

論文 あと施工アンカーと目荒らしを用いた接合部の力学挙動評価のための基礎検証

高瀬 裕也^{*1}・和田 俊良^{*2}・香取 慶一^{*3}・篠原 保二^{*4}

要旨：耐震補強された構造物では、一般に、あと施工アンカーと目荒らしによって、既存部材と増設部材が接合される。通常的设计では、あと施工アンカーのせん断耐力のみが考慮され、目荒らしによるせん断抵抗は考慮されていない。本論文では、目荒らしによるせん断抵抗を力学的に評価することが可能か検証するため、目荒らしのみを施した接合面のせん断実験の結果から、目荒らしによる力学挙動をモデル化し、あと施工アンカーのダウエルモデルと単純累加することで、どれだけ実験結果を再現できるか基礎的な検証を行った。その結果、本モデルにより全体的には良好に実験結果を追跡できることが明らかとなった。

キーワード：耐震補強、目荒らし、チッピング、せん断力、あと施工アンカー、ダウエル効果

1. はじめに

鉄筋コンクリート造または鉄骨鉄筋コンクリート造構造物において、2つ以上の構造部材を一体化させる場合には、鉄筋によるダウエル効果、シヤキーによる機械的噛み合い効果、および目荒らしの固着作用による接合が一般に用いられる。

プレキャスト構造を対象とした既往の研究では、Mattock¹⁾による「せん断摩擦理論」を始め、多くの研究例^{2)~4)}が報告されている。一方で、近年、急務の課題となっている耐震補強構造物の接合部に関する研究例は、少ないように思われる。

耐震補強構造物では、既存躯体と新設部材を一体化させるため、あと施工アンカーと目荒らしを用いて接合させることが多い。しかしながら、耐震改修設計指針などの既往の設計指針^{5)~7)}によれば、接合部の設計において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、目荒らしによるせん断抵抗は考慮されていない。これには様々な理由が考えられるが、その1つに、前記の通りあと施工アンカーと目荒らしのそれぞれの耐力の組み合わせの検証、あるいはその力学挙動の評価手法に関する研究が少ないことが挙げられる。

著者らは、これまでにせん断力を受けるあと施工アンカーの力学モデルを提案⁸⁾⁹⁾した。そこで本論文では、このモデルに目荒らしのせん断抵抗性能を組み合わせ、あと施工アンカーと目荒らしによる接合部のせん断挙動を評価できるものか基礎的な検証を行う。なお本論文において、目荒らしは一般的な耐震補強で多く採用されているチッピング工法を対象とする。

2. 目荒らしの影響を評価するためのせん断実験の概要

目荒らしによるせん断抵抗性能を把握するため、コンクリート接合面に目荒らしのみを施した試験体の単調載荷実験（以下、要素実験と記述する）と、目荒らしとあと施工アンカーを組み合わせた試験体の正負交番繰り返し実験（以下、接合部実験と記述する）の2種の実験結果を用いて検証する。本章では、これらの実験の概要について記述する。

2.1 要素実験

ここでは、著者らの一部がこれまでに報告した論文から、本検討で用いる要素実験の結果¹⁰⁾¹¹⁾を引用する。

(1) 試験体形状と試験パラメータ

本論文では、既報の文献¹⁰⁾¹¹⁾における試験体の中から、チッピング工法を対象としたNC3試験体の結果を用いる。図-1に要素試験体の諸元を、表-1にコンクリートの圧縮強度 σ_B とヤング係数 E_c 、およびモルタルの圧縮強度 σ_B を示す。

試験体は、幅500mm、長さ800mm、厚さ100mmの直形状であり、その上面の350mm×600mmの領域の75%を目荒らしする。その上に増設部として厚さ100mmのモルタルを打設する。モルタルのセメントと細骨材の重量比は1:2.5である。チッピングには、通常用いられる電動ピックによる工法を採用する。試験体数は2体であり、両者ともに同じ条件で載荷する。この2体の試験体を、それぞれNC3-1とNC3-2と名称する。

(2) 加力方法

図-2に要素実験の加力装置を示す。

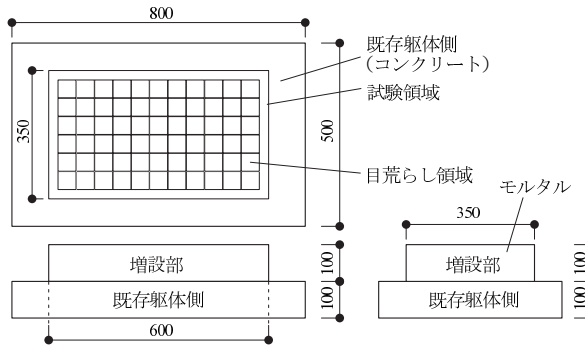
加力装置は、垂直軸力制御用として最大荷重200kN

*1 飛鳥建設 技術研究所 副主任研究員 工博（正会員）

*2 秋田職業能力開発短期大学校 住居環境科 能開教授 工博（正会員）

*3 東洋大学理工学部建築学科 准教授 工博（正会員）

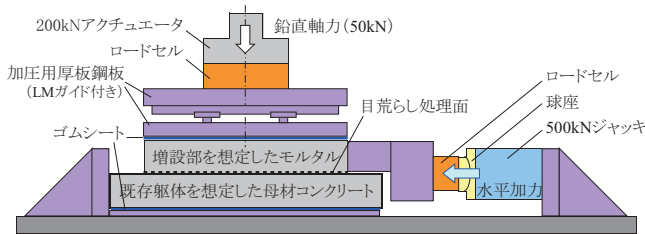
*4 東京工業大学建築物理研究センター 准教授 工博（正会員）



図一 要素試験体の諸元 (単位 :mm)

表一 要素試験体の材料特性

| 種別 | σ_B (N/mm ²) | E_C (kN/mm ²) |
|--------|------------------------------------|--------------------------------|
| コンクリート | 22.8 | 28.1 |
| モルタル | 45.4 | - |



図二 要素実験の加力方法

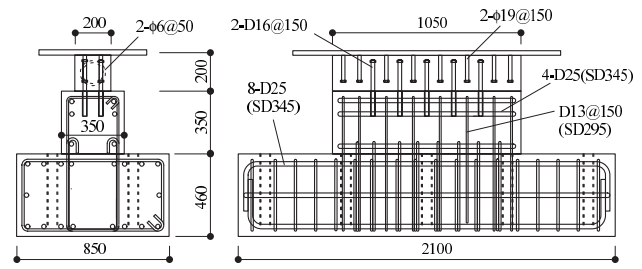
の疲労試験機を使用し、最大荷重 500kN の油圧ジャッキを用い、軸応力を一定としてせん断载荷する。せん断加力は、単調载荷とする。

軸応力の大きさは、摩擦力や初期剛性に大きく影響を及ぼすと考えられる。内付け補強の接合部における軸力の大きさを算定するには、既存部材の曲げやせん断の変形の影響も無視できず、これは非常に困難である。そこで、本論文では既存部材の変形の影響が比較的小さい、外付け補強⁹⁾の接合部に作用する平均圧縮応力を軸応力として想定する。

一般的な外付け補強の接合部には、0.5 ~ 1.5N/mm² 程度の平均圧縮応力が作用すると試算されたため、本論文では、軸応力を下限の 0.5N/mm² とする。しかし本要素実験では、この軸応力を用いると、加力装置の制約から最大せん断耐力まで载荷できない懸念があるため、軸応力をこの半分の値の 0.25N/mm² に設定する。

垂直軸力の载荷に使用する加圧用厚板鋼板とモルタルの間には、水平加力の際に出来るだけ摩擦荷重を生じさせないよう、免震支承用の LM リニアガイドを使用する。また荷重の測定は垂直軸力とせん断荷重の 2 点を、変位の測定はせん断方向 2 点、軸力方向 (上下) 3 点、せん断力直交方向 (ねじれ) 2 点の合計 7 点とする。

なお、軸応力の大きさが、接合部のせん断抵抗に及ぼす影響については、今後の検討課題とする。



図三 接合部試験体の諸元 (単位 :mm)

表二 接合部試験体の材料特性

| 種別 | σ_B (N/mm ²) | E_C (kN/mm ²) |
|--------|------------------------------------|--------------------------------|
| コンクリート | 20.4 | 26.3 |
| グラウト | 52.0 | - |



写真一 接合部試験体の目荒らしの状況

2.2 接合部実験

(1) 試験体形状と試験パラメータ

図一三に接合部試験体の諸元を、写真一にその目荒らしの状況を示す。また表二に、表一と同様に接合部試験体の材料特性を示す。

試験体は、スタブ、梁および間接接合部を模擬した部位で構成される。試験体の梁部分に SD295 (降伏強度 $\sigma_y: 363\text{N/mm}^2$) の D16 の注入式¹²⁾の接着系あと施工アンカーをダブルで配置し、ピッチを 150mm として 5 列配置する。接着剤はエポキシ系とし、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耐震補強で最短の長さ⁵⁾とされている $7d_a$ (d_a はアンカー筋径) とした。接合面には、要素試験体と同じく 75% の面積をチップング工法により目荒らしし、チップングをしない部分には、グリースを塗布し不要な固着力が出来るだけ作用しないように配慮する。

(2) 加力方法

図一四に接合部実験の加力装置を示す。

加力方法は、間接接合部の模擬部に L 字型の载荷ビームを取り付け、接合面と加力軸が一致するように 1500kN 油圧ジャッキによりせん断力を与える。また、载荷ビームにはせん断面垂直方向に 2 本の油圧ジャッキを設置し、前述した 0.5N/mm² 一定の目標軸力を与えながらせん断载荷する。1500kN 油圧ジャッキに取り付け

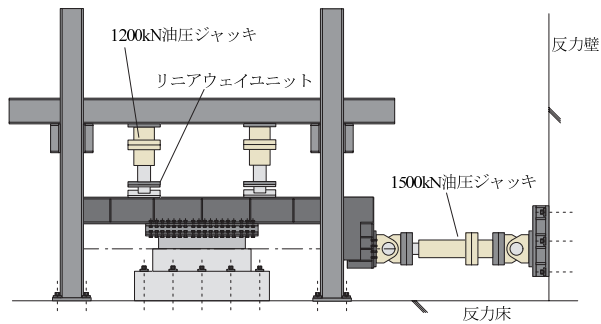


図-4 接合部実験の加力方法

たロードセルの計測値をせん断荷重 q とする。また接合面のせん断変位 δ は、スタブ上面から間接接合部の中心軸の両端 2 箇所測定する値の平均値とする。したがって、このせん断変位には、接合面のズレ変位に加え、梁のせん断変形も付加されることになる。この梁の変形の影響については、実験結果より検証する。

3. 実験結果

3.1 要素実験の結果

図-5 に要素実験の荷重変位曲線を示す。

図-5 を観察すると、載荷後、殆どズレることなく耐力が上昇し、最大耐力直前で変位がおよそ 0.2mm まで進展して最大耐力に至る。最大耐力後、荷重値が最大耐力の半分程度まで低下するが、その後、一定の荷重値を保持しつつ変位が進展する。

3.2 接合部実験の結果

図-6 に接合部実験の荷重-変位曲線を、写真-2 に最大耐力時 ($\delta=2\text{mm}$) の状況を示す。

荷重-変位曲線は、正負共に $\delta=0.2\text{mm}$ で一旦荷重が横ばいになるが、 $\delta=0.5\text{mm}$ から再び荷重が増加し始める。 $\delta=2\text{mm}$ で最大耐力に至り、その後、徐々に耐力が低下する。

要素実験の結果では、最大耐力に達した後、耐力が急激に低下する挙動が観察されたが、接合部実験ではこのような挙動は見られなかった。その理由は、あと施工アンカーの存在により、急激な目開きやせん断変位の増加が抑制されたためと推量される。

破壊形式は、局所的には接合面でのすべり破壊やあと施工アンカーの支圧破壊の痕跡が観察された。しかし、写真-2 に示すように、変位が最大耐力近傍まで進むと、既存コンクリートと増設部のモルタルが一体となってせん断抵抗するような挙動を見せた。

また既述した通り、せん断変位には梁のせん断変形も含まれている。本実験の結果より、弾性せん断剛性率から計算される最大荷重時の既存梁のせん断変形は、1/100mm のオーダーとなるが、これは最大耐力時の変

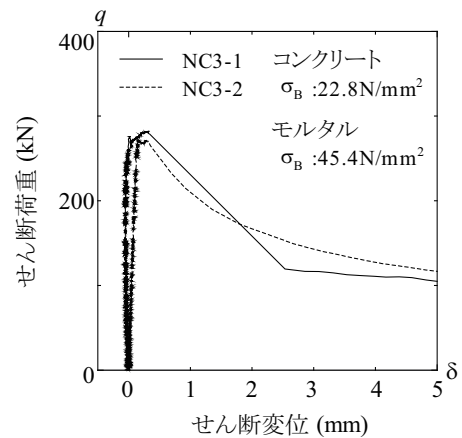


図-5 NC3 試験体の荷重変位曲線

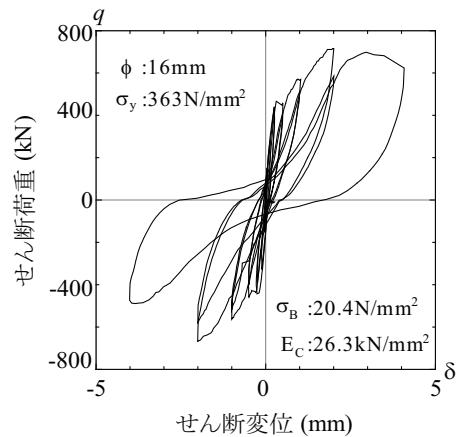


図-6 接合部試験体の荷重変位曲線

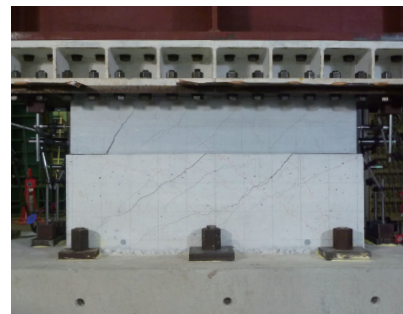


写真-2 接合部試験体の最大耐力時の状況

位 2mm に対し十分小さい値であるため、計測値に対する梁のせん断変形の影響は十分小さいと判断できる。

4. 目荒らしの影響を考慮した接合面の力学モデル

本章では、あと施工アンカーと目荒らしによる接合面の力学挙動を再現可能なモデルの構築を試みる。以下に、ここで提案するモデルについて記述する。

4.1 提案モデルの概要

あと施工アンカーと目荒らしによる接合面のせん断力に対する力学挙動は、あと施工アンカーによるダウエル効果と、目荒らしによるせん断抵抗を組み合わせることで再現できる可能性がある。実際には、両者の連成によ

る影響を考慮する必要があると考えるが、本論文では、簡便に単純累加できるものか検証する。

接合面に作用するせん断力を $q_j(N)$ とし、あと施工アンカーと目荒らしがそれぞれ担うせん断力を $q_a(N)$ と $q_r(N)$ すると、以下の釣り合い方程式が成立する。

$$q_j = q_a + q_r \quad (1)$$

本モデルでは、 q_a の評価に著者らが提案したダウエルモデル^{8),9)}を適用し、 q_r の評価については、要素実験の結果を用いて、新に構築することとする。

4.2 あと施工アンカーのダウエルモデルの概要

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^{8),9)}で詳述しているため、ここでは簡潔に触れるのみとする。図-7にあと施工アンカーのダウエル効果のモデル化を示す。また図-8に、アンカー筋の軸方向に生じる伸びと引張応力を示す。

図-7および図-8に示すように、著者らが提案するダウエルモデルでは、アンカー筋が担うせん断力 $q_a(N)$ は、塑性ヒンジ点における曲げ抵抗力 $q_s(N)$ 、コンクリートに作用する支圧抵抗力 $q_b(N)$ 、軸方向に作用する引張力 $q_T(N)$ のせん断成分 $q_T^s(N)$ を累加することで導かれる。式(2)はこれを数式化したものである。

$$q_a = q_s + q_b + q_T^s \quad (2)$$

図-9(a)と(b)に q_s と q_b の力学モデルを示す。また、 q_T の力学モデルは、次式の通りバイリニアモデルとする。

$$\sigma_{br} = \begin{cases} E_S \cdot \varepsilon_{br} & (\varepsilon_{br} < \varepsilon_y) \\ \sigma_y & (\varepsilon_y \leq \varepsilon_{br}) \end{cases} \quad (3)$$

ここに、 σ_{br} と ε_{br} はそれぞれ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である。

4.4 目荒らしによるせん断抵抗のモデル化

図-10に、目荒らしのせん断抵抗による力学挙動のモデル化を示す。

目荒らし面の載荷初期のせん断抵抗は、主として1)摩擦抵抗、2)凹凸面の噛み合い効果が考えられる。最大耐力後の抵抗機構は、2)の噛み合い効果の影響が小さくなり、摩擦抵抗が支配的になると推察される。

厳密に言えば、破壊後の摩擦抵抗は、最大耐力後、新に形成される破壊面に対して生じるものであり、最大耐力前の摩擦抵抗とは異なるのが妥当であるが、本論文では、まずはシンプルにこれらの摩擦抵抗が同一であるとみなす。したがって、凹凸面の噛み合い効果による耐力 q_{il} は、最大耐力 q_{max} から破壊後の摩擦荷重 q_f を差し引いた値で評価される。要素実験の結果を整理したものを、表-3に示す。

このようにして考えると、目荒らしによる力学挙動を

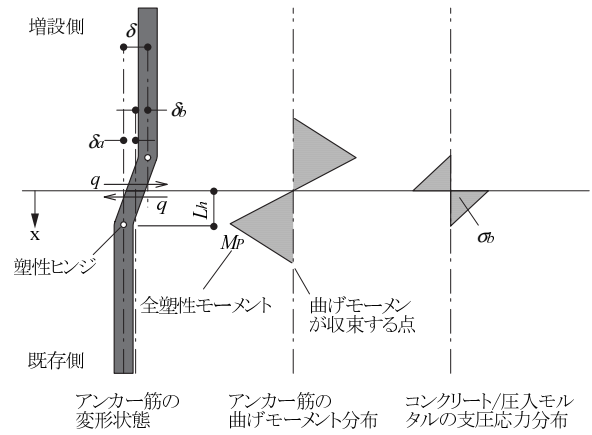


図-7 あと施工アンカーのダウエル効果のモデル化

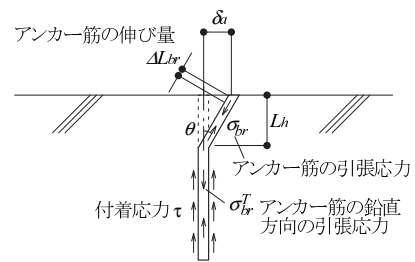
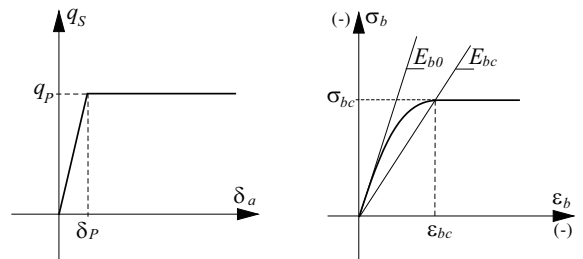


図-8 アンカー筋の軸方向に生じる伸びと引張応力



(a) 塑性ヒンジの曲げ抵抗 (b) コンクリートの支圧抵抗

図-9 構成材料の力学モデル

表-3 要素実験結果の一覧

| 試験体名 | q_{max} (kN) | q_f (kN) | q_{il} (kN) | μ_f |
|-------|-------------------|---------------|------------------|---------|
| NC3-1 | 281.5 | 110.8 | 170.7 | 1.96 |
| NC3-2 | 271.4 | 127.3 | 144.1 | 1.90 |
| 平均値 | 276.5 | 119.1 | 157.4 | 1.93 |

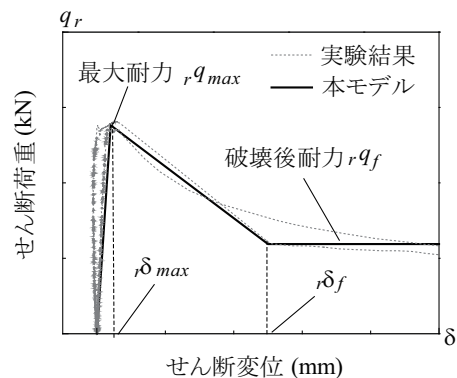


図-10 目荒らしによるせん断抵抗の力学モデル

次のような STEP に分けてモデル化することができる。
STEP1 凹凸面の噛み合い効果と摩擦抵抗が同時に作用する、最大耐力までの領域

STEP2 最大耐力後、徐々に耐力低下する領域

STEP3 凹凸面の噛み合い効果の影響が無くなり、摩擦抵抗のみが作用する領域

STEP1 の領域において、 ${}_r q_{max}$ は凹凸面の噛み合い作用による荷重 ${}_r q_{il}$ と摩擦荷重 ${}_r q_f$ を合わせ求められる。

$${}_r q_{max} = {}_r q_{il} + {}_r q_f \quad (4)$$

${}_r q_{max}$ までの荷重 - 変位関係は直線形状とし、その剛性 ${}_r K_{max}$ は次式で求められる。

$${}_r K_{max} = {}_r q_{max} / {}_r \delta_{max} \quad (5)$$

${}_r \delta_{max}$ は要素実験の結果より 0.2mm とする。

STEP2 における、荷重低下領域の荷重 - 変位関係も直線近似することとし、その勾配 ${}_r K_{pp}$ は次式で表わされる。

$${}_r K_{pp} = ({}_r q_f - {}_r q_{max}) / ({}_r \delta_f - {}_r \delta_{max}) \quad (6)$$

${}_r \delta_f$ の値は、要素実験の結果から算出することとし 2.5mm とする。

最後の STEP3 の領域では、荷重一定の挙動を辿る。摩擦抵抗による耐力 ${}_r q_f$ は、軸力 N_j に摩擦係数 μ_f を乗じて求められる。

$${}_r q_f = \mu_f \times N_j \quad (7)$$

μ_f は要素実験の結果より 1.93 とする。

以上の内容を整理すると、目荒らしによるせん断荷重 q_r は、式 (8) で表わされる。

$$q_r(\delta) = \begin{cases} {}_r K_{max} \cdot \delta & (\delta < {}_r \delta_{max}) \\ {}_r q_{max} + {}_r K_{pp} \cdot (\delta - {}_r \delta_{max}) & ({}_r \delta_{max} \leq \delta < {}_r \delta_f) \\ {}_r q_f & ({}_r \delta_f \leq \delta) \end{cases} \quad (8)$$

図-10 に、本モデルと要素実験の結果を比較して示しているが、本モデルにより実験結果を良好に再現していることが分かる。

5. 提案モデルの実験値への適合性

表-4 に解析条件を示す。Case-1 では目荒らしのみを、Case-2 ではあと施工アンカーのみの挙動を解析する。Case-3 では、目荒らしとあと施工アンカーの挙動を組み合わせ解析する。図-11 に実験結果と解析結果の比較を示す。

目荒らしとあと施工アンカーのみの挙動を、それぞれ再現した Case-1 と Case-2 の解析結果は、当然ながら、実験結果よりも小さい荷重値を示す。特に Case-2 では、

表-4 解析条件

| 解析番号 | 解析条件 |
|--------|-----------------|
| Case-1 | 目荒らし |
| Case-2 | あと施工アンカー |
| Case-3 | 目荒らし + あと施工アンカー |

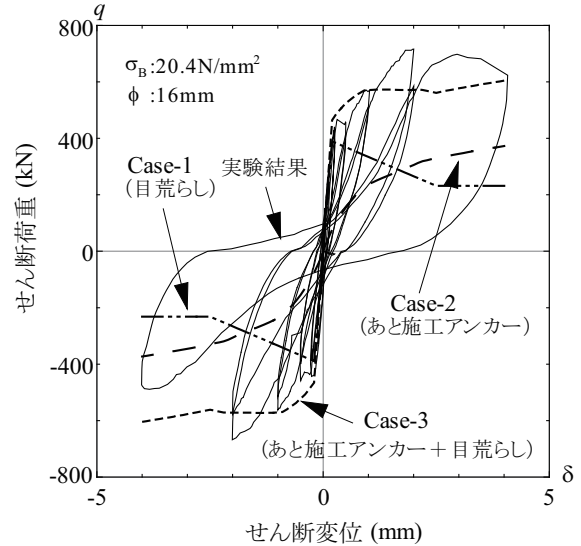


図-11 実験結果と解析結果の比較

初期剛性もかなり低めに評価されている。

本実験結果を再現した Case-3 の解析結果を見ると、目荒らし要素の耐力が低下する $\delta = 0.2\text{mm}$ で剛性低下し、 $\delta = 1\text{mm}$ で荷重がほぼ一定になるが、 $\delta = 2.5\text{mm}$ 以降、荷重がゆるやかに増加する。解析結果と実験結果と比較すると、初期勾配は凡そ一致し、 $\delta = 1\text{mm}$ までは解析結果が実験値をやや上回るものの、概ねの傾向を捉えることができる。しかし、それ以降の挙動に対しては、実験結果を正確に再現できていない。前記の通り、接合部実験の破壊形式が、単純な目荒らし面のすべり破壊や、あと施工アンカーの支圧破壊または母材降伏ではなく、既存躯体側と増設部が一体となってせん断破壊する様相を呈していたことから、本提案モデルで実験結果を追跡しきれなかったと考えられる。したがって、より正確に実験結果を再現するためには、目荒らしとあと施工アンカーの連成効果を定量的に評価する必要がある。

以上に述べたように、目荒らしによる力学挙動の評価手法において、幾つか課題が残されたのは事実である。しかし、既報の論文⁸⁾において、間接接合部を有する試験体のあと施工アンカーのダウエル効果を評価した際に、初期剛性が実験値よりも小さくなる傾向を指摘していたが、目荒らしの挙動を累加することで、この問題が解決されており、目荒らしの効果を単純累加して接合部の挙動を評価する本手法の有用性を窺うことができる。

6. 結論

本論文では、あと施工アンカーのダウエル効果と、目荒らしによるせん断抵抗の力学挙動の組み合わせ手法に関する検証を行った。以下に、本論文で得られた知見を列記する。

- 1) あと施工アンカーが無く目荒らしのみを施した接合面の、一定軸力単調せん断荷重実験の荷重-変位曲線は、最大耐力までほぼ直線形状となり、最大耐力後、大きく荷重が低下するが、ある荷重まで低下した後は、そのせん断荷重を維持したまま変位が進んだ。
- 2) あと施工アンカーと目荒らしの両者を組み合わせた接合部実験では、 $\delta=0.2\text{mm}$ で一旦荷重が横ばいになり、 $\delta=0.5\text{mm}$ から再び荷重が増加して $\delta=2\text{mm}$ で最大耐力に至り、その後、徐々に耐力が低下する挙動が観察された。
- 3) あと施工アンカーのダウエルモデルと、要素実験の結果から誘導した目荒らしのせん断抵抗モデルを累加した力学モデルにより、 $\delta=1\text{mm}$ までの実験結果を概ね評価することができた。
- 4) 目荒らしによる効果を考慮せず、純粹にあと施工アンカーのダウエル効果を評価した既報の論文⁸⁾において、間接接合部を有する試験体の実験結果に対し、解析結果の初期剛性が小さめに算出される傾向を指摘していたが、目荒らしのせん断抵抗を累加することで、この問題が改善された。

目荒らしのせん断抵抗機構は、目荒らし面の形状、既存側と増設側のコンクリート強度、目荒らし面積など、様々な要因が複雑に絡み合っていると推察される。したがって、目荒らしのせん断抵抗を定量的に評価するには、これらの要素を個々に検証し、さらに相互に及ぼす影響をも評価する必要があるが、あと施工アンカーと併用した場合の力学挙動の評価については、本論文で示した手法が有用な手段の一つになり得ると考えられる。

謝辞

本論文の執筆に当たり、飛島建設トグル事業部久保田雅春氏、阿部隆英氏、東亜建設工業技術研究開発センター・樋渡健博士、同設計部・村田鉄雄氏、日本ファステム・平田誠之氏、元日本ファステム・高見博一氏、および元東洋大学学生・和地大伍氏、来栖智宏氏に、多大なるご協力を賜りました。ここに深い謝意を表します。

また本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金(研究代表者:高瀬裕也, 課題番号:23760542)の助成を受けて実施しました。

参考文献

- 1) Mattock, A. H. :Cyclic Shear Transfer and Type of Interface, Journal of the Structural Division, Proceedings of ASCE, Vol.107, No.ST10, pp.1945~1964, 1981.10.
- 2) 望月重, 横谷栄次, 永坂具也:壁式プレキャスト構造鉛直接合部のせん断耐力 ダウエル効果および圧縮拘束力を考慮した場合, 日本建築学会構造系論文集, No.424, pp.11~22, 1991年6月.
- 3) 香取慶一, 林静雄, 牛垣和正, 乗物丈巳:直交鉄筋が配筋されたコンクリート接合面のせん断挙動と接合面表面粗さとの関係-プレキャスト接合部のせん断挙動に関する研究-, 日本建築学会構造系論文集, No.508, pp.101~110, 1998年5月.
- 4) 中野克彦, 松崎育弘:RC部材接合面におけるせん断抵抗要素の耐力累加法, 日本建築学会構造系論文集, No.550, pp.151~158, 2001年12月.
- 5) 日本建築防災協会:2001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, 2001年10月(改訂版発行).
- 6) 日本建築防災協会:既存鉄筋コンクリート造建築物の「外側耐震改修マニュアル」, 2003年2月.
- 7) 日本建築学会:各種合成構造設計指針・同解説, 日本建築学会, pp.91~101, 2010年.
- 8) 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, No.682, pp.1926~1935, 2012年12月.
- 9) 高瀬裕也, 和田俊良, 篠原保二:増設側圧入モルタルの強度があと施工アンカーのせん断耐力に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.134, No.2, pp.967~972, 2012年.
- 10) 香取慶一, 樋渡健, 村田鉄雄, 久保田雅春, 阿部隆英, 高瀬裕也, 平田誠之:低騒音・低振動の目荒らし工法の開発(その1)目荒らし工法の概要と要素試験概要, 日本建築学会学術講演梗概集(東海), 2012年.
- 11) 樋渡健, 村田鉄雄, 久保田雅春, 阿部隆英, 高瀬裕也, 平田誠之, 香取慶一:低騒音・低振動の目荒らし工法の開発(その2)要素試験結果, 日本建築学会学術講演梗概集(東海), 2012年.
- 12) 広沢雅也, 松崎育弘:あと施工アンカー設計・施工読本-初歩から応用まで-, 建築技術, 1991年12月.