

論文 AE 法によるコンクリートと補修材のせん断付着強度試験における破壊機構の考察

黒原 創^{*1}・大野 健太郎^{*2}・宇治 公隆^{*3}・上野 敦^{*4}

要旨: 母材コンクリートと補修材のせん断付着強度評価法について、2種類の治具を用いた一面せん断試験および二面せん断試験を実施し、微視的破壊機構の観点から検討を行った。破壊試験時にアコースティック・エミッション (AE) 計測を行い、供試体中の AE 発生源位置標定および AE 発生源形成モードの同定を行った。その結果、対象とした試験法において最も安定した評価が可能な試験法は、JSCE-G 553 に準拠した専用治具を用いた二面せん断試験であることが明らかとなった。この結果を受け、専用治具を用いた二面せん断試験による漸増繰返し載荷試験を実施し、詳細な付着界面の破壊機構を明らかにした。

キーワード: せん断付着強度, 二面せん断試験, 一面せん断試験, AE 法, 算術平均粗さ, 付着界面

1. はじめに

コンクリート構造物の断面修復に用いる補修材には、既存コンクリートと一体となって挙動することが要求される。付着界面における両材料の一体性が確保されている場合、母材コンクリートに作用する荷重は、付着界面において、せん断応力として補修材に伝達される。これにより、両材料が一体となって荷重に抵抗することとなる。すなわち、両材料の一体性評価には、付着界面における、せん断付着強度の適切な評価が重要と考えられる。しかし、せん断付着強度の評価には規格が存在せず、様々な評価法が提案されている^{1)~3)}。

せん断付着強度は、試験法、母材コンクリート付着界面の凹凸性状、母材コンクリートと補修材の強度、および付着界面の健全性等様々な要因により変化する。特に、付着界面の凹凸性状は、せん断付着強度に大きな影響を及ぼすとされる。これは、目粗し処理を施すことで、付着界面に粗骨材の機械的噛み合わせが生じると考えられるためである¹⁾。また、付着界面に凹凸を設けることで、付着面積が付着界面の投影面積に対して増加する。このことにより、強度が増加することも考えられる。これらのことから、付着界面に適切な目粗し処理を施すことは、補修や補強において重要であり、付着界面の凹凸性状の評価に関して様々な検討がなされている^{4)~5)}。しかし、せん断付着強度試験法が異なる場合の、凹凸性状がせん断付着強度に及ぼす影響度については、定量的に示した研究が少ない。

そこで筆者らは、4種類のせん断付着強度試験法で、凹凸性状が異なる付着界面のせん断付着強度を評価することで、せん断付着強度試験法が異なる場合の凹凸

性状とせん断付着強度の関係を明らかにした⁶⁾。また、破壊試験時にアコースティック・エミッション (AE) 計測を行い、AE 発生源位置標定を実施した。この結果、試験法によって、付着界面と付着界面以外の箇所が破壊する現象があることを明らかにしてきた⁷⁾。

本研究は、簡易的な試験法として、二面せん断試験 (試験法 1) と一面せん断試験 (試験法 2)、また、専用治具を用いた試験法として、専用治具二面せん断試験 (試験法 3) と専用治具一面せん断試験 (試験法 4) の4種類のせん断付着強度試験法を検討した。また、破壊試験時に AE 計測を実施し、得られた AE 信号に SiGMA (simplified Green's functions for moment tensor analysis) 解析⁸⁾を適用することで、AE 発生源位置標定および AE 発生源形成モードの同定を行い、供試体の破壊過程について考察を行った。さらに、試験法 3 による漸増繰返し載荷試験を実施し、付着界面の破壊過程について、詳細な考察を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体作製

コンクリートの使用材料、示方配合、および力学的特性を表-1、表-2、および表-3 に示す。補修材は無機系のプレミックスタイプの吹付けモルタルを使用した。表-3 中の弾性波速度とは、母材コンクリートと補修材を含む各試験供試体を伝播する弾性波の速度である。後述する図-1 に示す各 AE センサ近傍で励起した疑似 AE を検出し、弾性波速度をパラメータとして位置標定を行った。位置標定結果と入力点の距離の差が 5mm 以内となる弾性波速度を SiGMA 解析に適

*1 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 (学生会員)

*2 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域助教 博士 (工学) (正会員)

*3 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域教授 博士 (工学) (正会員)

*4 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域准教授 博士 (工学) (正会員)

表-1 母材コンクリートの使用材料

	セメント C	粗骨材 G			細骨材粗目 S1			細骨材細目 S2					
		種類	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率	種類	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率	種類	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率
試験法1, 試験法2 試験法3, 試験法4	普通ポルトランドセメント	相模原産砂岩砕石	2.63	1.26	6.34	相模原産砂岩砕石	2.63	1.25	2.68	富津産山砂	2.61	3.32	1.55
試験法3漸増繰り返し載荷試験		相模原産砂岩砕石	2.63	1.02	6.68	相模原産砂岩砕石	2.61	1.49	2.83				

表-2 母材コンクリートの示方配合

	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
						水 W	セメント C	細骨材粗目 S1	細骨材細目 S2	粗骨材 G	混和材 Ad
試験法1, 試験法2 試験法3, 試験法4	20	8.0	58.0	4.5	45.6	174	300	657	164	985	C×0.3~0.5%
試験法3漸増繰り返し載荷試験	20	8.0	58.0	4.5	45.6	172	298	656	164	986	

*スルホン酸系 AE 減水剤を使用

表-3 母材コンクリートおよび補修材の力学的特性

試験名	母材コンクリート			補修材			弾性波速度 (m/s)
	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	
試験法1	37.7	3.12	27.5	62.6	3.39	27.9	4350
試験法2	37.7	2.98	26.6	62.7	5.05	30.0	4350
試験法3	33.2	3.00	25.3	58.6	4.20	27.1	4200
試験法4	37.1	2.80	26.7	62.0	4.60	26.4	4200
試験法3漸増繰り返し載荷試験	38.5	3.10	25.3	61.2	3.60	29.0	4250

用した。供試体は、母材コンクリートを打設後、20℃水中養生を行い、母材材齢 14 日目に補修材を打継いだ。その後、母材材齢 28 日まで 20℃水中養生を継続し、各破壊試験を実施した。付着界面の目粗し処理は、凝結遅延シートを貼付した鋼製型枠に、母材コンクリートを打設し、母材コンクリート脱型時に流水とワイヤブラシで未凝結のモルタル分を取り除くことで行った。目粗し深さは、H-series (大目粗し)、M-series (中目粗し) および P-series (無処理) の 3 水準とした。試験法 1 と試験法 2 は各水準 5 個、計 15 個の供試体で試験を行い、試験法 3 と試験法 4 は各水準 3 個、計 9 個の供試体で試験を行った。試験法 3 漸増繰り返し載荷試験は H-series 供試体 3 個で試験を行った。

2.2 実験方法

載荷には、容量 2000kN の耐圧試験機を用い、付着界面に発生するせん断応力が、毎秒 0.025N/mm² 増加するように制御した。漸増繰り返し載荷は 20kN, 40kN, および 60kN の 3 段階の荷重レベルで載荷・除荷を繰返し、各荷重レベルで 3 サイクル、計 9 サイクルの載荷を行い、10 サイクル目は破壊まで載荷した。

AE 計測には、共振周波数 150kHz の AE センサを 6 個使用し、エレクトロニックボックスにて供試体に貼付した。しきい値は 40dB とし、1 波形を 1024 個の振幅値データとして、サンプリング周波数 1MHz で記録した。なお、試験法 3 漸増繰り返し載荷試験のみ AE センサを 8 個使用し、しきい値を 35dB として計測を行った。

2.3 せん断付着強度試験

図-1 に本研究で検討したせん断付着強度試験法の概略図を示す。

試験法 1 は、100×100×10mm の鋼版を 3 枚用いて載荷し、付着界面にせん断力を発生させた。供試体は、100×100×400mm の鋼製型枠をスペーサで仕切り、母材コンクリートと補修材を打分けて作製した。せん断付着強度は、最大荷重を付着界面面積の 2 倍で除すこ

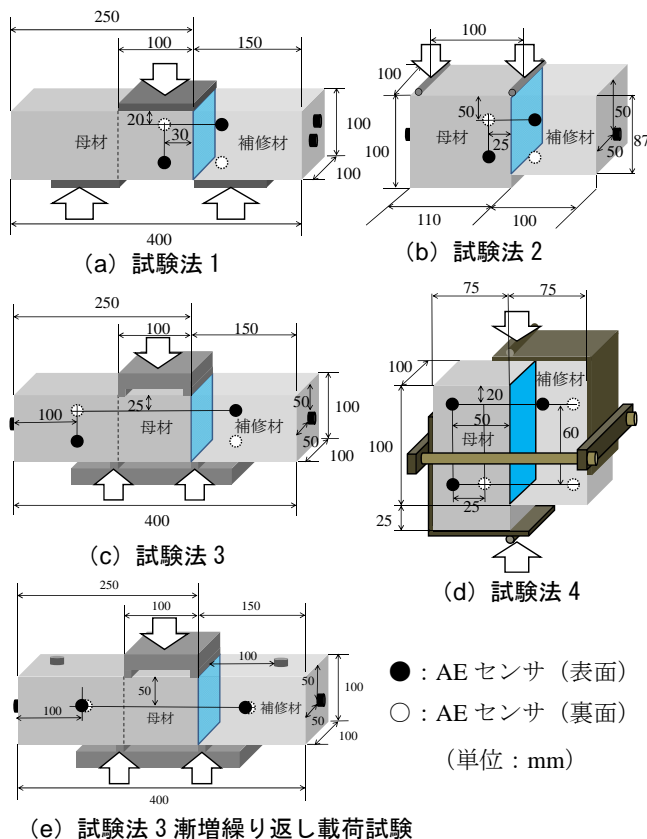


図-1 各せん断付着強度試験概略図

とで得た。ここで、本試験法では、鋼版を用いて載荷を行うことで分布荷重が働き、母材コンクリートに曲げモーメントが作用することとなる。

試験法 2 は、スパン 100mm の四点曲げ試験用載荷用具を用いて載荷を行い、付着界面にせん断力を発生

させた。線載荷となることで、試験法 1 と比較し、供試体に作用する曲げモーメントが低減された試験法である。供試体は試験法 1 と同様に両材料を打分けて作製した。载荷による供試体の回転を防ぐため、母材コンクリートの長さを 110mm とした。これにより、载荷点に均等な荷重が働かないと考えられる。よって、せん断付着強度は、供試体底面に等分布荷重が作用していると仮定した自由物体図から、付着界面に働くせん断力を求め、これを付着界面面積で除すことで得た。

試験法 3 は JSCE-G 553 に準拠した治具を用いて载荷を行った。幅 10mm のエッジによってせん断力を発生させるため、試験法 1 と比較し、曲げモーメントの影響を低減できる試験法と言える。供試体作製とせん断付着強度の評価は、試験法 1 と同様とした。

試験法 4 の载荷には、鋼製 L 型治具を用いた。2 個の L 型治具は鋼版とボルトで供試体に固定した。付着界面における拘束力の発生を防ぐため、固定用のボルトは手締めで固定した。せん断付着強度は、最大荷重を付着界面面積で除して得た。

2.4 付着界面凹凸性状評価

付着界面の凹凸深さは、粗さパラメータとして、JIS B 0601 による算術平均粗さを用いて評価した。凹凸深さの計測は、高さ方向の分解能が 0.05mm の自走式レーザ変位計を用い、付着界面の中心付近を载荷方向に計測した。信号検出は 0.001 秒ごとに行い、測定間隔は 0.0234mm となった。なお、付着界面端部の欠け等を考慮し、計測した信号のうち両端部 10mm 分のデータは除外した。

3. 実験結果

3.1 単調载荷によるせん断付着強度試験

試験法 1 において、H-series 供試体の、5 個中 3 個の供試体が、母材コンクリートで曲げ引張破壊を生じた。このことは、付着界面の一体性が保持された結果と言える。図-2 に、付着界面が破壊した H-4 供試体の SiGMA 解析結果を示す。SiGMA 解析により、AE 発生源位置が標定され、AE 発生源形成モードが同定されたものを以降 AE イベントと呼び、□ (赤色) はせん断型 AE イベント、◇ (青色) は引張型 AE イベント、○ (緑色) は混合型 AE イベントとする。図-2 より、付着界面が破壊した供試体であっても、曲げ領域内に多数の微細ひび割れが発生しており、供試体が曲げモーメントの影響を強く受けていることがわかる。また、AE イベントの X 座標、時間、荷重の関係を示した図-3 (a) および主破壊が生じた時間を拡大した図-3 (b) より、付着界面の破壊に先行して、曲げ領域内に多数の微細ひび割れが発生していることがわかる。

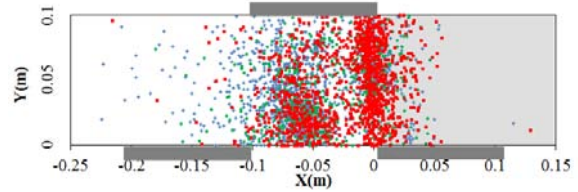


図-2 試験法 1 H-4 供試体の SiGMA 解析結果

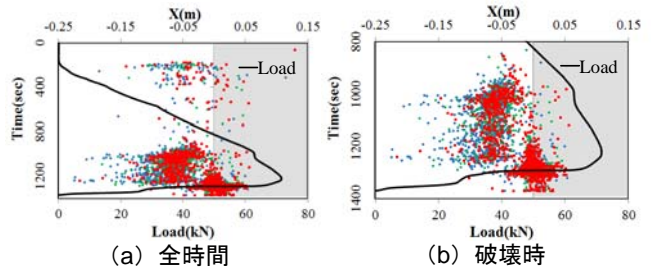


図-3 試験法 1 H-3 供試体における AE イベントの X 座標、時間、および荷重の関係

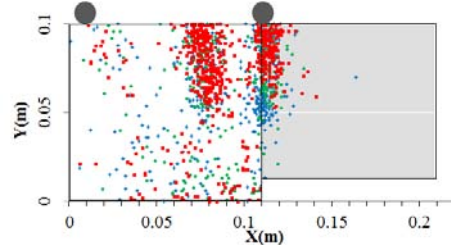


図-4 試験法 2 H-3 供試体の SiGMA 解析結果

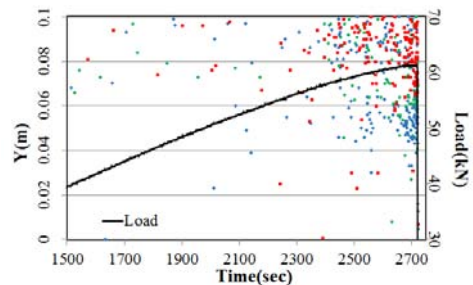


図-5 試験法 2 H-3 供試体における AE イベントの Y 座標、時間、および荷重の関係

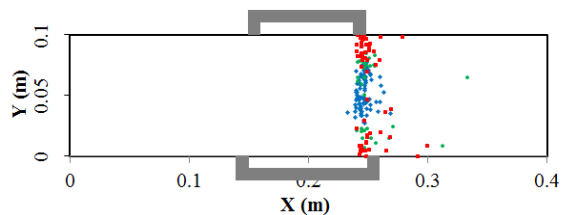


図-6 試験法 3 H-1 供試体の SiGMA 解析結果

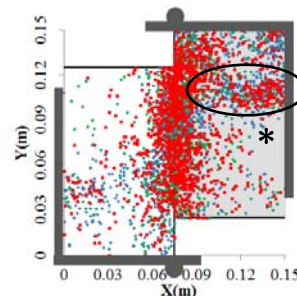


図-7 試験法 4 H-3 供試体の SiGMA 解析結果

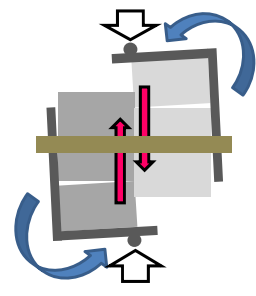


図-8 試験法 4 ひび割れ発生イメージ

このことから、試験法 1 は、付着界面の一体性が高い供試体のせん断付着強度を得ることが難しく、試験の適用範囲に限界があるといえる。

試験法 2 は、5 個中 4 個の H-series 供試体が付着界面で破壊した。しかし、図-4 の付着界面が破壊した H-3 供試体の SiGMA 解析結果では、供試体の曲げ領域内に多数の AE イベントが位置標定されており、付着界面が破壊した供試体においても曲げモーメントの影響が生じていることが推察される。また、H-3 供試体において、付着界面付近（付着界面を中心に、X 軸方向で幅 20mm 以内）に位置標定された AE イベントの Y 座標、時間、および荷重の関係を示した図-5 より、付着界面の破壊は、供試体上部から生じるものと考えられる。また、破壊が進展することで、付着界面高さ中央部に引張型の AE イベントが卓越した。これは、付着界面の破壊が進展することで、せん断力による破壊から、曲げモーメントの影響を受けた剥離破壊へと、破壊モードが変化したためと考えられる。

試験法 3 では、H-series 供試体全てが付着界面で破壊した。H-1 供試体の SiGMA 解析結果を示した図-6 においても、供試体の曲げ領域内に AE イベントが位置標定されておらず、付着界面が破壊に至るまで、曲げモーメントの影響を受けず、安定した载荷を行える試験法であることがわかる。

試験法 4 においても、H-series 供試体全てが付着界面で破壊した。しかし、H-3 供試体の SiGMA 解析結果を示した図-7 より、補修材に多数の AE イベントが位置標定されており、目視でもこの部分（図-7 中の*）のひび割れを確認できた。このひび割れは、治具内で発生した回転モーメント（図-8）により発生した引張応力によるものと考えられ、全 H-series 供試体でこの現象が確認された。また、AE イベントの X 座標、時間、および荷重の関係を示した図-9 から、付着界面の破壊に先行して、補修材にひび割れが生じることで、荷重が低下したことがわかる。これらのことから、試験法 4 は、適切なせん断付着強度が得られる試験法とは言い難い。

以上より、本研究で実施した 4 種類の試験法において、付着界面が破壊した全供試体の、算術平均粗さの値とせん断付着強度の関係を図-10 にまとめる。なお、図中には試験法 3 漸増繰返し载荷試験の結果も参考値としてプロットした。図より、全試験で算術平均粗さの値が増加することで、せん断付着強度が増加し、両者の関係が直線関係であることがわかる。しかし、試験法 4 により得られたせん断付着強度は、他の 3 試験に比べ高い。これは、治具を装着して载荷を行うことで、付着界面に拘束力が生じたためと考えられる。各

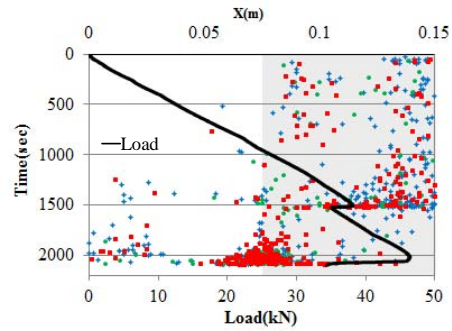


図-9 試験法 4 H-3 供試体における AE イベントの X 座標、時間、および荷重の関係

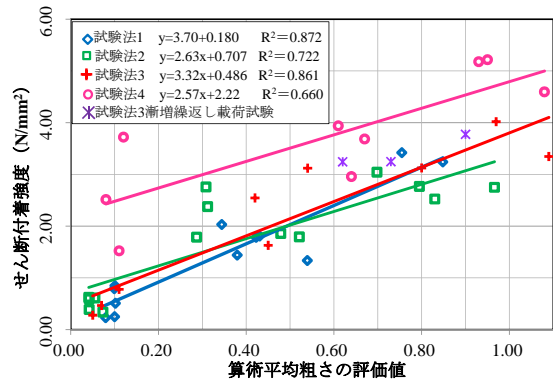


図-10 算術平均粗さの値とせん断付着強度の関係

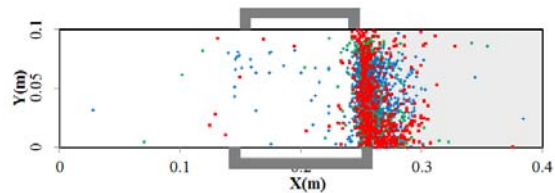


図-11 試験法 3 漸増繰返し载荷試験 H-3 供試体の SiGMA 解析結果

試験法における、算術平均粗さの値とせん断付着強度の決定係数 (R^2) を比較すると、試験法 2 と試験法 4 よりも、試験法 1 と試験法 3 が高い相関を示した。

これまでの検討の結果、試験法 3 は付着界面のみを安定して破壊可能な試験法であることに加え、算術平均粗さの値とせん断付着強度の間に高い相関が得られた。このため、本研究で実施した試験法の中では、最も適切にせん断付着強度を評価可能と考えられる。

3.2 試験法 3 漸増繰返し载荷試験

試験法 3 漸増繰返し载荷試験では、付着界面の破壊過程について、詳細な考察を行った。図-11 に示した H-3 供試体の SiGMA 解析結果は、通常の単調载荷を行った試験法 3 同様、付着界面付近に多くの AE イベントが位置標定され、漸増繰返し载荷を行った場合も、単調载荷を行った場合と同様の破壊モードであると考えられる。図-12 は、AE イベント（付着界面を中心に X 座標方向で幅 20mm 以内に位置標定されたもの）の Y 座標、時間、および荷重の関係を示したものであ

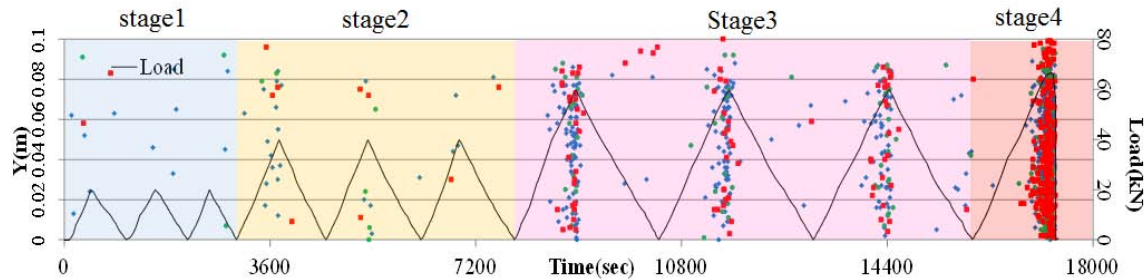


図-12 試験法3 漸増繰返し载荷試験 H-3 供試体における AE イベントの Y 座標, 時間, および荷重の関係

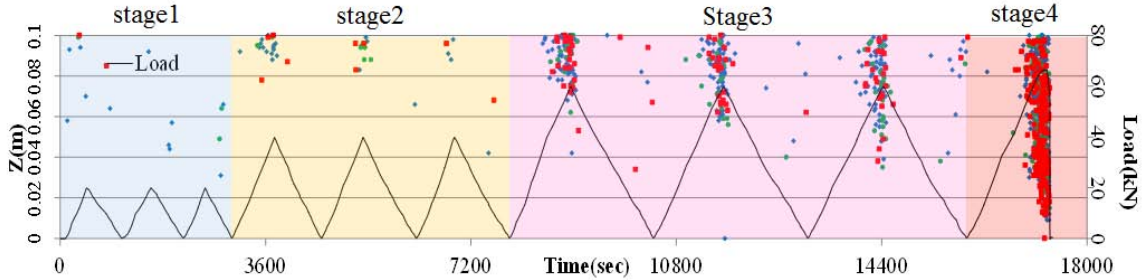


図-13 試験法3 漸増繰返し载荷試験 H-3 供試体における AE イベントの Z 座標, 時間, および荷重の関係

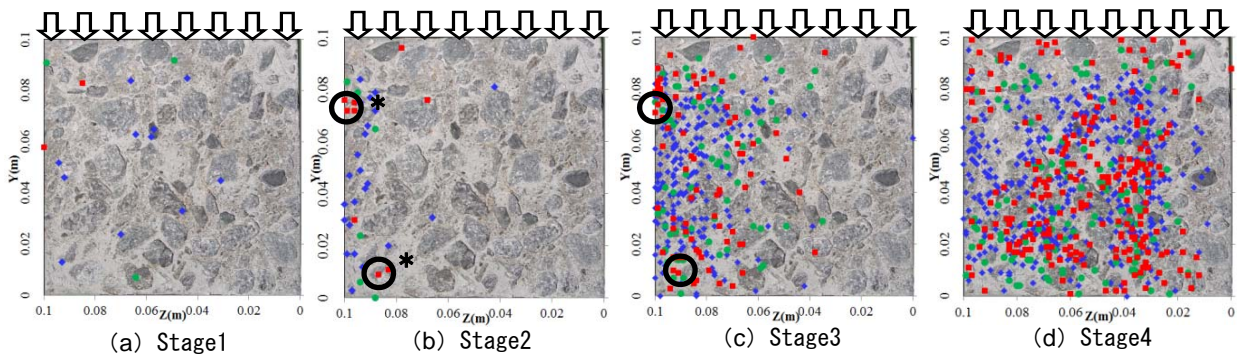


図-14 各 Stage の AE イベント散布図

り、図-13は、図-12の縦軸を、AE イベントの Y 座標から Z 座標に変更したものである。また、図-14は各 Stage で同定された AE イベントを、打継前の母材コンクリート付着界面の写真上にプロットしたものである。図-12および図-13において、Stage1では、座標や荷重レベルに関係なく、ランダムに AE イベントが同定されている。この時同定された AE イベントを図-14 (a) で確認すると、粗骨材上に引張モードの AE イベントが位置標定されていることが確認できる。このことから、低荷重レベルの Stage1 においては、付着界面に働くせん断応力によって、粗骨材とモルタルの剥離が生じていると考えられる。なお、Stage1 で発生した微細ひび割れは、粗骨材とモルタル界面の微小変位により生じていると考えられ、主破壊の要因とは異なるものと推察される。図-12の Stage2 では、4 サイクル目で多くの AE イベントが同定されており、その後 5 サイクル目、6 サイクル目では同定される AE イベント数が減少している。また図-13 から、Stage2 で発生した AE イベントの Z 座標は、0.08m 以上の領域に集中していることがわかる。このことは、図-14 (b) においても確認することができ、Stage2 では、

複数の微細ひび割れが集積することで、主破壊の要因となる損傷を生じたものと考えられる。Stage2 で生じた微細ひび割れは、他の 2 供試体でも付着界面の中心部以外から発生していた。これは、付着界面中心部は、変形の自由度が低く、微細ひび割れを発生させにくいためと推察される。Stage3 では、図-14 (c) より、Stage2 で生じた破壊領域が進展している。このことは、図-12の Stage3 において、サイクル数の増加に伴い、同定される AE イベント数が減少傾向を示さず、サイクルを重ねるごとに新たな微細ひび割れが形成されていること、また、図-13の Stage3 において、同定された AE イベントの Z 座標の範囲が、サイクル数を増すごとに広がっていることと整合している。

9 サイクル終了までに、付着界面に、多数の微細ひび割れが発生しているにもかかわらず、10 サイクル目も供試体は一体となって荷重に抵抗している。これは、付着界面に健全部が残存している場合は、剥離した粗骨材が機械的噛み合わせを発揮し、付着界面におけるせん断応力の伝達に寄与するためと考えられる。ここで、Stage3 において同定されたせん断モードの AE イベントの中で、Stage2 とほぼ同位置に同定されている

ものを例に挙げる(図-14 (b) 中の*)。これは、剥離を生じた粗骨材が機械的噛み合わせを発揮する際、付着界面内で擦れを生じて発生したと考えられる。このことから、目粗し処理で露出させた粗骨材が、せん断付着強度の増加に寄与することが推察される。

図-14 (d) において付着界面の広い範囲でせん断モードの AE イベントが位置標定されているのは、付着界面が破壊する際に付着界面全体が擦れたことに起因すると考えられ、供試体が破壊に至るまで付着界面にせん断力が働いていたと考えることができる。

以上の考察から、目粗し処理を行った付着界面のせん断破壊では、粗骨材はモルタルと剥離した後も、機械的噛み合わせを有し、せん断応力の伝達に寄与することが示唆された。しかし、現状では、粗骨材の機械的噛み合わせによる強度増加と、投影面積に対して付着面積が増加することによる強度増加を分離して評価できておらず、今後、両者の定量化が必要と考えられる。

4. 結論

本研究は、コンクリートと補修材の付着界面におけるせん断付着強度評価法を、算術平均粗さの評価値とせん断付着強度の関係、および SiGMA 解析を用いた、供試体の破壊過程の検討によって比較し、適切にせん断付着強度が評価可能な試験法の提案を目的とした。さらに、適切に強度が得られる試験法について、漸増繰返し載荷試験を実施し、付着界面のせん断破壊機構を明らかにすることを目的とした。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 試験法 1 は、算術平均粗さの値とせん断付着強度の間に良い相関が確認された。しかし、SiGMA 解析結果から、供試体の曲げ領域内に曲げモーメントによる破壊を生じることが確認され、評価可能なせん断付着強度に限界があることがわかった。
- (2) 試験法 2 は、試験法 1 に比べ、曲げモーメントの影響を低減できる試験法ではあるが、SiGMA 解析結果より、付着界面が破壊した供試体にも曲げモーメントの影響が生じていることがわかった。また、付着界面の破壊が進展すると、引張モードの AE イベントが卓越した。このことから、破壊モードが付着界面上部のせん断破壊から曲げモーメントによる剥離破壊へと移行したことが考えられる。
- (3) 試験法 3 は、SiGMA 解析結果より、付着界面が破壊に至るまで、安定した載荷を行える試験法であることがわかった。また、算術平均粗さの値とせん断付着強度の間に高い相関が得られ、実施した試験法中、最も適切に強度評価が可能である。

- (4) 試験法 4 は、付着界面の破壊が生じる前に補修材に水平方向のひび割れが生じ、荷重が低下する現象が確認された。このことから、せん断付着強度評価法としては適当でないと考えられる。
- (5) 試験法 3 漸増繰返し載荷試験の結果より、最大荷重の 70% 以下の荷重レベルで、付着界面内に局所的な粗骨材とモルタルの剥離が生じていることが推察された。また、主破壊の要因となる微細ひび割れは付着界面の外側から発生し、内部へ進展することが推察された。

謝辞

本研究は、平成 23 年度科学研究費補助金(基盤(B), 課題番号 22360173) によって実施した。

参考文献

- 1) Momayez, et al : Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials, Cement and Concrete Research, 35, pp.748-757, 2005.
- 2) 大池幸史, 他 : 既設コンクリート部材の補修における CFRP 格子筋のせん断耐荷挙動, 土木学会第 61 回年次学術講演概要集, 第 5 部, pp.57-58
- 3) 川島宏幸, 他 : 凝結遅延剤を塗布したシートを用いて目荒らしした打継目のせん断強度, 土木学会第 52 回年次学術講演会, V-291, pp.582-583, 1997.9
- 4) 武井一夫 : コンクリート打継ぎ面の界面粗さの評価方法 : 日本建築学会構造系論文集, 第 455 号, pp.7-16, 1994.1
- 5) 槇谷貴光, 他 : コンクリート打継ぎ面における表面粗さの評価とせん断力伝達能力に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp.171-176, 1995.
- 6) 黒原創, 他 : コンクリートと補修材料のせん断付着強度評価法に関する実験的考察, 土木学会第 66 回年次学術講演概要集, 第 5 部, pp.613-614, 2011.9
- 7) Kentaro Ohno, et al : Failure Process in Shear Bonding Strength Tests between Existing Concrete and Repairing Material by Acoustic Emission Technique, Proceedings of International RIREM conference in Advances in Construction Materials Through Science and Engineering (in CD-ROM) , 2011.9
- 8) 大津政康, 他 : AE モーメントテンソル解析のための SiGMA コードの開発, 非破壊検査第 42 巻 10 号, pp.570-575, 1993.10