

# 論文 複合応力下における接着系あと施工アンカーの3次元 FEM 解析モデルの構築と力学的挙動および応力度分布の考察

石田 雄太郎\*1・坂田 弘安\*2・高瀬 裕也\*3・毎田 悠承\*4

**要旨**：本研究では、複合応力下における接着系あと施工アンカーの力学的挙動と応力度分布を考察することを目的として、3次元 FEM 解析モデルを構築し解析を行った。アンカー径、軸応力比、コンクリート強度をパラメータとする計 13 体の試験体を対象として解析を行った結果、実験を概ね精度よく再現できた。せん断力のみを与えた試験体は接合面のせん断抵抗により、せん断力と引張力を与えた試験体に比べ初期剛性が大きくなる傾向があった。また、せん断力と引張力を与えた試験体では相対水平変位 0.25 [mm]程度までは剛性が概ね等しく、それ以降に軸応力比に応じて剛性、せん断耐力が低下する傾向があることが明らかとなった。

**キーワード**：あと施工アンカー、複合応力、3次元 FEM 解析、応力度分布、外付け耐震補強

## 1. 序論

「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(以下、外側耐震改修マニュアル)<sup>1)</sup>」に示されている外付け耐震補強は、建物の現状の機能を損なうことなく補強工事が可能であり、内部の環境に与える影響が少ない点から採用される事例が増えている。

また構造的な特徴としては、既存架構と補強架構が偏心することにより、その接合部にはせん断力に加え、偏心曲げモーメントによる圧縮、引張力が生じ、複合的な応力が作用することが挙げられる。

これらに対して、複合応力下での接合要素の力学的挙動や応力度分布は詳細に把握できているとは言い難いのが現状であり、現行の設計法<sup>2)</sup>では工学的な判断に基づく安全係数を乗じて安全に設計することになっている。

そこで本研究では、まずせん断力と引張力の複合応力下における接着系あと施工アンカーの実験を対象として3次元 FEM 解析モデルを構築し、実験を再現すること、その解析結果から力学的挙動および応力度分布を明らかにすることを目的とする。

## 2. 解析対象とする実験概要

本研究で解析対象とする実験の概要を図-1に示す。

試験体の詳細を図-1(a)に示す。試験体は既存躯体に相当するコンクリート部材にエポキシ系注入式の接着系あと施工アンカーを施工した。その後、接合面にグリスを塗布し、接合面と外付け耐震補強における鉄骨フレームのフランジを想定した鋼板との間にグラウトを圧入して製作した。

加力装置を図-1(b)に示す。接合面の高さで左右に油圧ジャッキを取付け、どちらか一方を押すことで載荷した。また、鉛直方向にセンターホールジャッキを取り付け、載荷治具等の自重の影響を除去し、引張力を与える試験体では所定の軸力を与えた後に、せん断力を加えた。

試験体パラメータと材料の諸元を表-1に示す。本稿では、アンカー径 3 水準、軸応力比 3 水準、コンクリート強度 3 水準の組合せの中で、計 13 体の試験体を対象とする。この解析対象の実験結果の一部(アンカー径 D13 のシリーズ 3 体)は文献<sup>2)</sup>で既に報告しており、その他の試験体の実験結果に関しては今後報告する予定である。

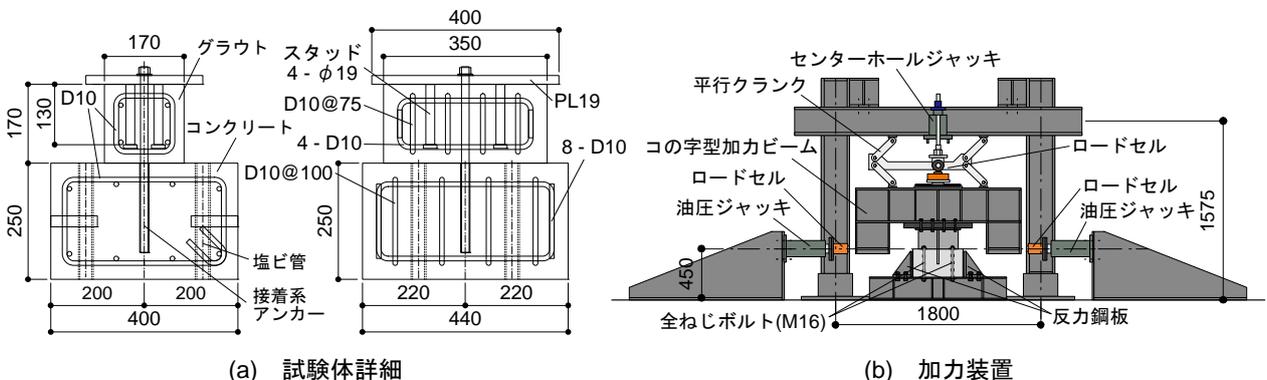


図-1 対象実験概要

\*1 東京工業大学環境・社会理工学院建築学系 大学院生 / 日本学術振興会特別研究員(DC1) (学生会員)

\*2 東京工業大学環境・社会理工学院建築学系 教授 工学博士 (正会員)

\*3 室蘭工業大学大学院工学研究科くらし環境系領域 准教授 博士(工学) (正会員)

\*4 千葉大学大学院工学研究院 助教 博士(工学) (正会員)

表-1 試験体パラメータと材料の諸元

試験体名	アンカー径	軸応力比 引張を正 で表す	コンクリート 設計基準強度 $F_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	コンクリート 圧縮強度 $\sigma_B$ [N/mm <sup>2</sup> ]	コンクリート 引張強度 $\sigma_t$ [N/mm <sup>2</sup> ]	コンクリート ヤング係数 $E_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	グラウト 圧縮強度 $\sigma_{Gc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	グラウト 引張強度 $\sigma_{Gt}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	グラウト ヤング係数 $E_G$ [N/mm <sup>2</sup> ]	アンカーボルト 降伏強度 $\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	アンカーボルト ヤング係数 $E_s$ [N/mm <sup>2</sup> ]
D13-0-15	D13	0	15.0	19.0	1.93	$23.7 \times 10^3$	59.1	3.30	$23.4 \times 10^3$	375	$193 \times 10^3$
D13-0.33T-15		0.33									
D13-0.66T-15		0.66									
D16-0-9	D16	0	9.0	12.5	1.43	$18.1 \times 10^3$	70.7	3.00	$24.6 \times 10^3$	396	$194 \times 10^3$
D16-0-15			15.0	19.0	1.93	$23.7 \times 10^3$	59.1	3.30	$23.4 \times 10^3$		
D16-0-21			21.0	30.5		$25.9 \times 10^3$	70.7	3.00	$24.6 \times 10^3$		
D16-0.33T-15		0.33	15.0	19.0	$23.7 \times 10^3$	59.1	3.30	$23.4 \times 10^3$			
D16-0.56T-9		0.56	9.0	12.5	1.43	$18.1 \times 10^3$	70.7	3.00	$24.6 \times 10^3$		
D16-0.56T-15			15.0	17.4	1.46	$19.8 \times 10^3$					
D16-0.56T-21			21.0	30.5	1.93	$25.9 \times 10^3$					
D19-0-15	D19	0	15.0	19.0	1.93	$23.7 \times 10^3$	59.1	3.30	$23.4 \times 10^3$	402	$189 \times 10^3$
D19-0.33T-15		0.33		21.1		$22.6 \times 10^3$	72.6	3.28			
D19-0.66T-15		0.66		19.0		$23.7 \times 10^3$	59.1	3.30			

※軸応力比：アンカーボルトの降伏強度に対する引張応力度の比

### 3. 解析概要

#### 3.1 解析モデル概要

解析には汎用非線形 FEM 解析プログラム<sup>3)</sup>を使用した。解析モデル概要を図-2に示す。

対称性を利用し、加力軸を通る鉛直面に対して半分をモデル化した。切断面では Y 方向並進のみを拘束、コンクリート下面では全自由度を拘束し、グラウト上面および加力フレームは平行を保持させた。コンクリートの Y-Z 平面の両端は X 方向並進のみを拘束した。そして、X 方向の支点反力の総和を 2 倍してせん断力とした。

コンクリートおよびグラウト、アンカーボルトは六面体要素でモデル化し、それらには付着特性および接着剤の特性、接合面の特性を考慮した接合要素を挿入した。また、補強鉄筋は拘束コンクリートおよび拘束グラウト要素内の分布鉄筋としてモデル化した。

载荷に関しては、大きな剛性を持つ梁要素でモデル化した加力フレーム左右の加力点に強制変位を与え、引張力はアンカーボルト上端に初期応力度として与えた。

#### 3.2 材料構成則

##### 3.2.1 コンクリートおよびグラウト

コンクリートおよびグラウトの材料構成則を図-3に示す。圧縮強度までは修正 Ahmad モデル<sup>4)</sup>を用い、圧縮軟化域の特性は破壊エネルギーに基づく Nakamura-Higai モデル<sup>5)</sup>を用いた。また、三軸応力下の破壊条件は Willam-Warnke の 5 パラメータモデルに大沼らの係数<sup>4)</sup>を用いた。一方、引張側は引張強度までは線形と仮定した。本解析モデルではアンカーボルトを六面体要素でモデル化し、後述するボンドリンク要素を用いた。また、補強鉄筋はコンクリート・グラウト要素内の分布鉄筋としてモデル化し、出雲モデル<sup>6)</sup>を用いてテンションステイフニングを考慮した。そのため、文献7)を参考にして、付着特性をダブルカウントしないように出雲モデルのパラメータ C は 1.0 とした。なお、ポアソン比は 0.2 とし、0.5 を上限として非線形ポアソン効果<sup>8)</sup>を考慮した。

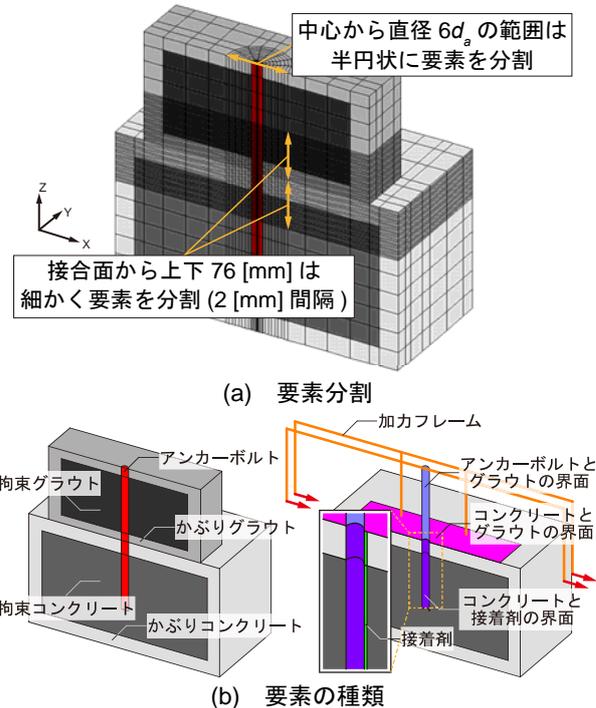


図-2 解析モデル概要

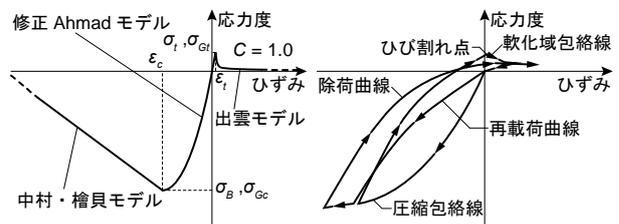


図-3 コンクリートおよびグラウトの材料構成則

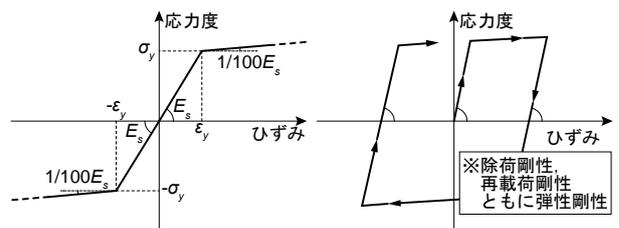


図-4 アンカーボルトおよび補強鉄筋の材料構成則

### 3.2.2 アンカーボルトおよび補強鉄筋

アンカーボルトおよび補強鉄筋の材料構成則を図-4に示す。圧縮側、引張側ともに Bi-linear モデルとし、降伏後の剛性は材料試験結果を基に  $1/100 E_s$  とした。また、アンカーボルトの多軸応力下の降伏条件には von Mises の降伏条件を用いた。なお、ポアソン比は 0.3 とした。

### 3.3 接合要素の特性

#### 3.3.1 コンクリートと接着剤およびアンカーボルトとグラウトの界面

せん断方向の特性を図-5(a)に示す。コンクリートと接着剤の界面は文献9)の本研究で対象としている実験の試験体と、同様の材料、施工方法で施工されたあと施工アンカーの付着性能実験を基に決定した。一方、アンカーボルトとグラウトの界面は文献10)のコンクリート-異形鉄筋間の付着性能実験の結果を参考にして決定した。

垂直方向の特性は、圧縮時には十分に大きな剛性を発揮し、引張時には応力度を伝達しないように設定した。

#### 3.3.2 アンカーボルトとコンクリートの界面(接着剤)

接着剤のモデル化概要を図-6に示す。既往の文献例え9)、10)では、注入式の接着系あと施工アンカーはコンクリートと接着剤の界面で付着すべりが生じる傾向があることが報告されている。そのため、コンクリートと接着剤の間に図-5(a)のコンクリート側の付着特性を挿入し、接着剤とアンカーボルトの間は剛接合とした。

接着剤のせん断方向の特性は、図-5(a)のコンクリート側の付着特性に既に考慮して含ませているため、ここでは図-7(a)のように十分に大きな剛性を持たせた。

接着剤の諸元<sup>2)</sup>を表-2に示す。本研究では、既存躯体のコンクリートを穿孔する径はアンカー径の1サイズ大きい径を想定しており、接着剤断面の厚さは1.5 [mm]となる。そこで、垂直方向の特性は Bi-linear 型を仮定し、表-2の接着剤の諸元と厚さ1.5 [mm]ということから、折れ点の座標を算出し、図-7(b)のようにモデル化した。

#### 3.3.3 コンクリートとグラウトの界面

コンクリートとグラウトの界面のせん断方向の特性を図-8(a)に示す。コンクリートとグラウトの接着によるせん断応力度は全体のせん断耐力に影響を及ぼさない程度に0.01 [N/mm<sup>2</sup>]とし、圧縮応力度が作用した際には摩擦による増大量を考慮した。摩擦係数 $\mu$ は、文献11)から接合面のせん断摩擦力と骨材の噛合いなどの機械的機構による「見かけのせん断摩擦係数」である0.974とした。

垂直方向の特性は図-8(b)に示す。圧縮時には十分に大きな剛性を持たせた。引張側も引張強度までは同様の剛性で、引張強度到達後は接合要素の接合が解かれ、垂直応力度、せん断応力度ともに零となるようにモデル化した。ここで、接合面の引張強度は文献12)から、コンクリートの引張強度 $\sigma_t$ に対して $\sigma_t/6$ とした。

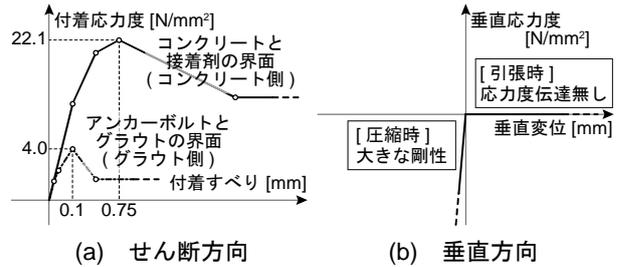


図-5 コンクリートと接着剤およびアンカーボルトとグラウトの界面の特性

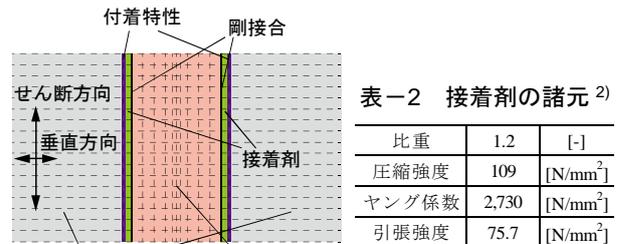


図-6 接着剤のモデル化概要

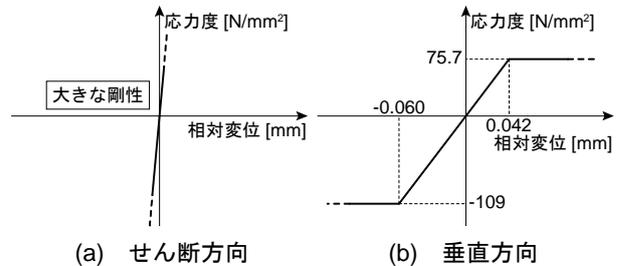


図-7 アンカーボルトとコンクリートの界面(接着剤)の特性

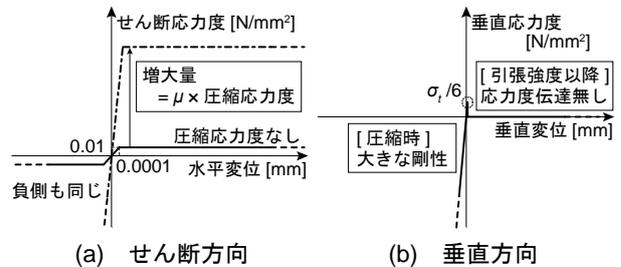


図-8 コンクリートとグラウトの界面の特性

## 4. 解析結果と考察

### 4.1 せん断力-相対水平変位関係

全13体の試験体のせん断力-相対水平変位関係の解析結果を、アンカー径とコンクリート強度の組合せ5種類で、種類ごとに実験結果と比較したものを図-9に示す。ここで、相対水平変位は文献2)の実験と同様にして、2箇所計測したコンクリートとグラウトの相対水平変位の平均値とした。

外側耐震改修マニュアルでは、あと施工アンカーの水平変形量は2.0 [mm]まで許容されており、本研究ではその2倍である4.0 [mm]までを解析の対象範囲とした。

せん断力-相対水平変位関係の解析結果から、一部を除き、実験結果に対して概ね良好な対応を示している。

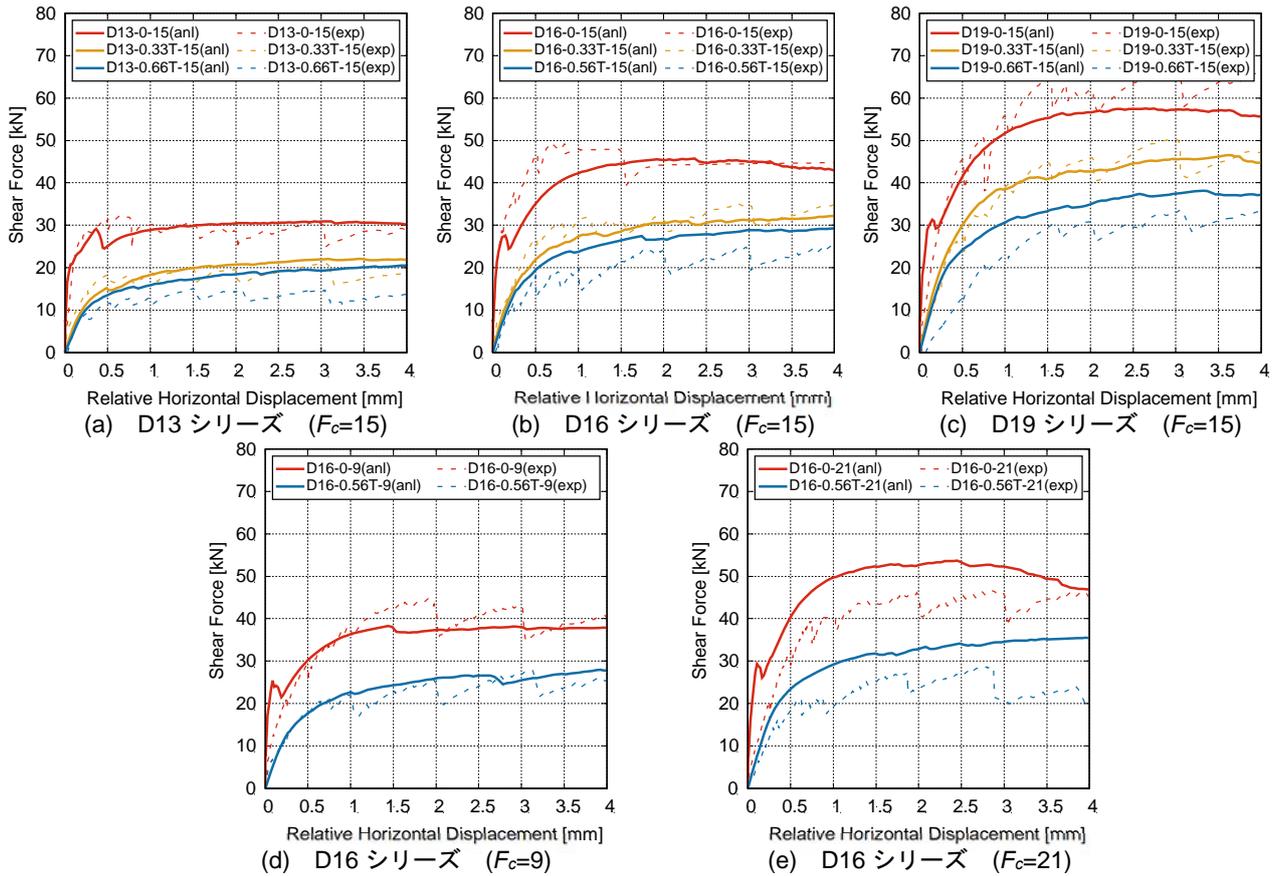


図-9 セン断力-相対水平変位関係

軸応力比で比較すると、せん断力のみを与えた試験体は引張力も与えた試験体に比べ解析結果、実験結果ともに初期剛性が大きい。これは接合面の摩擦によるせん断応力が作用しているためであると考えられる。また、図-9(a), (b), (c)中のそれぞれ引張力を与えた試験体2体の解析結果を比較すると、初期剛性は概ね等しく、相対水平変位 0.25 [mm]程度から次第に、軸応力比の増大に伴い剛性、せん断耐力ともに低下する傾向にある。一方、実験結果は軸応力比が大きい試験体で解析結果より初期剛性が小さい。これは本研究の解析モデルでは接着剤などの接合要素の特性を、せん断方向と垂直方向で独立にモデル化しており、例えば接着剤のせん断破壊による垂直方向の応力低下を再現できていないことなどが、解析の剛性およびせん断耐力が実験に対して大きくなった原因の一つであると考えられる。これに関しては、原因の追究やモデル化の方法を含め、今後の検討課題としたい。なお、引張力を与えた試験体ではそれぞれ所定の引張応力度をアンカーボルト上端に与えた時点で、接合面の離間が確認でき、接合面のせん断抵抗は生じていない。

次に、図-9(a), (b), (c)よりアンカー径で比較する。各アンカー径で、軸応力比が 0.33T の試験体のせん断耐力に対して、0.66T(0.56T)の試験体のせん断耐力が低下する割合を比較すると、D13 では 6%、D16 では 9%、D19 では 18%となり、アンカー径が大きいほど、軸応力比に

よるせん断耐力が低下する割合が大きい傾向がみられる。これはアンカー径が大きいほど、軸応力比が大きい場合に全断面が降伏せず、引張応力度が支配的になり、引張側断面が降伏する傾向にあるためであると考えられる。

最後に、図-9(b), (d), (e)よりコンクリート強度で比較すると、コンクリート強度による影響は実験結果ではほとんどみられない。一方、解析結果ではコンクリート強度が大きいほど剛性、耐力ともに上昇することが確認できる。これは、実験では解析に比べ施工誤差などにより、アンカーボルト周辺のコンクリートにひび割れが多く生じたことが原因の一つであると考えられるが、いずれにしても軸応力比やアンカー径が与える影響と比較すると小さい。このように実験、解析ともにコンクリート強度の影響が小さい傾向がみられるメカニズムについても現状では明らかではないため、今後の検討課題とする。

#### 4.2 コンクリートおよびグラウトの最小主応力度分布

相対水平変位 2.0 [mm]時のコンクリートおよびグラウトに作用する最小主応力度分布を図-10 に示す。ここでは、D16-0-15 を基本として、軸応力比、アンカー径、コンクリート強度による違いを比較するために、全 13 体の試験体のうち 7 体の解析結果を示す。

いずれの試験体も最小主応力度の最小値が生じているのは、グラウトがアンカーボルトと接触し支圧を受けている箇所であり、そこから放射状に立体的な応力度分布

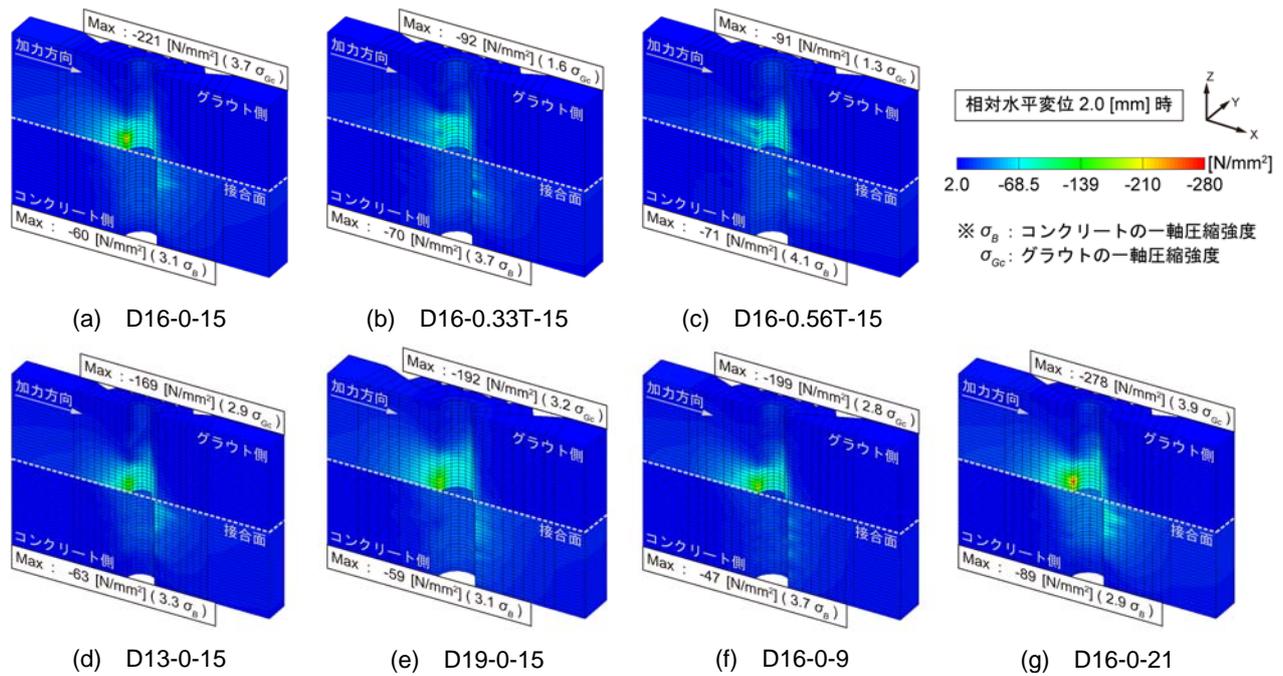


図-10 コンクリートおよびグラウトの最小主応力度分布

となっていることが確認できる。また、このようにアンカーボルトが局所的に変形する箇所では、多軸圧縮応力場となっていることが考えられ、グラウトの一軸圧縮強度  $\sigma_{Gc}$  と比較すると、せん断力のみを与えた試験体 D13-0-15, D16-0-15, D19-0-15, D16-0-9, D16-0-21 では、2.8～3.9 倍程度まで圧縮応力度の上昇が確認できる。一方、引張力を与えた試験体 D16-0.33T-15, D16-0.56T-15 では 1.3～1.6 倍程度まで上昇している。これは、アンカーボルトに引張力を与えたことで、アンカーボルト付近のグラウトに作用する Z 軸方向の圧縮応力度が低減され、多軸応力下におけるグラウトの拘束効果が低減したためであると考えられる。

図-10(a), (d), (e)を比較すると、いずれの試験体も応力度分布は放射状に立体的な分布であるものの、アンカー径が大きいほど広範囲で分布する傾向にある。これは、アンカー径が大きくなったことで、支圧面積が大きくなったためであると考えられる。

図-10(a), (f), (g)を比較すると、アンカー径が同じため最小主応力度の分布範囲は概ね等しい。しかし、コンクリート強度が大きくなるに従ってグラウト側の最小主応力度の最小値が小さくなる傾向にある。

#### 4.3 アンカーボルトの Mises 応力度分布

相対水平変位 2.0 [mm]時のアンカーボルトに作用する Mises 応力度分布を図-11 に示す。ここでは、アンカー径ごとに軸応力比で比較するため、全 13 体の試験体のうち 9 体の解析結果を示す。

これら 9 体の Mises 応力度分布の状態から、接合面付近でアンカーボルトの局所的な曲げ変形が生じており、ダボ効果が確認できる。なお、接合面位置を基準として

上下 30 [mm]の位置におけるアンカーボルトの材軸上の節点の水平方向の変形量から、すべての試験体においてダボ変形の中心は接合面位置ではなく、ややコンクリート側となる傾向がみられる。これは、コンクリート強度がグラウト強度に比べ小さいことにより、アンカーボルトのダボ変形の固定端位置がグラウト側に対して、コンクリート側は接合面から比較的深い位置となったためであると考えられる。また、ダボ変形の区間はアンカー径

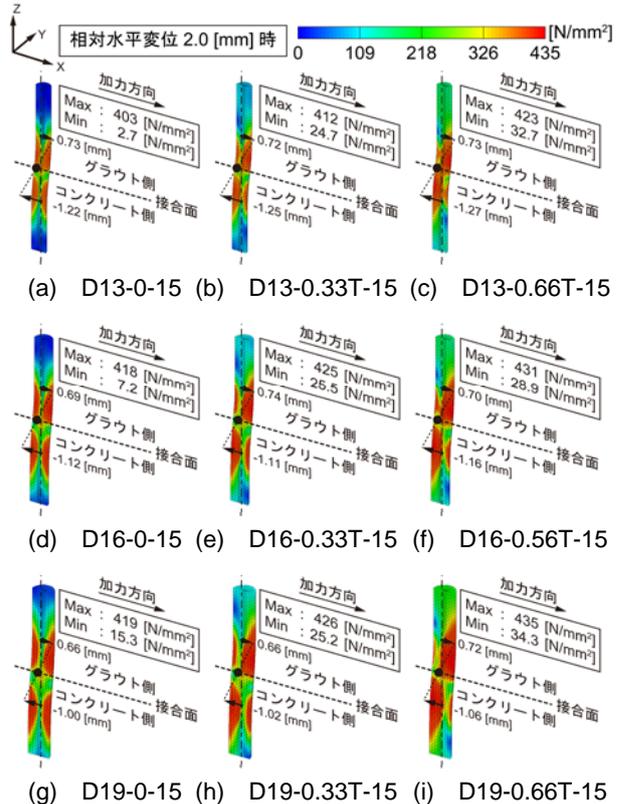


図-11 アンカーボルトの Mises 応力度分布

が大きくなるほど広範囲になる傾向にあり、Mises 応力度がアンカーボルトの降伏強度に達した範囲に着目すると、アンカー径  $d_a$  に対して、およそ  $4d_a \sim 5d_a$  となる。

せん断力のみを与えた試験体では、アンカーボルトがダボ変形した際に、材軸に対して圧縮側と引張側で対称に Mises 応力度が分布している。一方、引張力を与えた試験体では、引張力を与えたことにより引張側の Mises 応力度が増加する傾向にある。

また、それぞれの Mises 応力度の最大値に着目すると、アンカーボルトの降伏強度  $\sigma_y$  以上に増加しており、アンカー径、軸応力比が大きいほど増加する傾向がある。このことから、引張力を与えたことにより引張りひずみが増加したことで、アンカーボルトにはひずみ硬化域までひずみが生じていることが推察できる。

## 5. 結論

本研究では、複合応力下における接着系あと施工アンカーの実験<sup>2)</sup>を基に、3次元 FEM 解析モデルを構築し解析を行った。その結果から以下の知見を得た。

- (1) 既往の文献<sup>4)~12)</sup>によるコンクリートおよびグラウト、鋼材の材料構成則や接合要素の特性を用いて、3次元 FEM 解析モデルを構築した。その結果、外側耐震改修マニュアルで許容されている変形量の2倍である相対水平変位 4 [mm]までの変形域において、実験結果を概ね精度よく再現することができた。
- (2) せん断力-相対水平変位関係において、アンカーボルトのせん断特性は、アンカー径や軸応力比により大きく影響を受けるのに対し、コンクリート強度による影響は比較的小さい。この傾向は実験結果からも確認できており、試験体パラメータの違いによる影響も精度よく再現できた。
- (3) コンクリートおよびグラウトに作用する最小主応力度は、放射状の立体的な分布となることが確認できた。また、その範囲はアンカー径が大きくなるほど広範囲となり、最小主応力度は軸応力比が大きくなると引張応力度が作用することにより大きくなる。さらに、アンカー径が等しく、コンクリート強度が異なる場合は、最小主応力度の分布範囲は概ね等しいが、コンクリート強度が大きいほど、最小主応力度の最小値は小さくなり、せん断力は上昇する。
- (4) アンカーボルトの Mises 応力度分布からダボ効果を確認できた。また、Mises 応力度が降伏強度に達する範囲はアンカー径  $d_a$  により異なり、およそ  $4 \sim 5d_a$  の範囲であった。なお、その中心はややコンクリート側となる傾向がある。さらに、引張力を与えるほど Mises 応力度の上昇が確認でき、アンカーボルトのひずみ硬化による影響も顕著に生じた。

## 謝辞

本研究の解析モデルの構築にあたり、日本大学教授・長沼一洋博士、横浜国立大学教授・山田貴博博士より、貴重なご助言をいただきました。また、本研究は飛鳥建設株式会社からの技術協力を経て実施いたしました。

ここに記して深い謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 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，2002.9
- 2) 高瀬裕也，和田俊良，篠原保二：一定引張力を受けながら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，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.2，pp.1105-1110，2016.7
- 3) 伊藤忠テクノソリューションズ(株)：FINAL HELP
- 4) 長沼一洋：三軸圧縮下のコンクリートの応力～ひずみ関係，日本建築学会構造系論文集，No.474，pp.163-170，1995.8
- 5) Nakamura, H., Higai, T. : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar on Post-peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Load, JCI-C51E, Vol.2, pp.259-272, Oct.1999
- 6) 出雲淳一，島弘，岡村甫：面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル，コンクリート工学論文，Vol.25，No.87.9-1，pp.107-120，1987.9
- 7) 日本コンクリート工学会：コンクリートと補強材の付着挙動と付着構成則に関するシンポジウム委員会報告書・論文集，2011
- 8) 長沼一洋：非線形ポアソン効果を考慮した三軸応力下のコンクリートの直交異方性構成モデル，日本建築学会構造系論文集，No.485，pp.109-116，1996.7
- 9) 瀬戸口英恵，阿部隆英，高瀬裕也，佐藤眞一郎，高橋宗臣，佐藤貴志：湿式コアドリル工法によるあと施工アンカーの性能確認実験(その 2)注入式アンカーを用いた付着性能実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.149-150，2010.9
- 10) 中野克彦，松崎育弘，杉山智昭：接着系あと施工アンカーの基本平均付着強度に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.149-150，2009.8
- 11) 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，日本建築学会構造系論文集，No.508，pp.101-110，1998.6
- 12) 金亨俊，野口貴文，米田信年，濱崎仁：有限要素逆解析による補修モルタルと躯体コンクリートの付着構成則構築，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，pp.577-582，2008