

論文 母材コンクリートと断面補修材のせん断付着強度に及ぼす界面性状の影響

松崎 晃*1・宇治 公隆*2・上野 敦*3・大野 健太郎*4

要旨: 本研究では、直接2面せん断試験での、付着界面の処理性状、補修材種類、付着面の形状や寸法がせん断付着強度に及ぼす影響に関して検討を行った。さらに、アコースティック・エミッション (AE) 法を用い、破壊進展について微視的観点から考察を行った。その結果、断面補修材にポリマーセメントモルタルを使用することで、無機系補修材に比べ、付着面の一体性が向上することが確認された。さらに有機系補修材のせん断付着強度算定式を付着面の算術平均粗さを指標として提案した。また AE 計測の結果より、直接2面せん断試験での、付着面上下端と中央部で生じる AE 源発生機構が異なることが確認された。

キーワード: せん断付着強度, 界面処理方法, 補修材種類, 付着面形状, AE 源発生機構

1. はじめに

近年、高度経済成長期に建設された膨大な数のコンクリート構造物の老朽化が顕在化しており、補修・補強のニーズが高まっている。そこで、適切な補修・補強方法の選定にあたっては、母材コンクリートと補修材が一体となって荷重に抵抗し、剥離・剥落を生じさせないことが要求され、適切な照査が求められる。

現在、補修後の構造物の性能照査は、吹付けコンクリートの力学的特性に基づく性能照査により、構造物の性能を担保することとしている¹⁾。しかし、吹付けコンクリートの性能照査は、補修後の部材の一体性を保証するものではなく、一体性に関して検討が必要な場合には、設計・施工者が適宜照査することになっている。

一般に既設コンクリート構造物の補修では、サンドブラストなどによって付着界面表層の脆弱部の除去、目粗しが行われ、その後、プライマーの塗布、断面補修材が施される。その際、付着界面には、粗骨材の機械的抵抗力に加え、プライマーやポリマーなどによる化学的付着力が複合的に作用しており、個別に評価することは困難である。

既往の研究²⁾によれば、付着界面のせん断付着強度試験方法について4種類の試験方法を取り上げ、それぞれの試験での破壊機構をアコースティックエミッション (AE) 法を用いた微視的な観点から評価し、二面せん断試験の有効性が示されている。さらに、母材コンクリート付着界面の算術平均粗さと直接2面せん断試験から得られるせん断付着強度に良好な相関があり、無機系補修材とプライマー不使用の条件下では、式(1)

によりせん断付着強度が推定可能とされている³⁾。

$$\tau_u = 3.22R_a + 0.825 \quad (R^2 = 0.826) \quad (1)$$

ここに、 τ_u : せん断付着強度 (N/mm²), R_a : 算術平均粗さ (mm)

ここで、この式(1)の適用範囲は、付着界面にプライマーを使用せず、補修材に無機系モルタルを用いた限定的な条件とされており、プライマー使用時や有機系モルタルを含め、適用範囲を広げるためにはさらなるデータの蓄積が必要である。

一方、せん断付着強度試験方法が未だ確立されていない要因の一つとして、他の物性試験と同様に寸法依存性が考えられる。連続繊維シートの付着強度に関しては、付着面積に応じて付着強度が変化することが報告されており、寸法の影響を加味した評価が行われている^{4),5)}。しかし、コンクリートのせん断付着強度の寸法依存性に関する研究は少なく十分であるとは言い難い⁶⁾。

本研究では、母材コンクリートの付着界面にプライマー処理を行った場合や無機系および有機系補修材を用いた供試体に対し、JSCE-G 553の直接2面せん断試験を実施し、界面処理方法や補修材種類がせん断付着強度に及ぼす影響について検討を行った (検討1)。

また、付着面の形状や寸法を変化させた供試体に対し、同様の試験を行い、せん断付着強度の寸法依存性に関する検討を行った。さらに、破壊試験時に AE 計測を実施し、得られた AE データを SiGMA (simplified Green's functions for moment tensor analysis) 解析^{7),8)}に適用することで、AE 発生源位置標定および AE 発生源の形成モードの同定を行い、破壊進行に伴う最終破壊

*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 都市基盤環境学域教授 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 都市基盤環境学域准教授 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 都市基盤環境学域助教 博士 (工学) (正会員)

表-1 使用材料

セメント	細骨材粗目				細骨材細目				粗骨材			
	種類	表乾密度 [g/cm ³]	吸水率 [%]	粗粒率 F.M.	種類	表乾密度 [g/cm ³]	吸水率 [%]	粗粒率 F.M.	種類	表乾密度 [g/cm ³]	吸水率 [%]	粗粒率 F.M.
普通 ポルトランド セメント	相模原産 砂岩砕石	2.57	2.16	2.89	山砂	2.65	2.89	1.58	相模原産 砂岩砕石	2.61	1.82	6.38

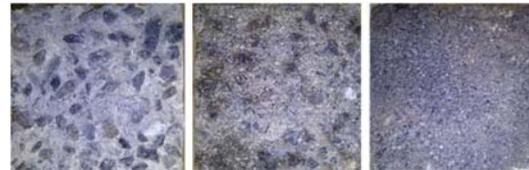
表-2 母材コンクリートの計画配合

Gmax (mm)	SL (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				AE減水剤
					W	C	S	G	
20	8	58	4.5	47.2	172	297	836	949	C×0.3%

表-3 母材コンクリートと補修材の力学的特性

シリーズ	圧縮強度 [N/mm ²]		弾性係数 [kN/mm ²]		割裂引張強度 [N/mm ²]		弾性波速度 [m/s]
	Concrete	Mortar	Concrete	Mortar	Concrete	Mortar	
Nシリーズ	29.4	59.2	26.6	29.5	2.52	3.59	4100
PCMシリーズ	34.4	53.4	24.7	22.4	2.67	3.81	4200
タイプA	32.6	52.3	27.8	34.6	3.00	3.10	4100
タイプB	28.6	51.1	28.9	33.6	2.78	3.56	4000

面の形成について微視的観点から検討を行った（検討2）。



(a)Hシリーズ (b)Mシリーズ (c)Sシリーズ

2. 実験概要

2.1 供試体作製方法

検討1では、目粗し状態を、図-1に示すように大目粗し（Hシリーズ）、中目粗し（Mシリーズ）、小目粗し（Sシリーズ）の3水準、プライマー使用の有無を無し（nシリーズ）、有り（pシリーズ）の2水準、補修材として有機系モルタル（PCMシリーズ）と、比較用のセメント砂比 1:3 の無機系モルタル（Nシリーズ）の2水準とし、計12水準で試験を実施し、各水準につき3個供試体を作製した。

図-1 目粗し性状



(a)タイプA (b)タイプB (c)タイプC

検討2では、付着面の断面形状を図-2に示すような、高さが幅に比べて大きいタイプA、幅が高さに比べて大きいタイプB、正方形断面のタイプCの3水準とし、寸法（幅×高さ）を30×100, 50×100, 70×100, 100×30, 100×50, 100×70, 100×100mmの7水準、プライマー使用の有無を無し（nシリーズ）、有り（pシリーズ）の2水準、目粗し深さを小目粗しの1水準、補修材を無機系の1水準とし、計14水準で試験を実施し各水準につき3個供試体を作製した。なお、付着面の付着を期待しない領域には、厚さ1mmの矩形のプラスチックフィルムを挿入した。

図-2 付着界面形状

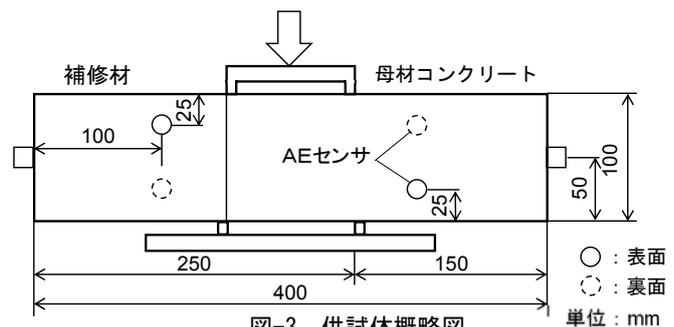


図-3 供試体概略図

供試体には、図-3に示すように幅高さ100×100×400mmの角柱供試体を使用し、端部から250mmを母材コンクリート、残り150mmを補修材とした。

実験に使用したコンクリートの使用材料、計画配合、および力学的特性を表-1、表-2、表-3にそれぞれ示す。

母材コンクリートの水セメント比を0.58とし、粗骨材には砂岩砕石、細骨材は流動性を考慮し、粗目砂と細目砂を質量比8:2で混合した。プライマーはアクリル系ポリマーディスパージョンタイプとし、補修材の打込みの3時間前に刷毛を用いて塗布した。無機系補修材には水セメント比0.5、セメント砂比1:3のモルタル、有機系補修材はプレミックスタイプのアクリル樹脂系ポリマーセメントモルタルを使用し、水量をカタ

ログで示される範囲の最低値とした。

母材コンクリート打込み後 24 時間で脱型し、界面処理を行い、母材コンクリート材齢 28 日目まで 20°C 水中養生を行い、補修材を打ち継いだ。その後、母材コンクリート材齢 42 日目まで 20°C 水中養生を継続し、母材コンクリート材齢 42 から 44 日目に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木製スペーサを設置した鋼製型枠内に、母材コンクリートを打ち込み、母材コンクリート脱型時に流水と植物毛またはワイヤブラシにより、未凝結のモルタル分を取り除くことにより行った。

ここで、表-3 中の弾性波速度とは、母材コンクリートと補修材を一体と見なした供試体中を伝搬する弾性波の速度である。図-3 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。位置標定結果と疑似 AE 入力点との距離の差が 5mm 以内となる弾性波速度を SIGMA 解析に使用した。

2.2 実験方法

表面粗さ評価には、JIS B 0601 の算術平均粗さをを用いた。付着界面の凹凸性状計測は、母材コンクリート材齢 28 日目に行い、高さ方向の分解能が 0.05mm の自走式レーザ変位計を用いた。信号の検出を、0.001 秒毎とし、測定間隔は 0.0234mm である。基準長さは 80mm であり、供試体端部 10mm を取り除いた領域を対象とした。算術平均粗さの算出に用いた断面曲線は、測定断面曲線に対し、最小 2 乗法により中心線を求め、各測定点における中心線から断面曲線までの距離を求めることで得た。

せん断付着強度試験は、JSCE-G 553 に準拠し、実施した。载荷には、容量 2000kN のアムスラー型耐圧試験機を用いた。AE 信号が取得しやすいように付着界面に発生するせん断応力が毎秒 0.0125N/mm² 増加するように制御した。

AE 計測には、共振周波数 150kHz の AE センサを 6 個使用し、エレクトロンワ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。

3. 実験結果

3.1 界面処理性状の影響 (検討 1)

検討 1 の供試体で大目粗しシリーズの中で、せん断付着強度が高い場合、母材コンクリート側のせん断面で破壊する供試体が見受けられた。本検討では、母材コンクリートが破壊した供試体のデータは排除している。

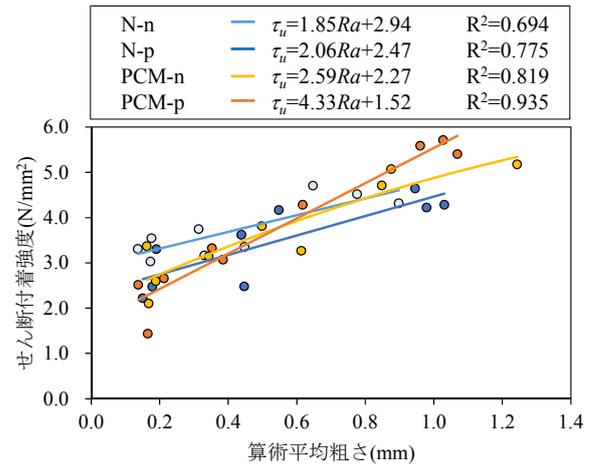


図-4 せん断付着強度試験結果 (検討 1)

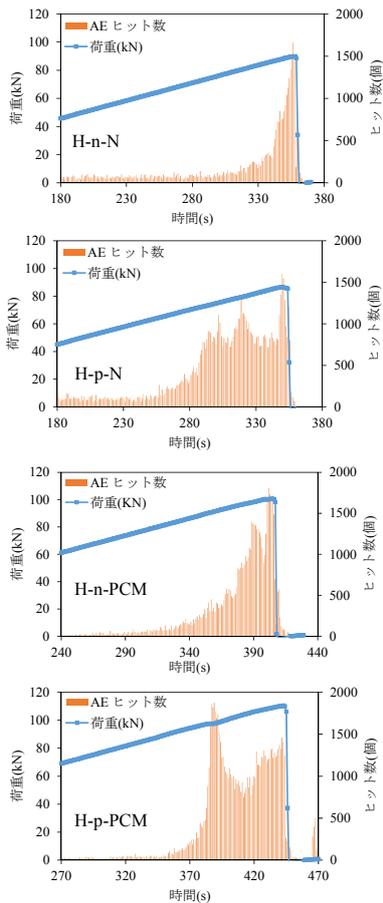
図-4 に算術平均粗さとせん断付着強度の関係を示す。算術平均粗さが大きくなるにつれ、せん断付着強度が増加していることがわかる。これは、凹凸が大きくなることで、粗骨材による界面の機械的抵抗が増したことによるものと考えられる。

図-5 に各 H シリーズの AE ヒット数と荷重の関係および AE 源位置標定結果を示す。なお本研究では、SIGMA 解析によって AE 発生源の位置および形成モードが同定された AE 源に対し、赤×をせん断型 AE 源、緑△を混合型 AE 源、青○を引張型 AE 源として示す。図-5 (b) より、どの水準においても、破壊面近傍に AE 源が標定されていることがわかる。プライマーの影響に着目すると、図-5 (a) より、どちらの補修材を用いた場合も、プライマー無しでは、破壊直前に AE ヒット数が急激に増加し破壊に至ったが、プライマー有りでは、一度急激に AE ヒット数が増加した後、多くの AE ヒット数がプライマー無しと比較して長い時間継続していることがわかる。これはプライマー無しでは、破壊面の形成は短時間で生じるが、プライマーを使用することで、破壊面の形成に比較的時間を要し、微細ひび割れが徐々に発達しながら破壊が進行したためと考えられる。

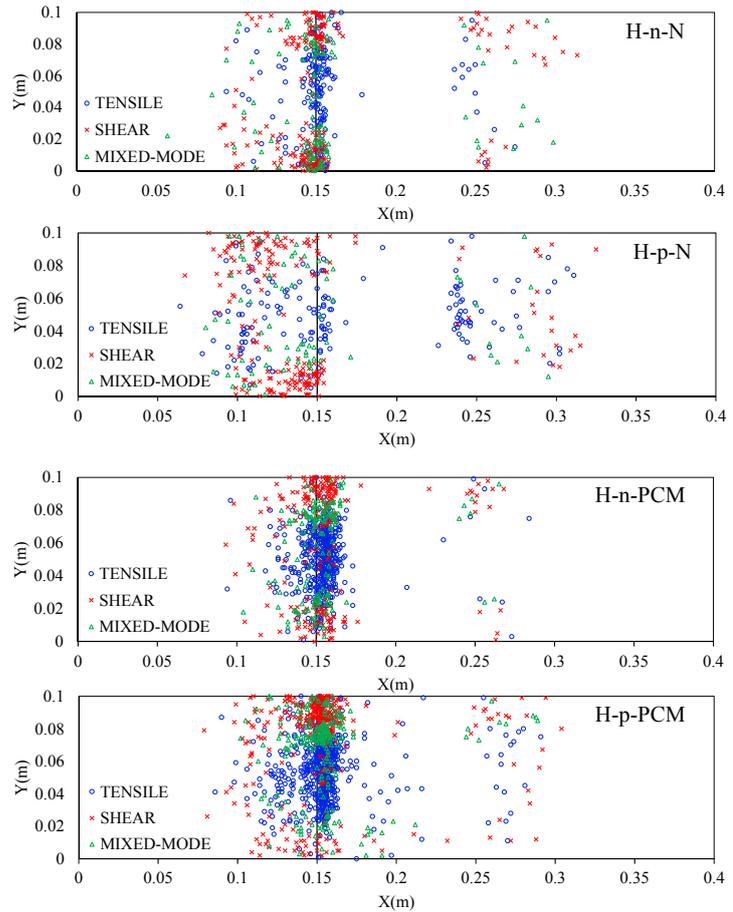
ここで、各シリーズのせん断付着強度に着目すると、N シリーズでは、プライマー無しの方が、せん断付着強度が高く、PCM シリーズにおいても、プライマーの使用により若干の強度増加が見られる供試体もあったが最大で 10% 程度の強度増加に留まっており、顕著な差は認められなかった。

そこで、図-6 に、プライマーの影響を考慮せずに補修材種類別に再プロットした。なお、図中には短繊維を含まない無機系無収縮プレミックスモルタルを使用した既往の試験結果³⁾も併せて示した。

粗骨材が露出する大目粗し H シリーズの強度に着目すると N シリーズが平均 4.4N/mm² に対し、PCM シリ



(a) 荷重と AE ヒット数の関係



(b) SiGMA 解析結果

図-5 AE ヒット数と SiGMA 解析結果 (プライマー使用の有無および補修材種類の影響)

ーズが平均 5.3N/mm^2 と 20% 高くなり、また、近似直線の傾きは N シリーズの傾き 1.9 に対し、PCM シリーズの傾きが 3.2 と PCM シリーズの方が 70% 大きい結果となった。これは、ポリマーにより界面の一体性が増した結果、粗骨材の機械的抵抗が十分に発揮された結果であると考えられる。したがって、劣化構造物の補修・補強においては、十分に目粗しを行い、PCM による断面修復を行うことで一体性が確保できると考えられる。

また前述のように、算術平均粗さとせん断付着強度には相関があり、算術平均粗さからせん断付着強度が推定可能である。PCM シリーズの近似直線を式(2)に示す。なお、式(2)の傾きは 3.25 となり、式(1)と同程度の値となった。一方、定数は式(1)に対して 1.0N/mm^2 程度大きくなった。

$$\tau_r = 3.25R_a + 1.96 \quad (R^2 = 0.861) \quad (2)$$

ここに、 τ_r : せん断付着強度 (N/mm^2)、 R_a : 算術平均粗さ (mm)

3.2 付着面の形状および寸法の影響 (検討 2)

図-7 に H-n-N シリーズの付着界面を中心に供試体長手方向で幅 20mm 以内に位置標定された AE 源を示す。高さ方向に卓越する AE 源の発生機構が異なり、付着面高さ中央部では引張型の AE 源の割合が高く、

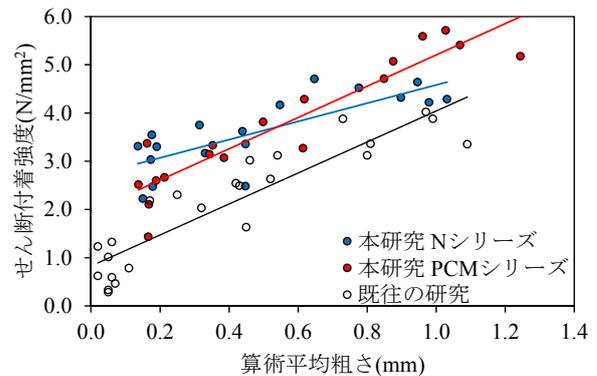


図-6 無機系および有機系補修材のせん断付着強度と算術平均粗さの関係

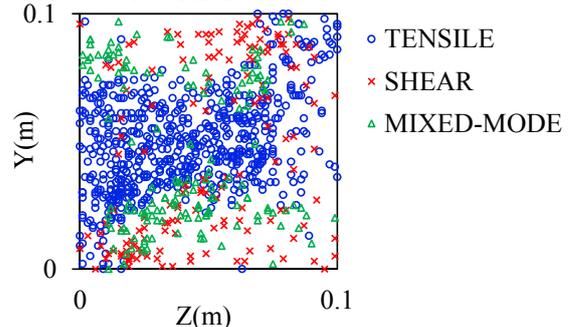


図-7 SiGMA 解析結果 (H-n-N シリーズ)

上部および下部では、せん断型 AE 源の割合が高いことがわかる。既往の研究³⁾より、付着界面では、ポアソン効果や载荷治具により変形拘束の影響を受ける領域が存在することで、高さ方向で同定される AE 源の発生機構が異なることがわかっており、本研究においても同様の傾向が確認された。

以上のことから、付着面内の破壊機構は一様ではなく、载荷位置付近とそれ以外の領域で異なる可能性がある。そこで、付着面の寸法および形状がせん断付着強度に及ぼす影響について検討を行った。

図-8 に付着面積とせん断付着強度の関係を示す。なお、検討 2 においてもプライマーの使用による顕著な差は認められなかったため、プライマーの影響は考慮せず表示している。AB の両タイプにおいて、断面積の増加に伴い、せん断付着強度が減少しており、タイプ A の $30 \times 100\text{mm}$ の強度が平均で 7.1N/mm^2 、タイプ B の $100 \times 30\text{mm}$ の強度が平均で 6.6N/mm^2 であり、 $100 \times 100\text{mm}$ の強度 3.4N/mm^2 の約 2 倍となっている。したがって、せん断付着強度には、寸法依存性があることが確認された。

以上より、適切な補修・補強計画にあたっては、格子状炭素繊維補強材に代表されるような比較的小さい付着面を有する部材の耐荷力算定⁹⁾では、せん断付着強度の算定値を高く設定することができ、下面増厚工法などに代表されるような比較的大きい付着面を有する部材の耐荷力算定では、せん断付着強度の算定値を割引いて算定する必要がある可能性が示唆された。

また、タイプ A のせん断付着強度の方がタイプ B よりも約 1N/mm^2 程度高いことがわかる。これは図-9 に示すようにタイプ A の断面では、载荷治具の変形拘束を受けるが、タイプ B は、直接载荷治具の変形拘束を受けず、変形が比較的自由なため、強度が低くなったと考えられる。

次に、図-10 に、各水準の付着界面を中心に供試体長手方向で幅 20mm 以内に位置標定された AE 源の一例を示す。

タイプ A の断面内では、いずれの断面幅においても上下端部から 25mm 程度まで、せん断型の AE 源の割合が高くなっている。断面の端部は壁効果により粗骨材の存在確率が中央部よりも低いと考えられる。粗骨材が少ない領域では、せん断力を受けるとせん断方向の変形が生じやすくせん断型のクラックが支配的となり、せん断型の AE 源が同定されたと考えられる。一方、中央では粗骨材の存在確率が高く機械的抵抗が生じ、かつポアソン効果による引張力が働き、治具等の変形拘束の影響が小さくなるために引張型の AE 源が

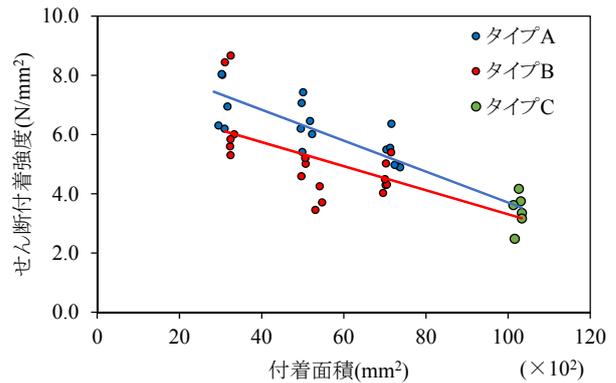


図-8 付着面形状および寸法の違いがせん断付着強度に及ぼす影響

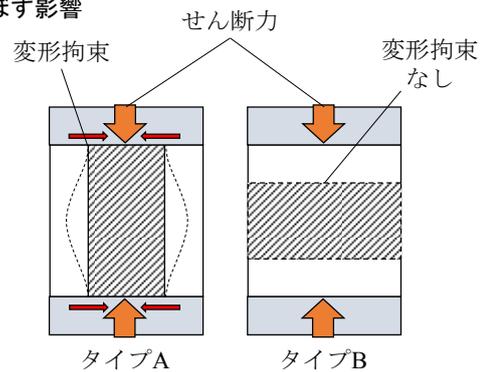


図-9 付着面形状の違いが変形拘束に及ぼす影響

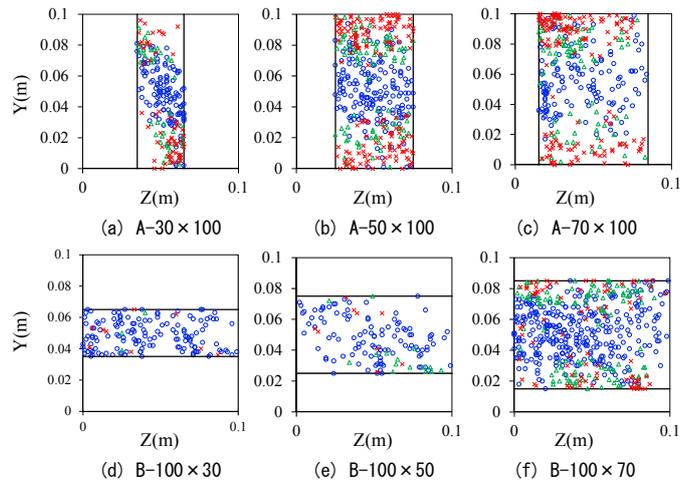


図-10 付着面形状および寸法を変えた供試体での SIGMA 解析結果

同定されたと考えられる。

タイプ B の断面では、付着面寸法 (幅×高さ) が $100 \times 30\text{mm}$ および $100 \times 50\text{mm}$ の供試体では、断面全体として引張型の AE 源が卓越しているが、付着面寸法 (幅×高さ) が $100 \times 70\text{mm}$ の供試体では、上下端部にせん断型の AE 源の割合が高く、供試体上面および下面から 25mm の位置より内側では引張型の AE 源が占めている。タイプ B の断面内では、主として引張型の AE 源が同定されており、载荷治具による変形拘束の影響がなく、ポアソン効果による引張破壊が生じていると考えられ、変形拘束を受けるタイプ A よりも強度が低

くなる結果と整合している。

したがって、供試体端部 25mm では、粗骨材の存在確率が小さいことに加え、載荷治具による変形拘束により、せん断型のクラックが卓越し、強度が高く評価され、一方、中央部の骨材の存在確率が高い領域では、ポアソン効果による引張型のクラックが卓越し、変形拘束の影響が低減し強度が低く評価された可能性が示唆された。

以上より、付着面形状が変化する場合には、断面内で主たる破壊要因が異なる場合がある。

4. 結論

本研究では、母材コンクリートと断面補修材のせん断付着強度について直接 2 面せん断試験を対象に、付着界面の処理方法、プライマー使用の有無および補修材種類が異なる場合のせん断付着強度への影響に関して検討を行った。さらに、せん断付着強度における寸法依存性に関して、AE 法を用いた微視的観点から破壊進行に伴う最終破壊面の形成について考察を行った。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) プライマー使用の有無が破壊面の形成に及ぼす影響に関して、プライマーの使用により、界面の一体性が向上し、破壊が徐々に進行する結果が得られた。しかし、せん断付着強度に及ぼす影響は、プライマーの使用により若干の強度増加が生じる場合もあったが、本研究の範囲内では、顕著な差は認められなかった。
- (2) 断面補修材として PCM を使用した場合、目粗しが十分な場合、付着面の一体性が向上し、無機系補修材と比べ高いせん断付着強度が得られる。
- (3) 有機系補修材において、算術平均粗さとせん断付着強度の関係は線形となり、せん断付着強度算定式を実験値から提案した。その近似直線の傾きは、既往の研究における無機系補修材を対象としたせん断付着強度算定式の傾きと同程度であり、定数部は無機系補修の場合と比べ 1.0N/mm^2 程度大きい値となった。
- (4) 付着面積の増加に伴い、せん断付着強度は低下し、せん断付着強度には寸法依存性があることが確認された。したがって、界面の一体性評価においては、付着面積を考慮し、適切なせん断付着強度の算出を行う必要がある。
- (5) 直接 2 面せん断試験においては、付着界面内で生じる AE 源の発生機構が供試体高さ方向によって異なり、断面上下端部から 25mm はせん断型、高さ中央付近では引張型 AE 源が卓越した。これは、壁効果による粗骨材の存在確率が供試体上下端と中央部

で異なることに加え、載荷治具による変形拘束の影響が生じたためと考えられる。

- (6) 断面幅が減少する縦長のタイプ A のせん断付着強度は、断面高さが減少する横長のタイプ B の強度よりも高くなった。これは、タイプ A の付着面は載荷治具により変形が拘束されるのに対し、タイプ B は変形拘束を受けずポアソン効果による引張方向の変形が可能となることが要因と考えられる。

謝辞

本研究は、平成 30 年度科学研究費補助金(基盤(C), 課題番号 18K04309)によって実施した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会 コンクリートライブラリー123「吹付けコンクリート指針(案)[補修・補強編]」, 丸善, pp.18-19, 2005.7
- 2) 黒原創, 大野健太郎, 宇治公隆, 上野敦: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.358-390, 2012.6
- 3) 黒原創, 大野健太郎, 宇治公隆, 上野敦: 母材コンクリートと無機系補修材界面のせん断付着強度試験に関する考察, コンクリート工学論文集, Vol.35, No.1, pp.607-612, 2013.6
- 4) 吉澤博之, 吳智深, 袁鴻, 金久保利幸: 連続シートとコンクリートの付着挙動に関する検討, 土木学会論文集, No.662, Vol.49, pp.105-119, 2000.
- 5) 出雲健司, 佐伯昇, 大沼博志: 連続繊維シートとコンクリートの付着強さの関係, 土木学会論文集, Vol.46, No.641, pp.167-178, 2002.
- 6) 佐藤貢一, 小玉克己: ポリマーセメントモルタル増厚補強部の付着界面せん断はく離性状に関する研究, Vol.59, No.732, pp.77-87, 2003.5
- 7) 大津政康, 重石光弘, 湯山茂徳, 岡本享久: 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, Vol.42, No.10, pp.570-575, 1993.10
- 8) 大野健太郎, 下菌晋一郎, 沢田陽佑, 大津政康: AE 波初動部の自動読み取りの開発による SiGMA 解析の改良, 非破壊検査, Vol.57, No.11, pp.531-536, 2008.11
- 9) 笠倉亮太, 宇治公隆, 梁俊, 佐藤貢一: CFRP 格子筋と吹付けモルタルを用いた補強における格子筋定着特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.853-858, 2007.6