

# 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

## 外付け耐震補強接合部の応力伝達メカニズムと力学的挙動に関する研究 その1

### 3D FEM ANALYSIS OF POST-INSTALLED ADHESIVE ANCHORS UNDER COMBINED STRESS

#### Stress transmission mechanism and mechanical behavior of the joints for external seismic retrofitting : Part 1

石田 雄太郎<sup>\*1</sup>, 坂田 弘安<sup>\*2</sup>, 高瀬 裕也<sup>\*3</sup>, 毎田 悠承<sup>\*4</sup>, 佐藤 匠<sup>\*5</sup>

Yutaro ISHIDA, Hiroyasu SAKATA, Yuya TAKASE,  
 Yusuke MAIDA and Takumi SATO

To investigate the mechanical behavior of post-installed adhesive anchors under combined stress, a 3D FEM model which can reproduce the experiment conducted in a previous research is established. A total of 13 specimens are modelled in accordance to the combination of parameters including anchor diameter,  $d_a$ , axial stress ratio,  $\eta$ , and concrete strength,  $F_c$ . The analysis results of the shear strength versus relative horizontal displacement relationship show good agreement with the experimental results. In addition, from the analysis results, the state of stress distribution near the joint is clarified.

**Keywords :** Post-installed anchor, Combined stress, 3D FEM analysis, Stress distribution, External seismic retrofitting

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耐震補強工法の一つである外付け耐震補強は、建物の現状の機能を維持しながら施工が可能であることから、採用される事例が多い。外付け耐震補強の構造的な特徴としては、Fig.1(a)のように既存架構と補強架構が偏心することが挙げられる。そのため、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。

これらに対して、接合部に実際に作用する各応力の分布や、一般的な接合要素であるあと施工アンカーの複合応力下における力学的挙動は詳細に把握できているとは言い難いのが現状である。そのため、「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>」では、Fig.1(b)のように各応力の分担を仮定しており、スパン長さ  $l$  において、中央部の  $0.6l$  でせん断力を平均的に負担させ、両端部の  $0.2l$  で圧縮・引張力を負担させることになっている。さらに、接合部のずれ変形を抑制するために、中央部  $0.6l$  に配置したあと施工アンカーのせん断耐力に工学的な判断に基づく低減係数を乗じて設計することになっている。これらより、十分なせん断耐力を確保するために、あと施工アンカーの必要施工本数が多大となり、設計・施工が困難となるケースもある。

このような背景から、外付け耐震補強接合部の応力伝達メカニズムを考慮した合理的な設計法を確立できれば、施工費用の削減、工期の短縮、鋼材や接着剤などの資源の節約が期待できる。そのため

にはまず、接着系あと施工アンカーなどの接合要素単体の複合応力下における力学的挙動を詳細に把握する必要がある。

既往の研究では、阿部・市橋ら<sup>2),3)</sup>による3次元 FEM 解析モデルを用いた接着系あと施工アンカーの引張特性およびせん断特性に関する研究などがあるが、せん断力と引張力の複合応力下を対象とした3次元 FEM 解析に関する研究は稀少である。

そこで本論文では、まず基礎的な検討として、複合応力下における接着系あと施工アンカーの既往の実験<sup>4),5)</sup>を対象に3次元 FEM 解析モデルを構築する。そしてその解析結果から、各パラメータが接着系あと施工アンカーのせん断特性に与える影響や、接合部近傍の応力度分布を明らかにすることを目的とする。

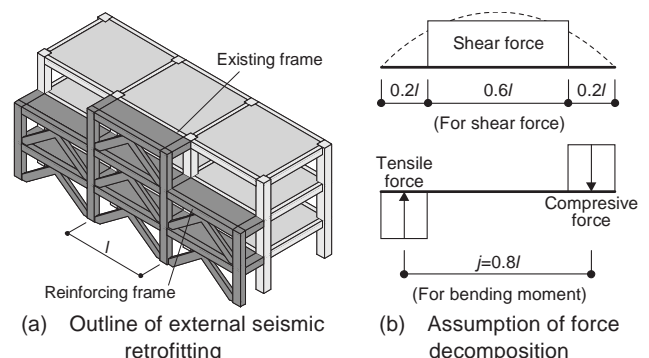


Fig.1 Force decomposition in current design method

<sup>\*1</sup> 東京工業大学環境・社会理工学院 博士後期課程・修士(工学) / 日本学術振興会 特別研究員 DC  
<sup>\*2</sup> 東京工業大学環境・社会理工学院 教授・工博  
<sup>\*3</sup> 室蘭工業大学大学院工学研究科 准教授・博士(工学)  
<sup>\*4</sup> 国立研究開発法人建築研究所 研究員・博士(工学)  
<sup>\*5</sup> 飛鳥建設株式会社

Grad. Student, Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Tech., M.Eng. / JSPS Research Fellow DC  
 Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Tech., Dr.Eng.  
 Assoc. Prof., College of Environmental Tech., Muroran Tech., Dr.Eng.  
 Research Engineer, Building Research Institute, Dr.Eng.  
 TOBISHIMA Corporation

## 2. 対象とする実験概要<sup>4),5)</sup>

本章では、解析対象とする実験の概要について述べる。詳細については文献4),5)を参照されたい。

### 2.1. 試験体詳細

試験体の詳細を Fig.2 に示す。試験体は外付け耐震補強における既存架構と新設架構の接合部を部分的に取り出し、実大で模擬した。製作に関しては、まず表面を金ゴテ仕上げとした既存コンクリートにエポキシ系注入式の接着系と施工アンカーを施工した。なお、既存コンクリートの穿孔には湿式コアドリルを用いた。その後、接合面にグリスを塗布し、新設部分の補強鉄筋と鋼板を設置して、グラウトを圧入した。ここで、鋼板にはせん断力を伝達するためのスタッドが溶接されている。また、中央部にはボルト孔を設けており、先に施工されたあと施工アンカーをナット締めすることで、引張力を直接与えられるように製作した。

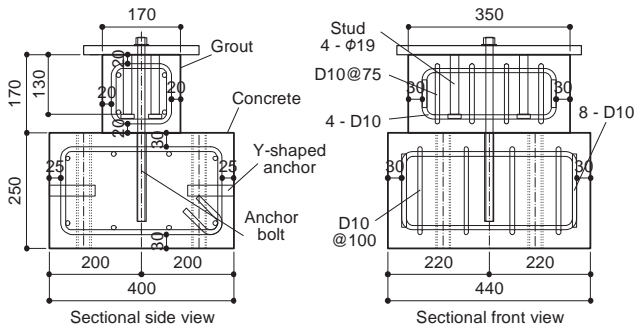


Fig.2 Details of specimens (unit : [mm])

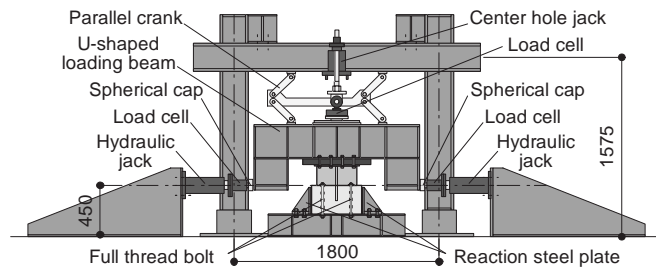


Fig.3 Loading setup (unit : [mm])

### 2.2. 載荷方法

載荷装置を Fig.3 に示す。平行クランクが取付けられたコの字型加力ビームを、接合面高さの左右水平方向にある油圧ジャッキが球座を介して押すことでせん断力を与えた。コの字型加力ビームと球座の間にはテフロンシートを用いることで、試験体の鉛直方向の変形を拘束せずに、引張力の一部も負担しないように配慮した。また、鉛直方向にセンターホールジャッキを取付け、載荷治具等の自重による影響を除去し、引張力を与える試験体ではさらに所定の引張軸力を与えながらせん断力を与えた。

### 2.3. 試験体パラメータ

試験体パラメータを Table 1、各材料の諸元を Table 2 に示す。既往の実験<sup>4),5)</sup>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体の実験を行なった。試験体名は前からアンカー径 $d_a$ 、軸応力比 $\eta$ 、コンクリート強度 $F_c$ を意味している。ここで、軸応力比とは Table 2 に示すアンカーボルトの降伏強度 $\sigma_y$ に対する引張応力度の比である。本研究においてもこの全13体の試験体を対象として解析を行なった。

Table 1 Parameters of specimen

Specimen	$d_a$ [mm]	$\eta$ [-]	$F_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]
D13-0-15	12.7 (D13)	0	15
D13-0.33T-15		0.33	
D13-0.66T-15		0.66	
D16-0-9	15.9 (D16)	0	9
D16-0-15			15
D16-0-21			21
D16-0.33T-15		0.33	15
D16-0.56T-9		0.56	9
D16-0.56T-15	15		
D16-0.56T-21		21	
D19-0-15	19.1 (D19)	0	15
D19-0.33T-15		0.33	
D19-0.66T-15		0.66	

$d_a$  : Anchor diameter

$\eta$  : Axial stress ratio (tensile force)

$F_c$  : Design strength of concrete

Table 2 Materials properties

Specimen	Concrete			Grout			Anchor bolt	
	$\sigma_B$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_t$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{Gc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{Gt}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_G$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_s$ [N/mm <sup>2</sup> ]
D13-0-15	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								
D13-0.66T-15								
D16-0-9	19.0	1.93	$23.7 \times 10^3$	59.1	3.30	$23.4 \times 10^3$	396	$194 \times 10^3$
D16-0-15								
D16-0-21								
D16-0.33T-15								
D16-0.56T-9								
D16-0.56T-15								
D16-0.56T-21								
D19-0-15								
D19-0.33T-15	1.93	$22.6 \times 10^3$	72.6	3.28	$23.4 \times 10^3$	402	$189 \times 10^3$	
D19-0.66T-15								

$\sigma_B$  : Compressive strength of concrete

$\sigma_t$  : Tensile strength of concrete

$E_c$  : Young's modulus of concrete

$\sigma_{Gc}$  : Compressive strength of grout

$\sigma_{Gt}$  : Tensile strength of grout

$E_G$  : Young's modulus of grout

$\sigma_y$  : Yield strength of anchor bolt

$E_s$  : Young's modulus of anchor bolt

### 3. FEM 解析モデルの構築

#### 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>6)</sup>を使用した。本解析では対称性を利用して、Fig.4 に示すように加力軸を通る鉛直面に対し半分をモデル化した。

コンクリートおよびグラウト、アンカーボルトは 8 節点アイソパラメトリック立体要素(以下、六面体要素)でモデル化した。これらの六面体要素の界面上には同一座標上に節点を別に設け、それぞれの界面の特性を考慮した 8 節点アイソパラメトリック接合要素(以下、接合要素)を Fig.5 のように挿入した。また、接着材は厚みを持たせた接合要素としてモデル化し、補強鉄筋は拘束コンクリート、拘束グラウト要素内の分散鉄筋として考慮した。

本解析で対象とするような試験体では、接合面付近においてアンカーボルトにはせん断応力に加え、Fig.6 のように局所的な曲げ応力が作用し、さらにコンクリートおよびグラウトには支圧応力が作用する。本論文ではこのアンカーボルトのせん断抵抗機構をダボ効果、アンカーボルトの変形をダボ変形と呼称する。また、アンカーボルトには曲げモーメントが収束するまで反曲点が複数生じる。そのうち、接合面に最も近い反曲点をダボ変形の中心と定義する。

本解析のアンカーボルトのように、局所的な曲げモーメントを六面体要素が受ける場合、要素単体は曲げ変形を追随できず、本来生じないはずのせん断ひずみが生じる現象、いわゆるストレスロッキングにより剛性を過大に評価する恐れがある。そのため予備解析を行い、接合面から Z 方向にそれぞれ  $4d_a$  の範囲でひずみ勾配が大きくなることを確認した。よって本解析モデルでは、最も径が大きい D19 のシリーズに合わせて、Fig.7 に示すように接合面からそれぞれ 76mm の要素分割を 2mm 間隔として細かく分割した。

#### 3.2. 解析条件

境界条件を Fig.8 に示す。切断面の全節点は Y 方向並進のみ拘束し、コンクリート下面の全節点は全自由度を拘束した。また、グラウト上面およびコの字型加力ビームは Z 方向に平行を保持させた。コンクリート両端 Y-Z 平面上の全節点は X 方向並進のみ拘束した。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。

载荷に関しては、大きな剛性を有する梁要素でモデル化したコの字型加力ビーム左右の加力点に X 方向の強制変位を与えた。本研究では、まず各試験体のせん断力  $Q$ —相対水平変位  $\delta_h$  関係の包絡線を解析で再現するために単調载荷とした。また、引張力はアンカーボルト上端の要素に初期応力度として与えた。

解析結果で評価する相対水平変位  $\delta_h$  は、実験に対応させて Fig.9 に示す 2 箇所の相対水平変位を抽出し、その平均値を用いた。

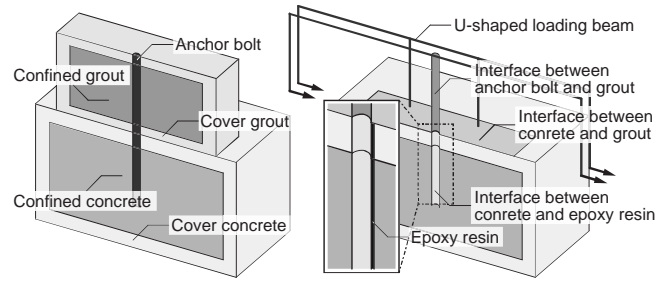


Fig.4 Outline of FEM model

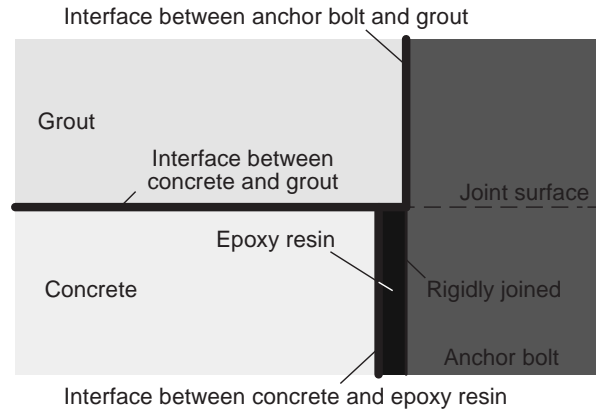


Fig.5 Modeling of joint element

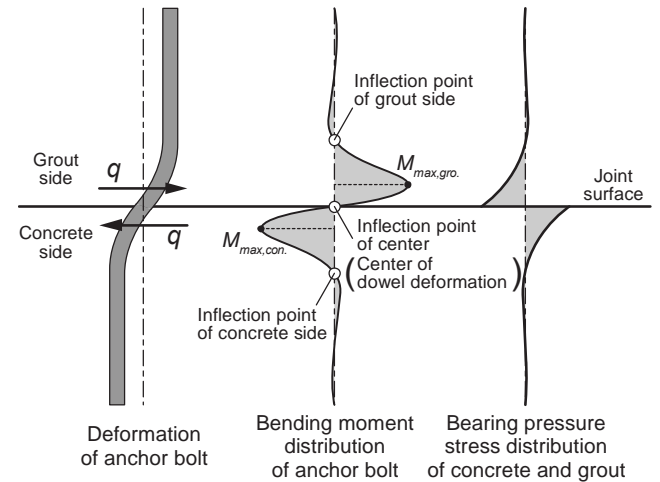


Fig.6 Definition of dowel effect

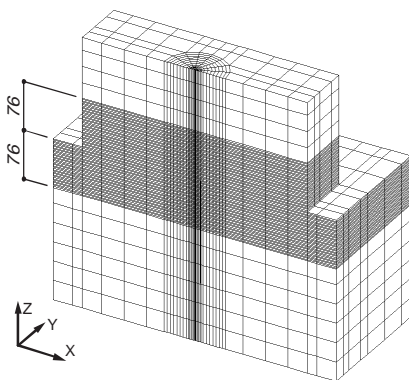


Fig.7 Mesh of FEM model

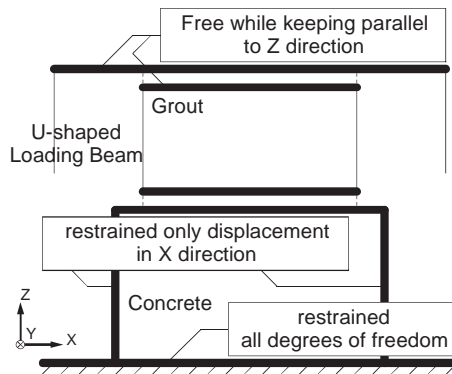


Fig.8 Boundary conditions

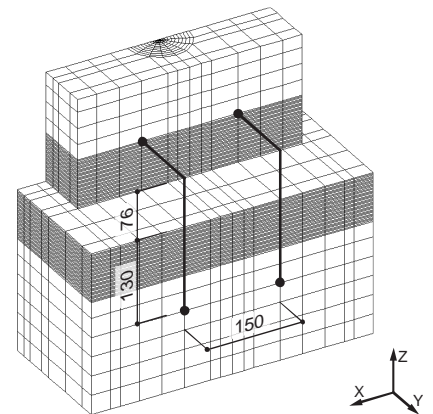


Fig.9 Measurement points

### 3.3. 材料構成則

#### 3.3.1. 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 Fig.10 に示す。圧縮側の特性は、圧縮強度までは修正 Ahmad モデル<sup>7)</sup>を用い、圧縮強度到達後の軟化域には破壊エネルギーに基づく Nakamura-Higai モデル<sup>8)</sup>を用いた。また、三軸応力下の破壊条件は William-Warnke の 5 パラメータモデルに大沼らの係数<sup>9)</sup>を用いた。一方、引張側の特性は引張強度まで線形と仮定した。前述のとおり、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、後述する接合要素を用いて付着特性を考慮した。また、試験体内部の補強鉄筋を拘束コンクリートおよび拘束グラウト要素内の分散鉄筋としてモデル化し、出雲モデル<sup>10)</sup>を用いてテンションスティフニングを考慮した。そのため、文献 11) 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。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>12)</sup>を考慮した。

#### 3.3.2. 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 Fig.11 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の結果をもとに弾性剛性  $E_s$  に対して  $1/100E_s$  とした。また、六面体要素でモデル化し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。

補強鉄筋は  $\sigma_y=295\text{N/mm}^2$ 、 $E_s=205,000\text{N/mm}^2$  とし、拘束コンクリート要素および拘束グラウト要素に対して、各方向の鉄筋比の情報を与えることにより、分散鉄筋として考慮している。

### 3.4. 接合要素の特性

#### 3.4.1. コンクリート-接着材界面

コンクリートと接着材の界面のせん断方向の特性は、文献 13) の本研究で対象としている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もとに、Fig.12(a)のように決定した。なお、本特性は加力方向に対して直交方向の特性であるため、全体の挙動に対する摩擦の影響は小さいと判断し、考慮していない。後述する 3.4.2~3.4.3 項の接合要素についても同様である。

垂直方向の特性は Fig.12(b) に示すように、圧縮時には十分に大きな剛性を有し、引張時には応力度を伝達しないように設定した。

既往の文献<sup>例え 14)</sup>では、注入式の接着系あと施工アンカーを用いた場合、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、本解析では Fig.5 に示すようにコンクリートと接着剤の界面に本接合要素を挿入した。

接合要素の多点折線モデルと完全弾塑性モデルの履歴特性を Fig.13 に示す。履歴特性はせん断方向、垂直方向ともに共通であり、後述する各接合要素についても同様の履歴特性を与えている。

#### 3.4.2. 接着剤

接着剤のせん断方向の特性は Fig.12(a)の特性で既に考慮しているため、ここでは Fig.14(a)のように十分に大きな剛性を持たせた。そして、アンカーボルト-接着剤界面は剛接合とした。

接着剤の諸元<sup>5)</sup>を Table 3 に示す。本研究では、既存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いるため、接着剤断面の厚さはおよそ 1.5mm となる。垂直方向の特性は Bi-linear 型を仮定し、Table 3 の接着剤の諸元と厚さ 1.5mm という条件から、Fig.14(b)のように折点の座標を算出した。

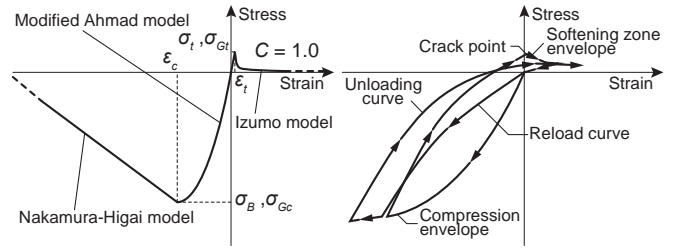


Fig.10 Material constitutive laws (concrete and grout)

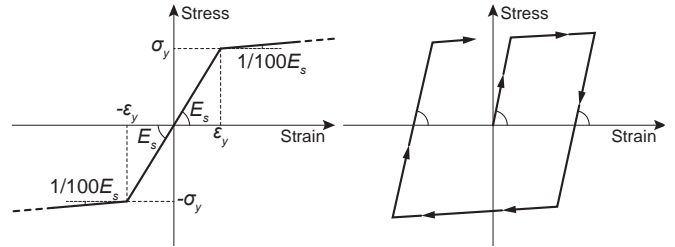


Fig.11 Material constitutive laws (anchor bolt and reinforcements)

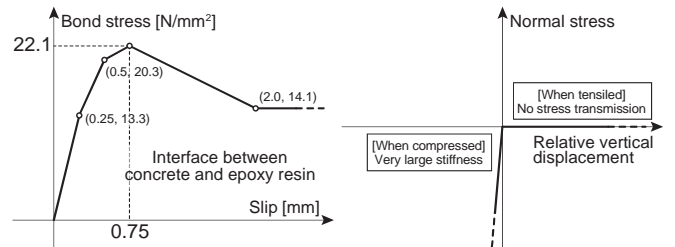


Fig.12 Characteristics of joint element (Interface between concrete and epoxy resin)

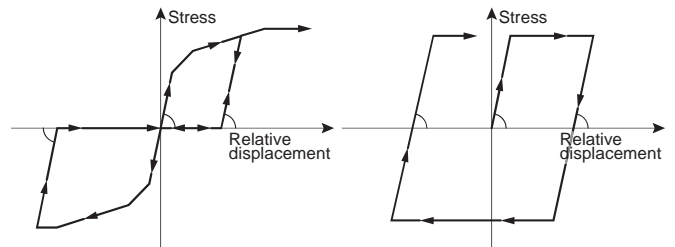


Fig.13 Hysteretical characteristics of joint element

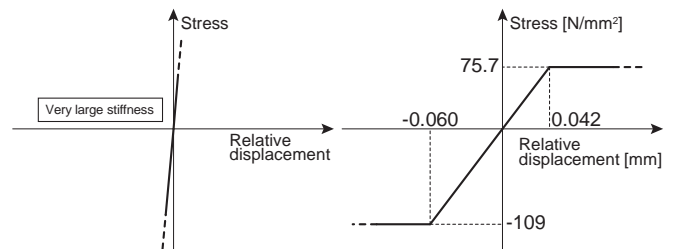


Fig.14 Characteristics of joint element (Epoxy resin between concrete and anchor bolt)

$d_b$	$\sigma_{bc}$	$\sigma_{bt}$	$E_b$
[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
1.2	109	75.7	2,730

$d_b$  : Specific gravity

$\sigma_{bt}$  : Tensile strength

$\sigma_{bc}$  : Compressive strength

$E_b$  : Young's modulus

### 3.4.3. アンカーボルトーグラウト界面

アンカーボルトとグラウトの界面のせん断方向の特性は、文献 14) の異形鉄筋ーコンクリート間の付着性能実験の結果を参考にして Fig.15(a)のように決定した。

垂直方向の特性は、コンクリートー接着剤界面と同様に Fig.15(b)のようにモデル化した。

### 3.4.4. コンクリートーグラウト界面

コンクリートとグラウトの界面のせん断方向の特性を Fig.16(a)に示す。コンクリートとグラウトの固着は全体のせん断耐力に影響を及ぼさないように  $0.01\text{N/mm}^2$  とし、圧縮応力度が作用した際には摩擦の影響を考慮した。摩擦係数  $\mu$  は文献 15)を参考に、接合面の表面粗さによる影響を考慮して  $0.974$  とした。

垂直方向の特性を Fig.16(b)に示す。圧縮側の特性には十分に大きな剛性を持たせた。引張側の特性は、接合面の引張強度までは同様の剛性で、引張強度到達後は接合が解かれ、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 16)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。

## 4. 解析結果と考察

### 4.1. 実験結果との対応

全 13 体の試験体のせん断力  $Q$ ー相対水平変位  $\delta_h$  関係の解析結果を Fig.17 に示す。外側耐震改修マニュアル<sup>リ</sup>では、あと施工アンカーの水平変形量は  $2.0\text{mm}$  以下となるように制限されている。本研究

ではその 2 倍である  $\delta_h=4.0\text{mm}$  までを解析の対象範囲とした。

$Q$ ー $\delta_h$  関係の解析結果より、一部の試験体を除き、実験結果に対して概ね良好な対応を示していることが確認できる。

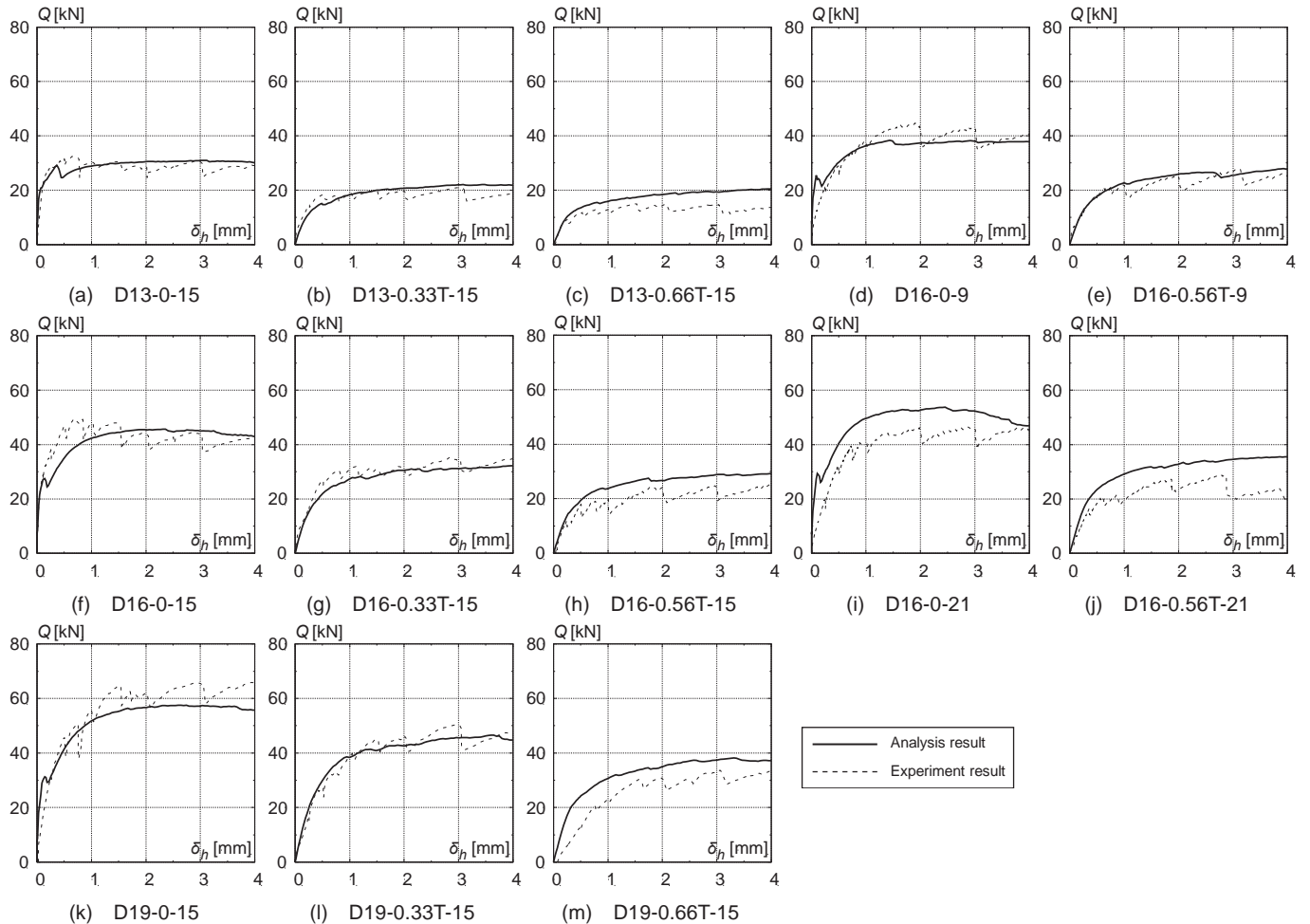
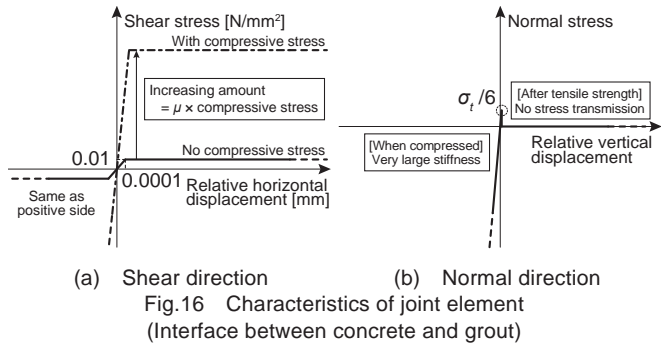
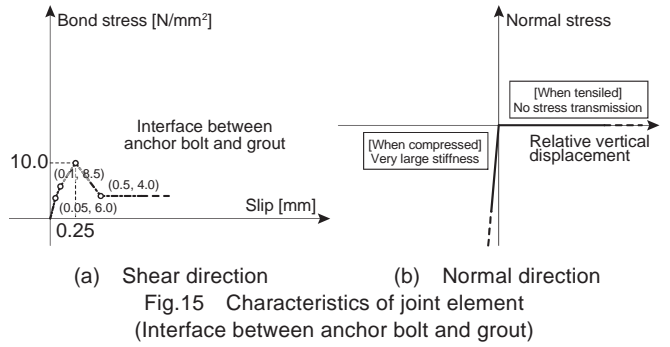


Fig.17 Shear force vs. relative horizontal displacement

## 4.2. 各パラメータによる比較

### 4.2.1. 軸応力比 $\eta$ による比較

$Q-\delta_h$  関係を軸応力比で比較したものを Fig.18 に示す。  $\eta=0$  の試験体は  $\eta=0.33T, 0.66T(0.56T)$  の試験体に比べ、解析結果、実験結果ともに  $\delta_h=1.0\text{mm}$  までの範囲において剛性が大きい。  $\eta=0$  シリーズの接合面では、接合面の表面粗さによるせん断応力が作用することで、  $\delta_h=1.0\text{mm}$  までの剛性が大きくなると考えられる。 また、  $\eta=0$  シリーズの解析結果において最大耐力に到達する以前に耐力が低下していることが確認できる。 これは 3.4.4 項で示した接合面の接合要素が部分的に引張強度に達し、応力度を喪失したためである。

Fig.18(a),(b),(c)の各グラフで、  $\eta=0.33T, 0.66T(0.56T)$  の試験体 2 体の解析結果を比較すると、  $\delta_h=0.25\text{mm}$  までの剛性は概ね等しい。 しかし、  $\delta_h=0.25\text{mm}$  から軸応力比の増大に伴い剛性が低下し、せん断耐力が小さくなる傾向にある。 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に与えた時点で接合面が離間しており、接合面のせん断抵抗は生じていない。

### 4.2.2. アンカー径 $d_a$ による比較

アンカー径で比較したものを Fig.19 に示す。せん断力のみを与えたシリーズ Fig.19(a)では、実験結果、解析結果ともに  $\delta_h=0.1\text{mm}$  までの範囲において、剛性がアンカー径によらず概ね等しい。これは前述したように接合面のせん断抵抗によるものであると考えられる。また、せん断耐力はアンカー径が大きいほど上昇し、解析結果では  $\delta_h=2.0\text{mm}$  程度でせん断耐力に到達する。一方、せん断力と引張力を与えたシリーズ Fig.19(b),(c)では実験結果、解析結果ともに载荷初期から剛性が異なり、同様にアンカー径の増大に伴ってせん断耐力が上昇する傾向がみられる。

### 4.2.3. コンクリート強度 $F_c$ による比較

アンカー径が D16 のシリーズのうち、軸応力比が 0 と 0.56T の試験体でコンクリート強度により比較したものを Fig.20 に示す。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。解析結果においても、前述の軸応力比やアンカー径がせん断特性に与える影響と比較するとコンクリート強度による影響は小さいことが確認でき、大まかな傾向は再現できている。しかし、解析結果では  $\delta_h=0.25\sim 1.0\text{mm}$  の範囲において、コンクリート強度の増大に伴い剛性が大きくなる傾向があり、せん断耐力に差が生じている。

このように、実験、解析ともにコンクリート強度による影響が小さくなるメカニズムについては、実験結果と解析結果で差が生じた原因の追究も含めて今後の課題としたい。

## 4.3. アンカーボルトの曲率分布

Fig.21 に解析結果によるアンカーボルトの曲率分布を示す。ここでは、軸応力比、アンカー径、コンクリート強度による影響を比較するために、D16-0-15 を基本として全 13 体のうち 7 体の解析結果を示す。曲率  $\phi$  は式(1)より算出した。

$$\phi = (\varepsilon_L - \varepsilon_R) / d_a \quad (1)$$

ここに、 $\phi$  は曲率 [ $\mu/\text{mm}$ ]、 $\varepsilon_L, \varepsilon_R$  はアンカーボルト断面における最外縁の要素の軸ひずみ [ $\mu$ ]、 $d_a$  はアンカー径 [ $\text{mm}$ ] である。

$\varepsilon_L, \varepsilon_R$  は接合面からコンクリート側、グラウト側ともに  $1\sim 4d_a$  の各点で抽出し、曲率  $\phi$  を算出した。図中にはコンクリート側およびグラウト側それぞれの曲率の最大値も併せて示している。さらに、 $\varepsilon_L$

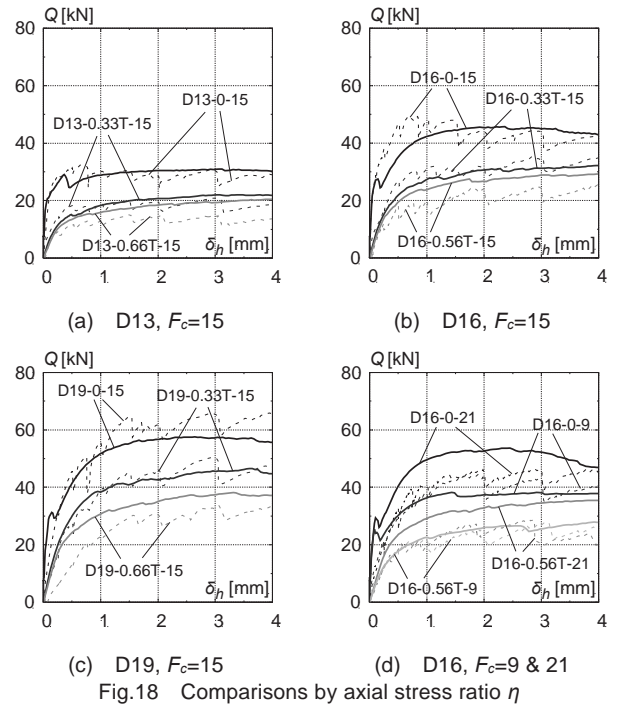


Fig.18 Comparisons by axial stress ratio  $\eta$

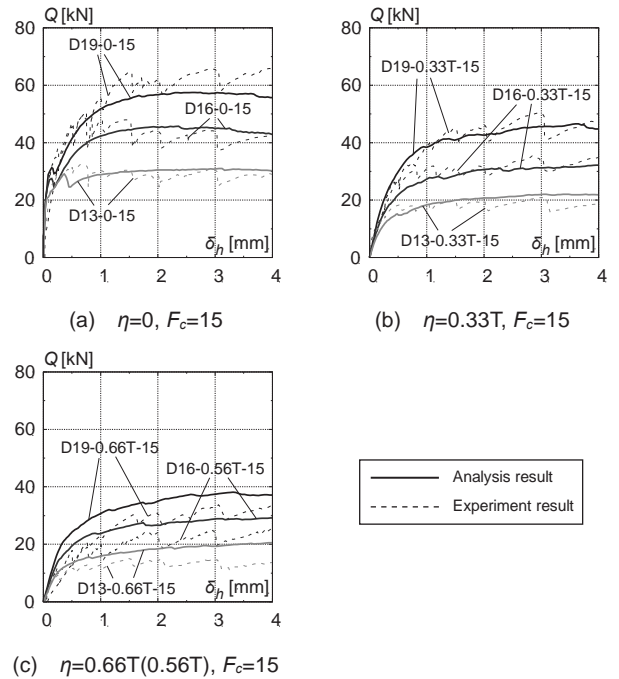


Fig.19 Comparisons by anchor diameter  $d_a$

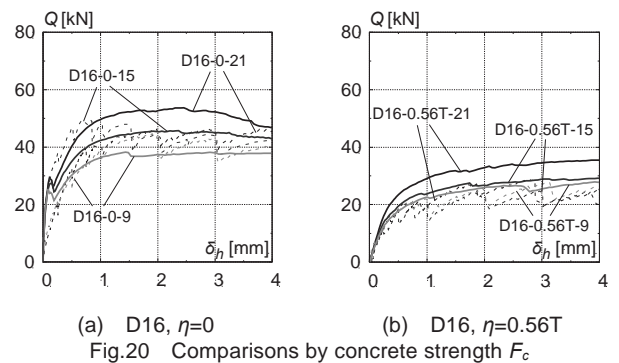


Fig.20 Comparisons by concrete strength  $F_c$

と  $\varepsilon_R$  のいずれかが降伏ひずみ  $\varepsilon_y$  に達したときの曲率  $\phi_y$  を式(2), (3)より算出し、図中に示している。引張力を与えた試験体では、式(3)のように引張応力度導入時の軸ひずみ  $\varepsilon_N$  を考慮し、 $\phi_y$  を算出した。

$$\phi_y = \frac{2\varepsilon_y}{d_a} \quad (\eta=0 \text{ の場合}) \quad (2)$$

$$\phi_y = \frac{2(\varepsilon_y - \varepsilon_N)}{d_a} \quad (\eta>0 \text{ の場合}) \quad (3)$$

ここに、 $\phi_y$  は  $\varepsilon_L$  と  $\varepsilon_R$  のいずれかが  $\varepsilon_y$  に達したときの曲率[ $\mu/\text{mm}$ ]、 $\varepsilon_y$  は降伏ひずみ(= $\sigma_y/E_s$ )[ $\mu$ ]、 $d_a$  はアンカー径[mm]、 $\varepsilon_N$  は引張応力度導入時の軸ひずみ[ $\mu$ ]である。

いずれの試験体においても  $\delta_h=0.5\text{mm}$  時にコンクリート側  $2d_a$  とグラウト側  $1d_a$  の位置で  $\phi_y$  に達している。実験結果<sup>4)</sup>でも  $\delta_h=0.5\sim 0.75\text{mm}$  で貼付したいずれかのひずみゲージが降伏ひずみに達していることから、実験結果と整合がとれている。

曲率の最大値に着目すると、いずれの試験体も接合面からコンクリート側は  $2d_a$ 、グラウト側は  $1d_a$  の位置で最大となる。また、 $\delta_h=2.0\text{mm}$  時における曲率分布をみると、コンクリート側  $3d_a$  からグラウト側  $2d_a$  までの各点で  $\phi_y$  に達しており、 $5d_a$  の範囲で降伏していることがわかる。さらに、反曲点の位置からダボ変形の中心は接合面よりコンクリート側となる傾向があり、これはコンクリート強度がグラウトの圧縮強度よりも小さいためであると考えられる。そのため、コンクリート強度が大きく、グラウトの圧縮強度との差が小さい D16-0-21 ではダボ変形の中心は接合面に近くなる。

各パラメータにより比較すると、コンクリート強度が大きくなるとコンクリートの支圧応力が上昇するため、コンクリート側  $1d_a$  の位置の曲率が増加し、グラウト側の曲率の最大値も増加する。また、アンカー径が大きくなると曲率は全体的に小さくなり、曲げ変形が抑制される。なお、軸応力比による顕著な差はみられない。

#### 4.4. アンカーボルトの Mises 応力度分布

$\delta_h=2.0\text{mm}$  時にアンカーボルトに作用する Mises 応力度分布を Fig.22 に示す。ここでは、アンカー径ごとに軸応力比による影響を比較するため、全 13 体の試験体のうち 9 体の解析結果を示す。

後述する 4.5 節および 4.6 節を含め、 $\delta_h=2.0\text{mm}$  時における部材内部の損傷状況や応力状態を比較することで、各パラメータがアンカーボルトのせん断抵抗性能に与える影響を考察する。 $\delta_h=2.0\text{mm}$  時を主な考察対象としたのは、 $\eta=0$  の試験体シリーズの解析結果が  $\delta_h=2.0\text{mm}$  付近でせん断耐力に達しているためである。

9 体の Mises 応力度分布の状態をみると、接合面付近でアンカーボルトに局所的な曲げ変形が生じており、ダボ効果が確認できる。

せん断力のみを与えた試験体シリーズでは、ダボ変形した際にアンカーボルトの材軸に対して Mises 応力度が対称に分布している。一方、せん断力と引張力を与えた試験体シリーズでは、引張力を与えることで引張側の Mises 応力度が上昇する傾向にある。つまり、軸応力比の増大に伴いアンカーボルトの断面内では引張応力度が上昇し支配的になるため、早期に降伏する。したがって、アンカーボルトの断面内に生じるせん断応力度が減少し、せん断力のみを与えた試験体に比べ、せん断耐力が低下する。この傾向は  $\delta_h=0.5, 1.0, 1.5\text{mm}$  時においても同様に確認できた。

#### 4.5. 解析による損傷状況

$\delta_h=2.0\text{mm}$  時における接合面付近のコンクリートの損傷状況を Fig.23 に示す。ここでも、4.3 節と同様に D16-0-15 を基本として各パラメータにより比較するために、全 13 体のうち 7 体の解析結果を示す。図中にはひび割れに加え、コンクリートの圧縮強度に到達した「圧縮軟化要素」と圧縮軟化を経験した「圧縮軟化経験要素」を併せて示す。ここで、本解析は単調載荷にも関わらず圧縮軟化経験要素が生じるのは、圧縮強度に達した圧縮軟化要素が応力再配分

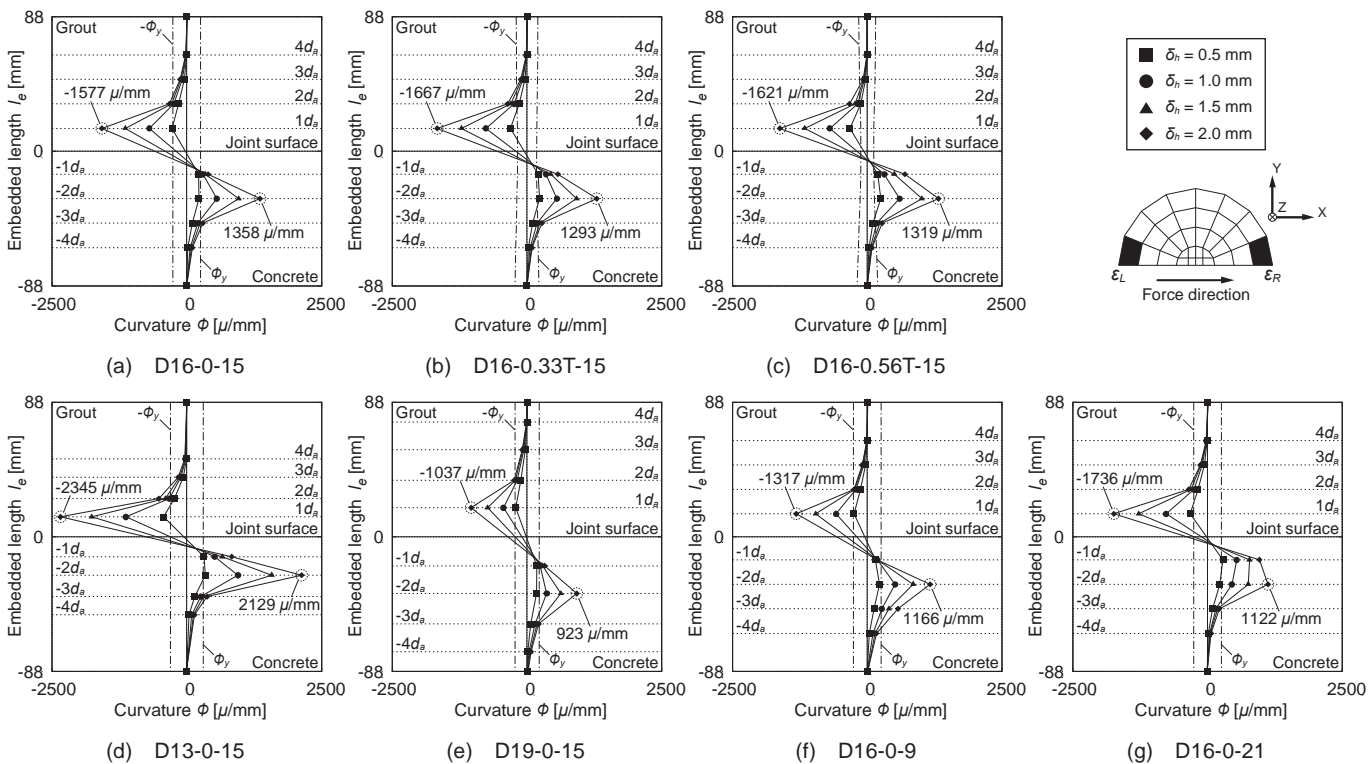


Fig.21 Curvature distributions of anchor bolt

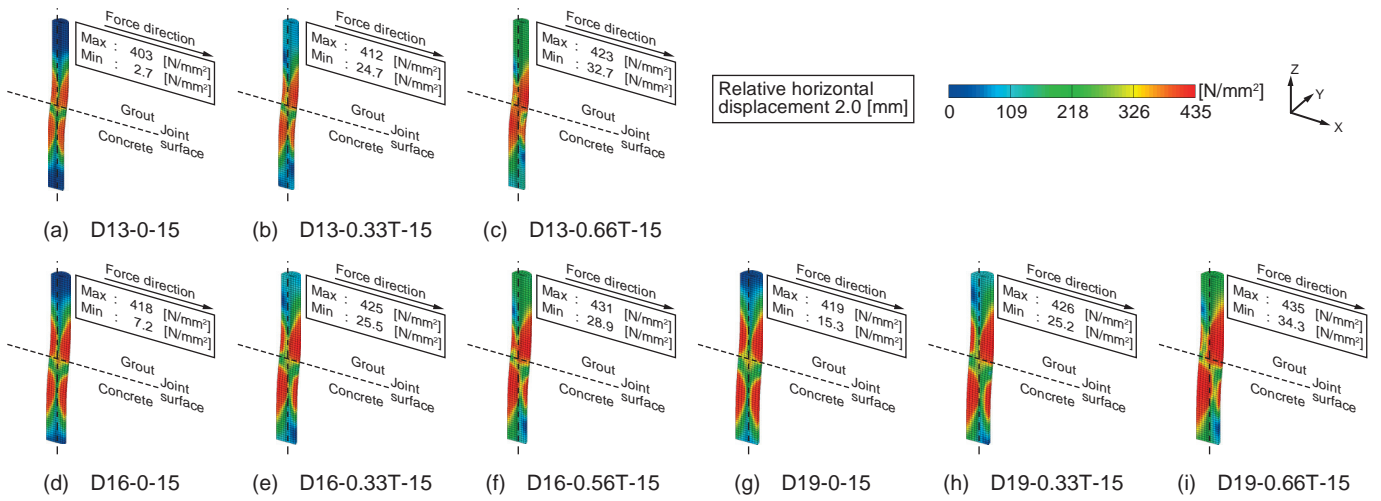


Fig.22 Mises stress distributions of anchor bolt

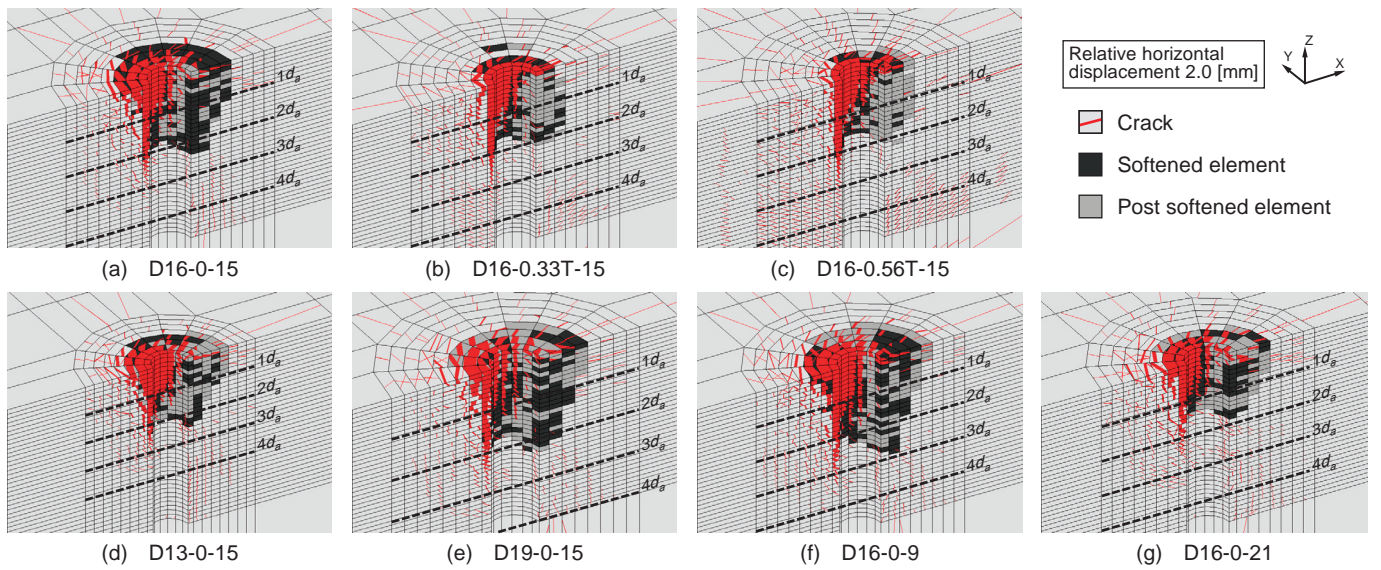


Fig.23 Damages states of concrete

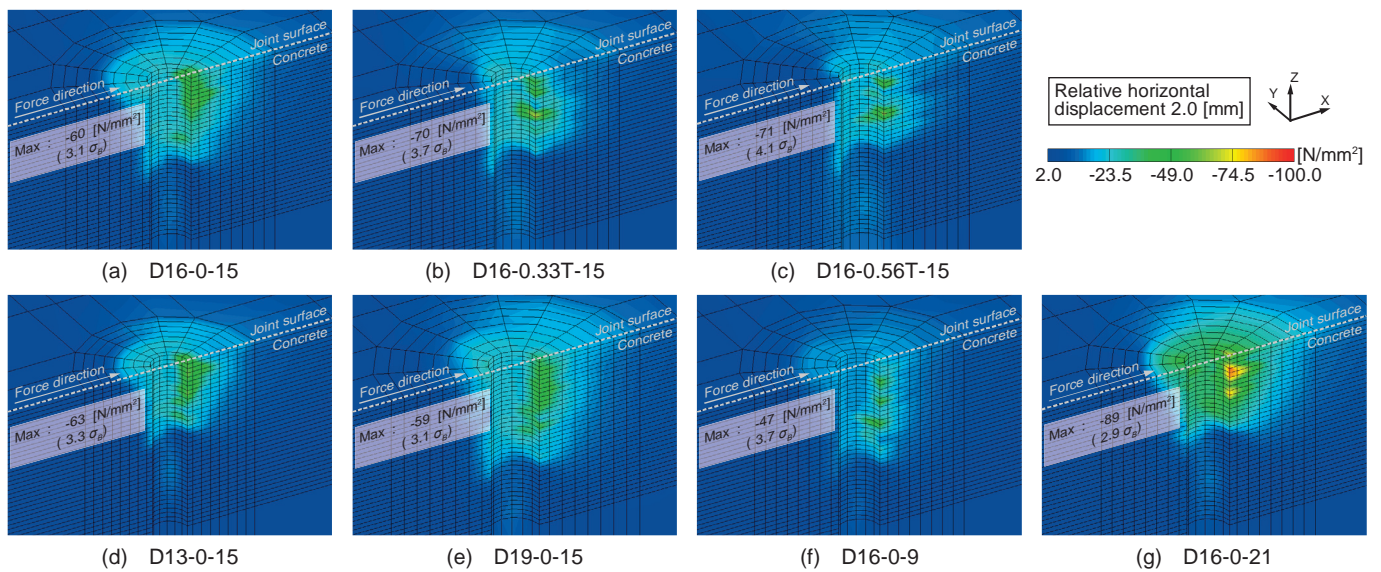


Fig.24 Minimum principal stress distributions of concrete



により除荷され、圧縮軟化以前の応力状態に復帰するためである。

X-Z 平面(以下、鉛直面)のひび割れ性状をみると、 $\eta=0$  の試験体ではコンクリート強度によらずダボ変形によるひび割れが顕著に生じている。一方、 $\eta=0.33T, 0.56T$  の試験体ではダボ変形によるひび割れに加え、接合面から  $3d_a$  より深い位置で引張力による水平方向のひび割れが生じている。よって、軸応力比が大きいほど引張力によりコンクリートが損傷することがわかる。なお、接合面のひび割れについてはパラメータの違いによる大きな差はみられない。

コンクリートが圧縮軟化する範囲に着目すると、鉛直面においてはアンカー径  $d_a$  に比例する傾向があり、 $F_c=15, 21$  の試験体では接合面から  $2d_a$  程度まで圧縮軟化し、 $F_c=9$  の試験体では  $3d_a$  程度まで圧縮軟化する。接合面においてもアンカー径  $d_a$  に比例する傾向があり、 $\eta=0$  の試験体ではアンカーボルト断面の中心から  $1d_a$ 、 $\eta=0.33T, 0.56T$  の試験体では  $0.5d_a$  の範囲が圧縮軟化していることから、引張力が作用すると圧縮軟化する範囲は小さくなり、支圧によるコンクリートの損傷は抑制されることがわかる。

#### 4.6. コンクリートの最小主応力度分布

$\delta_h=2.0\text{mm}$  に接合面付近のコンクリートに作用する最小主応力度分布を Fig.24 に示す。前節と同様に D16-0-15 を基本として、全 13 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は放射状に立体的な分布となっていることが確認できる。また、最小主応力度の絶対値の最大値(以下、最小主応力度の最大値)はコンクリートの一軸圧縮強度  $\sigma_B$  に対して 3~4 倍程度まで上昇しており、アンカーボルトが局所的に変形する箇所においてコンクリートは多軸圧縮応力場となっているといえる。

各パラメータにより比較すると、アンカー径およびコンクリート強度が大きいほど、 $\sigma_B$  以上の最小主応力度が広範囲で分布しており、コンクリートの支圧応力が上昇することがわかる。また、最小主応力度の最大値はコンクリート強度および軸応力比が大きいほど増大する。軸応力比の増大により最小主応力度の最大値が大きくなるのは、引張力が作用する場合は軸応力比の増大に伴い接合面から深い位置で最大値が生じ、コンクリート内部では補強鉄筋による拘束効果が得られるためであると考えられる。

## 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既往の実験<sup>4)5)</sup>を対象にして、3次元 FEM 解析モデルを構築し、解析を行なった。その解析結果より以下の知見を得た。

- 1) 既往の文献<sup>7)~10)</sup>によるコンクリート、グラウトおよび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。外側耐震改修マニュアルで制限されている水平変形量の 2 倍である相対水平変位  $4.0\text{mm}$  までを解析の対象範囲として単調載荷解析を行なった結果、せん断力-相対水平変位関係で実験結果を概ね精度よく再現することができた。
- 2) アンカーボルトの曲率は、いずれの試験体も接合面からコンクリート側は  $2d_a$ 、グラウト側は  $1d_a$  の位置で最大となり、相対水平変位  $2.0\text{mm}$  時ではコンクリート側  $3d_a$  からグラウト側  $2d_a$  までの  $5d_a$  の範囲が降伏する。ダボ変形の中心は接合面よりコンクリート側となり、コンクリート強度が大きくグラウトの圧縮強

度との差が小さくなると接合面に近くなる。コンクリート強度が大きく支圧応力が上昇すると、コンクリート側  $1d_a$  の位置の曲率が増加し、グラウト側の曲率の最大値も増加する。また、アンカー径が大きくなると曲率は全体的に小さくなり、アンカーボルトの曲げ変形が抑制される。

- 3) せん断力のみを与えた試験体シリーズでは Mises 応力度は材軸に対して対称に分布するのに対し、せん断力と引張力を与えた試験体シリーズでは軸応力比の増大に伴い引張側の Mises 応力度が上昇する。つまり、軸応力比の増大によりアンカーボルトの断面内では引張応力度が上昇し支配的になるため、早期に降伏する。したがって、断面内に生じるせん断応力度が減少し、せん断力のみを与えた場合に比べ、せん断耐力が低下する。
- 4) 加力軸を通る鉛直面のコンクリートのひび割れ性状は、せん断力のみを与えた試験体ではダボ変形によるひび割れが顕著である。一方、せん断力と引張力を与えた試験体ではダボ変形によるひび割れに加え、接合面から  $3d_a$  より深い位置で引張力による水平方向のひび割れが生じ、軸応力比が大きいほど損傷する。
- 5) コンクリートが圧縮軟化する範囲に関して、鉛直面に着目すると、 $F_c=15, 21$  では接合面から  $2d_a$  まで、 $F_c=9$  では  $3d_a$  までが圧縮軟化し、アンカー径およびコンクリート強度が大きいほど広範囲で圧縮軟化する。また接合面では、せん断力のみを与えた試験体はアンカーボルト断面の中心から  $1d_a$ 、せん断力と引張力を与えた試験体は  $0.5d_a$  が圧縮軟化し、引張力が作用すると圧縮軟化する範囲は小さくなり、支圧による損傷は抑制される。
- 6) 接合面付近におけるコンクリートの最小主応力度分布より、アンカー径およびコンクリート強度が大きいほど、コンクリートの支圧応力は上昇する。また最小主応力度の絶対値の最大値はコンクリート強度および軸応力比が大きいほど増大する。引張力が作用する場合は軸応力比の増大に伴い接合面から深い位置で最大値が生じ、コンクリート内部では補強鉄筋による拘束効果が得られるため、最小主応力度の最大値が大きくなる。

本研究の成果は、接着系あと施工アンカーの種類としてエポキシ系注入式あと施工アンカーを、その施工方法として湿式コアドリルを対象として得られたものである。今後は接着系あと施工アンカーの種類が異なる場合や、その施工方法が異なる場合についても更なる検討を行う必要があると考えている。また、本解析は片方向の単調載荷により行なったものであり、繰り返し載荷による解析検討も今後の課題として行う予定である。そして、本研究で構築した 3次元 FEM 解析モデルの解析結果から得られた知見を包括して、複合応力下における接着系あと施工アンカーのせん断特性を再現し得る力学モデルを構築したいと考えている。

なお、本論文は、文献 17),18),19)の内容に新たな分析結果を加え、修正・加筆したものである。

## 謝辞

本研究の解析モデルの構築にあたり、日本大学・長沼一洋教授、横浜国立大学・山田貴博教授より、大変貴重なご助言をいただきました。ここに記して深い謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Japan Building Disaster Prevention Association: External Seismic Retrofitting Manual, 2002.9.10 (in Japanese)  
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) Abe, K., Ichihashi, S., Sugiyama, T., Nakano, K. and Matsuzaki, Y.: Analytical Study on Tension and Shear Behaviors of Post-installed Adhesive Anchor: Part 1. Outline of FEM and Tension Behavior of a Post-installed Adhesive Anchor with Edge, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-1, Structures-I, pp.311-312, 2010.9 (in Japanese)  
阿部潔, 市橋重勝, 杉山智昭, 中野克彦, 松崎育弘: 接着系あと施工アンカーの引張およびせん断特性に関する解析的研究 (その 1) 解析概要と 1 本のアンカーの引張挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1 分冊, 構造 I, pp.311-312, 2010.9
- 3) Ichihashi, S., Abe, K., Sugiyama, T., Nakano, K. and Matsuzaki, Y.: Analytical Study on Tension and Shear Behaviors of Post-installed Adhesive Anchor: Part 2. Tension Behavior of Two Post-installed Adhesive Anchor and Shear Behavior of Post-installed Adhesive Anchor with Edge, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-1, Structures-I, pp.313-314, 2010.9 (in Japanese)  
市橋重勝, 阿部潔, 杉山智昭, 中野克彦, 松崎育弘: 接着系あと施工アンカーの引張およびせん断特性に関する解析的研究 (その 2) 複数本のアンカーの引張挙動と 1 本のアンカーのせん断力挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1 分冊, 構造 I, pp.313-314, 2010.9
- 4) Takase, Y., Wada, T., Ikeda, T., Shinohara, Y. and Mizoguchi, M.: Mechanical Behavior and Work of Adhesive Post-installed Anchors Subjected to Cyclic Shear Force and Constant Tensile Force, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.82, No.738, pp.1255-1263, 2017.8 (in Japanese)  
高瀬裕也, 和田俊良, 池田隆明, 篠原保二, 溝口光男: 一定引張力を受けながら繰り返しせん断応力を受ける接着系あと施工アンカーの力学的挙動と仕事量, 日本建築学会構造系論文集, Vol.82, No.738, pp.1255-1263, 2017.8
- 5) Takase, Y., Wada, T. and Shinohara, Y.: A Study on Mechanical Behavior of Post-installed Adhesive Anchor Receiving Repeated Shear Force Under Consistent Tensile Force, JCI Annual Convention Proceedings, Vol.38, No.2, pp.1105-1110, 2016.7 (in Japanese)  
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
- 6) ITOCHU Techno-Solutions Corporation: FINAL HELP, 2016.10  
伊藤忠テクノソリューションズ(株): FINAL HELP, 2016.10
- 7) Naganuma, K.: Stress-Strain Relationship for Concrete Under Triaxial Compression, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.474, pp.163-170, 1995.8 (in Japanese)  
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
- 8) 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, 1999.10
- 9) Ohnuma, H. and Aoyagi, Y.: Ultimate Strength Property of Concrete Under Triaxial Compressive Stresses, CRIEPI Research Report, No.381021, 1981.12  
大沼博志, 青柳征夫: 三軸圧縮応力下におけるコンクリートの強度特性, 電力中央研究所報告, No.381021, 1981.12
- 10) Izumo, J., Shima, H. and Okamura, H.: Analysis Model of Reinforced Concrete Board Element Subjected to In-plane Force, Concrete Journal, Vol.25, No.87.9-1, pp.107-120, 1987.9 (in Japanese)  
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
- 11) Japan Concrete Institute: Symposium Committee Report on Bond Behavior and Bond Constitution Rule of Concrete and Reinforcing Materials, 2011.9  
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, 2011.9
- 12) Naganuma, K.: Orthotropic Constitutive Relationship for Concrete Considering Nonlinear Poisson's Effect Under Triaxial Stresses, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.485, pp.109-116, 1996.11 (in Japanese)  
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, 1996.11
- 13) Setoguchi, H., Abe, T., Takase, Y., Sato, S., Takahashi, M. and Sato, T.: Experimental Study to Confirm the Performance of Post-installed Anchor that Uses Core Drill Method: Part 2. Test of Bond Strength that Uses Injection Type Anchor, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-2, Structures-IV, pp.149-150, 2010.9 (in Japanese)  
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, C-2 分冊, 構造 IV, pp.149-150, 2010.9
- 14) Nakano, K., Matsuzaki, Y. and Sugiyama, T.: Average Bond Strength of Post-installed Bonded Anchor, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-2, Structures-IV, pp.149-150, 2009.8 (in Japanese)  
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, C-2 分冊, 構造 IV, pp.149-150, 2009.8
- 15) Katori, K., Hayashi, S., Ushigaki, K. and Norimono, T.: Effects of Surface Roughness on Shear Behavior of Construction Joint Arranging Connecting Bars Perpendicularly: Studies on shear behavior of joint, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.508, pp.101-110, 1998.6 (in Japanese)  
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
- 16) Kimu, H., Noguchi, T., Yoneda, N. and Hamasaki, H.: Construction of Adhesion Constitutive Law Between Repair Mortar and Frame Concrete by FEM Inverse Analysis, JCI Annual Convention Proceedings, Vol.30, No.2, pp.577-582, 2008.7 (in Japanese)  
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, 2008.7
- 17) Ishida, Y., Sakata, H., Takase, Y., Maida, Y. and Shirai, Y.: 3D FEM Analysis of Post-installed Adhesive Anchor under Shear Force and Tensile Force, Proceeding of the Architectural Research Meetings, Kanto Chapter, AIJ, pp.601-604, 2017.2 (in Japanese)  
石田雄太郎, 坂田弘安, 高瀬裕也, 毎田悠承, 白井佑樹: 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 3 次元 FEM 解析, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.601-604, 2017.2
- 18) Nemoto, K., Ishida, Y., Sakata, H., Takase, Y., Maida, Y., Shirai, Y. and Sato, T.: Construction of 3D FEM Analysis Model and Consideration of Post-installed Adhesive Anchors Under Combined Stress: Part 1. Construction of 3D FEM Analysis Model, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures-IV, pp.383-384, 2017.7 (in Japanese)  
根本夏帆, 石田雄太郎, 坂田弘安, 高瀬裕也, 毎田悠承, 白井佑樹, 佐藤匠: 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 解析モデル構築と考察 (その 1) 3 次元 FEM 解析モデルの概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 IV, pp.383-384, 2017.7
- 19) Ishida, Y., Sakata, H., Takase, Y., Maida, Y., Shirai, Y. and Sato, T.: Construction of 3D FEM Analysis Model and Consideration of Post-installed Adhesive Anchors Under Combined Stress: Part 2. Analysis Result and Consideration, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures-IV, pp.385-386, 2017.7 (in Japanese)  
石田雄太郎, 坂田弘安, 高瀬裕也, 毎田悠承, 白井佑樹, 佐藤匠: 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 解析モデル構築と考察 (その 2) 解析結果と考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 IV, pp.385-386, 2017.7

# 3D FEM ANALYSIS OF POST-INSTALLED ADHESIVE ANCHORS UNDER COMBINED STRESS

Stress transmission mechanism and mechanical behavior of the joints for external seismic retrofitting : Part 1

*Yutaro ISHIDA*<sup>\*1</sup>, *Hiroyasu SAKATA*<sup>\*2</sup>, *Yuya TAKASE*<sup>\*3</sup>,  
*Yusuke MAIDA*<sup>\*4</sup> and *Takumi SATO*<sup>\*5</sup>

<sup>\*1</sup> Grad. Student, Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Tech., M.Eng./JSPS Research Fellow DC

<sup>\*2</sup> Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Tech., Dr.Eng.

<sup>\*3</sup> Assoc. Prof., College of Environmental Tech., Muroran Tech., Dr.Eng.

<sup>\*4</sup> Research Engineer, Building Research Institute, Dr.Eng.

<sup>\*5</sup> TOBISHIMA Corporation

Post-installed adhesive anchors are used in external seismic retrofitting joints for existing reinforced concrete buildings. As a structural characteristic of external seismic retrofitting, the existing frame and reinforcing frame are eccentric. Therefore, in addition to the shear force, there are also compression force and tensile force due to the eccentric bending moment acting on the joints, so that the joints are in a combined stress state in external seismic retrofitting. There are few studies on post-installed adhesive anchors under a combined stress state, and it is difficult to grasp in detail its mechanical behavior when subjected to combined stress. For that reason, the current design method suggests the use of reduction factors which are based on engineering judgment.

This paper investigates the mechanical behavior of the post-installed adhesive anchors under combined stress by constructing 3D FEM model which can reproduce the experiment conducted in a previous research. A total of 13 specimens of varying parameters, i.e. anchor diameters,  $d_a$ , axial stress ratios,  $\eta$  and concrete strengths,  $F_c$ , are studied. Based on the analysis results, the influence of each parameter is investigated in terms of (1) shear force vs. relative horizontal displacement relationship, (2) curvature distribution of anchor bolts, (3) Mises stress distribution in anchor bolts, (4) damage states in concrete and (5) minimum principal stress distribution in concrete.

In Chapter 2, the outline of the experiment and the details of the specimen parameters which are the subject of the analysis are introduced. In Chapter 3, the outline of the analysis model is described. The concrete, grout and anchor bolts are modeled by hexahedral elements (eight-node isoperimetric elements). The epoxy resin between the concrete and anchor bolts was modeled by joint elements (eight-node isoperimetric joint element) with thickness. Furthermore, depending on the interface properties, zero-length joint element are applied to model the bonding properties between different materials.

The analysis results of the shear force versus relative horizontal displacement relationship show generally good agreement with the experimental results. For the specimens subjected to combined shear and tensile force, the following phenomena are observed. (1) The maximum curvature of the anchor bolt occurs at  $2d_a$  (where  $d_a$  is the diameter of the anchor bolt) depth from the joint surface on the concrete side and  $1d_a$  depth on the grout side. When the relative horizontal displacement reaches 2.0 mm, a total length of  $5d_a$  is yielded in the anchor bolt:  $3d_a$  on the concrete side and  $2d_a$  on the grout side. (2) The Mises stress of the anchor bolt on the tensile side increases when the axial stress ratio increases. In this condition, the anchor bolt yields earlier due to the tensile stress and therefore the shear stress decreases in the cross-section of the anchor bolt. (3) In the specimens subjected to both shear and tensile force, cracks occur in the concrete due to dowel deformation and tensile stress. Meanwhile, the damage of the concrete increases when the axial stress ratio increases. (4) When the anchor diameter and the concrete strength increase, the bearing stress of the concrete also increases, and the concrete is compressed and softened in a wider range. (5) The maximum value of the minimum principal stress increases as the concrete strength and the axial stress ratio increase.

(2018年1月10日原稿受理, 2018年5月17日採用決定)