

論文 水平力による損傷とひび割れ補修が接着系アンカーの付着特性に及ぼす影響

小野澤翔^{*1}・塩越汰斗^{*1}・八巻祐太^{*2}・高瀬裕也^{*3}

要旨：既存コンクリート構造物の補修・補強は一般にあと施工アンカーが多く使用されるが、地震被害を受けた部材への適用も想定され得る。そこで、本研究ではせん断加力実験による部材の損傷を考慮したあと施工アンカーの付着性能を検証した。その結果、損傷した部材に対するひび割れ補修の補修効果や接着剤種による影響が明らかとなった。本実験では、部材変形角を $1/75 \text{ rad.}$ とし、アンカー筋の定着時期、補修の有無、接着剤種、ひび割れ本数をパラメータとしたが、無損傷試験体に対する未補修試験体の付着強度比が $0.3 \sim 0.7$ になったが、ひび割れ補修をすることで $0.9 \sim 1.1$ と付着強度が増加することが確認された。

キーワード：あと施工アンカー、付着強度、ひび割れ補修、地震被害

1. はじめに

図-1 にあと施工アンカーの適用例を示す。耐震性、耐久性の損なわれた鉄筋コンクリート（以下、RC と呼ぶ）構造物の耐震補強や建物の用途変更においては、一般に接着系あと施工アンカーが使用される。日本のような大規模地震が頻発する国では、地震による損傷を考慮した設計を行った上で、あと施工アンカーを定着する必要がある。各種合成構造設計指針¹⁾をはじめとする既往の規・基準においても、地震により損傷した部材についての接着系あと施工アンカーの付着強度に関する明確な規定はない。既往の研究^{2), 3)}では圧縮試験機により生じたひび割れにアンカー筋を定着し、その付着特性を検証しているが、部材変形角などの地震による損傷を考慮した研究は極めて少ない。また既報⁴⁾において、有機系接着剤を使用したアンカー筋を損傷後の部材に定着し、付着実験を実施した。その結果、せん断加力実験の変形角やアンカー筋定着位置の危険断面からの距離が付着強度に大きく影響することを報告した。しかし、ひび割れ補修や接着剤種による影響は検証していない。そこで本研究では、ひび割れ補修の有無や無機系接着剤をパラメータに追加し、地震荷重による損傷があと施工アンカーの付着特性に及ぼす影響を検証する。

2. 梁試験体のせん断加力実験

2.1 実験概要

表-1 に試験体パラメータを、表-2 にコンクリートの調合を、図-2 に試験体の諸元を、図-3 に目地棒の詳細を示す。本研究では、日本建築学会耐震性能評価指針（案）⁵⁾によって定められている 5 段階の損傷度のうち、補修の必要がない I に加え、大規模な補修が必要である損傷

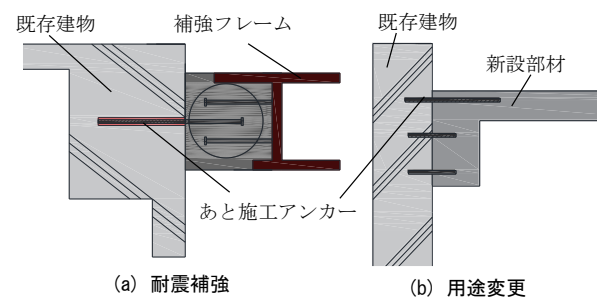


図-1 あと施工アンカーの適用例

表-1 せん断加力実験の試験体パラメータ

試験体名	$f_{c,s}$	$E_{c,s}$	損傷度 ⁵⁾			損傷前 定着	補修
			Rank	R	w_t		
ND-23-1	23.8	20.2	I	—	—	—	—
DIII-23-1			III	1/75	1.0~2.0	—	—
DIII-23-2			—	—	—	—	—
ND-22-1	22.0	20.8	I	—	—	—	—
DIII-22-1			—	—	—	—	○
DIII-22-2			—	—	—	—	○
DIII-22-3			III	1/75	1.0~2.0	○	—
DIII-22-4			—	—	—	○	—
DIII-22-5			—	—	—	○	○
DIII-22-6			—	—	—	○	○
ND-16-1	16.5	20.3	I	—	—	—	—
DIII-16-1			—	—	—	—	—
DIII-16-2			—	—	—	—	—
DIII-16-3			—	—	—	—	○
DIII-16-4			III	1/75	1.0~2.0	—	○
DIII-16-5			—	—	—	○	—
DIII-16-6			—	—	—	○	—
DIII-16-7			—	—	—	○	○
DIII-16-8			—	—	—	○	○

$f_{c,s}$: コンクリート圧縮強度 (N/mm^2), $E_{c,s}$: ヤング係数 (kN/mm^2),
R: 部材変形角 (rad.), w_t : 目標ひび割れ幅 (mm)

表-2 コンクリートの調合

W/C	s/a	単位質量(kg/m^3)			
		W	C	S	G
78.6	49.4	187	238	906	944

W: 水, C: セメント, S: 細骨材, G: 粗骨材, s/a: 細骨材率
W/C: 水セメント比

*1 室蘭工業大学大学院工学研究科 大学院生 学生会員

*2 室蘭工業大学理工学部創造工学科 大学生

*3 室蘭工業大学 もの創造系領域 教授・博士（工学） 正会員

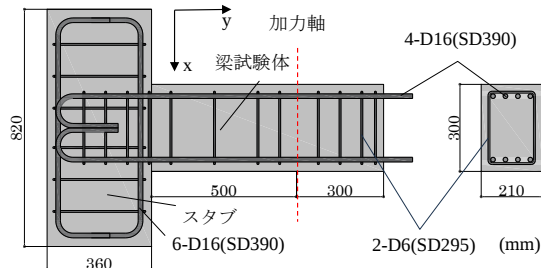


図-2 試験体の諸元

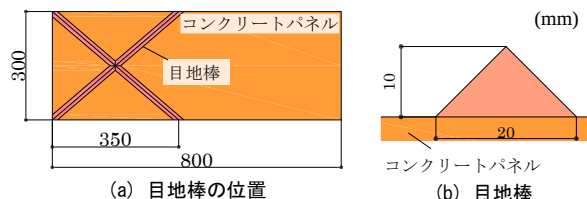


図-3 目地棒の詳細

表-3 せん断加力実験結果の一覧

試験体名	R(rad.)	Q _{max} (kN)		w _f (mm)	w(mm)			
		+	-		表		裏	
					w ₊	w ₋	w ₊	w ₋
DIII-23-1	1/75	100	-129	1.0~2.0	2.00	1.60	2.00	0.90
DIII-23-2		130	-123		1.30	0.45	1.40	0.20
DIII-22-1		135	-111		1.10	0.60	1.50	0.85
DIII-22-2		154	-137		1.40	1.10	1.10	0.80
DIII-22-3		149	-144		1.30	1.30	2.00	1.70
DIII-22-4		155	-128		1.30	0.35	2.00	0.35
DIII-22-5		146	-100		1.60	0.70	1.50	0.30
DIII-22-6		134	-97		2.00	0.80	2.50	0.90
DIII-16-1		115	-109		1.40	1.00	1.30	1.30
DIII-16-2		88	-114		1.50	1.60	2.00	1.50
DIII-16-3		119	-111		1.20	1.10	0.75	1.10
DIII-16-4		130	-116		1.70	1.00	1.50	1.20
DIII-16-5		113	-118		1.40	2.00	0.95	1.30
DIII-16-6		123	-109		1.40	0.85	1.40	1.30
DIII-16-7		116	-130		1.10	1.40	1.40	1.10
DIII-16-8		120	-111		1.40	1.10	1.40	1.30

R : 部材変形角, $Q_{\max}$: 最大荷重, w_t : 目標ひび割れ幅, w : ひび割れ幅

度Ⅲを対象とする。また、損傷度Ⅳ以降は部材の補修が困難な状態であることから、対象外とした。目標残留ひび割れ幅 w_t はその損傷度に対応するひび割れ幅であり、損傷度Ⅲ (DIII) は $w_t = 1.0 \sim 2.0 \text{ mm}$ である。また、損傷度および残留ひび割れ幅に対応する本試験体における部材変形角は、予備実験によって概ね把握し、DIII は $R = 1/75 \text{ rad.}$ とした。本実験で用いる試験体は、図-2 に示すように、全長 1,160 mm、スタブから加力軸までの長さが 500 mm、梁せい 300 mm、梁幅 210 mm の RC 片持ち梁とした。梁主筋には D16 (SD390) のねじ鉄筋、あばら筋には D6 (SD295) の異形鉄筋、スタブの主筋には D16 (SD390) の異形鉄筋を用いた。せん断余裕度は 0.79、シアスパン比は 1.91、あばら筋間隔は 150 mm、引張鉄筋比 p_t は 1.44 %、あばら筋比 p_w は 0.20 % とした。DIII-22-3~6, DIII-16-5~8 の試験体は、せん断加力実験の前にアンカー筋を定着した試験体であり、アンカー筋の定着位置にひび割れを誘発するため、図-3 のように型枠に目地棒 (幅: 20 mm、高さ: 10 mm) を貼り付けた。目地棒の長さや位置は、予備実験で損傷させた試験体のひび割れ

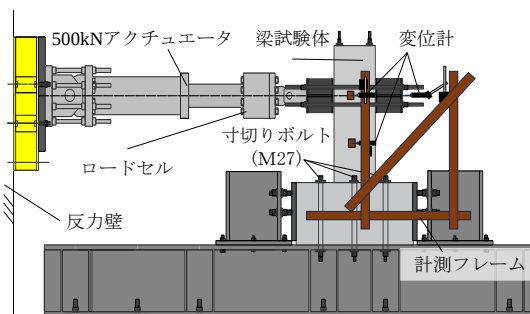


図-4 せん断加力実験の加力装置の概要

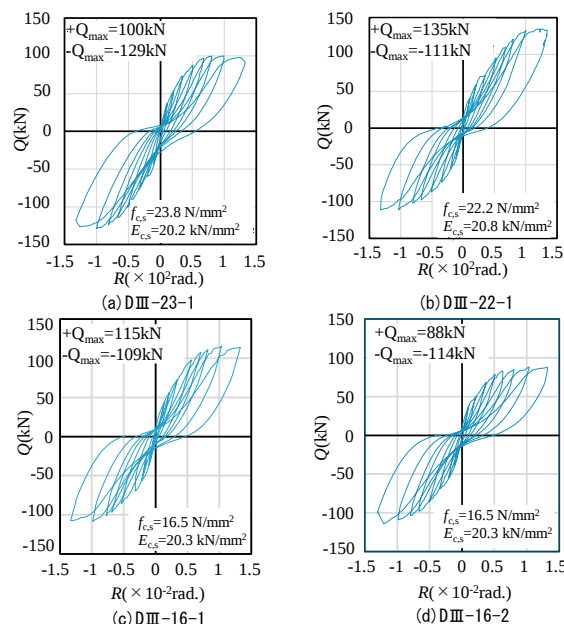


図-5 荷重-変位関係の一例

試験体のひび割れのうち、ひび割れ交差部の位置を計測し、その平均した値が目地棒の交差部となるようにした。図-4 にせん断加力実験の加力装置の概要を示す。500 kN のアクチュエータにより梁試験体に正負交番繰り返し荷重を与える。水平変位は加力軸の位置と加力軸とスタブの中間位置の 2 箇所計測し、固定治具に水平方向の変位計を 2 箇所設置することでねじれを計測した。部材変形角 R は、その加力軸部で計測した水平変位の値を加力軸の位置である 500 mm で除した値とした。荷重サイクルは、 $R = \pm 1/1000, \pm 1/500, \pm 1/300, \pm 1/200, \pm 1/150, \pm 1/125, \pm 1/100, \pm 1/75 \text{ rad.}$ をそれぞれ 1 回ずつとして、油圧アクチュエータを制御して繰り返し加力を与えた。ひび割れの計測方法は、クラックスケールによって各サイクルの荷重ピーク時、 $Q = 0 \text{ kN}$ 、 $R = 0 \text{ rad.}$ のタイミングで測定した。

2.2 実験結果

図-5 にせん断加力実験の荷重-変位関係を、表-3 にせん断加力実験の結果の一覧を示す。表-3 には、正側、負側の荷重で発生したひび割れのうち最大の残留ひび割れ幅を、それぞれ w_+ 、 w_- と表記している。 $R = 1/75 \text{ rad.}$ まで加力し、 $Q_{\max}$ が正側は 88~155 kN で負側は -97~144

表-4 付着実験の試験体パラメータ

試験体名	接着剤種	ひび割れ 補修	d_a	f_c E_c	l_e	ひび割れ幅						定着位置					
						1		2		3		1		2		3	
						w_1	w_2	w_1	w_2	w_1	w_2	x	y	x	y	x	y
Ep-ND23		-				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ep-Po-N-Nc80		-		23.0		-	-	-	-	-	-	0.49	0.39	0.51	0.32	0.28	0.34
Ep-Po-N-1c		-		25.1		0.90	-	0.90	-	1.20	-	0.66	1.03	0.66	1.03	0.30	1.00
Ep-Po-N-2c		-				2.00	1.6	1.40	0.2	1.30	0.4	0.62	0.67	0.47	0.68	0.74	0.52
Ep-ND22		-				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ep-Pr-N-Nc80		-				-	-	-	-	-	-	0.50	0.27	0.50	0.27	0.50	0.27
Ep-Pr-N-1c		-				1.30	-	0.30	-	0.00	-	0.29	0.83	0.29	0.83	0.29	0.83
Ep-Pr-N-2c	Ep	-				2.00	1.7	1.20	0.2	1.30	1.2	0.50	0.58	0.50	0.58	0.50	0.58
Ep-Pr-R-Nc80		○				-	-	-	-	-	-	0.50	0.27	0.50	0.27	0.50	0.27
Ep-Pr-R-1c		○		22.8		0.00	-	0.10	-	1.60	-	0.29	0.83	0.29	0.83	0.29	0.83
Ep-Pr-R-2c		○		20.9		2.00	0.8	2.50	0.9	1.20	0.7	0.50	0.58	0.50	0.58	0.50	0.58
Ep-Po-R-Nc80		○				-	-	-	-	-	-	0.46	0.35	0.37	0.20	0.50	0.20
Ep-Po-R-Nc320		○				-	-	-	-	-	-	0.50	1.07	0.50	1.07	0.50	1.07
Ep-Po-R-1c		○				1.40	-	1.10	-	1.40	-	0.38	0.69	0.70	0.85	0.24	0.88
Ep-Po-R-2c		○				1.00	0.6	1.10	0.6	1.30	0.7	0.52	0.47	0.73	0.57	0.55	0.50
Ce-ND19		-				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ce-Po-N-Nc80		-	13.0		4.5 d_a	-	-	-	-	-	-	0.44	0.32	0.37	0.34	0.64	0.30
Ce-Po-N-Nc320		-				-	-	-	-	-	-	0.50	1.07	0.50	1.07	0.50	1.07
Ce-Po-N-1c		-				0.95	-	0.90	-	0.75	-	0.62	1.01	0.53	0.30	0.50	0.45
Ce-Po-N-2c		-				1.30	1.2	0.95	0.3	0.85	0.8	0.53	0.55	0.31	0.61	0.46	0.53
Ce-Pr-N-Nc80		-				-	-	-	-	-	-	0.44	0.32	0.37	0.34	0.64	0.30
Ce-Pr-N-Nc320		-				-	-	-	-	-	-	0.50	1.07	0.50	1.07	0.50	1.07
Ce-Pr-N-1c		-				0.80	-	1.10	-	1.20	-	0.62	1.01	0.53	0.30	0.50	0.45
Ce-Pr-N-2c	Ce	-		19.8		0.80	0.4	0.70	0.6	1.30	1.0	0.53	0.55	0.31	0.61	0.46	0.53
Ce-Po-R-Nc80		○		20.3		-	-	-	-	-	-	0.44	0.32	0.37	0.34	0.64	0.30
Ce-Po-R-Nc320		○				-	-	-	-	-	-	0.50	1.07	0.50	1.07	0.50	1.07
Ce-Po-R-1c		○				0.80	-	0.90	-	0.75	-	0.62	1.01	0.53	0.30	0.50	0.45
Ce-Po-R-2c		○				0.85	0.8	0.95	0.3	0.85	0.8	0.53	0.55	0.31	0.61	0.46	0.53
Ce-Pr-R-Nc80		○				-	-	-	-	-	-	0.44	0.32	0.37	0.34	0.64	0.30
Ce-Pr-R-Nc320		○				-	-	-	-	-	-	0.50	1.07	0.50	1.07	0.50	1.07
Ce-Pr-R-1c		○				1.20	-	0.80	-	0.80	-	0.62	1.01	0.53	0.30	0.50	0.45
Ce-Pr-R-2c		○				1.40	1.4	2.00	1.4	2.00	2.0	0.53	0.55	0.31	0.61	0.46	0.53

d_a : アンカー筋径(mm), f_c , E_c : コンクリート圧縮強度(N/mm²)とヤング係数 (kN/mm²), l_e : 定着長さ(mm), w : 定着部のひび割れ幅(mm),

x : x 方向(×D mm), y : y 方向(×D mm), D: 梁せい(300mm)

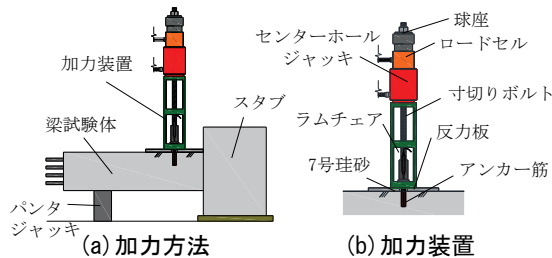


図-6 付着実験の加力装置

kN であった。試験体によって最大荷重のバラツキが見られたが、すべての試験体でおよその目標ひび割れ幅となる $w = 1.0 \sim 2.5$ mm となった。また、表-3 に示す w_t , w の一方が w_t に達していない試験体は、両者とも w_t まで載荷すると、どちらか一方のひび割れが目標の損傷度を超えることが懸念されるため、本実験では一方が w_t に達した段階で載荷を終了した。DIII の試験体は、かぶりコンクリートが一部剥落し、荷重-部材変形角関係でも一部の試験体で荷重が低下した。しかし、極度に大きな荷重低下も見られず、コアコンクリートは概ね健全な状態であったこと、主筋も一部降伏しているものの、座屈や大変形は生じていなかったことから損傷度 III の条件に該当すると判断される。DIII-22-3～6, DIII-16-5～8 の試験体は、アンカー筋をせん断加力実験前に定着した試

験体(損傷前定着 Pr)であり、目地棒を用いてアンカー筋の定着位置にひび割れを誘発させた結果、概ねアンカー筋の定着位置にひび割れが発生したが、一部の試験体で、定着位置にひび割れが発生しなかった。無損傷試験体3体に加え、16体の梁試験体の表面、裏面にそれぞれアンカー筋を定着し、付着実験を行った。

3. アンカー筋の付着実験

3.1 実験概要

表-4 に付着実験の試験体パラメータ、図-6 に付着実験の加力装置を、表-5 に鉄筋の機械的性質を、表-6 に補修材(エポキシ樹脂)の材料特性⁹⁾を、表-7 に接着剤の材料特性を示す。パラメータは定着部のひび割れ本数とアンカー筋の定着時期、接着剤種とした。ひび割れ本数は、ひび割れなし(Nc80, Nc320)、ひび割れ1本(1c)、ひび割れ2本(2c)の3種であり、それぞれに対し3本ずつアンカー筋を定着した。Ncにおいては、試験体面のひび割れがない部分のうちスタブ上面からおおよそ80mmと320mmの地点を定着位置とした。アンカー筋径 d_a を13.0 mm、定着長さを4.5 d_a 、接着剤種を有機系(Ep)、無機系(Ce)とした。また、付着実験時のコンクリートの圧縮強度 $f_{c,b}$ は19.8～23.0 N/mm²である。無損傷試験

体 (ND) の試験体名は、接着剤種とコンクリート圧縮強度(23, 22, 19)で構成される。せん断加力を与えた場合の試験体名は、接着剤種、アンカー筋の定着時期(Po, Pr)、補修の有無 (N, R)、ひび割れ本数で構成される。各パラメータが 3 本ずつあるため、表-4 のひび割れ幅と定着位置の列に示す通り、通し番号 1~3 で区別する。加力装置は、320kN のセンターホールジャッキでアンカー筋に引張力を与え、500kN のロードセルで荷重を計測した。また、コンクリートのコーン状破壊を防ぐため、加力装置底部に反力板を設置した。ひび割れ補修は、内部のひび割れまで補修材を充填可能なひび割れ注入工法を用いた。また、補修材には構造部材の耐力や変形性能の回復が期待でき、より一般的に使用されているエポキシ樹脂⁸⁾を用いた。アンカー筋の定着手順は、せん断加力実験後に定着する試験体(加力後定着 Po)では、まず梁試験体作製し、せん断加力実験により部材を損傷させる。その後、湿式コアドリルを用いて埋込み長さ(4.5 d_a)まで穿孔、孔内をナイロンブラシで清掃し、接着剤を注入してアンカー筋を定着する。せん断加力実験前に定着する試験体(加力前定着 Pr)は梁試験体を湿式コアドリルを用いて穿孔、清掃し、アンカー筋を定着する。その後、せん断加力実験により損傷させる。定着位置のひび割れ幅 w_1 , w_2 は、表-3 のひび割れ幅とは異なり、Po の試験体はアンカー筋定着位置で、Pr の試験体はアンカー筋近傍で最大残留ひび割れ幅を計測し、1c のひび割れ幅を w_1 , 2c のひび割れ幅を w_1 , w_2 ($w_1 > w_2$) とした。Pr の試験体の定着位置は、定着位置による損傷の影響が小さくなるよう、各パラメータで同一の位置に定着した。また、ひび割れ補修する試験体 R はせん断加力実験後にひび割れ補修する。ひび割れ補修の手順⁹⁾は以下の通りである。補修対象となる 0.2 mm 以上のひび割れ表面をブラシで清掃し、注入補修用シリンダー(以下、シリンダーと略記する)の固定器具である座金を取りつけ、ひび割れ表面をシーリング材で塞ぐ。シーリング材硬化後にシリンダーを使用してエポキシ樹脂を注入する。この際、ひび割れの上端部に空気孔を設け、空気孔から補修材があふれだすことを確認した。

3.2 実験結果

3.2.1 破壊形式

破壊形式は多くの試験体でアンカー筋上部にわずかにコンクリートが残存しているものの、アンカー筋のみが引き抜かれており、想定通り付着破壊が顕著であった。また、アンカー筋に接着剤が残存していないことから鉄筋-接着剤界面で付着破壊したと考えられる。しかし、Ep-Pr-N-1c, Ep-Pr-N-2c の 6 体のうち Ep-Pr-N-1c-3 を除く 5 体はアンカー筋に接着剤とコンクリートが付着しており、接着剤-コンクリート界面での破壊となった。こ

れらの破壊形式の違いの要因として、補修試験体は定着時期によらず、ひび割れが補修され、ひび割れ部の引張強度が回復するためと考えられる。Ep-Pr-N のパラメータは接着剤-コンクリート界面がせん断加力実験によって損傷し、コンクリートの引張強度が低下したため、接着剤-コンクリート界面で破壊したと推察される。一方、Ep-Pr-N-1c-3 は鉄筋-接着剤界面での破壊となった。この理由として、せん断加力実験でひび割れがアンカー筋を貫通せず、接着剤-コンクリート界面の付着強度が低下しなかったためと考えられる。また、Ep-Pr-N-Nc80 のパラメータは、Pr-N であるにも関わらず、鉄筋-接着剤界面での破壊であった。これは、アンカー筋を定着した位置の近傍にひび割れが生じなかったことから、せん断加力によるコンクリートの引張強度低下の影響が少なかったためと考えられる。これに対し、Ce はアンカー筋上部にコンクリートが一部残存しているものの全て鉄筋-接着剤界面での破壊であった。両者の違いとして Pr-N の試験体はせん断加力実験後、Ep-Pr-N は接着剤を避けるようにしてひび割れが生じており、接着剤-コンクリート界面での付着が弱まり、Ce-Pr-N は接着剤自体にもひび割れが生じていたため、鉄筋-接着剤界面での付着が弱まったことが影響していると推察される。

3.2.2 付着応力-すべり量関係

図-7 に付着実験の付着応力-すべり量関係の一例を示す。付着応力 τ は、ロードセルで計測した引張力 T をアンカー筋定着時に測定した埋め込み長さ l_e までの表面積で除すことにより次式で求められる。

$$\tau = T / (\pi d_a l_e) \quad (1)$$

図-7 より付着強度 τ_{max} 後の荷重は、 s が約 5mm まで緩やかに下降し、それ以降は軟化勾配が大きくなった。その後、ほとんどの試験体において $s = 8$ mm 前後で付着

表-5 鉄筋の機械的性質

f_{cs}	鉄筋		d	E_s	f_y	f_u	伸び率 (%)
	種類	部位					
23.0	SD295	あばら筋	6	252	488	580	12.5
	SD390	スタブ主筋	16	169	394	544	22.4
	SD390	梁主筋	16	191	394	568	18.0
22.8	SD295	あばら筋	6	192	456	540	12.5
	SD390	スタブ主筋	16	197	390	512	22.1
19.8	SD390	梁主筋	16	199	407	563	19.1
	-	SD345	アンカー筋	13	190	497	682

d : 公称直径 (mm), E_s : ヤング係数 (kN/mm²), f_y : 降伏強度 (N/mm²), f_u : 終局強度 (N/mm²) ※本実験は f_{cs} に応じて鉄筋のロットが異なる。

表-6 ひび割れ補修材の材料特性⁶⁾

f_{ce}	E_{ce}	f_{te}	τ_e
76.4	2.2	43.4	20.4

f_{ce} : 圧縮強度(N/mm²), E_{ce} : ヤング係数 (kN/mm²), f_{te} : 割裂強度 (N/mm²), τ_e : 引張せん断接着強さ(N/mm²)

表-7 接着剤の材料特性⁷⁾

接着剤種	f_{ca}	E_{ca}	f_{ta}
Ep	22.8	26.7	3.09
Ce	30.5	12.4	2.74

f_{ca} : 圧縮強度(N/mm²), E_{ca} : ヤング係数 (kN/mm²), f_{ta} : 割裂強度 (N/mm²)

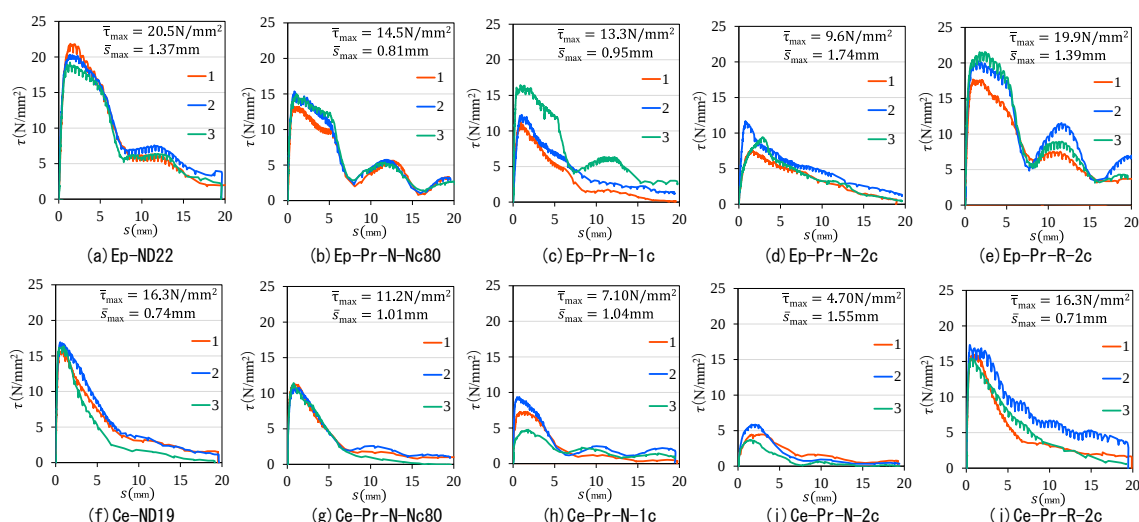


図-7 付着応力-すべり量関係の一例

応力が再上昇した。これは、鉄筋-接着剤界面の破壊形式で確認されるものであり、実験後の穿孔内部には、接着剤が残存していることから、接着剤-コンクリート界面がせん断破壊せず、アンカー筋の節による噛み合い作用が生じたためと考えられる。各パラメータの τ_{max} の平均 $\bar{\tau}_{max}$ を比較すると、接着剤ごとに最も $\bar{\tau}_{max}$ が低かったのは Ep-Pr-N-2c, Ce-Pr-N-2c で 9.6 N/mm^2 , 4.7 N/mm^2 であり、無損傷の試験体である ND に比べ、 $\bar{\tau}_{max}$ がそれぞれ 47%, 71% 低下した。一方でひび割れ補修をした、Ep-Pr-R-2c, Ce-Pr-R-2c は ND に比べ、同等もしくはそれ以上の値まで $\bar{\tau}_{max}$ が増加した。また、せん断加力前に定着した Ep-Pr-N-1c-3, Ep-Pr-R-1c-1, Ce-Pr-R-1c-2 はアンカー筋の定着位置にひび割れが発生しなかったため、次節では、これらの値を除いて考察する。

4. 付着強度の考察

4.1 ひび割れによる影響

図-8 に施工実験によるアンカー筋定着後の穿孔内部の様子を、図-9 に付着強度の比を示す。この施工実験では、穿孔部から 30 mm 離れたひび割れ位置に観察用の $\phi 50 \text{ mm}$ の孔を設け、充填状況を確認した。本研究では、補修の有無による影響を検証するため、無損傷試験体 (ND) の定着位置 (Nc80, 1c, 2c, Nc320) と同一のものを比較し、ND 試験体に対して付着強度がどの程度低減、または増加したか評価する。図の縦軸は付着強度比 γ_b であり、ND 試験体に対する付着強度の比率である。初めに、図-9 (a), (b) の加力前定着試験体 Pr に着目する。無機系接着剤 Ce-Pr の末補修試験体 N の付着強度比は ND に比べ、Nc80, 1c, 2c でそれぞれ 0.69, 0.43, 0.28 と定着位置のひび割れ本数の増加に伴い付着強度が低下した。有機系接着剤 Ep-Pr の N は同様に 0.79, 0.72, 0.51 であり類似する傾向が見られた。続いて、図-9 (c), (d) の加力後定着試験体 Po に着目する。Ce-Po の N は Nc80,

1c, 2c でそれぞれ 0.61, 0.79, 0.71 であり、Ep-Po の N は同様に 0.66, 0.72, 0.72 であった。つまり、ND 試験体と比較して付着強度は低下するものの、ひび割れ本数による影響は確認されなかった。また、Po より Pr が付着強度の低下率が大きいことが示された。これは図-8 に示すように Po はアンカー筋定着時に接着剤がひび割れに流れ込み、接着剤がひび割れ補修材の役割を果たしたため、部分的にひび割れが補修された可能性が考えられる。また、Ep においてはアンカー筋の定着部から 30 mm の位置にひび割れに入り込んだ接着剤が確認できたが、Ce では確認されなかったため、接着剤の入り込んだ範囲により Ep, Ce の付着強度に差が出た可能性も考えられる。

4.2 ひび割れ補修による影響

未補修試験体 N と補修試験体 R に着目する。Ce-Pr を例にすると、N が $\gamma_b = 0.3 \sim 0.7$ であるのに対し、R が $\gamma_b = 0.9 \sim 1.10$ であり、ひび割れ補修をすることで付着強度が増加することが示された。しかし、Nc80 はひび割れ補修により付着強度が増加するものの、完全な回復には至らず、他の試験体においても同様の傾向が見られた。なお、Ep-Po のみ Nc80, 1c, 2c 全ての付着強度が回復しているが、先述した図-8 のように穿孔内部のひび割れに接着剤が流れ込み、補修材の役割を果たしたことが原因と考えられる。また、Nc320 はひび割れ補修の有無に関わらず、 $\gamma_b = 1.0 \sim 1.2$ であった。

4.3 接着剤種による影響

続いて接着剤種に着目する。図-9 (a), (b) の Pr-N を観察すると、有機系アンカーでは $\gamma_b = 0.5 \sim 0.8$ になったが、無機系アンカーでは $\gamma_b = 0.3 \sim 0.7$ となっており、無機系の方が有機系に比べ、ひび割れ本数により付着強度が低下しやすい。一方で図-9 (c), (d) の Po-N を観察すると、Ce と Ep でそれぞれ $\gamma_b = 0.6 \sim 0.8$, $\gamma_b = 0.6 \sim 0.7$ であり、ひび割れ本数による顕著な違いは見られなかった。Po-R を観察すると有機系は Nc80, 1c, 2c 全てで付着強度が回復

したにもかかわらず、無機系は Nc80, 1c が完全に回復していない。この理由も前記と同様に接着剤の入り込んだ範囲の違いによる可能性が考えられる。

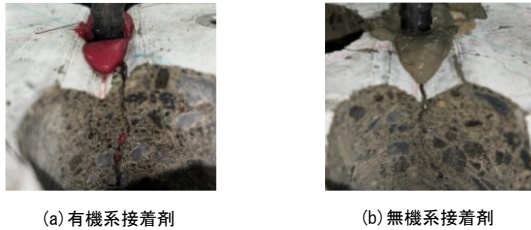


図-8 Po試験体のアンカー筋定着後の穿孔内部の様子

5. まとめ

本研究では、RC 片持ち梁のせん断加力実験前後に定着した接着系アンカー、およびひび割れ補修が付着強度に及ぼす影響を検証した。これらの結果より得られた知見を以下に列記する。

- 1) Ep 試験体の破壊形式は、ほとんどの試験体で鉄筋-接着剤界面での破壊であったが、加力前定着の試験体で接着剤-コンクリート界面で破壊した。一方、Ce 試験体の破壊形式は上部にコンクリートが残存するもののすべての試験体でアンカー筋接着剤界面での破壊であった。
- 2) Ep 試験体の損傷前定着 (Pr) はせん断加力実験によって生じたひび割れが、接着剤を避けるようにして進展するものが多かった。一方で Ce 試験体の損傷前定着 (Pr) は接着剤自体にもひび割れが進展している試験体を確認されたため、破壊形式に差が出た可能性が考えられる。
- 3) ひび割れによる影響を検証すると、接着剤種によらず、Pr-N はひび割れ本数の増加に伴い付着強度比が $\gamma_b=0.3\sim0.7$ まで低下した。Po-N はひび割れ本数による影響が見られなかった。
- 4) ひび割れ補修による影響を検証すると、接着剤種によらず、ひび割れ補修をすることで、 γ_b が $0.9\sim1.1$ まで増加したが、Nc80 は完全に付着強度が回復しなかった。
- 5) 接着剤種による影響を検証すると、Po-N, Pr-N 共通して、有機系アンカーの付着強度比が $\gamma_b=0.5\sim0.8$ であるのに対し、無機系アンカーは $\gamma_b=0.3\sim0.7$ となった。
- 6) Po 試験体の補修効果に着目すると、Ep は全ての定着位置で付着強度が回復したが、Ce は Nc80, 1c で完全に回復しなかった。これは損傷した部材にアンカー筋を定着する際にひび割れに入り込む接着剤の範囲が Ep の方が Ce に比べ大きいことから両者の付着強度に差が出た可能性が考えられる。

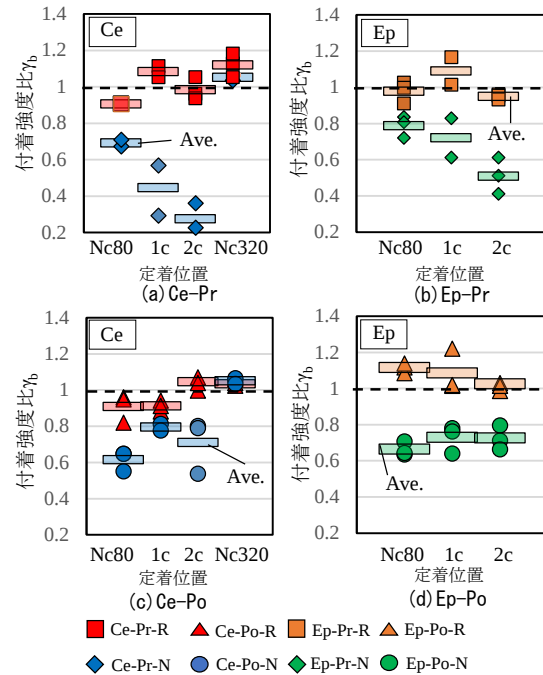


図-9 付着強度比

謝辞

本研究の実施に際し、飛島建設・阿部隆英氏、石田雄太郎氏、日本ヒルティ・石垣勉氏、高橋宗臣氏、住友大阪セメント・安藤重裕氏より貴重な助言を賜りました。また、本研究の一部は日本建設あと施工アンカー協会の助成を受け実施しました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会:各種合成構造設計指針・同解説, 2023
- 2) 濱崎仁, 他 3 名: ひび割れが生じたコンクリートに対する接着系あと施工アンカーの付着強度および変形性状の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.1420-1425, 2020
- 3) 石原力也, 国枝稔, 高橋宗臣: コンクリートのひび割れがあと施工アンカーの力学性能に与える影響評価のための試験方法の開発と実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1723-1728, 2017
- 4) 塩越汰斗, 他 4 名: せん断加力で損傷した RC 梁に定着される接着系あと施工アンカーの付着強度, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.24, pp.837-842, 2024.10
- 5) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針 (案)・同解説, 2004
- 6) KONISHI 株式会社, ”カタログ一覧”, E206(S・W)
- 7) HIT-RE500 材料規格書
- 8) 日本コンクリート工学会北海道支部:補修工法アンケート調査結果, <http://www.jci-h.org/crack/index.html>, 2018.7(2024.1.8 閲覧)
- 9) コンクリート工学会:コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針, 2022