論文 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

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無機系補修材のせん断付着強度評価法の確立を目的とし,JSCE-G 553 規定の二面 せん断試験における付着界面の破壊機構を検討した。破壊過程については,付着界面での載荷方向ひずみと, その直交方向の開口変位の計測を行った。さらに,アコースティック・エミッション(AE)法を用い,微視 的観点から考察を行った。また,付着界面凹凸性状と補修材強度を各3水準として実験を行った。その結果, 無機系補修材を用いた場合は,補修材強度の変化がせん断付着強度に与える影響は小さく,せん断付着強度 は,付着界面凹凸性状を表す算術平均粗さを変数とした一次式で推定可能であることが示唆された。 キーワード:せん断付着強度,二面せん断試験,AE法,算術平均粗さ,粗骨材による機械的抵抗

1. はじめに

既設コンクリート構造物の補修・補強に用いる補修 材には、既設コンクリートと一体となって挙動するこ とが要求され、既設コンクリートと補修材界面のせん 断付着強度評価が重要となる。せん断付着強度評価法 について、海外では BS6319:part4 にレジン系補修材 のせん断付着強度試験法が規格化されているが、補修 材の種類が異なる場合にこの評価法を適用することに ついては同意が得られていない。また、国内には統一 された規格は存在せず、様々な評価法が提案されてい る現状にある^{1)~3)}。

せん断付着強度は,載荷方法,付着界面凹凸性状(以 下,凹凸性状と称す),および補修材強度等,様々な要 因により変化する。その中でも,凹凸性状は,粗骨材 による機械的な抵抗によってせん断付着強度に大きな 影響を与える。このことから,付着界面に適切な目粗 し処理を施すことは重要であり,凹凸性状評価法につ いて検討がなされている⁴⁾。また,補修材強度が変化 することで,粗骨材による機械的な抵抗の程度が変化 すると考えられる。しかし,これらの影響に関する情 報は体系化されておらず,情報の蓄積が必要と言える。

筆者らは、これまでに6種類のせん断付着強度試験 を実施し、凹凸性状が異なる付着界面のせん断付着強 度評価を行っている^{5)~7)}。実験ではアコースティッ ク・エミッション(AE)法を用い、供試体の破壊機構 を微視的観点から検討した。その結果、対象とした試 験の範囲では、JSCE-G 553に規定の二面せん断試験が 最も適切にせん断付着強度を評価可能であることを明 らかにした。この結果を受け、本研究では二面せん断 試験における付着界面の破壊機構をより詳細に検討した(検討1)。さらに、補修材強度を変化させて試験を 実施することで、凹凸性状と補修材強度を考慮したせん断付着強度推定法に関し検討を行った(検討2)。検 討1では、付着界面での載荷方向ひずみとその直交方 向の開口変位を計測した。また、破壊試験時にAE計 測を実施し、得られた AE データに対して SiGMA

(simplified Green's functions for moment tensor analysis) 解析^{8)~9)}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,微視的観点か らの検討を行った。また,検討2では,凹凸性状と補 修材強度を各3水準に変化させて試験を実施すること で,補修材強度が異なる場合の付着界面破壊性状につ いて検討を行った上で,凹凸性状と補修材強度を考慮 したせん断付着強度推定法について考察を行った。

2. 実験概要

実験に使用した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。本研究で用いた補修材は無機系材料で構成されて おり、強度を高強度(Hs)シリーズ,中強度(Ms)シ リーズ,低強度(Ls)シリーズの3水準に変化させた。 Hs シリーズの補修材にはプレミックスタイプの無機 系吹付けモルタルを使用した。Ms,Lsシリーズはセ メント細骨材比1:3のモルタルを使用した。モルタル の使用材料は母材コンクリートの使用材料と同一とし, 細骨材は粗目砂と細目砂を質量比8:2で混合した。水 セメント比はMsシリーズが0.46であり,Lsシリーズ は0.58である。ここで,表-3中の弾性波速度とは,

*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)

	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
検討2_Hs	普通ポルトラ ンドセメント	普通ポルトラ 相模原産 ンドセメント 砂岩砕石	2.63	1.26	6.34	相模原産 砂岩砕砂	2.63	1.25	2.68	富津産 山砂	2.61	3.32	1.55
検討2_Ms,Ls 検討1_Hs			2.63	1.02	6.55		2.63	1.70	3.03				

表-1 使用材料

表-2 コンクリートの示方配合

	粗骨材の	フランプ	水セメン	<i>本</i> / 目.	(미 교 + +	単位量 (kg/m ³)					
	最大寸法 (mm)	(cm)	ト比 (%)	空风里 (%)	神雨村卒 (%)	水 W	セメント C	細骨材粗目 S1	細骨材細目 S2	粗骨材 G	混和剤 [*] Ad
検討2_Hs	20		58.0	4.5	45.6	174	300	657	164	985	C×
検討2_Ms,Ls 検討1_Hs		20 8.0			46.4	172	297	666	166	971	$0.3 \sim 0.5\%$

*スルホン酸系 AE 減水剤を使用

表-3 コンクリートと補修材の力学的特性(試験時材齢)

		母材コン	/クリート			弾性波			
試験名	压縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弹性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	压縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	速度 (m/s)
検討1_Hs	39.1	2.95	27.4	0.16	63.4	3.58	29.9	0.23	4400
検討2_Hs	33.2	3.00	25.3	0.17	58.6	4.20	27.1	0.22	4200
検討2_Ms	32.8	2.50	25.3	0.17	46.2	3.49	24.5	0.17	4250
検討2_Ls	38.5	3.06	26.7	0.15	40.0	3.05	20.7	0.20	4200



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。シャープペンシル芯 圧折法(NDIS2110)によって供試体表面で励起した疑 似 AE に対し,弾性波速度を変数とした AE 発生源位 置標定を実施し,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 解析に用いた。

供試体は、100×100×400mmの鋼製型枠をスペーサ によって仕切り、母材コンクリートと補修材を打分け て作製した。母材コンクリートは打設後24時間で脱型 し、20℃水中養生を実施した。母材材齢14日目に母材 コンクリートを型枠に戻し、補修材を打継いだ。その 後、母材材齢15日から28日まで20℃水中養生を継続 し、破壊試験に供した。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 ラシを用い、未凝結のモルタルを取り除くことで行っ た。目粗しの程度は、Hr シリーズ(大目粗し、粗骨材 が露出する程度)、Mr シリーズ(中目粗し、細骨材が 露出する程度) および Pr シリーズ(無処理)の3 水準 とした。載荷には容量 2000kN の耐圧試験機を用い, 載荷速度は0.05kN/sec とした。検討1 では Hs_Hr シリ ーズ供試体3 個で実験を行い,検討2 では各目粗し水 準3 個,全シリーズ計27 個の供試体を実験に用いた。

AE 計測には、共振周波数 150kHz の AE センサを 8 個使用し、エレクトロンワックスにて供試体表面に貼 付した。しきい値は 35dB とし、AE 信号はプリアンプ にて 40dB 増幅し、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、 検討 2 の Hs シリーズのみ AE センサ数を 6 個とし、し きい値を 40dB として AE 計測を行った。

図-1 に本研究で実施した試験の概略図を示す。開 口変位計は図-1(c)のとおり、供試体底面より高さ 10mmの位置から20mm間隔で5個取り付けた。ひず みゲージはゲージ長30mmとし、図-1(d)のとおり、 付着界面の高さ方向中央部に貼付した。供試体長手方 向で10mm離れた位置の母材コンクリートと補修材に



もそれぞれ貼付した。なお,開口変位計は型枠面に, ひずみゲージは打設面に取り付けた。

凹凸性状評価には JIS B 0601 の算術平均粗さを用い た。付着界面凹凸性状の計測は、母材コンクリート材 齢7日目に行った。凹凸性状の計測には高さ方向の分 解能が 0.05mm の自走式レーザ変位計を用い、付着界 面の中心付近を載荷方向に計測した。信号検出は 0.001 秒毎とし、測定間隔は 0.0234mm である。付着界面端 部の欠け等を考慮し、計測信号のうち両端部 10mm 分 のデータを除外した全データを算術平均粗さ算出に用 いた。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二乗法によって中心線を求め、各 計測点における中心線から測定断面曲線までの距離を 求めることで得た。

3.実験結果

3.1 付着界面の破壊過程の検討(検討1)

図-2 は供試体の SiGMA 解析結果,図-3 は付着界 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 イベントの高さ方向に関する AE イベント モードの内訳を示している。本研究では,SiGMA 解析



図-7 せん断力が作用する付着界面に発生する応力

(AE 発生源位置標定解析およびモーメントテンソル 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 現象を AE イベントと称し、赤□をせ ん断型 AE イベント、緑○を混合型 AE イベント、青 ◇を引張型 AE イベントとして示す。

図-2 より供試体の破壊が付着界面で生じたことが 分かる。また、図-3 より、高さ方向で卓越する AE イベントモードが異なっており、中央付近では引張型 AE イベントの割合が多くなっており、上部および下 部ではせん断型の AE イベントの割合が多いことが分 かる。図-4 は載荷時間、付着界面の載荷方向ひずみ、 および荷重の関係を示したものであり、図-5 は載荷 時間、開口変位、および荷重の関係を示したものであ る。また、図-6 は付着界面を中心に幅 20mm 以内に 位置標定された AE イベントを打継前の母材コンクリ



ートの写真上にプロットしたものである。

荷重が低下する直前の1616秒までに着目すると、図 -6 (b) では付着界面の広範囲に AE イベントが位置 標定されており、付着界面に多くの微小ひび割れが発 生している。微小ひび割れが多数発生しても供試体が 荷重に抵抗しているのは、粗骨材による機械的な抵抗 が得られているためと考えられる。この時、付着界面 には約 400μの圧縮ひずみが発生しており (図-4), 母材コンクリートの静弾性係数、ポアソン比を用いて 付着界面に発生している引張応力を推定すると、約 1.75N/mm²の引張応力が発生していることとなる。こ の値は付着界面の応力算定に当たり、母材コンクリー トの物性値のみを考慮している値であるため、付着界 面に発生している応力を正確に表す値ではないが、ポ アソン効果によって付着界面法線方向に引張応力が発 生していることが推察できる。付着界面に微小ひび割 れが発生する際,高さ方向中央部に発生する場合は付 着界面法線方向のポアソン効果の影響を受け, AE イ ベントモードが引張型に同定される。これに対し、上 部および下部に微細ひび割れが発生する場合は載荷治 具による変形拘束の影響により、AE イベントモード がせん断型に同定されると考えられる。荷重が低下す る際(1617~1621 秒)には圧縮ひずみは解放され(図 -4), 開口変位が増加した (図-5)。この時発生した AE イベントは (図-6 (c)), 1616 秒までに AE イベ ントが位置標定された位置の近傍に再度位置標定され ており、荷重低下の要因となったひび割れで擦れが生



写真-1 各補修材強度の破面性状

じたことが推察できる。最大荷重の40%程度まで荷重 が低下した後では,再度圧縮ひずみが増加した(図-4)。 この時の開口変位の増加は緩やかなものとなり(図-5),付着界面でずれが生じた後,新たな噛み合いが生 じることで荷重に抵抗したと推察できる。さらに,付 着界面が完全に破壊する際には,圧縮ひずみは解放さ れ(図-4),開口変位が急増した(図-5)。この間に 発生した AE イベントは,発生数は少ないものの,1621 秒までに AE イベントが発生していない位置に発生し ており(図-6(d)網掛け部),新たに噛み合いを生 じた箇所が破壊したと推察できる。

二面せん断試験では、ひび割れ開口変位と荷重の関係から、ひび割れ形成後も粗骨材による機械的な抵抗 によって荷重に抵抗しており、巨視的観点では付着界 面にせん断力が作用していると考えられる。しかし、 図-7 に示すように、微視的観点では目粗し処理を施 した付着界面には様々な応力が発生していると考えら れる。筆者らのこれまでの検討から、付着界面では、 弱点部で微細ひび割れが発生し、これらの微細ひび割 れが集積・進展することで主破壊の要因たるひび割れ を形成すると考えられる⁷⁰。この時の微細ひび割れの 形成は、ポアソン効果の影響や載荷治具による変形拘 束の影響を受け、卓越する AE イベントモードが高さ 方向で変化すると考えられる。

3.2 付着界面凹凸性状と補修材強度を考慮したせん断 付着強度評価法に関する検討(検討2)

二面せん断試験では、粗骨材による機械的な抵抗に

より強度増加が得られるが、補修材強度の変化によっ て粗骨材による機械的な抵抗の程度が変化すると考え られる。図-8 に示す補修材強度別の SiGMA 解析結果 の一例より、補修材強度が低い程、供試体長手方向の AEイベント分布域が広くなることが分かる。これは, 補修材強度が低いため補修材にも微小な破壊が生じて いることに加え,付着界面の破壊箇所が供試体長手方 向に広くなっていることを示すと考えられる。写真-1 に示す各供試体の破面性状では,補修材強度が低い程, 粗骨材粒子や補修材の破壊が生じている箇所が少なく, 打継ぎ前の凹凸性状と同様の大きな凹凸を有する破断 面となっている。このことから補修材強度が低い Ls シリーズでは、目粗し処理を施した付着界面の一体性 が低かったと推察できる。これに対し、Hs シリーズの 破断面は母材付着界面の凹凸に補修材が剥ぎ取られる と共に, 粗骨材粒子の破断も認められ, 平面的な破断 面となっている。このことから、付着界面における一 体性が高かったことが分かる。これらの破面凹凸性状 の相違はSiGMA解析結果におけるAEイベント分布域 と対応しており、補修材強度の変化によって付着界面 の破壊性状が変化していると考えられる。

図-9 は各供試体の算術平均粗さとせん断付着強度 の関係を補修材強度と目粗し水準ごとに区別してまと めたものである。図-9 中の白抜きのプロットは、各 供試体のせん断付着強度評価結果から付着界面の面積 増分の影響を除外したものである。目粗し処理を施す ことで、補修材が母材コンクリートと接触する面積が 増加する。せん断付着強度を評価する際に付着界面の 面積は付着界面の投影面積で与えられるため、実際の 付着面積よりも小さな面積で強度評価を行っていると 考えることが出来る。ここでは粗骨材による機械的な 抵抗に着目する目的で、この影響を除外した場合につ いても考察を行う。面積増分の算定では、計測した凹 凸データから得られる断面曲線長さを評価長さで除し た表面積率を用いた。各目粗し水準の表面積率は、Pr シリーズでは約 1.01, Mr シリーズでは約 1.10, Hr シ リーズでは約1.25程度である。図-9より,算術平均 粗さが大きくなると、せん断付着強度が高くなること が分かる。その中で、補修材強度別のプロットは混在 しており、補修材強度の変化がせん断付着強度に与え る影響は小さいと考えられる。白抜きのプロットは, 付着界面における粗骨材による機械的な抵抗に着目し たものであるが、この中で、Ls_Mr シリーズと Ls_Hr シリーズのプロット(図-9 網掛け部)に着目する。 この2つのシリーズ間では、算術平均粗さが異なるに も関わらず、評価された強度に大きな違いが認められ ない。これは、Lsシリーズ補修材の静弾性係数が低い



図-10 Ls_Hr を除いた全供試体のせん断付着強度評価

ためと考えられる。付着界面内に微小ひび割れが発生 した際、粗骨材と補修材が噛み合うことで荷重に抵抗 することとなる。しかし、補修材の静弾性係数が低い 場合は補修材の変形量が増加し、補修材が粗骨材に対 し抜け出しやすくなると考えられる。ここで、粗骨材 による機械的な抵抗を有効に得ることが出来ず、他の 2 種類の補修材と異なる挙動を示した Ls_Hr シリーズ 供試体3個の結果を除外した全供試体の算術平均粗さ とせん断付着強度(図-9における塗りつぶしのプロ ットの関係を図-10に示す。図-10より,補修材強度 が異なった場合であっても、せん断付着強度は算術平 均粗さによって表現可能と考えられる。算術平均粗さ とせん断付着強度の関係における近似直線の決定係数 は 0.826 であり、本研究で対象とした凹凸性状の範囲 において,両者の関係は概ね直線関係にあると言える。 このことから、補修材に有機系の接着増強剤等を含ま ない場合、母材コンクリート付着界面の凹凸性状を算 術平均粗さにより評価し,評価値を式(1) に代入す ることでせん断付着強度の推定が可能と考えられる。

 τ_u =3.22 R_a +0.825 (1) ここに、 τ_u : せん断付着強度 (N/mm²)、 R_a : 算術平

均粗さ (mm)

式(1)は本研究において実験的に得られた式であり, より高精度にせん断付着強度評価を行うためには, さらなる情報の蓄積が重要である。また,有機系の接着 増強剤を用いた場合は,付着界面の凹凸が小さくても, せん断付着強度が増加することが考えられるため¹⁰, 有機系補修材等、補修材種類が異なる場合のせん断付 着強度評価に関しては,さらなる検討が必要である。

4.結論

本研究は、母材コンクリートと補修材界面のせん断 付着強度評価法の確立を目的とし、二面せん断試験に おける付着界面の破壊機構を、付着界面が破壊する際 の変形特性と AE 法を用いた微視的観点から考察した。 これに加え、付着界面凹凸性状と補修材強度を考慮し たせん断付着強度推定法に関し検討を行ったものであ る。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1)付着界面でひび割れ開口変位が増加した後も、圧縮ひずみが再度増加し、供試体は最大荷重の40%程度の荷重に抵抗した。これは、付着界面において新たな噛み合いを生じることで荷重に抵抗したためと考えられる。このことから、巨視的観点では、二面せん断試験の付着界面にはひび割れ発生後もせん断力が作用していると考えられる。
- (2) 二面せん断試験では、付着界面に載荷方向の圧縮 ひずみが生じており、ポアソン効果によって付着 界面法線方向に引張応力が発生していると推察さ れた。微視的観点では付着界面に発生する微細ひ び割れは、ポアソン効果や載荷治具による変形拘 束の影響を受け、付着界面高さ方向で卓越する AE 発生源形成モードが変化すると考えられる。
- (3)補修材強度が異なる場合の二面せん断試験を実施した結果、付着界面の破断面性状が補修材強度の変化に伴い変化した。また、AE発生源分布域も補修材強度の変化に伴い変化しており、付着界面の破壊機構が異なると考えられる。
- (4) 補修材強度を変化させ、せん断付着強度を評価した結果、補修材強度の変化がせん断付着強度に与える影響は小さいと考えられた。また、粗骨材による機械的な抵抗に着目した検討において低強度大目粗しシリーズは、低強度中目粗しシリーズと比較して算術平均粗さが大きいにも関わらず、強度変化が認められなかった。これは、補修材モルタルの静弾性係数が小さいことで、補修材が母材コンクリートに対し抜け出しやすくなるためと考えられる。
- (5)低強度大目粗しシリーズの結果を除外し、算術平均粗さとせん断付着強度の関係を評価した結果、補修材強度が変化した場合もせん断付着強度を算術平均粗さで表現可能であり、補修材に有機系の接着増強剤を含まない場合は、算術平均粗さを変数とした一次式によりせん断付着強度を推定可能であることが示唆された。

謝辞

本研究は,平成24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

- Momayez, M.R.Ehsani, A.A.Ramezanianpour, H.Rajaie : 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,宇治公隆,國府勝郎,笠倉亮太: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, 2006.
- 川島宏幸,平田隆祥,十河茂幸: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) 黒原創, 宇治公隆, 大野健太郎, 上野敦: 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
- 6) Kentaro Ohno, So Kurohara, Kimitaka Uji, Atsushi Ueno : 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
- 7) 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.1375-1380, 2012.
- 8) 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,非破壊検査第42巻10号,pp.570-575, 1993.10
- 大野健太郎,下園晋一郎,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.
- Aseel Masani : Bond strength Assessment for Different Types of Repair Materials , Eng.& Tech.Journal, Vol.28, No.21, pp.6325-6336, 2010.