

論文

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に関する考察

奥山 裕希恵*1, 高瀬 裕也*2, 阿部 隆英*3, 坂本 啓太*3, 樋渡 健*4

Consideration on Accumulating Dowel Model of Post-Installed Anchor and Interlocking Model of Roughened Concrete

Yukie OKUYAMA*1, Yuya TAKASE*2, Takahide ABE*3, Keita SAKAMOTO*3 and Takeshi HIWATASHI*4

要旨： 既存コンクリート構造物の耐震補強では、一般にあと施工アンカーと目荒らしによって既存部材側と増設部材側が接合されるが、このメカニズムの解明は重要な課題である。ここで、あと施工アンカーはダウエル効果で、目荒らしは噛み合い効果でせん断抵抗すると考え、これまでの個々のモデルを提案してきた。そこで本論文では、目荒らしとあと施工アンカーを組み合わせた試験体の実験を行い、個々のモデルを微修正して累加することにより、概ね良好に実験結果を再現できることが明らかとなった。

キーワード： あと施工アンカー、ダウエル効果、目荒らし、噛み合い作用

1. はじめに

既存コンクリート構造物の耐震補強は、一般に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)によって既存部材側と増設部材側が接合される。しかし、あと施工アンカーと目荒らしを組み合わせた試験体の耐力評価に関する研究が少ないことを一つの要因として、現状の耐震補強の設計指針¹⁾で検討されるせん断力はあと施工アンカーのみとなっている。ここで、目荒らしは、その凹凸形状から接合面の噛み合い効果によってせん断力を伝達しているが、既存構造物に施工される目荒らしは施工者の技術や意識の違いから異なる形状となる。そのため目荒らしは補助的に行うものと認識されやすい。

これまで、著者らは目荒らしのみを施した接合面の実験からトリリニアで目荒らし面の挙動をモデル化し、あと施工アンカーのダウエルモデル²⁾と単純に累加し、実験結果をどれだけ再現できるか検証している。その後、目荒らし面の面積比や、最大深さ、既存コンクリートの強度を違えた種々のせん断載荷実験を行い、微小凹凸面の摩擦を考慮したコンクリートのひび割れ面の構成則をベースとして支圧破壊時の目荒らし面の力学モデルを構築した^{3),4)}。

前述のとおり、あと施工アンカーと目荒らしを組み合わせた実験例は極めて少なく、そのメカニズムを議論することもままならない状況である。そこで

本論文では、あと施工アンカーと目荒らしの個々の実験に加えて、両者を組み合わせた試験体の載荷実験を行い、これまでに提案されたダウエルモデルと目荒らしモデルを組み合わせて検証を進める。

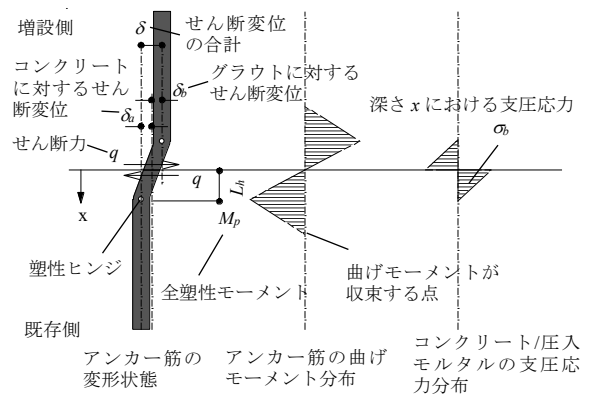


図-1 あと施工アンカーのダウエルモデル

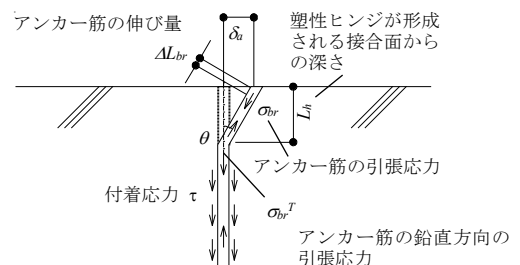


図-2 アンカー筋の軸方向に生じる伸びと引張応力

*1 室蘭工業大学大学院環境創生工学系専攻 修士課程
*2 室蘭工業大学大学院工学研究科もの創造系領域 准教授
*3 飛鳥建設(株) 建設事業本部耐震ソリューション部技術開発 G
*4 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター 主任研究員

2. 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、これまでの研究で構築し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} を累加することでどれだけ実験結果を再現できるか検証する。

$$q_j = q_a + q_{cr} \quad (1)$$

以下に、 q_a と q_{cr} の概要を記述する。

2.1 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については既報の論文²⁾にて詳述しているため簡潔にまとめる。

本研究で用いるダウエルモデルは、非線形領域における力学挙動を簡便に再現できるように図-1 に示すように理想化している。また、図-2 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は変形し、塑性ヒンジが形成される。それに伴いコンクリートには支圧応力 σ_b が生じ、アンカー筋が軸方向に伸びることによって引張応力 σ_{br} が作用することによって、せん断抵抗する。このことから、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。

図-3 に、本論文で使用する q_s と q_b の構成モデルを示す。支圧抵抗力は、アンカー筋の载荷方向に対する半円周上に作用すると仮定され式(2)により q_b が求められる。 q_T は、アンカー筋の軸方向に作用する引張力で、このせん断成分を抽出することで式(3)のように q_T^s が得られる。 q_T の力学モデルは式(4)で表されるバイリニアモデルとする。

$$q_b = \frac{\pi\phi}{2} \sigma_b \quad (2)$$

$$q_T^s = q_T \sin \theta = \sigma_{br} \frac{\pi\phi^2}{4} \sin \theta \quad (3)$$

$$\sigma_{br} = \begin{cases} E_S \cdot \varepsilon_{br} & (\varepsilon_{br} < \varepsilon_y) \\ \sigma_y & (\varepsilon_y \leq \varepsilon_{br}) \end{cases} \quad (4)$$

ここに、 σ_{br} と ε_{br} はアンカー筋に作用する引張応力とひずみであり、 ε_y はアンカー筋の降伏ひずみ、 E_S はヤング係数である。

2.2 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」³⁾ と呼ぶ) の概要を以下に記述する。

図-4 に微小凹凸面に作用する接触応力の概念図⁴⁾を示し、各記号の定義を図中に示す。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モデルである Bujadaham モデル⁵⁾をベースに構築しており、

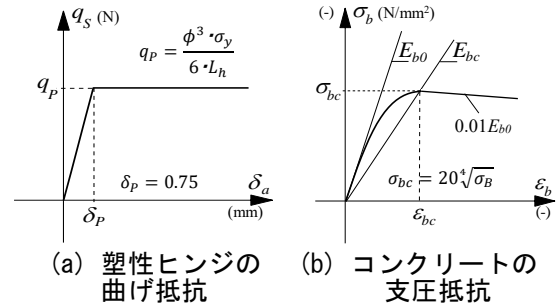


図-3 構造材料の力学モデル

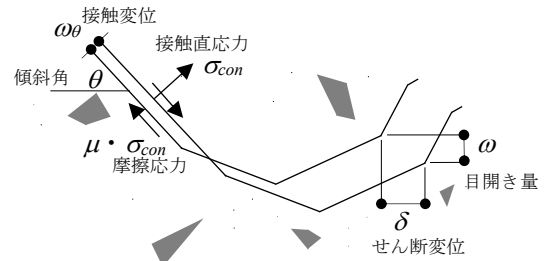


図-4 微小凹凸面に作用する接触応力の概念図

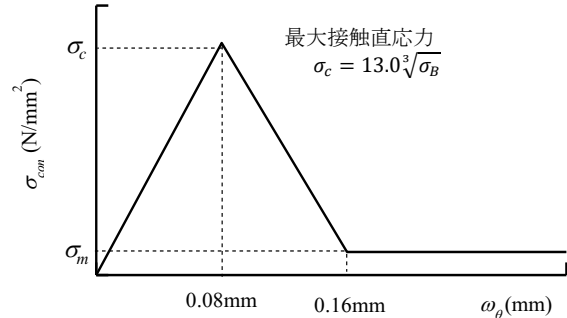


図-5 微小凹凸面の $\sigma_{con} - \omega_{\theta}$ 関係

表-1 傾斜密度関数のパラメータ

r_{cr}	パラメータ			
	a_0	a_1	n	m
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

表-2 試験体のパラメータ

試験体名	r_{cr}	r_{cr} 実測値	σ_0 (N/mm ²)	ϕ (mm)
R-10LM	0.10	0.099	0.48	16
R-20LM	0.20	0.213		
R-30LM	0.30	0.290		
AR-10LM	0.10	0.117		
AR-20LM	0.20	0.204	0.95	
AR-30LM	0.30	0.301		
A-0LM	—	—		
AR10MM	0.10	0.104	0.95	
AR20MM	0.20	0.195		
AR30MM	0.30	0.293		

ϕ : アンカー筋径 σ_0 : 軸応力

微小凹凸面が接触した際に生じる接触直応力 σ_{con} および摩擦応力 ($\mu \times \sigma_{con}$) 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 $\Omega(\theta)$ ⁶⁾

を乗じて、微小傾斜角で積分することで、せん断応力 τ_{cr} と垂直応力 σ_{cr} が算出され、これらは図-4 の概念図より次式⁵⁾で表される。

$$\tau_{cr} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} K \cdot \sigma_{con} \cdot \Omega(\theta) \cdot (\sin \theta + \mu \cos \theta) d\theta \quad (5)$$

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

ここに、 θ は微小面の傾斜角、 μ は摩擦係数である。微小凹凸面の接触はフラットな面同士で発生することから、プレキャスト鉄筋コンクリート構造の指針より、 $\mu=0.6$ を用いている⁴⁾。目荒らし面の形状分析はレーザー変位計を用いて行うこととし、3次元座標データを計測することで微小凹凸面の傾斜角を得る。形状測定実験から取得した3次元座標データをもとに算出した傾斜密度は数式化しなければならない、ここでは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⁴⁾。

$$\Omega(\theta) = \frac{4}{3}(a_0 + a_1 \cdot |\theta|^n) \cdot \cos^m \theta \quad (7)$$

a_0, a_1, n, m は目荒らし面積比（試験領域における目荒らしの凹凸部の割合） r_{cr} 毎の傾斜密度関数を表すために用いる係数であり、これらは目荒らし面の傾斜密度分布をシミュレートできるように最小二乗法により設定されたものである。表-1 にこれらの係数の値を示す。また、図-5 に微小凹凸面の接触直応力をモデル化したものを示す。

3. 実験概要

3.1 試験体パラメータ

表-2 に試験体のパラメータを示す。試験体パラメータは r_{cr} とアンカー筋の有無および接合面に生じる平均圧縮応力度 σ_0 （以下、「軸応力」と呼ぶ）である。想定する r_{cr} は、0.1, 0.2, 0.3 の3水準、目標 σ_0 は 20N/mm^2 とする。アンカー筋径 ϕ は 16mm である。試験体名は記号（A：あと施工アンカー，R：目荒らし，AR：あと施工アンカーと目荒らしの組み合わせ）、 r_{cr} を意味する数値（呼称し易いよう百分率で表記）、および軸応力（LM： 0.48N/mm^2 ，MM： 0.95N/mm^2 ）で表す。これまでは軸応力 0.48N/mm^2 を基準としていたが、本論文ではこの2倍の 0.95N/mm^2 を新たに設定した。また、表-3 にコンクリートおよびグラウトの材料特性をそれぞれ示す。アンカー筋は D16 の SD345（ σ_y ： 369N/mm^2 ， E_s ： 196N/mm^2 ）を用いる。

3.2 試験体形状および施工方法

図-6 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模擬して幅を設定し、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。寸法はそれ

表-3 試験体の材料特性
コンクリートおよびグラウト

試験体名	材料	σ_B (N/mm^2)	E_c (kN/mm^2)	σ_t (N/mm^2)
R-10,30LM	コンクリート	17.1	24.7	1.83
	グラウト	64.6	26.2	2.10
R-20LM	コンクリート	19.9	29.1	1.90
	グラウト	68.7	26.3	3.42
AR-10,20,30LM	コンクリート	21.1	26.3	-
	グラウト	73.4	-	-
A-0LM	コンクリート	21.2	21.8	2.09
	グラウト	48.9	23.1	3.55
AR-10,20,30MM	コンクリート	20.8	27.3	2.30
	グラウト	54.4	25.0	2.70

σ_B ：圧縮強度 E_c ：ヤング係数 σ_t ：割裂強度

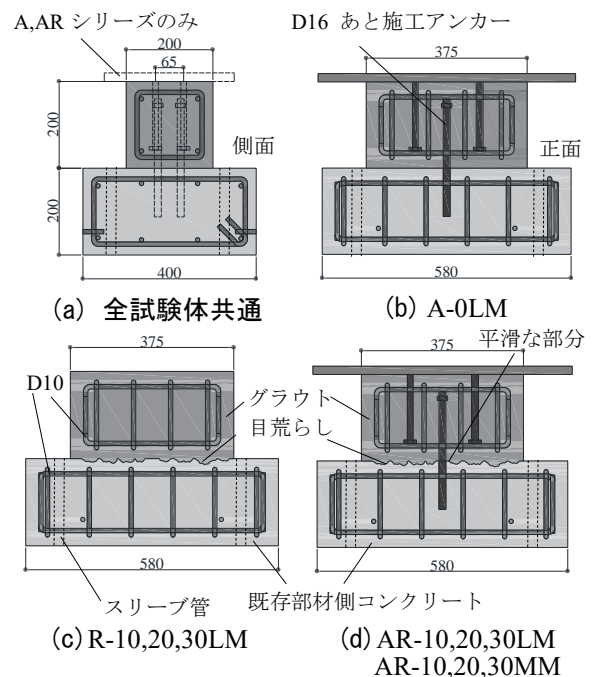


図-6 試験体の諸元寸法 単位(mm)

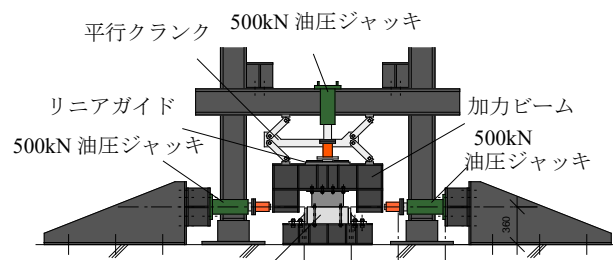


図-7 せん断載荷実験の載荷装置

ぞれ $580\text{mm} \times 400\text{mm} \times 200\text{mm}$ ， $375\text{mm} \times 200\text{mm} \times 200\text{mm}$ とし、既存部材側コンクリートの $375\text{mm} \times 200\text{mm}$ を試験領域とする。目荒らしは電動ピックを用いて施工し、画像解析を用いて r_{cr} を確認する。まず、接合面の平滑な部分に黒色の塗料を塗布し目荒らしを施工することで接合面は二色で表すことができる。こ

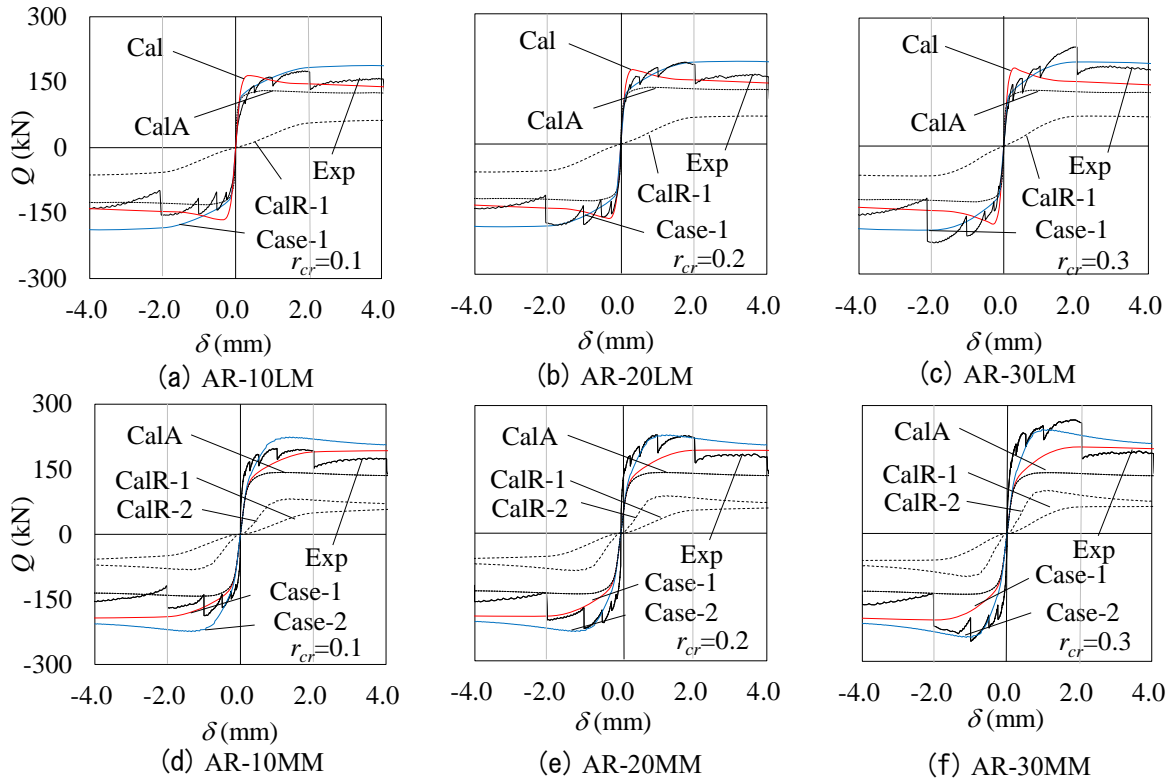


図-8 $Q-\delta$ 関係の包絡線と修正モデル

の明度の違いから面積比を実測する。あと施工アンカーはダブルで配置する。アンカー筋の有効埋め込み深さは $7da$ (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の型枠を接合面の上面に設置しグラウトを圧入する。グラウトはプレミックタイプを使用し、純粋な目荒らし部のせん断抵抗性能を把握するため、目荒らしの凹凸がない平滑な部分にはあらかじめグリスを塗布し凹凸部以外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 $0.5da$, $2da$ の位置にひずみゲージを貼付する。

3.3 加力方法と計測方法

図-7 に载荷装置図を示す。载荷装置は軸応力と正負交番繰り返しの水平加力を制御するために、最大 500kN の油圧ジャッキをそれぞれ使用する。せん断加力は、 δ を変位制御しながら行う。既存コンクリートに変位計を設置し、そこから増設部材側に取り付けた標点に対する離間距離と δ をそれぞれ計測する。

4. 提案モデルの修正

図-8 に各試験体の $Q-\delta$ 関係の包絡線(Exp)を示す。実験結果を観察すると目荒らしのみの試験体^{3),4)}では $0.2\sim 0.5\text{mm}$ のずれでピークに達し荷重が低下したのに対し、目荒らしとあと施工アンカーを併用した場合にはピーク時のずれが大きくなり、現状のモデルを単純に累加した場合、せん断変位の小さい領域でピーク値に達し、実験結果と異なる様相を示す

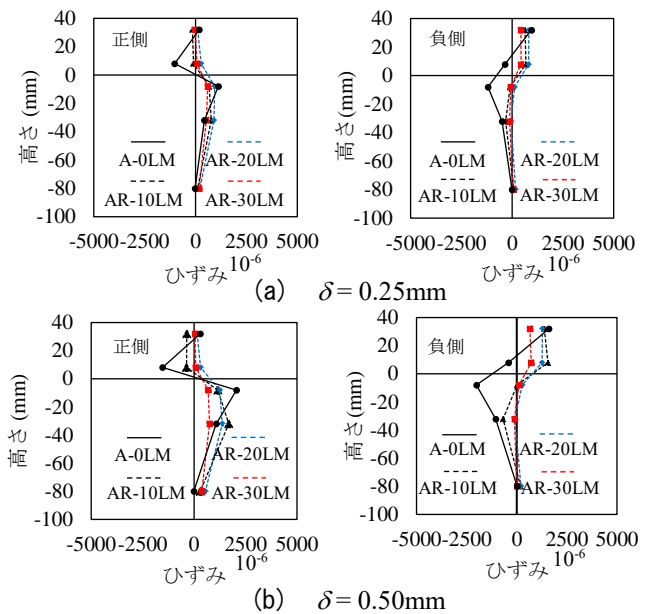


図-9 アンカー筋のひずみ分布

ことが考えられる。このことから、現状のモデルを単純に累加しただけでは実験結果を再現できない可能性があるため、本章では詳細に実験結果を観察し、2章で述べたモデルを修正する。

4.1 塑性ヒンジ点とコンクリート軟化勾配の検討

図-9 にアンカー筋のひずみ分布を示す。AR-10LM, 20LM, 30LM と A-0LM の実験結果を観察すると、AR-10LM, 20LM, 30LM では A-0LM に比べ、ひずみが大きくなる位置が接合面から既存側に対して深くなる傾向が見られた。また、ばらつきはあるもの

の、 r_{cr} が大きくなるほどひずみは小さくなり、アンカー筋のみの試験体のひずみが最も大きくなる。これは、目荒らしを併用することでコンクリートの支圧抵抗領域が深さ方向に増大し、アンカー筋が担うせん断応力が大きくなるためと考えられる。ダウエルモデルにおいて、図-1 に示してある塑性ヒンジ点の位置は計算過程全体に大きく影響を及ぼす²⁾。そこで、前記のひずみ分布から塑性ヒンジ点の位置を既往モデル²⁾から 1.5 倍深い位置に設定し、実験で確認された挙動と概ね整合するように配慮する。

続いてコンクリートの軟化を検討する。目荒らしとあと施工アンカーを併用すると、ピークに達した後荷重は緩やかに低下していくことが実験結果から確認された。これより、図-3 (b) に示すコンクリートの支圧挙動の軟化勾配も緩やかになるように修正する。現状のモデルではヤング係数の 1% の傾き ($=0.01E_{b0}$) で軟化させているが、修正モデルでは 0.75% の傾き ($=0.0075E_{b0}$) で軟化するように設定する。

4.2 目荒らしモデルの検討

これまでの研究では、 $\sigma_0=0.48 \text{ N/mm}^2$ を中心に実験やモデル化を行ってきた。そこで、この軸応力をベースに修正モデルを検討し、次いで $\sigma_0=0.95 \text{ N/mm}^2$ の実験結果を考慮して再修正する。

4.2.1 $\sigma_0=0.48 \text{ N/mm}^2$ をベースとした検討 (Case-1)

まず、 ω の定量評価を行う。図-10 (a) に R-10LM, 20LM, 30LM および AR-10LM, 20LM, 30LM の ω - δ 関係を示す。 $\delta=0.2\sim 0.5 \text{ mm}$ 近傍までは特段の差異は見られないが $\delta=0.5 \text{ mm}$ 以降は r_{cr} に依存することなくばらついて推移している。解析する際には、実験による ω - δ 関係を回帰分析して得られる ω の値を用いる。図-9 に示す通りあと施工アンカーと併用した場合、アンカー筋の残留ひずみの影響により挙動が異なるため、AR-10LM, 20LM, 30LM を対象に回帰分析し、式(8)を用いて修正モデルに導入する。

$$\omega = 0.0087\delta^3 - 0.1046\delta^2 + 0.6144\delta \quad (8)$$

続いて接触応力モデルを検討する。目荒らしとあと施工アンカーを併用すると、接合面にせん断力が生じた際に、付加軸力が生じるなど、アンカー筋が目荒らしの破壊を抑制しようとする現象が起こる可能性が考えられる。これにより、前述したようにピーク値の δ は大きくなる。

図-11 に微小凹凸面の $\sigma_{con}-\omega_{\theta}$ 関係の修正モデル (これを「Case-1」と呼ぶ) を示す。修正前のモデルでは、図-5 に示しているように、ピーク時の変位は $\omega_{\theta c} = 0.08 \text{ mm}$ であったが、本実験の $Q-\delta$ 曲線の挙動から $\omega_{\theta c} = 0.8 \text{ mm}$ とする。また、実験結果より全体的に緩やかに荷重は低下していくが、同変位時の加力サイクルごとの挙動に注目すると、処女載荷時からの

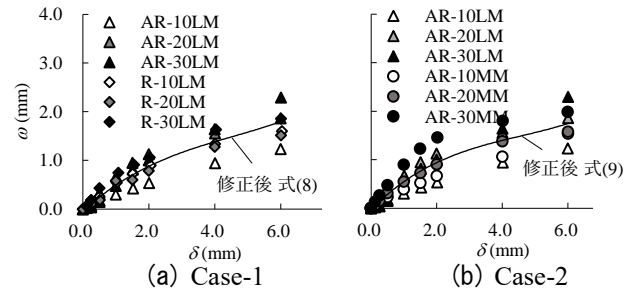


図-10 ω - δ 関係

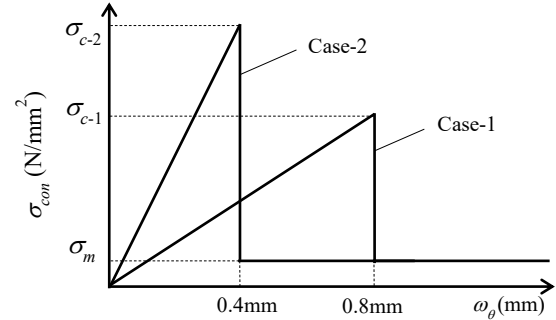


図-11 微小凹凸面の $\sigma_{con}-\omega_{\theta}$ 関係の修正モデル

低下の度合いが大きくなっている。これはアンカー筋の存在によって既存部と新設部が分離することはないが、コンクリート自体は脆性的に損傷していると推測される。そこで図-11 の通り、ピーク後に脆性破壊する現象を再現した。なお、各試験体の $Q-\delta$ 曲線において、変位の進展とともに荷重が一定値に収束する傾向があることから、微小凹凸面の接触応力も一定の値に収束するようモデル化する。

4.2.2 $\sigma_0=0.95 \text{ N/mm}^2$ を加えた検討 (Case-2)

図-10 (b) に AR-10LM, 20LM, 30LM および AR-10MM, 20MM, 30M の ω - δ 関係を示す。 r_{cr} が 10% の試験体では軸応力を 2 倍にすると、 ω は 2 割程度、 r_{cr} が 30% では 4 割程度増加している。一方で、 r_{cr} が 20% では ω は 2 割程度抑制されており、定性的な傾向は本実験結果からは見られない。そこで、 $\sigma_0=0.95 \text{ N/mm}^2$ の試験体も含めて新たに回帰分析を行い、次式を目荒らしモデルに導入する。

$$\omega = 0.0028\delta^3 - 0.0655\delta^2 + 0.5613\delta + 0.0334 \quad (9)$$

続いて接触応力モデルを検討する。実験結果を観察すると、軸応力が 2 倍になるとピーク位置は $\sigma_0 = 0.48 \text{ N/mm}^2$ の試験体の約半分の $\delta=1.0 \text{ mm}$ 付近に移行する。また、最大荷重は同じ面積比の試験体と比べると 15% ほど増加する。この傾向を考慮して接触応力モデルを修正する。まず、 σ_0 が 2 倍の試験体については、 $\omega_{\theta c}$ を 0.8 mm の 1/2 となる 0.4 mm に設定する。また純粋な理論に従えば、軸応力が大きくなると、目開きが小さくなり、これに伴って ω_{θ} が増大し結果として接触力が大きくなる。しかしながら、実験の結果、軸力が増大しても必ずしも目開きが小

さくなることは無かった。そこで、最大接触応力 σ_c の構成について、次式の通り再考する。

$$\sigma_c = 13.0 \cdot \sqrt[3]{\sigma_B} \cdot \sigma_0 \quad (10)$$

右辺の $13.0 \cdot \sqrt[3]{\sigma_B}$ は文献4)で提案したものである。これに σ_0 を乗じることで、この影響を考慮する。図-11にCase-2として併記する。なお、ひび割れを対象としたBujadahamモデルでは、最大で1~2mm程度のずれを対象とし、荷重低下領域までは扱われていない。一方で本モデルは、荷重低下領域まで再現することを目的としている。そこで、接触応力-接触変位モデルにおいて応力低下を考慮することで、 $Q-\delta$ の荷重低下を再現している。

5. 修正モデルの実験結果への適合性

前掲の図-8(a), (b), (c)にAR-10LM, 20LM, 30LMの修正前モデル(Cal)と修正モデル(Case-1), 修正アンカーモデル(CalA), 修正目荒らしモデル(CalR-1)を併記する。修正前モデルでは、変形が1mm以下の小さい領域でピークに達し、実験とは異なる挙動を呈している。しかし本修正により、全体的な挙動を概ね良好に追跡できるようになった。表-4に正側載荷における実験結果と解析結果の一覧を示す。 $\delta=0.5\text{mm}$ から4.0mmの全体にわたっては、およそ $\pm 10\%$ の精度で、実験結果を追跡できているが、設計で用いられる $\delta=2.0\text{mm}$ に着目すると、AR-30LMで20%程度過小評価している。

図-8(d), (e), (f)にAR-10MM, 20MM, 30MMの修正モデル(Case-1, Case-2)を併記する。またCase-1とCase-2の修正目荒らしモデルをそれぞれCalR-1, CalR-2として併記する。実験結果を観察すると、 $\sigma_0=0.48\text{N/mm}^2$ の試験体と同様にピークに達した後は緩やかに荷重が低下していく挙動が見られたが、AR-10LM, 20LMの試験体において σ_0 を大きくするとピーク時のずれは小さくなる傾向が見られた。最大荷重は σ_0 の増加に伴い、いずれの試験体も大きくなるのが観察されたが、Case-1ではこれらの挙動を過小評価し、適切に再現できなかった。軸応力を変えたことで目荒らし部やアンカー筋付近の破壊のメカニズムに変化が生じたことが、要因であると推察される。Case-2の場合、AR-20MM, 30MMでは実験値を $\pm 20\%$ の範囲内で評価できているが、AR-10MMでは実験値を過大に評価している。

6. 結論

本論文では、耐震補強接合部におけるあと施工アンカーと目荒らしを併用した試験体のせん断荷重実験を実施し、せん断荷重-ずれ関係を再現するため

表-4 正側載荷における実験結果と解析結果一覧
(実験値/解析値)

試験体名	せん断変位(mm)				
		0.5	1.0	2.0	4.0
AR-10LM	Cal	0.865	1.038	1.189	1.129
	Case-1	1.015	0.997	0.947	0.839
AR-20LM	Cal	0.920	1.130	1.245	1.104
	Case-1	1.086	1.064	0.947	0.829
AR-30LM	Cal	0.904	1.165	1.538	1.252
	Case-1	1.075	1.065	1.180	0.928
AR-10MM	Case-1	1.246	1.151	0.976	0.880
	Case-2	1.050	0.903	0.878	0.845
AR-20MM	Case-1	1.364	1.301	1.111	0.898
	Case-2	1.115	1.010	1.006	0.866
AR-30MM	Case-1	1.508	1.342	1.236	0.922
	Case-2	1.168	1.036	1.129	0.892

の力学モデルについて検証した。その結果、目開き量、塑性ヒンジ点位置、コンクリートの軟化勾配、接触応力モデルの修正を行うことで両者を併用し、 $\sigma_0=0.48\text{N/mm}^2$ の場合の実験結果は概ね良好に再現することができた。また、軸応力を2倍にした場合でも目開き量や接触応力モデルを修正することで凡その形状を捉えることが可能であったが、詳細なメカニズムの解明については今後検証する予定である。

参考文献

- 1) 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(第2刷)
- 2) 高瀬裕也, 和田俊良, 池田隆明, 篠原保二: 繰返しせん断力を受ける接着系あと施工アンカーの力学モデル, 日本建築学会構造系論文集第77巻第682号, pp.1915-1924, 2012.12
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 和田俊良, 佐藤龍司, 石川千温, 上田正生: レーザビーム光線による亀裂面形状測定手法の開発とデータの2次元分析手法の提案: コンクリート亀裂面の形状特性分析に関する基礎的研究(その1), 日本建築学会構造系論文集, 61巻, 490号, pp.179-188, 1996.12