論文 鉄筋比が小さいあと施工アンカーとコンクリート目荒らし面を累加 した耐震補強接合部の力学挙動

山田 太蔵*1・奥山 裕希恵*2・高瀬 裕也*3・阿部 隆英*4

要旨:既存コンクリート構造物の耐震補強では,一般的にあと施工アンカーと目荒らしを併用して既存部材 側と増設部材側が接合されるが,既往の設計指針はあと施工アンカーのせん断耐力のみで構成されている。 先行の研究において,2-D16のアンカー筋を用いて基礎的実験を行った。そこで本論文ではアンカー筋サイズ を変更し,鉄筋比の観点から新たに検討を加え,個々のモデルを修整して累加することにより,実験値を概 ね再現できた。

キーワード:耐震補強,目荒らし,あと施工アンカー,鉄筋比

1. はじめに

既存コンクリート構造物の耐震補強では、あと施工ア ンカーとチッピングによる目荒らし(以下、「目荒らし」 と呼ぶ)によって既存部材と増設部材が接合されるのが 一般的である。しかし、あと施工アンカーと目荒らしの 両者組み合わせに関する研究が少ないことを1つの要因 として、現状の接合部の設計指針¹⁾でせん断耐力が評価 されるのはあと施工アンカーのみであり、目荒らしのせ ん断耐力は評価されていない。また別の要因として、目 荒らしは施工者の技術や意識の違いから形状の管理が難 しく、定量的な耐力評価も難しいことが指摘される。

先行の研究において奥山らは 2-D16 のあと施工アンカ ーと目荒らしの両者組み合わせた実験を実施して²⁾,力 学挙動のモデル化まで行っている。目荒らし単独の実験 では、0.5mm 以下の小さいずれでピーク荷重となるが、 あと施工アンカーと併用することで、この小さい変形領 域でピーク値が確認されなかったことから、目荒らしの 力学モデルにおいて、微小凹凸面に作用する接触応力の ピーク応力時の接触変位を 0.08mm から 0.8mm まで大き くなるように修整している。

しかしながら,アンカー筋量やその径が異なると,同 じ修整で対応できるかは不明である。そこで本論文では, アンカー筋比と目荒らし面積比の比(本研究では,これ を「目荒らし鉄筋比(*Pch*)」と定義する)に注目して,こ れまでは2-D16と比較的,鉄筋量が多い条件で検証して きたが,新たにD13シングル,D16シングルと鉄筋量を 少なくしたケースについて載荷実験を行う。しかし,繰 り返し挙動のモデル化については未だ課題が残っている ため本実験では,実験値の包絡挙動を追跡できるよう, 力学モデルについて検討する。

本実験の概要

2.1 試験体の諸元と実験パラメータ

表-1 に試験体パラメータを示す。また表-2 にコンク リートおよびグラウト,アンカー筋の材料特性をそれぞ れ示す。試験体パラメータは、目荒らし面積比 rcr, 接合 面に生じる平均圧縮応力度の(以下,「軸応力」と呼ぶ), およびアンカー筋径である。ここで目荒らし深さが変わ っても、面積比が同一であれば凹凸部の垂直投影面積に 違いが見られず 3)、せん断抵耐力に及ぼす影響も少ない と考えられるため、本論文では考慮しない。試験体名は、 接合要素を表す記号(A:アンカーのみ, AR:目荒らしと あと施工アンカーの組み合わせ)に、目荒らし面積比を表 す数値,軸応力を表す記号(M:0.48N/mm², H:0.72N/mm²), 最後にコンクリートの強度水準を表す記号(L:10N/mm², M:20N/mm², H:30N/mm²) を組み合わせて構成される。 コンクリート強度については,一般的な旧耐震建物の強 度を概ね網羅できるように、10~30N/mm²に設定した。 また軸応力については、これまでの実験と同様に 0.48N/mm²を基準とし、軸力による影響を検証するため、 この1.5 倍の0.72 N/mm²の2水準に設定した。

目荒らし鉄筋比 P_{ch} は,目荒らしの凹凸部の水平投影 面積に対するアンカー筋の比(つまり, P_a/r_{cr})であり, この値が大きいほどアンカー筋の影響が大きくなる。

2.2 試験体形状および施工方法

図-1 に試験体の諸元寸法を示す。まず既存部材側コン クリートを打設する。既存部材側コンクリートは既存梁 を,増設部材側グラウトは耐震補強の接合部を模擬して いる。既存部材側寸法は440mm×460mm×250mm,増設 部材側は375mm×200mm×190mmとし,既存部材側コ ンクリートの375mm×200mmを試験領域とする。目荒

*1 室蘭工業大学 大学院工学研究科 環境創生工学系専攻 大学院生 (学生会員) *2 室蘭工業大学 大学院工学研究科 環境創生工学系専攻 大学院生 (非会員) *3 室蘭工業大学 大学院工学研究科 もの創造系領域 准教授 博士 (工学) (正会員) *4 飛島建設 耐震ソリューション部 耐震技術 G 主任 (正会員)

	既往論文 2)	本論文	本論文	本論文	本論文	既往論文2)	既往論文 2)	本論文	既往論文 2)
試験体名	A-0-MM	AR-30- MM	AR-20- MM	AR-10- MM	AR-10- HM	2-D16 AR-30-MM	2-D16 AR-20-MM	D16 AR-10- MM	2-D16 AR-10-MM
r _{cr}	0	0.3	0.2	0.1	0.1	0.3	0.2	0.1	0.1
r _{cr} 実測値	0	0.316	0.210	0.108	0.099	0.301	0.204	0.093	0.117
σ_{θ} (N/mm ²)	0.48 0.7			0.72	0.48				
<i>ф</i> (mm)	13				16				
P_{a} (%)	0.169			0.530 0.265 0.530			0.530		
P_{ch} (%)	0	0.563	0.844	1.	69	1.77	2.65		5.30
			A.4. 6.6						

表-1 試験体パラメータ

 r_{cr} :目荒らし面積比 σ_{0} :軸応力 ϕ :アンカー筋径 P_{a} :鉄筋比 P_{ch} :目荒らし鉄筋比

らしは電動ピックを用いて施工し、画像解析を用いて目 標とする目荒らし面積比に調整していく。まず接合面の 平滑な部分に赤色の塗料を塗布することで接合面は2色 で表すことができる。この彩度の違いにより面積比を実 測する。

その後 SD345 接着系あと施工アンカーを配置する。 アンカー筋の有効埋め込み深さは、一般的な鉄筋コンク リート造構造物の内付け補強を想定し 7da (da:アンカー 筋の直径)とした。次に増設側の補強鉄筋と間接接合部¹¹ の型枠を接合面の上面に設置し、プレミックスタイプの モルタルを圧入する。また、純粋な目荒らし面のせん断 抵抗性能を評価できるように、凹凸のない平滑な面には グリスを塗布し凹凸部以外の場所での摩擦や固着の影響 を少なくした。アンカー筋には、既存部材側に深さ 0.5da, 2da, 5da, 増設部材側に高さ 0.5da, 2da, の位置に、せ ん断載荷方向に対し裏表 2 枚ずつ計 10 ヶ所にひずみゲ ージを貼付した。

2.3 加力方法と計測方法

図-2 に載荷装置図を示す。載荷装置は軸応力と正負交番の繰り返しの水平加力を制御するために, せん断方向は 500kN のアクチュエータを用いて手動制御し, 軸力は2 つの 150KN のスクリュージャッキにより, 目標の一定荷重かつ加力梁が平行になるように自動制御している。せん断加力は, ずれ変形量を変位制御しながら, δ=0.5, 1.0, 1.5, 2.0mmを2サイクル, δ=3.0, 4.0, 6.0, 10.0mmを1 サイクルとし, 正負交番繰り返し載荷を行う。そして既存コンクリートの高さ中央部にアングルを固定して変位計を左右2ヶ所設置し, そこから増設部の高さ中央にそれぞれ取り付けた2ヶ所の評点に対する相対鉛直変位(以下,「目開き量の」と呼ぶ)とをそれぞれ計測する。

3. 力学モデルの概要

本論文では,接合面に作用するせん断力を q_j とし,こ れまでの研究において構築されてきた接着系あと施工ア ンカーのダウエルモデルによって算出されるせん断力 q_a と,目荒らしによって生じるせん断力 q_{cr}を累加すること で,実験結果の再現を試みる。

表-2 試験体の材料特性 (a) コンクリートおよびグラウト

試験体名	材料	$\sigma_B(N/mm^2)$	$E_c(kN/mm^2)$	
AR-10-MM AR-20-MM	コンクリート	22.5	17.4	
AR-30-MM AR-10-HM D16AR-10-MM	グラウト	68.0	25.9	

 σ_B : 圧縮試験 E_c : ヤング係数

(b)アンカー筋

試験体名	径鋼種	降伏強度 (N/mm²)	ヤング係数 (kN/mm²)
AR-10-MM AR-20-MM AR-30-MM AR-10-HM	D13 SD345	403	174
AR-10-MM	D16 SD345	376	170
A-0LM	D13 SD345	352	180



図-1 試験体の諸元寸法

单位 (mm)



図-2 せん断載荷実験の載荷装置

(1)

以下に, $q_a \ge q_{cr}$ の概要を記述する。

3.1 あと施工アンカーのダウエルモデル

あと施工アンカーのダウエルモデルの基本事項については、既報⁴にて記述しているため簡潔にまとめる。

本研究で提案しているダウエルモデルでは,非線形領 域における力学挙動を簡易的に再現できるように,図-3 に示すように理想化されている。また図-4にアンカー筋 の軸方向に生じる伸びと引張応力を示す。接合面にせん 断力が生じるとアンカー筋が変形し,塑性ヒンジ点が形 成される。その変形に伴いコンクリートに支圧応力 σ が, さらにアンカー筋が軸方向に伸びることによって引張応 力 σ rが生じる。したがって,アンカー筋が担うせん断力 q_a は,塑性ヒンジ点における曲げ抵抗力 q_s , コンクリー トに作用する支圧抵抗力 q_b , 軸方向に作用する鉄筋の引 張力のせん断成分 q_T^{s} (カテナリー効果)を重ね合わせた 値となる。

$$q_a = q_S + q_B + q_T^s \tag{2}$$

図-5(a)と(b)に本論文で使用する qs と qB の構成モデ ルを示す。支圧抵抗力は、アンカー筋の載荷方向に対す る半円周上に作用すると仮定され式(3)により qB を求め ることが出来る。次に qrは、アンカー筋の軸方向に作用 する引張力であり、このせん断成分だけを抽出すること で式(4)のようにq^Sが得られる。qrの力学モデルは式(5)に 表されるようなバイリニアモデルとする。

$$q_B = \frac{\pi\phi}{2}\sigma_b \tag{3}$$

$$q_T^S = q_T \sin \theta = \sigma_{br} \frac{\pi \phi^2}{4} \sin \theta \tag{4}$$

$$\sigma_{br} = \begin{cases} E_S \cdot \varepsilon_{br} & (\varepsilon_{br} < \varepsilon_y) \\ \sigma_y & (\varepsilon_y \le \varepsilon_{br}) \end{cases}$$
(5)

ここに、の*br* と*br* はそれぞれアンカー筋に作用する引 張応力とひずみを表しており、*br* はアンカー筋の降伏ひ ずみ、*Es*はヤング係数である。なお、図-5(b)のピーク後 の軟化勾配は、アンカー筋単独の場合、*Ebo*の1%の傾き ⁴⁾であるから、ここでは奥山らと同様²⁾に 0.75%とする。 3.2 コンクリート目荒らし面の力学モデル

本研究で用いるコンクリート目荒らし面の力学モデル (以下,「目荒らしモデル」^{5)、6)}と呼ぶ)の概要を以下に記 述する。

図-6 に摩擦を考慮した微小凹凸面に作用する接触応 力の概念図^{5), の}を示す。目荒らしモデルはひび割れ面の せん断応力伝達に関する Bajadaham モデル⁷⁾をベースに 構築されており、この構成則では、目荒らし面にせん断 変位が生じた際に、図-6 に示すように微小凹凸面が接触 した際に発生する接触応力 σ_{con} および摩擦応力($\mu \times \sigma_{con}$)







図-4 アンカー筋の軸方向に生じる伸びと引張応力



(a) 塑性ヒンジの曲げ抵抗
(b) コンクリートの支圧抵抗
図-5 構造材料の力学モデル







図−7 微小凹凸面の接触直応力*_{con}*−接触変位*ω* 関係

をせん断成分と垂直成分に分解し,接触面積有効率 K および傾斜密度関数 $\Omega(\theta)$ を乗じて,界面全体で積分することで,ひび割れ面のせん断応力 τ と垂直応力 σ がそれぞれ算出される。図-6の概念図より式(6),(7)が表される。

$$\tau_{cr} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} K \cdot \sigma_{con} \cdot \Omega(\theta) \cdot (\sin \theta + \mu \cos \theta) d\theta \quad (6)$$

$$\sigma_{cr} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} K \cdot \sigma_{con} \cdot \Omega(\theta) \cdot (\cos \theta - \mu \sin \theta) d\theta \quad (7)$$

ここに, θは微小面の傾斜角, μ は摩擦係数である。 既往の文献⁵よりμ=0.6 とする。目荒らし面の形状分析は レーザー変位計を用いた形状測定実験から得られた 3 次 元座標データを用いて行う。3 次元座標データを元に算 出した傾斜密度を数式化する際に傾斜密度分布をシミュ レーションする式として次式を用いる⁵。

$$\Omega(\theta) = \frac{4}{3}(a_0 + a_1 \cdot |\theta|^n) \cdot \cos^m\theta \tag{8}$$

ao, *ai*, *n*, *m*は最小二乗法を用いて設定され,目荒らし面積比 *r*_{cr}毎の傾斜密度関数を表すために用いられる係数である。これらの係数の値を表-3に示す。また図-7

表-3 傾斜密度関数のパラメータ

r _{cr}	バラメータ				
	<i>a</i> ₀	<i>a</i> 1	п	т	
0.10	1.22	-1.11	0.44	3.09	
0.20	1.16	-1.05	0.43	2.54	
0.30	1.12	-0.99	0.41	2.10	

*r*_{cr}:目荒らし面積比





4. 実験結果

図-8 に荷重-変位関係の包絡曲線を示す。同図には次 章で述べる解析結果も併記している。これまでに実施し てきた 2-D16 と目荒らしを累加した試験体²⁾では、変形 の進展と伴に荷重が緩やかに増加する傾向、つまり目荒 らしがあってもアンカー筋のような挙動が確認された。 しかしながら本実験結果を見てみると、どの試験体も *6*=0.25mm 程度でピーク荷重となり、その後荷重が低下 している。特に、図-8(b)、(c)の面積比が 0.2 や 0.3 の試 験体の方がピーク後に大きく荷重低下する。したがって、 既往の 2-D16 の結果は異なり、どちらかと言えば、目荒 らしの挙動に近い傾向となった。

5. 修整モデルとその実験結果への適合性

アンカー筋量を小さくした本実験の結果,同じ累加で も 2-D16 の結果は異なり,目荒らしの影響が強く,奥山 らが行ったモデルの修整²⁾では対応できない可能性が高 い。そこで本論文では,新たな修整モデルについて検討 する。

5.1 修整モデルの概要

表-4 にモデルケースを,図-9 に目荒らし鉄筋比 P_{ch}に よるモデルの修整を示す。また既述の通り,図-8 には各



表-4 モデルケース

解析番号	<i><i>O</i>θ<i>c</i></i>	$\sigma_c = \alpha * \sqrt[3]{\sigma_B}$	Lhの増加率
Casel	0.16	$6.5^*\sqrt[3]{\sigma_B}$	1.5 倍
Case2	0.16	$8.4^{*}\sqrt[3]{\sigma_B}$	1.0 倍
Case3	0.16	$9^*\sqrt[3]{\sigma_B}$	1.0 倍

試験体の解析結果も併記している。

既往の修整モデルでは、実験によるアンカー筋のひず み分布より塑性ヒンジ点の位置を、また荷重変位関係の 傾向から、目荒らしモデルの接触応力モデルを修整して いる。そこで本論文でも、この2点の調整を行う。

本修整では、Case1からCase3の3つのモデルケース で検討する。Case1は奥山らが行った修整に類似したも ので、累加することで目荒らしの挙動が弱くなる。Case3 は目荒らしの挙動については単独時と同じであり、Case2 はこれらの中間である。以下に具体的なモデルの修整に ついて述べる。

(1) 接触直応カモデル

図-9(a)と図-10 に、それぞれ α - P_{ch} 関係および接触直応力モデルを示す。目荒らし面の最大接触応力 σ は次式で算出される。

 $\sigma_c = \alpha \times \sqrt[3]{\sigma_B} \tag{9}$

磯崎ら 50のモデルより,目荒らし単独で用いる場合に は, α =9 であり,また奥山ら 20のモデルでは α =6.5 にな る。そこで P_{ch} が一番小さく目荒らしの影響を受けやす い試験体は α =9,逆に既報の 2-D16AR-30-MM に近い場 合は α =6.5 とし,最大接触応力が P_{ch} と比例関係にあると 仮定すると, α は次式で表される。

α = -2.23P_{ch} + 10.25 (0 ≤ P_{ch} < 1.69) (10)
この式に AR-20-MM の P_{ch}=0.84 を 代入するとα=8.4
となるため,表-4 および図-10 に示す通り,本論文ではα=6.5, 8.4, 9.0 の 3 段階で検討することとする。

また接触応力の軟化勾配は,磯崎ら ⁵と同様にピーク 時変位 0.08 の 2 倍の変位で応力一定となるように設定す る。

(2) 塑性ヒンジ位置

図-9(b)は目荒らし鉄筋比と L_hの増加率との関係を表 したグラフである。また図-11 にアンカー筋のひずみ分 布を示す。図-11 を観察してみると、目荒らしもある AR-10-MM, AR-10-HM, AR-30-MMは、アンカーのみの A-0-MM に比べてひずみが大きくなる位置が既存躯体側に 深くなっている。また rcrが大きくなるとひずみが小さく なる傾向が見られた。そこで図-9(b)に示すように目荒ら し鉄筋比が大きい場合には、奥山らと同様に塑性ヒンジ 位置を 1.5 倍深い位置に、目荒らし鉄筋比が小さい場合 は、アンカー筋を単独で用いた場合と同じ位置とする。

(3) 目開き挙動









目荒らしモデルの計算には、目開き量*a*の値を入力す る必要がある。D16を用いた、図-8(d)のD16AR-10-MM では、既発表と同じ次式²⁾を用いる。

ω = 0.0087δ³ - 0.1046δ² + 0.6144δ (11)
また,鉄筋サイズが D13 となる図-8(a)~(c)について
は,図-12(a)に示す回帰式(12)を適用する。

 $\omega = 0.0024\delta^3 - 0.0519\delta^2 + 0.4557\delta \tag{12}$

最後に軸力が大きくなる AR-10-HM 試験体の目開きに ついて検討する。奥山らの修整²⁾では,高軸力の試験体 を評価する際は中軸力と高軸力の試験体を合わせた回帰 式を用いている。そこで図-12(b)に示される AR-10-MM, 20MM, 30MM, 10HM で回帰分析を行って算出した回帰 式を目開き I とすると次式で表される。

ω = 0.0014δ³ - 0.0345δ² + 0.3318δ (13)
ここで本実験では、中軸力の試験体数が多いため、この違いを考慮し、AR-10-MM と AR-10-HM の 2 体から算出した回帰式を目開き II とすると、式(14)で表される。

 $\omega = 0.0004\delta^3 - 0.0168\delta^2 + 0.2235\delta \tag{14}$

5.2 修整モデルと実験値の比較

P_{ch}が大きい場合

はじめに、図-8(a)の AR-10-MM に着目する。Pchが大 きい場合、アンカー筋の傾向が強くなると考えられる。 そのため、Case2 や Case3 のように目荒らしの挙動が支 配的になる修整モデルに関しては、全変位にわたり実験 結果を過大に評価する。これとは反対に Case1 は、最大 荷重は実験結果を過大に評価するが、Case2、Case3 に比 べると実験結果に近い挙動を再現しており、この試験体 については、Case1 が推奨される。

また図-8(d)の D16AR-10-MM も, *Pch* がさらに大きく なるため,理屈的には Casel がもっとも適合し易いよう に考えられるが,ピーク荷重近傍を観察すると, Case2 や Case3 の方が,再現性が高い。この理由として,本論文で は *Pch*のみを考慮して,修整 Case を検証しているが,鉄 筋サイズなど他のパラメータも影響している可能性が考 えられる。

(2) P_{ch}が小さい場合

続いて図-8(b), (c)の AR-20-MM および AR-30-MM に着目する。*Pch*が小さくなると,目荒らしの影響を受けやすくなる。これらの図を見ると, Case1 の最大荷重が最も小さく, Case2 や Case3 の方が,適合性が高い。そのため,これらの試験体については,目荒らしの挙動がより顕著となる修整が推奨される。

(3) 軸力が大きい場合

最後に軸力を大きくした図-8(e),(f)のAR-10-HMに 着目する。この試験体も、Pchが大きく、Casel が適合す るように考えらえる。両図とも3つのモデルケースを比 較すると、Casel が最も実験値に近い挙動を示すが、そ れでも、実験結果を過大に評価している。また、目開き 量の値も、中軸力の試験体を多く用いた回帰式を使った 図-8(e)の方が、実験結果に近い。

これは、これまでの研究が $\sigma_0 = 0.48 \text{ N/mm}^2$ を主にモデ ル化を行ってきたが、軸力が変動する場合には、さらな る改善が必要であると判断される。

6. おわりに

本論文では、耐震補強接合部における目荒らしとあと

施工アンカーを併用した耐震補強接合のせん断載荷実験 を行い, せん断荷重-変位関係を再現するための力学挙動 について検証した。先行の研究により行われたアンカー 筋径 D16 における実験結果を参考に, 目荒らし鉄筋比と いう新たな検討項目を追加し, モデルの修整を行った。 その結果, 目荒らし鉄筋比に応じてモデルを調整するこ とで ϕ =13mm, σ =0.48N/mm²の実験結果を概ね良好に再 現できた。また軸応力を σ =0.72N/mm²に変更した場合も 目開き量を修整することで概ね再現することが出来たが, この修整の妥当性について課題が残されている。同様に D16 を用いた場合にも, 目荒らし鉄筋比によるモデル修 整には, 課題が残された。

今後は、目荒らし鉄筋比によるモデルの修整の精度を 向上させるため、D13のダブル配筋や、鉄筋径の異なる パラメータを増やすなど、目荒らしとあと施工アンカー 両者組み合わせた場合の詳細なメカニズムについて検証 をする予定である。

謝辞

本研究の実施にあたり,東亜建設工業・樋渡健博士よ り貴重な助言を賜りました。ここに誠意を表します。

参考文献

- 日本建築防災協会:2017 年改訂版 既存鉄筋コンク リート造建築物の耐震改修設計指針・同解説、日本 建築防災協会、2017 年(2017 年改訂版第2刷)
- 2) 奥山裕希恵,高瀬裕也,阿部隆英,坂本啓太,樋渡 健:あと施工アンカーのダウエルモデルと目荒らし モデルの累加関する考察,アップグレード論文報告 集,vol.19, pp.497-502, 2019.10
- 阿部隆英, 樋渡健, 坂本敬太, 高瀬裕也, 香取慶一: 既存部材に施したチッピングによる目荒らし形状の 定量評価における基礎的研究, 日本建築学会技術報 告集, 24 巻, 57 号, pp. 655-660, 2018.6
- 4) Takase Yuya:Testing and modeling of dowel action for a post-installed anchor subjected to combined shear force and tensile force,Engineering StructuresVol.195,pp.551-558,2019.9
- 5) 磯崎翼,高瀬裕也,阿部隆英,坂本啓太,樋渡健, 香取慶一:圧縮強度を違えたコンクリート目荒らし 面のせん断応力伝達機構を再現する構成モデル,コ ンクリート工学年次論文集,Vol.40, No2, pp.73-78, 2018.6
- 6) 磯崎翼,高瀬裕也,阿部隆英,香取慶一:既存部材 におけるコンクリート目荒らし面のせん断抵抗に関 する基礎的研究,コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No1, pp.919-924, 2017.6
- Bujadaham Buja : The Universal Model for Transfer across Crack in Concrete, Department of Civil Engineering, The Graduate School of The University of Tokyo, 1991.3