

論文 多数回繰り返しせん断力を受ける接着系あと施工アンカーの力学挙動に関する考察

高瀬 裕也^{*1}・和田 俊良^{*2}・篠原 保二^{*3}

要旨：2011年東北地方太平洋沖地震では、地震動の継続時間の長さが特徴の一つとして指摘されている。本論文では、多数回の同変位繰り返しせん断力を受ける接着系あと施工アンカーの力学性能を検証するため載荷実験を行い、さらに著者らが提案した力学モデルを用いて実験結果の再現を試みた。実験の結果、ずれの大きな変形領域よりも、小さい変形領域の方が処女載荷に対する同変位繰り返し時の荷重低下率が大きくなった。この理由として、載荷初期は繰り返しに脆弱なコンクリートが負担する応力が7割～8割近くを占めるが、ずれが大きくなるに従い、アンカー筋が負担する割合が増えて行く傾向を、提案モデルより示した。

キーワード：耐震補強、あと施工アンカー、ダウエル効果、多数回繰り返し載荷

1. はじめに

周知のように、2011年東北地方太平洋沖地震の地震動の特徴の一つとして、過去に観測された地震動と比べ継続時間が非常に長かったことが指摘^(例えば¹⁾)されており、今後の地震防災において、これを無視することはできないものと推察される。耐震補強構造物においては、既存躯体と補強部材を剛に接合することが極めて肝要であるが、前記のような継続時間の長い地震、即ち、接合部が多数回の繰り返しせん断力を受けた場合の力学性能について論じられた論文は無いようである。

そこで本論文では、多数回の強制せん断変位(ずれ)を与えたあと施工アンカーの載荷実験を行うとともに、著者らが提案した力学モデル²⁾を用いて、実験結果の再現を行い、この力学性能について考察する。

2. 本実験の概要

2.1 試験体パラメータ

表-1に試験体パラメータを、図-1に載荷サイクルを示す。また、表-2にコンクリートとグラウトの材料特性を、表-3に鉄筋とアンカー筋の機械的性質を示す。

本実験では、As-0～As-2の3体の試験体の実験を行う。As-0試験体では軸応力をゼロとし、その他の試験体では、前報³⁾と同様に、接合面に作用する圧縮応力 σ_N を、一般的な外付け耐震補強を想定して 0.5N/mm^2 とする。載荷サイクルは2通りとする。As-0試験体およびAs-1試験体では、一般的な構造実験で見られるような同変位2回づつの載荷とする。As-2試験体には、多数回繰り返しせん断載荷を与える。上記地震における観測記録の一例として、文献4)から建物の時刻歴変位波形(8F屋上)を観察すると、最大変位に対する比が1/2～1.0の振幅の

揺れが4回、1/4～1/2で20回弱見られ、残りの揺れは1/4以下であった。ここで接合部の許容ずれを既往の指針⁵⁾から2mmとし、許容ずれの1/4以下の領域は弾性範囲内であると仮定すると、0.5～2mmの間で20回程度、さらに2mm以降も若干の繰り返し強制変位を与えることで、継続時間の長い地震にも十分対応できると考えられる。そこで、As-2試験体では、ずれが1mm未満で各変位5回づつ、1mmから2mmで3回づつ、その後、徐々に繰り返し載荷数を減らしながら漸増する載荷とする。

なお、先に実験結果の一部に触れることになるが、軸応力をゼロとしたAs-0試験体は目開き量が大きかったためか、ずれ δ が-2mmの際に増設側(グラウト側)で引張(割裂)破壊した。そこで、この試験体の結果については、 $\delta=-2\text{mm}$ までの参考値として使用する。

2.2 試験体形状

図-2に本試験体の諸元寸法を、図-3および図-4にひずみの計測位置と、ひずみゲージの貼り付け方法を、それぞれ示す。

本試験体は、既存躯体から間接接合部までの一部を切り出した部分を模擬したものである。既存躯体に相当するコンクリート部分は、幅320mm、長さ390mm、高さ160mm、接合部に相当する増設側は、幅150mm、長さ300mm、高さ150mmの直方体である。コンクリート部分にアンカー筋を施工した後に、接合面にグリスを塗布し、その上に、型枠、スパイラル筋、鋼板(2- ϕ 16のスタッドを溶接)を設置してグラウトを圧入する。

あと施工アンカーは、注入式接着系アンカーとし、エポキシ系の接着剤を使用する。アンカー筋は全ての試験体で共通であり、アンカー筋径 d_a は13mm(D13)、有効埋め込み深さは130mm($10d_a$)、増設側の定着はナットま

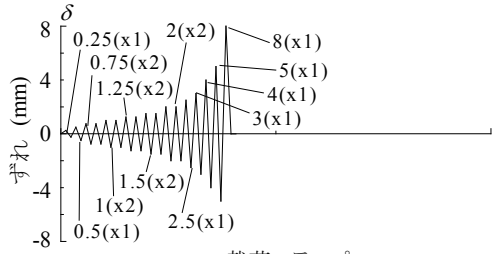
*1 飛鳥建設 技術研究所 副主任研究員 工博 (正会員)

*2 秋田職業能力開発短期大学校 住居環境科 教授 工博 (正会員)

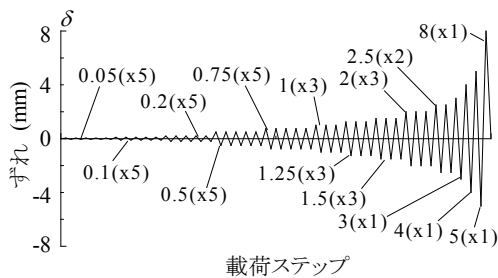
*3 東京工業大学 建築物物理研究センター 准教授 工博 (正会員)

表一 試験体パラメータの一覧

試験体名	σ_N (N/mm ²)	Cycle	備考
As-0	0	Case-1	軸応力ゼロの予備実験
As-1	0.5	Case-1	アンカー筋のひずみ分布を検証
As-2	0.5	Case-2	コンクリートのひずみを検証



(a) Case-1



(b) Case-2

図一 載荷サイクル

表二 コンクリート及びグラウトの材料特性

種別	σ_B (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	ϵ_{cu} (10 ⁻⁶)	σ_t (N/mm ²)
コンクリート	25.0	27.4	1553	2.3
グラウト	66.1	29.7	2762	4.3

σ_B : 圧縮強度, E_c : ヤング係数, ϵ_{cu} : 最大耐力時のひずみ, σ_t : 割裂強度

表三 鉄筋及びアンカー筋の機械的性質

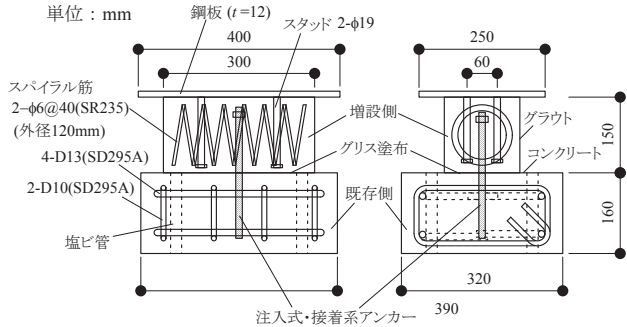
サイズ	σ_y (N/mm ²)	σ_{su} (N/mm ²)	ϵ_y (10 ⁻⁶)	E_s (kN/mm ²)	伸び (%)
D10	411	556	2296	186	21
D13	380	587	2224	183	19
D13(Anchor)	366	515	1917	190	24

σ_y : 降伏強度, σ_{su} : 引張強度, ϵ_y : 降伏耐力時のひずみ, E_s : ヤング係数

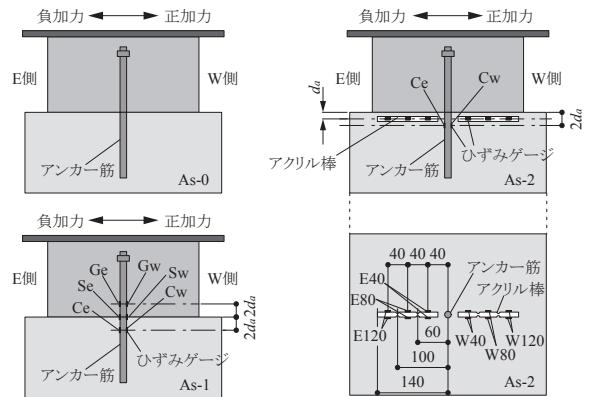
での首下で 110mm である。

As-2 試験体では、アンカー筋の周囲で支圧応力を受けるコンクリートのひずみを測定するため、既往の論文で用いられている局所ひずみの計測方法^{例えは6),7)}を採用する。即ち、図一四の左側に示すように、ゲージを貼り付けた 1 辺 10mm、長さ 120mm のアクリル製の角棒を、アンカー筋のせん断方向に配置する。アクリル棒には切り欠きを設け、コンクリートに定着するように配慮している。この埋め込み深さは、接合面から $1d_a$ である。

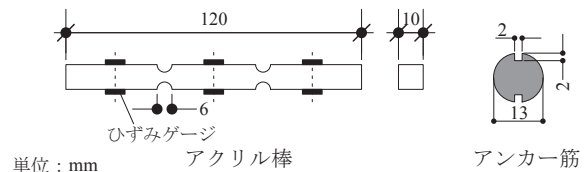
また、アンカー筋にひずみゲージを貼り付ける際に、この防水養生によって穿孔径が標準よりも太くなったため、接着剤の付着抵抗が低下しないように配慮するた



図二 試験体の諸元寸法



図三 各試験体のひずみ計測位置



図四 ひずみゲージの貼り付け方法

め、図一四の右側に示す通りアンカー筋の断面に溝を設け、溝の底部にゲージを貼る。ゲージを貼らない試験体でも同じ断面のアンカー筋を使用する。As-1 試験体のアンカー筋では、接合面からそれぞれ増設側と既存側に $2d_a$ の位置、および接合面、As-2 試験体では既存側のひずみを計測する。アンカー筋のひずみを計測する各箇所においては、ゲージを加力方向に対し前後に 2 枚貼る。

2.3 加力方法

図一五に本実験の加力装置を示す。

試験体の鋼板に、コの字型の加力ビームを固定する。加力装置には、500kN 油圧ジャッキを、鉛直方向に 1 本、水平方向に 2 本（正側加力用と負側加力用）設置し、軸力を与えながら、加力ビームを介して試験体にせん断加力を与える。せん断載荷時に加力ビームが平行に作動するように、パンタグラフとガイドレールを介して、加力ビームを加力フレームに設置する。

3. せん断力を受けるあと施工アンカーの力学モデル

本論文では著者らが提案したモデル²⁾を用い、本実験結果の考察を行う。紙幅の制約から本モデルの詳細は既報の論文に譲ることとし、以下に本モデルの概要、およ

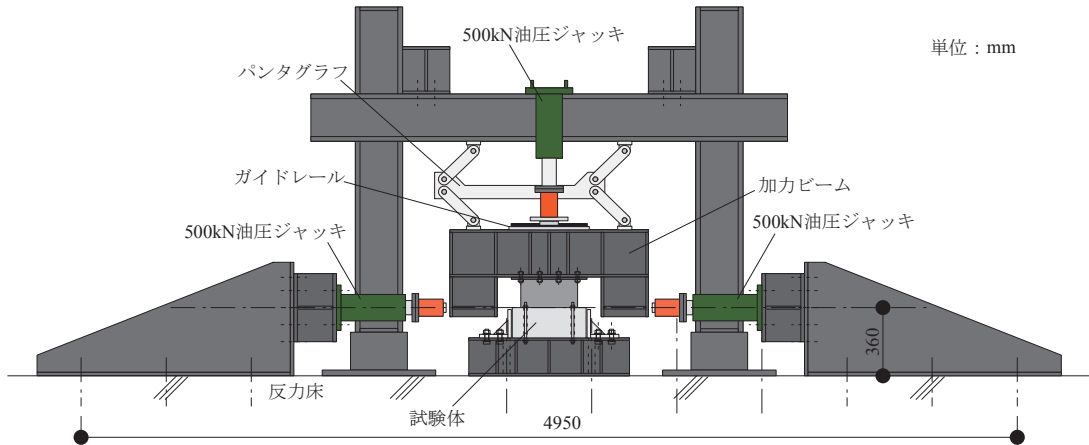


図-5 加力方法

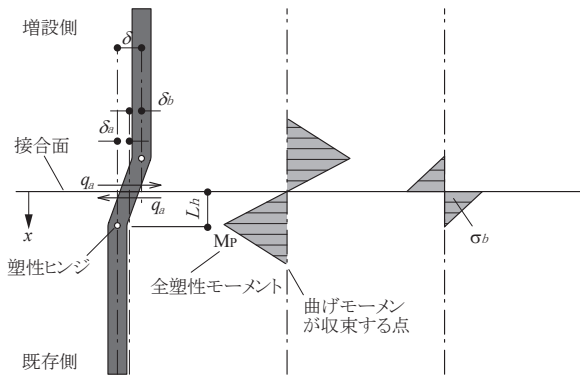


図-6 あと施工アンカーのダウエル効果のモデル化

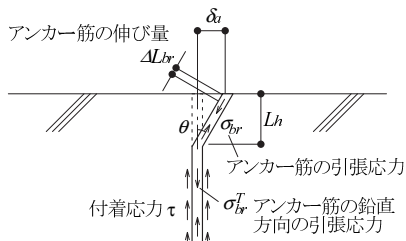


図-7 アンカー筋の軸方向に作用する引張応力

び本実験結果の考察に関連する数式について記述する。

3.1 アンカー筋のダウエルモデル

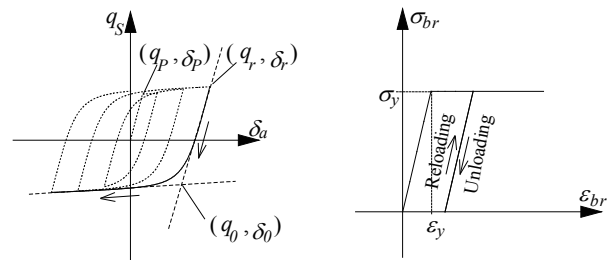
(1) 本ダウエルモデルの概要

図-6および図-7に示すように、著者らが提案するダウエルモデルでは、アンカー筋に作用するせん断力 $q_a(N)$ 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 $q_b(N)$ 、アンカー筋の軸方向に作用する引張力 $q_T(N)$ のせん断成分 $q_T^s(N)$ を累加した荷重と釣り合う。

$$q_a = q_s + q_b + q_T^s \quad (1)$$

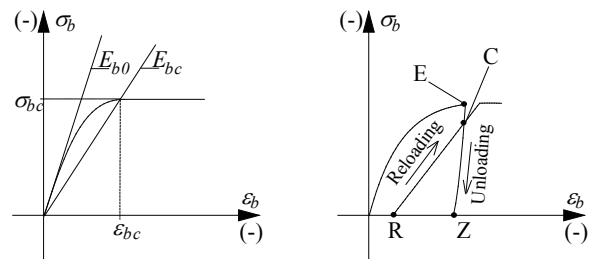
(2) アンカー筋の構成モデル

図-8(a)と(b)に、それぞれ q_s と q_T^s の構成モデルを示す。塑性ヒンジにおける曲げ挙動は、修正 Menegotto-Pinto モデル⁸⁾に準じる。つまり、通常モデルは、鉄筋の応力-ひずみ関係を記述するものであるが、本モデルでは、これを荷重 q_s -変位 δ_a 関係に置き換えて用いる。



(a) 塑性ヒンジの曲げ抵抗 (b) アンカー筋の伸び

図-8 鋼材の構成モデル



(a) スケルトンカーブ (b) 繰り返し

図-9 コンクリートの構成モデル

ルでは、これを荷重 q_s -変位 δ_a 関係に置き換えて用いる。

アンカー筋に塑性ヒンジが形成される際の荷重 q_p は、アンカー筋の全塑性モーメント M_p を、塑性ヒンジが形成される深さ L_h で除して求められる。

$$q_p = M_p / L_h \quad (2)$$

また L_h は、下式を用いて算出²⁾される。

$$L_h = \frac{3}{2} \cdot \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{4E_s I_z}{\kappa \phi}} \quad (3)$$

なお、詳細は次章で触れるが、 $\delta = +0.75\text{mm}$ で既存側のアンカー筋が降伏ひずみに達したことから、本論文では、 $\delta_p = 0.75\text{mm}$ とする。

ここで本試験体の諸元から、 L_h を計算すると、 $L_h = 27.7\text{mm}$ となるが、この値は鉄筋のひずみ計測位置 $2d_a(26\text{mm})$ とほぼ一致する。As-2 試験体では、深さ $1d_a(13\text{mm})$ の位置でコンクリートのひずみを計測するが、これは塑性ヒンジと接合面のほぼ中間の位置になる。

q_T の力学モデルは、図-8(b)に描く通りバイリニア

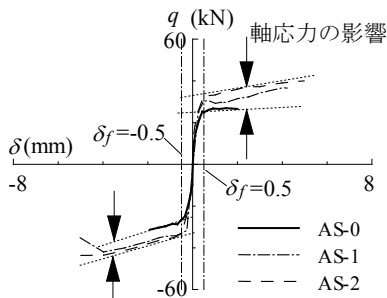


図-10 各試験体の包絡曲線の比較

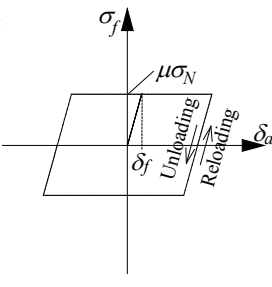


図-11 摩擦の力学モデル

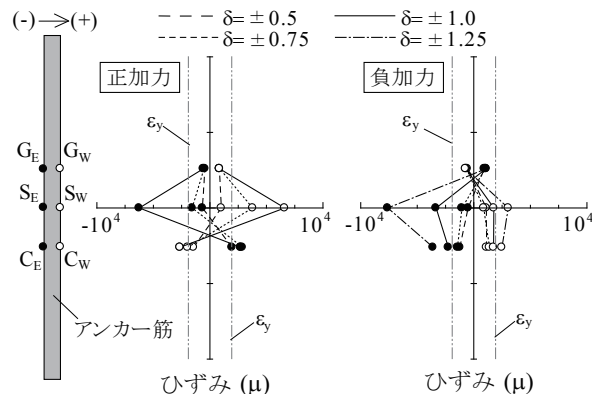


図-12 アンカー筋のひずみ分布

モデルとする。

(3) コンクリートの構成モデル

図-9(a)と(b)に支圧応力を受けるコンクリートの構成モデルを示す。支圧応力を受けるコンクリートの構成モデルは、最大耐力までは圧縮応力を受けるコンクリートの構成モデル^{2),9)}を適用する。

ただし、最大耐力後は、支圧を受けるコンクリートが周囲に拘束されていることから、軟化させずに最大荷重を維持するようにモデル化している。また繰り返し時の挙動は、除荷時は図-9(b)のE点とZ点を結ぶ2次関数で再現する。再載荷時の挙動も、既報²⁾のモデルでは、C点とR点を結ぶ2次関数で記述していたが、ひずみ量が大きい領域で不自然な曲線形状を示すため、1次関数に修正する。ここでC点の応力は、最大経験ひずみ時の応力の5/6の応力に設定²⁾しており、同変位2回目以降は同じ履歴を辿るようにモデル化している。

接合面からxの深さのコンクリートのひずみ ϵ_b は、接合面(x=0)におけるずれ $\delta_a(0)$ より、以下の(4)式および(5)式、によって算出される。

$$\delta_a(x) = \begin{cases} \delta_a(0) - \frac{\delta_a(0)}{L_h} \cdot x & (0 \leq x < L_h) \\ 0 & (L_h \leq x) \end{cases} \quad (4)$$

$$\epsilon_b(x) = \delta_a(x) / L_{db} \quad (5)$$

ここで、有効ひずみ化長さ L_{db} は、既発表の論文²⁾より300mmとしている。

3.2 軸応力の影響

既発表のモデルでは軸応力が作用しない条件でモデル化を行っているが、本実験の結果を追跡するためには軸応力の影響を考慮する必要がある。

図-10に、AS-0~AS-2試験体の実験結果より、各載荷サイクルにおける最大荷重を結んだ包絡曲線を示す。同図を観察すると、軸応力をゼロとしたAS-0試験体よりも、軸応力を与えた試験体の方がせん断荷重 q が大きく推移する。本論文では、この要因を摩擦による影響と捉え、図-11に示す完全弾塑性型のモデルで再現する。

図-10より $\delta=0.5\text{mm}$ 辺りから、せん断荷重 q の増加

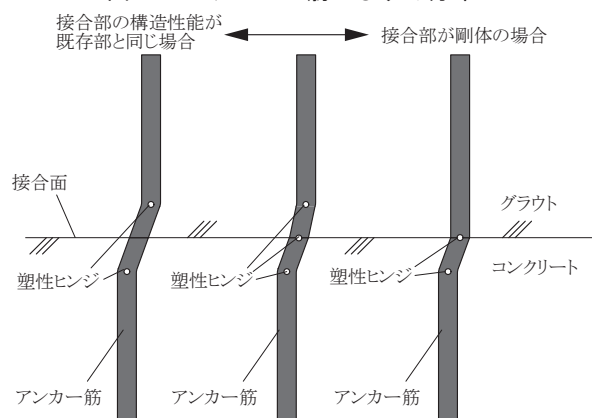


図-13 想定される塑性ヒンジの形成パターン

量が安定することから、本論文では $\delta_f=0.5\text{mm}$ とする。また摩擦係数 μ は、実験結果から $\mu=0.4$ ($\delta=0.5\text{mm}$ 以降の正加力サイクルにおける q の増加量の平均値を、軸力 N で除した値)とする。

前報³⁾では、チップングによる目荒らしを施した要素実験を行い、そこで得られた結果をモデル化し、さらにこれをダウエルモデルに累加することで、目荒らしとあと施工アンカーを用いた接合部の力学挙動を概ね再現できることを報告した。また中野ら¹⁰⁾も、プレキャスト工法の接合面の評価において、接合筋のダウエル効果による負担力と摩擦力の耐力累加が可能であることを示唆している。そこで本論文でも、ダウエルモデルと摩擦モデルの累加により評価する。そのため、接合面に作用するせん断力を $q_j(N)$ とし、摩擦により負担するせん断力を $q_f(N)$ すると、以下の釣り合いが成立する。

$$q_j = q_a + q_f \quad (6)$$

4. 実験結果と解析結果の比較と考察

本章では、提案モデルによる解析結果と比較しながら実験結果を観察し、多数回繰り返しせん断力を受けるあと施工アンカーの力学性能について考察する。

4.1 アンカー筋のひずみ分布

図-12に、As-1試験体のアンカー筋のひずみ分布を示す。ここで観察するひずみ量は、アンカー筋の溝の底

部に貼ったゲージの値であるため、最外縁におけるひずみ量は、これよりも大きな値を示すと考えられる。

$\delta=+0.75\text{mm}$ で接合面上の S_w が引張側、および、既存側の C_w と C_e がそれぞれ圧縮側と引張側にそれぞれ降伏ひずみ(1917μ)に達する。しかしながら、増設側の G_w 、 G_e は、 $\delta=0.25\sim 1.25\text{mm}$ の領域のひずみ量は、正加力時、負加力時ともに $500\mu\sim 1000\mu$ 前後で大きな変化は見られず、その後も大きなひずみは認められなかった。既報の論文²⁾では、塑性ヒンジの形成状態として、図-13の左側に示すように既存側と増設側で対象となる状態から、図-13右側のような増設側が剛体となる状態の中間の状態になり得ると推察したが、本試験体のひずみ分布から、どちらかと言えば、増設側が剛体に近い状態になっていると考えられる。

4.2 アンカー筋から支圧応力を受けるコンクリートのひずみ推移

図-14に、As-2試験体で計測したアクリル棒のひずみ推移を示す。同図を観察すると、正側、負側ともに、アンカー筋から最も近い位置に貼り付けたW40とE40のひずみゲージで、最終的には 5000μ 以上の大きなひずみが計測されるが、これと比べるとその他のゲージは数百 μ 程度の小さなひずみしか生じていない。

また図-14には、式(4)および式(5)から算出される本モデルのひずみ量も併記しているが、W40とE40の

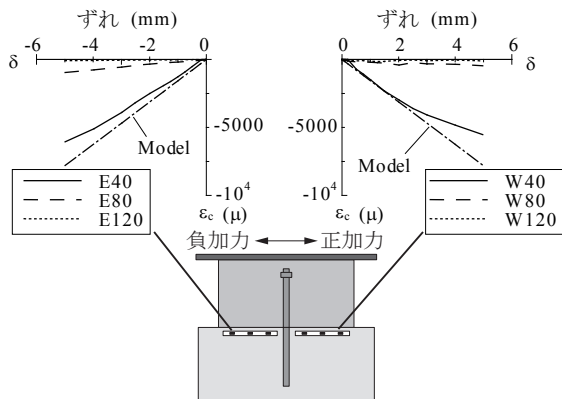
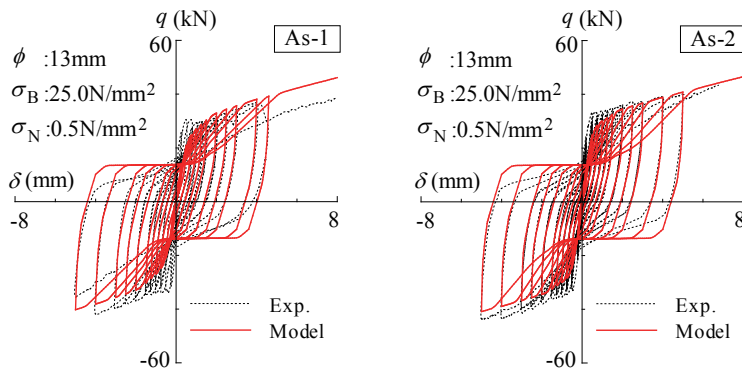


図-14 コンクリートのひずみ推移



(a) As-1 試験体 (b) As-2 試験体
図-15 せん断荷重-変位 ($q-\delta$) 曲線の実験値と解析値の比較

ひずみ推移と同程度の値となっており、提案モデルにより、適切にモデル化できていると判断される。

4.3 繰り返しせん断力を受けるあと施工アンカーの力学挙動

図-15に、各試験体のせん断荷重-変位 ($q-\delta$) 曲線および解析結果を示す。同図より、本モデルは両試験体とも初期剛性を小さめに評価している。また本モデルは正側と負側で対称の挙動となるが、実験結果を見ると負側の方が荷重値が大きい。現状の知見からは、この理由を説明できず、今後の課題としたい。しかし、 $\delta=1\text{mm}$ 以降の挙動に着目すると、スケルトンカーブ、除荷時、再荷荷時の挙動などを概ね良好に捉えられている。

続いて図-16に、処女荷重に対する同変位の載荷ステップにおける繰り返し載荷時の荷重比 (荷重残存率) の推移を示す。この図では、同変位の載荷ステップだけでなく、次の載荷ステップで、前の載荷ステップの変位を通過する際の荷重も評価する。繰り返し回数が、2回~4回へと増えるにつれ、荷重低下率が大きくなっていく (荷重比が小さくなっていく) が、4回目から6回目では殆ど差異は見られず、この際の荷重比はずれが小さい領域で最小値が0.8となる。また図-16のグラフの曲線形状に着目すると、 δ が $\pm 1\text{mm}$ の範囲内で全体的にV字形状となり、 $\delta=\pm 1\text{mm}$ 以降は、ほぼ横ばいの挙動を示す。つまり、 $\delta=\pm 1\text{mm}$ よりも小さい領域で荷重低下率が大きく、 $\delta=\pm 1\text{mm}$ を超える領域の方が荷重低下率が小

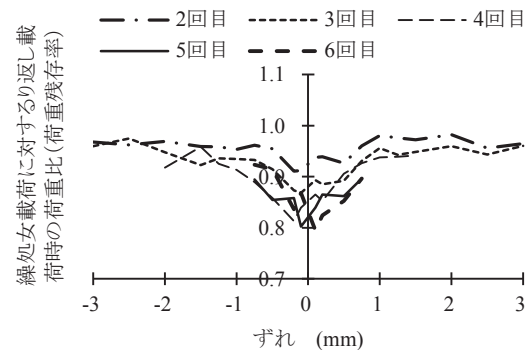


図-16 処女荷重の荷重に対する繰り返し載荷時の荷重比 (荷重残存率) の推移

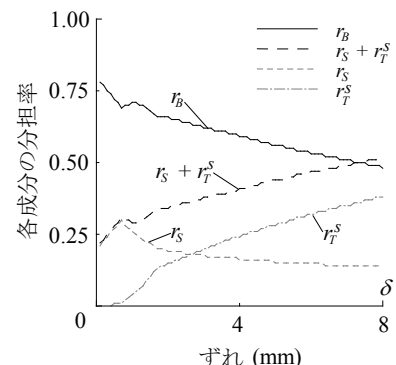


図-17 ダウエルモデルにおける各成分の分担率の推移

さい。この理由を検証するため、本ダウエルモデルにおける、各成分が分担する割合を算出し、この結果を図-17に示す。ここでは q_B 、 q_S 、 q_T^s の q_a に対する割合を、 r_B 、 r_S 、 r_T^s と表記する。

図-17より、 $\delta=0.75\text{mm}$ 以下の領域では、コンクリートが負担する割合が、7割~8割と大きく占めているが、その後、徐々にアンカー筋が負担する割合が増えていく。したがって、ずれが小さい範囲では、繰り返しの脆弱なコンクリートが負担する応力が大きい、ずれが大きい領域では、繰り返しの荷重低下の少ないアンカー筋が負担する応力が大きくなるため、荷重低下率も小さくなったと推察される。

また、本モデルにおいて、再載荷時の荷重低下を表現できるのは、コンクリートの支圧挙動のみであり、この荷重残存率を $5/6$ (≈ 0.833)に設定している。コンクリートの負担が大きい、ずれが小さい領域で荷重残存率が 0.8 であったことから、本モデルの設定値は妥当な値であったと言えよう。また本モデルでは、繰り返し回数毎に変動する荷重低下率までは詳細に設定していないが、2回目以降の挙動を経験荷重の $5/6$ としたことで、安全側に評価できるモデルとなっている。これに付随して、前述したように変形の小さい範囲で本モデルが実験よりもせん断荷重を小さく評価しているが、これはコンクリートの支圧モデルにおける、初期剛性や最大耐力時のひずみ ε_p の設定、あるいは式(5)による ε_b の算出方法などに改善の余地がある可能性を意味しているが、これらは、今後の研究課題とする。

5. 結論

本論文では、多数回繰り返しせん断力を受けるあと施工アンカーの接合部実験を行い、その力学性能について、若干の考察を加えた。以下に、本論文で得られた知見を列記する。

- 1) D13のアンカー筋を使用した本実験の結果、ずれ δ が 1mm を超える大きな変形領域よりも、 1mm 以下の小さい変形領域の方が、処女載荷に対する繰り返し時の荷重低下率が大きかった。
- 2) 上記1)の理由は、ずれが小さい領域の方が、繰り返しに対し脆弱な挙動となるコンクリートの負担力が大きく、変形が進むにつれ靱性能に富むアンカー筋が負担する応力が大きくなるためと考えられる。
- 3) アンカー筋のひずみ分布や、支圧応力を受けるコンクリートのひずみ推移から、本提案モデルの妥当性を示した。
- 4) 著者らが既発表の論文²⁾で提案した、あと施工アンカーの力学モデルを用いて、本実験結果の再現を試

みたが、多数回の繰り返しせん断力を受ける場合であっても、良好に実験結果を追跡できた。

上記の結果より、 1mm 以上のずれを想定して設計する場合は、多数回の繰り返しの影響が少ないが、変形の小さい領域で設計する場合には、繰り返しによる荷重低下の度合いを考慮する必要がある。今後著者らは、アンカー筋の諸元やコンクリート強度を達した実験を行ってデータを蓄積し、本モデルの精度向上を図る予定である。

謝辞

北海道大学助教・越川博士より、本実験の計測について、貴重なご助言を賜りました。本試験体の制作に際し、サンコーテクノ・佐藤氏、酒井氏よりご協力を、載荷履歴の設定については、飛島建設・阿部氏よりご教示頂きました。本研究の一部は、東京工業大学応用セラミックス研究所の共同利用研究において実施しました。ここに深い謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報，2011年7月30日(第1版第1刷)
- 2) 高瀬裕也，和田俊良，池田隆明，篠原保二：繰り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
- 3) 高瀬裕也，和田俊良，香取慶一，篠原保二：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.135，No.2，pp.1069-1074，2013年
- 4) 佐々木清，田中礼二，高瀬裕也：増幅機構付制震構法(トグル制震構法)による仙台市役所本庁舎の耐震補強とその効果，建築技術，No.750，pp.184-189，2012年7月
- 5) 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」- 枠付き鉄骨ブレースによる補強 -，2009年10月20日。(初版3刷)
- 6) 平井圭，中村光，檜貝勇：コンクリート圧縮破壊領域の推定に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.17，No.2，pp.339-344，1995年
- 7) 越川武晃，上田正生，菊地優，和田俊良：フィードバック制御を用いたコンクリートの一軸圧縮破壊実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.91-96，2008年
- 8) 堺淳一，川島一彦：部分的な除荷・再載荷を含む履歴を表す修正Menegotto-Pintoモデルの提案，土木学会論文集，No.738/I-64，pp.159-169，2003.7
- 9) Sanz, L. P. : Discussion of Equation for Stress - Strain Curve of Concrete, by Desayi P. and Krishnan S., ACI Journal, V. 61, No. 9, pp. 1227-1239, 1964.9
- 10) 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