露出高さ	粗骨材の露出面積割合
シリーズ	表記	(%)	(%)	W	C	S	G	Ad	(cm)	(%)	(日)	(N/mm ²)		(mm)	(%)
シリーズ1	1-A	45.5	39.1	160	352	712	1124	5.3	6	3.1	14	39.6	打設 6時間後	9	69
	1-B												打設 12時間後	4	28
	1-C												打設 18時間後	1	14
	1-D												打設 24時間後	1	13

粗骨材の露出面積割合が大きい程、せん断付着強度が高い結果となった。自己充填モルタルとの接触面積が増えたのが原因と考えられる。おおよそ、せん断付着強度は、被着体のコンクリートのせん断強度と自己充填モルタルのせん断強度の間に収まる結果となった。

表-3 自己充填モルタルの配合

	水セメント比 (%)	高性能 AE減水剤 (%)	細骨材容積比 (%)	モルタルフロー (mm)
シリーズ1	31.7	1.35	45	277×277

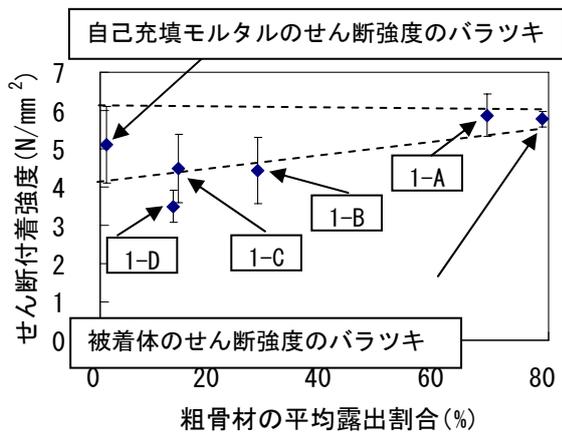


図-1 粗骨材の露出面積割合と付着強度との関係

5. 表面に機械的ななみ合わせが生じない場合の表面の形状がせん断付着強度に及ぼす影響の検証

被着体表面の機械的ななみ合わせが生じない場合の表面の形状が付着強度に及ぼす影響の仮説を検証した。機械的ななみ合わせが生じない場合の被着体をシリーズ2とした。

5.1 被着体の作製方法

平面度 $30\mu\text{m}$ 以下まで仕上げ可能なコンクリート研磨機で被着体表面を平滑になるまで研磨した。その後、砂粒の粒径が $635\mu\text{m}$ 以下のサンドペーパー#40 と粒径が $25\mu\text{m}$ 以下の#1000 で表面を研磨した。被着体の詳細を表-4 に、自己充填モルタルの配合を表-5 に示す。

表-4 各被着体の詳細 (シリーズ2)

被着体の名称		示方配合							各種性状と強度				表面処理方法
		W/C	s/a	単位量 (kg/m³)				スランプ	空気量	水中養生	圧縮強度		
シリーズ	表記	(%)	(%)	W	C	S	G	Ad	(cm)	(%)	(日)	(N/mm²)	
シリーズ2	2-A	45.5	39.1	160	352	712	1124	5.3	6	3.1	28	44.8	コンクリート研磨機で研磨後、#40のサンドペーパーで研磨
	2-B												コンクリート研磨機で研磨後、#1000のサンドペーパーで研磨

表-5 自己充填モルタルの配合

	水セメント比 (%)	高性能 AE減水剤 (%)	細骨材容積比 (%)	モルタルフロー (mm)
シリーズ2	31.7	1.35	45	277×278

5.2 実験結果

せん断力の載荷位置は、被着体と自己充填モルタルの付着面とした。機械的ななみ合わせが程度の表面の形状がせん断付着強度に及ぼす影響を検証した結果を図-2 に示す。砂粒の粒径が $635\mu\text{m}$ 以下のサンドペーパー#40 と、粒径が $25\mu\text{m}$ 以下の#1000 で表面を研磨したのでは、せん断付着強度の差は、 0.1N/mm^2 、標準偏差は 0.1N/mm^2 程度となった。表面の形状はせん断付着強度に影響を及ぼさなかったと言える。

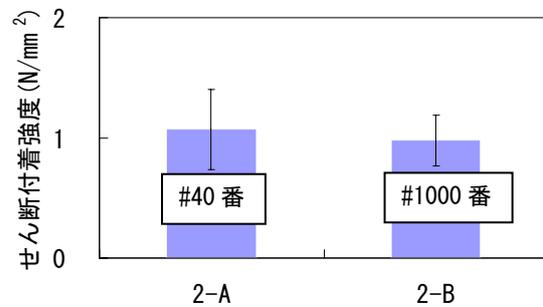


図-2 機械的ななみ合わせが生じない程度の表面の性状とせん断付着強度との関係

6. 機械的ななみ合わせが生じる条件についての考察

機械的ななみ合わせが生じる条件を粗骨材の平均露出高さから考察した結果を図-3 に示す。砂粒の粒径が $635\mu\text{m}$ 以下のサンドペーパー#40 で研磨した被着体の粗骨材の平均露出高さを $635\mu\text{m}$ とした。同様に粒径が $25\mu\text{m}$ 以下の#1000 で表面を研磨した被着体の粗骨材の平均露出高さを $25\mu\text{m}$ とした。粗骨材の平均露出高さを $635\mu\text{m}$ と粗骨材の平均露出高さが 1mm のものでは強度差が4倍となっている。よって、被着体表面の凹凸が 1mm 以上から機械的ななみ合わせが生じたと考えられる。

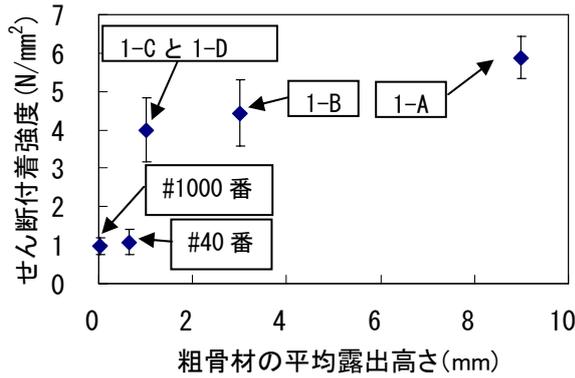


図-3 機械的なかみ合わせが生じる表面の凹凸の高さとせん断付着強度との関係

7. 水の存在がせん断付着強度に及ぼす影響

機械的なかみ合わせが生じない場合の被着体のせん断付着強度の要因として水の存在に着目し、せん断付着強度に及ぼす影響を検証した。検証に使用する被着体は、シリーズ3とした。各被着体の詳細を表-6に、自己充填モルタルの配合を表-7に示す。被着体に自己充填モルタルを打設し、7日間封緘養生を行なった後、脱枠した。その後、95℃の乾燥機に入れ4時間ごとにせん断付着強度試験用供試体5本の重量変化を計測後、せん断付着強度試験を行った。

せん断付着強度を7日目のせん断付着強度の平均で割った値をせん断付着強度の減少率とした。自己充填モルタルから減少した水量を自己充填モルタル全体に含まれる水量で割った値を水の減少率とした。水の減少がせん断付着強度に及ぼす影響についての実験結果を図-4に示す。水が抜けることによってせん断付着強度が大幅に低下することが分かった。水の減少がせん断付着強度の要因であることが確認できた。乾燥条件が同じである場合、自己充填モルタルの水の減少率とせん断付着強度の極めて高い相関関係が認められた。せん断付着強度の減少率と水の減少率との間には、

$$\text{せん断付着強度の減少率(\%)} = 15\text{Ln}(\text{水の減少率(\%)} + 14.5$$

という関係性があることを導き出した。

表-7 自己充填モルタルの配合

	水セメント比 (%)	高性能 AE減水剤 添加量 (%)	細骨材 容積比 (%)	モルタル フロー (mm)
シリーズ3	31.7	1.1	45	247×245

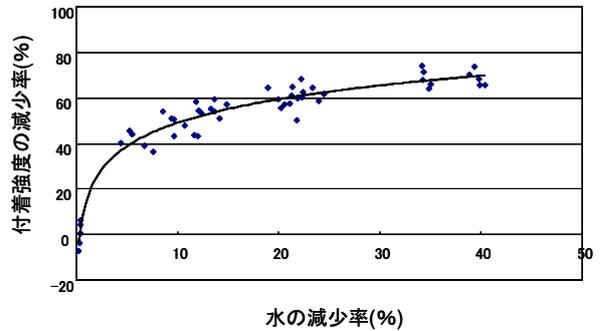


図-4 水の減少率とせん断付着強度の減少率との関係

8. 付着面の生成物がせん断付着強度に及ぼす影響

8.1 付着面生成物が付着強度に及ぼす影響の検証

機械的なかみ合わせが生じない場合のせん断付着強度の要因として付着面の生成物に着目した。付着面の水和物がせん断付着強度に及ぼす影響を検証した。検証に使用する被着体はシリーズ4とした。付着面の生成物を変化させるために、被着体は5種類とした。各被着体の詳細を表-8に、自己充填モルタルの配合を表-9に示す。

各供試体の含水量を求めるため、被着体に自己充填モルタルを打設、封緘養生7日後に脱枠し、60℃の恒温恒湿機で乾燥させた。含水量は、脱枠後の供試体質量から乾燥材齢36日の供試体質量を引いた値とした。付着面の生成物がせん断付着強度に及ぼす影響を検証した結果を図-5に示す。被着体が石灰岩のみ、または砂岩のみの供試体は、含水量にあまり違いがないのにも関わらず、被着体を砂岩のみとした供試体のせん断付着強度が高い結果となった。同様に、水セメント比が同じコンクリートの被着体であったとしても骨材に砂岩を使用した供試体が高い結果となった。

表-6 各被着体の詳細(シリーズ3)

被着体の名称	示方配合							各種性状と強度				表面処理方法
	W/C	s/a	単位量 (kg/m³)					スランブ	空気量	水中養生	圧縮強度	
	(%)	(%)	W	C	S	G	Ad	(cm)	(%)	(日)	(N/mm²)	
シリーズ3	45.5	39.1	160	352	712	1124	5.28	10	4.9	28	43.7	自己充填モルタルを打設する直前にコンクリート用研磨機で研磨して平滑にする

被着体をセメントペーストとした供試体は含水量が最も多いにも関わらず、最も強度が低い結果となった。このことから、付着面での生成物の違いがせん断付着強度に影響を与えていると考えられる。

表-9 自己充填モルタルの配合

	水セメント比 (%)	高性能 AE減水剤 添加量 (%)	細骨材 容積比 (%)	モルタル フロー (mm)
シリーズ4	31.7	1.35	45	267×265

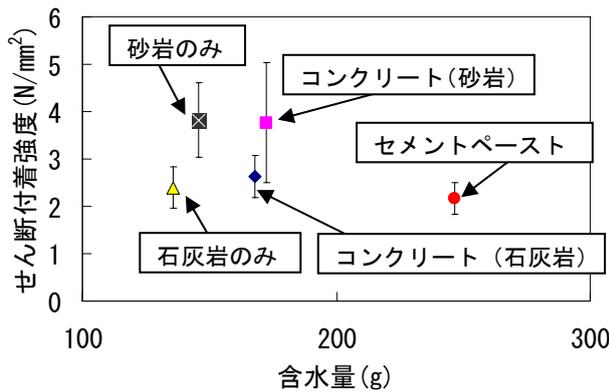


図-5 含水量とせん断付着強度との関係

8.2 付着面の水和生成物がせん断付着強度に及ぼす影響の有意差の検討

封緘養生7日後に脱枠し、60℃に温度設定した恒温恒湿機で抜ける水分量の変化がほぼ見られなくなるまで乾燥させた。水の存在の影響を除き、付着面の水和生成物のみが受け持つせん断付着強度を求めためである。抜けた水分量の変化率は、乾燥材齢1日で供試体から抜けた水分量を100%とした。検証に使用する被着体は、シリーズ4とした。各被着体の詳細を表-8に、自己充填モルタルの配合を表-9に示す。乾燥材齢と抜けた水分量の変化率を図-6に示す。乾燥材齢16日以降からは、抜ける水分量が一定となった。

乾燥材齢26日にせん断付着強度試験を行った。封緘養生7日と乾燥材齢26日の被着体毎のせん断付着強度試験の結果を図-7に示す。乾燥材齢26日のせん断付着強度は、被着体に砂岩を使用したコンクリートの供試体が最も強度が高い結果となった。被着体に砂岩を用いた供試体以外は、供試体の自重、もしくは、試験機と供試体の自重によって破断した。このように、せん断付着強度が保持されるものと消失するものに分かれる結果となった。

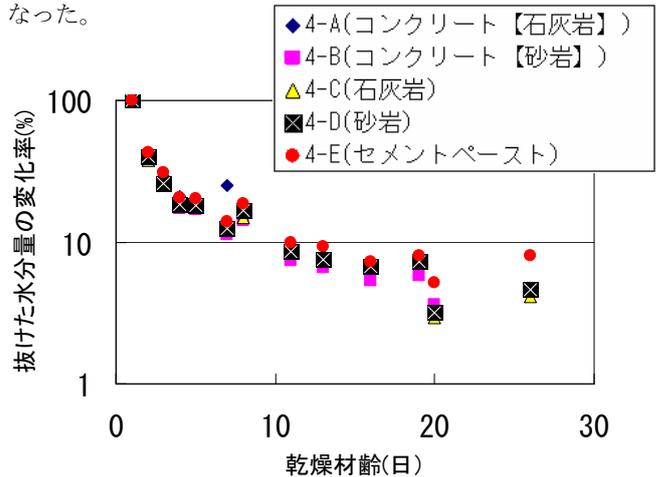


図-6 乾燥材齢と抜けた水分量の変化率の関係

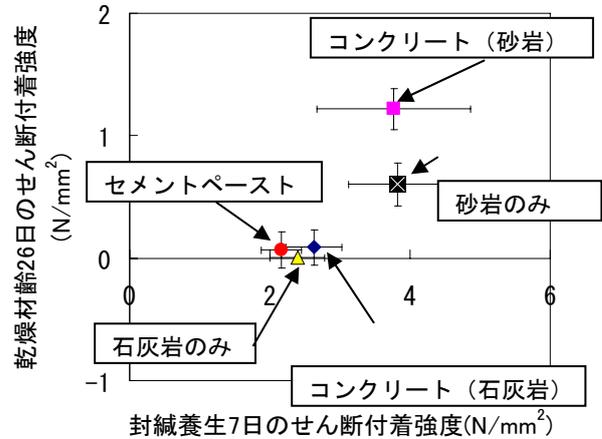


図-7 岩種による乾燥に伴う付着強度の変化の違い

表-8 各被着体の詳細(シリーズ4)

被着体の名称		示方配合							各種性状と強度				表面仕上げと詳細	
シリーズ	表記	W/C	s/a	単用量 (kg/m³)					スランブ (cm)	空気量 (%)	水中養生 (日)	圧縮強度 (N/mm²)	表面処理方法	詳細
		(%)	(%)	W	C	S	G	Ad						
シリーズ4	4-A	45.5	39.1	160	352	712	1124	5.28	6	3.1	28	45.7	自己充填モルタルを打設する直前にコンクリート用研磨機で研磨して平滑にする	粗骨材と細骨材に石灰岩を使用
	4-B					676	1078							56.8
	4-C								石灰岩のみ					
	4-D								砂岩のみ					
	4-E								W/C:30%のセメントペーストのみ					

8.3 化学分析

被着体に石灰岩を用いた供試体, 砂岩を用いた供試体, および被着体コンクリートの骨材に石灰岩を用いた供試体の付着面を SEM-EDS により観察した。その結果, 被着体に石灰岩を用いた供試体には付着表面に CaCO_3 と思われる析出物が多く見られた以外の供試体種類間の差異は見られなかった。

しかし, 骨材の化学的表面組織がセメントペーストと骨材間の付着力に関係する³⁾ことから, 被着体によって付着面の水和生成物が異なった結果, 水が抜けても強度が保持された可能性は否定できないものと思われる。

9. 結論

本研究は, 被着体表面の形状, 水の存在および付着面での生成物の観点から自己充填モルタルのせん断付着強度の要因を明らかにすることを目的として研究を行った。その結果, 以下のことが分かった。

- 1) 被着体表面の形状がせん断付着強度に及ぼす影響を検証した結果, 機械的なかみ合わせが生じる場合, おおよそのせん断付着強度が被着体のせん断強度と自己充填モルタルのせん断強度の間に収まる結果となった。
- 2) 機械的なかみ合わせが生じない場合の表面の形状の違いによるせん断付着強度の影響は, サンドペーパー粗めのものと超極細めのもので被着体表面を研磨したものではかみ合わせがなく, せん断付着強度の差は 0.1 N/mm^2 程度となった。又, 被着体表面の凹凸が 1 mm 以上あると機械的なかみ合わせが生じることによってせん断付着強度が大きくなった。
- 3) 水の存在がせん断付着強度に及ぼす影響を検証した。その結果, 乾燥によって大幅に強度が低下することが確認された。さらに, 乾燥条件が同じである場合, 自己充填モルタルの水の減少率とせん断付着強度との間に相関関係があることが分かった。
- 4) 付着面の水和生成物がせん断付着強度に及ぼす影響を検証した。その結果, 被着体が石灰岩, または砂岩である供試体は含水量にあまり違いがないのにも関わらず, 砂岩を使用している供試体のせん断付着強度が高い結果となった。被着体がコンクリートであっても, 骨材に砂岩を使用した供試体が強い結果となった。被着体をセメントペーストとした供試体は, 含水量が最も多いにも関わらず, 最もせん断付着強度が低い結果となった。
- 5) 水の存在が強度に及ぼす影響を除くため, 60°C に温度設定した恒温恒湿機で 26 日間乾燥させた。その結果, 被着体に砂岩を用いた供試体以外は強度が消失した。

- 6) 被着体に石灰岩を用いた供試体, 砂岩を用いた供試体および粗骨材に石灰岩を使用したコンクリートの供試体の付着面の水和生成物の化学分析を行った。その結果, 被着体に石灰岩を用いたものには付着表面に CaCO_3 と思われる析出物が多く見られたが, せん断付着強度が保持または消失した因果関係は分からなかった。いずれにせよ, 供試体に含まれる水の量だけでは説明できない結果となった。

謝辞

本研究を遂行するにあたり, 高知工科大学の宮地日出夫助手からご指導を頂きました。深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 中岡和久：自己充填モルタルの引張付着強度, 高知工科大学修士論文, 2007
- 2) 森野奎二:各種岩石骨材とセメントペーストとの付着性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.2, pp.93-96, 1980
- 3) 村田二郎, 岩崎訓明, 児玉和巳：コンクリートの科学と技術, pp.47, 山海堂, 1996
- 4) 田澤榮一, 佐伯 昇：コンクリート工学 微視構造と材料特性 pp.25, 技報堂出版, 1998