

# エポキシ樹脂と接着系アンカーによる 鋼構造建築用耐震補強ブレースの接合方法に関する実験研究

## EXPERIMENTAL STUDY ON JOINT OF SEISMIC RETROFITTING BRACE FOR STEEL STRUCTURES USING EPOXY RESIN AND CHEMICAL ANCHORS

市川 康<sup>\*1</sup>, 山田 努<sup>\*2</sup>, 中村 博志<sup>\*3</sup>山田 哲<sup>\*4</sup>, 竹内 徹<sup>\*5</sup>, 和田 章<sup>\*6</sup>Yasushi ICHIKAWA, Tsutomu YAMADA, Hiroshi NAKAMURA,  
Satoshi YAMADA, Toru TAKEUCHI and Akira WADA

Incorporating additional braces is representative method for seismic retrofit for steel building frames. However, it often causes difficulty to the continuous residence of the building during the site work, because of the noise and vibrations caused by welding and floor concrete removal works. In order to solve this problem, we propose a new joint for seismic retrofit braces using epoxy resin and chemical anchors. To evaluate the dynamic characteristics of this joint, we carry out experiments and analyses, and propose a method to estimate the strength of the joint.

**Keywords :** *Seismic Retrofitting Brace, Epoxy Resin, Chemical Anchor*

耐震補強用ブレース, エポキシ樹脂, 接着系アンカー

### 1. 序

兵庫県南部地震以来、1982年6月施行の新耐震設計法以前に設計された既存建築物について、その耐震性を診断し、それが不足する建築物を改修しようとする気運が高まっている。鉄骨造建築についても例外ではなく、先の震災においても少なからず被害が生じたこともあり、耐震改修の必要性が高い。

「既存不適格建築物」の耐震改修のすすみ方は建物の機能・用途などによりさまざまである。例えば、学校建築等では建物を使用しない期間に工事が行えるので比較的改修が進んでいるが、病院や住宅などの居住者の移転が困難な建築物の耐震改修はなかなか進まないという現状がある。そこで、耐震改修工事を多種多様な建物に適用するための項目のひとつとして「居ながら補強」、つまり建物の機能を止めずに行える補強工法が求められている。「居ながら補強」では騒音、振動、粉塵、匂い等、施工時に発生する問題の軽減及び使用性、採光、動線等の建物機能の確保に留意する必要がある、これらを満たす工法としてRC造を対象とした補強工法はいくつか考案されている<sup>1)~2)</sup>など。一方、鉄骨造での補強工法はブレース増設がよく行われるが、現場溶接、スラブコンクリートのはつり工事を伴う在来工法による場合が多く<sup>3)</sup>、騒

音、振動、粉塵の発生等の問題が生じやすい。特に強度型のブレース補強を行う場合、ブレースには高い耐力が求められ、それに応じて接合部は強大なものにならざるを得ず「居ながら補強」には多大な困難が伴う。しかしながら軸力を負担する部分に降伏強度が管理された鋼材を用いた座屈補剛ブレースを使用すれば接合部に入る力は限定されるため、「居ながら補強」に対応できる工法の採用が可能となる。

本研究では、座屈補剛ブレースを対象とし「居ながら補強」を実現するための条件を満たす耐震補強工法として、耐震補強用ブレースを設置する際の接合部をエポキシ樹脂と接着系アンカーを用いて取り付ける工法を提案する。本報では提案したブレース接合部の力学的特性を把握することを目的とし、ブレース接合部周辺部材を切り出した実大試験体による実験、及びエポキシ樹脂の耐力を把握するための要素実験を行い、実験結果と接合部のFEM解析の比較により接合部の破壊性状の考察、耐力評価式の提案を行う。

### 2. 本研究で提案する接合方法の概要

本研究では、図-1のように座屈補剛ブレースを用いた耐震補強工法

<sup>\*1</sup> 新日本製鐵㈱建築事業部 マネジャー・修士(工学)

<sup>\*2</sup> 元東京工業大学 大学院生・修士(工学)

<sup>\*3</sup> 新日本製鐵㈱建築事業部 マネジャー・博士(工学)

<sup>\*4</sup> 東京工業大学建築物理研究センター 助教授・博士(工学)

<sup>\*5</sup> 東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻  
助教授・博士(工学)

<sup>\*6</sup> 東京工業大学建築物理研究センター 教授・工博

Nippon Steel Corporation, M. Eng.

Former Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.

Nippon Steel Corporation, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

を想定し、ブレースを接合するためのガセットプレートの既存建物への接合方法を提案する。まずブレースを接合するための接合金物は柱面プレート、スラブ面プレート、ガセットプレートから構成され、柱面プレートをワンサイドボルトにより鋼管柱スキンプレートに接合、スラブ面プレートはコンクリートスラブ表面にエポキシ樹脂により接着し、さらに接着系アンカーを打ち込んで接合する。

この接合方法はボルト接合、エポキシ樹脂、接着系アンカーを用いることで現場溶接、スラブコンクリートのはつり工事を無くすることができ、施工時の騒音、振動、粉塵等の問題を軽減できる。またワンサイドボルトを使用することで、鋼管柱のような閉断面の部材であっても柱梁接合部へのガセットプレートの取付けが可能となる。さらに柱への取り付けの際、ガセットプレートに構面外座屈防止用のリブがあるとこのリブが障害となってボルトの締め付けが困難となるので、本研究では文献4)における研究を受け、座屈補剛ブレースのガセットプレートへの接合方法として、スプライスプレートにアングルを用いた形式を採用した。

### 3. ブレース接合部実験計画

#### 3.1 試験体

試験体の概要を図-2に示す。本実験ではスパン6.4m、階高4mのフレームを想定しており試験体は想定したフレームのブレース接合部を切り出した実大試験体で、柱フランジの面外変形等、ブレース接合部周辺部材の局所変形の影響を反映できるようにしたものである。

提案した接合方法を再現するため、柱面プレートをワンサイドボルトにより鋼管柱スキンプレートに接合、スラブ面プレートはコンクリートスラブ表面にエポキシ樹脂(層厚6mm)により接着、さらにD10の接着系アンカー(埋め込み長さ110mm、材質SD295)により接合する。なお、ガセットプレートの板厚は想定する座屈補剛ブレースの芯材に合わせて22mmとし、柱面プレート、スラブ面プレートの板厚もこれに合わせて22mmとした。また、一般的な中規模建築を想定し、梁は圧延H型鋼H-500x200x10x16、柱は冷間成形角型鋼管□-400x400x16とした。鉄骨の材質についてはH型鋼、プレートはSS400材、鋼管はSTKR400材としている。コンクリートスラブは各試験体とも厚さ150mmで、梁及び直交梁とはスタッドコネクターで定着されてH-244x175x7x11 SS400

いる。スタッドコネクターとしては、本実験で用いた200mm幅の梁フランジに一般的に配置される径、ピッチを19φ(h=80mm)@300と想定し、それが想定したフレームの半スパン(3.2m)に配置される本数を試験体の梁に配置することとし@150とした。また、コンクリー

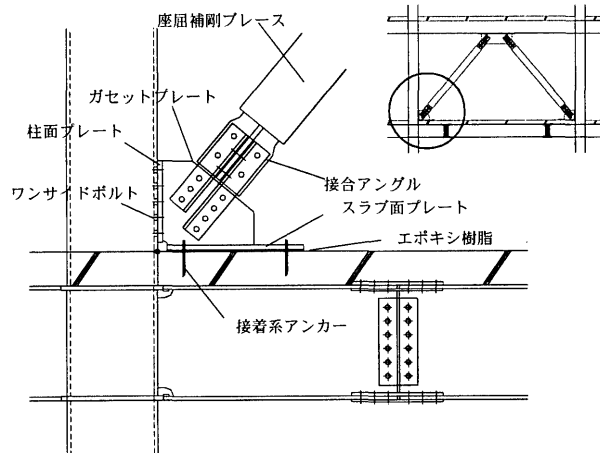


図-1 提案する接合方法の概要

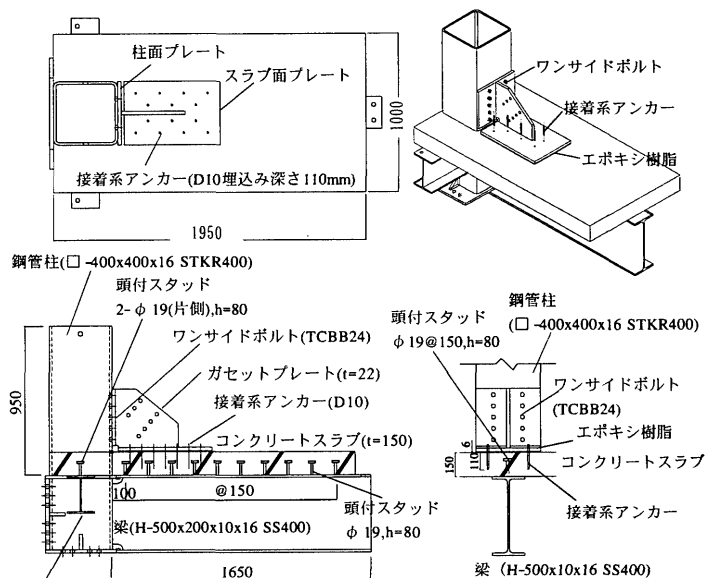


図-2 試験体概要

表-1 パラメーター一覧

| 試験体名の定義                                                             | No           | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
|---------------------------------------------------------------------|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                                                     | 試験体名         | B0-s    | B4-s    | B8-s    | B14-s   | B8-e    | B8-sb   | L8-s    | L12-s   | L20-s   | W8-s    |
| i. 接着面積<br>B: 600x400<br>L: 800x400<br>W: 600x500                   | 接着面積         | 600×400 | 600×400 | 600×400 | 600×400 | 600×400 | 600×400 | 800×400 | 800×400 | 800×400 | 600×500 |
|                                                                     | 接着系アンカー配置タイプ | —       | A       | A       | A       | A       | A       | B       | C       | B       | D       |
|                                                                     | アンカー本数(本)    | 0       | 4       | 8       | 14      | 8       | 8       | 8       | 12      | 20      | 8       |
|                                                                     | 柱面ボルト本数(本)   | 10      | 10      | 10      | 10      | 10      | 6       | 10      | 10      | 10      | 10      |
|                                                                     | ガセットプレート形状   | 基準形     | 基準形     | 基準形     | 基準形     | 延長形     | 基準形     | 基準形     | 基準形     | 基準形     | 基準形     |
| ii. 接着系アンカー本数                                                       | 接着系アンカー配置    |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| iii. s: GP 基準形、柱面ボルト10本<br>e: GP 延長形、柱面ボルト10本<br>sb: GP 基準形、柱面ボルト6本 |              |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |

|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
|   |   |   |   |
| A | B | C | D |

(A, Bについてはボルト本数が最も多い場合の配置を示す)

|     |    |
|-----|----|
|     |    |
| 10本 | 6本 |

柱面ボルト配置

|     |     |
|-----|-----|
|     |     |
| 基準形 | 延長形 |

ガセットプレート形状

トスラブ内にはφ6-100x100のワイヤーメッシュを入れた。

試験体数は10体で、その実験パラメータを表-1に示す。各試験体はスラブ面のエポキシ接着面積が600x400のBシリーズ、800x400のLシリーズ、600x500のWシリーズに分類した。また、接着系アンカーのパラメータは、アンカーを8本打設したものを基準としてアンカー本数を増減させた。さらに、試験体B8-sと比較して、ガセットプレートに梁材軸方向に延長したB8-e、柱面ワンサイドボルト本数を6本にしたB8-sbを設け、ガセットプレートの形状や柱面の強さによる影響を考察する。

試験体に使用したエポキシ樹脂の材料試験結果を表-2に、各試験の載荷に合わせて行ったコンクリートの圧縮強度、割裂試験強度を表-3に示す。なお、試験体B0-s, B8-s, B4-s, L12-s, B8-sbの載荷時には圧縮試験のみ行った。

### 3.2 載荷装置

載荷装置を図-3に示す。想定するブレース取り付け角度に合わせて試験体を50°傾けて反力治具にセットし、油圧式100tfジャッキを用いてブレース軸方向力を想定した荷重をガセットプレートに載荷する。ジャッキは座屈補剛ブレース芯材端部を模した十字断面加力治具を介してアングルによりガセットプレートと接合し、試験体はパネルゾーンを介し高力ボルトにより反力治具に接合されている。加力治具とガセットプレートとの接合部は試験体耐力を1000～1500kNと想定し設定した。接合部は高力ボルトM22により接合されており接合部の短期許容耐力としては1170kNであり、文献5)によるすべり係数の平均値を採用すると耐力は1500kNである。

本実験で提案する接合部はブレースが引張軸力を受ける際に破壊すると思われるが、ブレース接合部の柱梁は、ブレースが引張軸力を受けるとき閉じる方向に変形すること、またスラブ面プレートにはコンクリートスラブに発生するであろう亀裂の抑制効果も期待できることから本実験における載荷方法による接合部耐力はフレーム変形を考慮した接合部耐力を概ね評価できるものと考えた。

### 3.3 加力計画及び計測計画

載荷パターンを図-4に示す。引張りを正とし、98kNピッチで2回ずつ繰り返す正負交番繰り返し載荷により加力を行った。また、B14-s, L8-s, L20-sにおいては980kN以上の耐力を有したため、一旦980kNまで載荷を行った後、200tfジャッキに取替え、図-5に示すように正負588kNまでは1回ずつ繰り返す、それ以降は引張側の片側振幅による載荷パターンにより実験を行った。

計測は主に図-6に示す箇所を計測した。まず、ブレース軸方向の変形を計測するために、ブレース接合部と試験体躯体部分とのジャッキ軸方向の相対変形 $d_j$ を $d_0$ から $d_5$ を差し引いて計測し、この $d_j$ をガセットプレート接合部変形と定義した。なお $d_i$ にはガセットプレート接合部自身の弾性変形が微小であるが含まれる。摩擦接合のすべりが発生しない範囲となる1500kNの荷重に対し、その最大変形量は0.1mm程度である。

また、 $d_5$ から $d_{10}$ によりスラブ面及び柱からのガセットプレートの相対ずれ変位を計測した。鋼管柱フランジの面外変形を計測するために、鋼管柱フランジから柱フランジへ変位計を設置し、 $d_{13}$ と $d_{14}$ を計測した。

試験体B14-s, B8-e, W8-s, L8-s, L20-sにおいて、ガセットプレー

表-2 エポキシ樹脂材料試験結果

| 引張強さ<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 圧縮強さ<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 圧縮弾性係数<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 曲げ強さ<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 引張せん断強さ<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 衝撃強さ<br>(KJ/m <sup>2</sup> ) |
|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| 55.5                         | 111.2                        | 3298                           | 82.2                         | 20.4                            | 5.3                          |

表-3 コンクリート材料試験結果

| 試験体名                         | B0-s | B8-s | B4-s | L12-s | B8-bs |
|------------------------------|------|------|------|-------|-------|
| 圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 25.3 | 29.2 | 29.9 | 30.3  | 30.0  |

| 試験体名                         | B14-s | W8-s | B8-e | L8-s | L20-s |
|------------------------------|-------|------|------|------|-------|
| 圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 29.2  | 29.3 | 29.1 | 29.3 | 29.1  |
| 引張強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 2.46  | 2.58 | 2.63 | 2.64 | 2.66  |

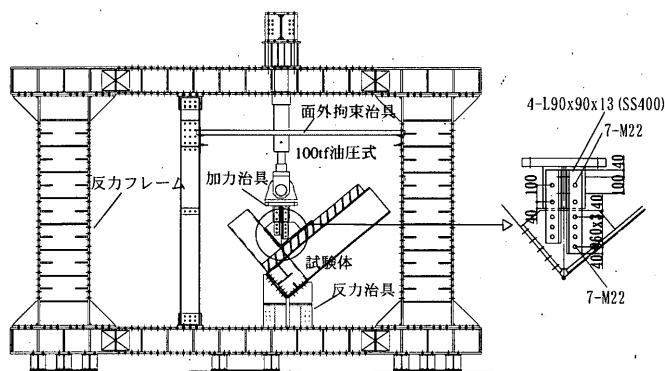


図-3 載荷装置

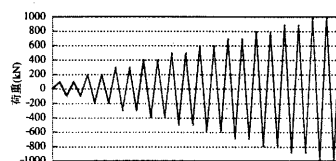


図-4 載荷パターン1

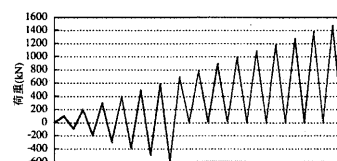
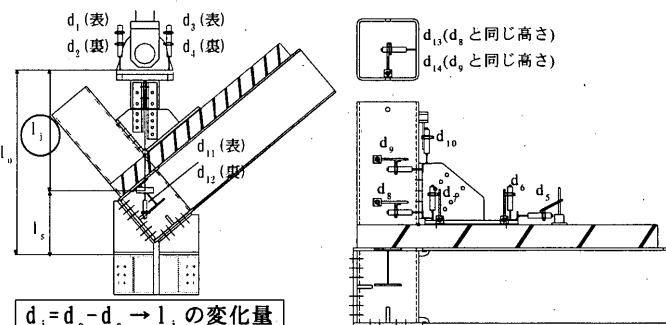


図-5 載荷パターン2



$$d_j = d_0 - d_s \rightarrow l_j \text{ の変化量}$$

$$d_0 = (d_1 + d_2 + d_3 + d_4) / 4 \rightarrow l_0 \text{ の変化量}$$

$$d_s = (d_{11} + d_{12}) / 2 \rightarrow l_s \text{ の変化量}$$

図-6 変位計設置位置

トから躯体への力の流れを大まかに把握するため、図-7のようにガセットプレートのスラブ面、柱面それぞれの近傍に3軸歪ゲージを添付した。また、スラブ側の接合部からスラブを介して梁へと力の伝達が行なわれているかを確認するために梁フランジ、ウェブにひずみゲージを添付した。

## 4. ブレース接合部実験結果

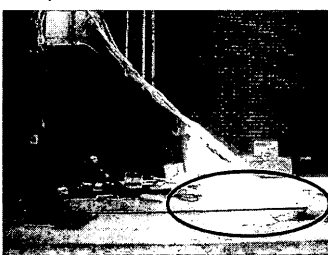
### 4.1 荷重-変形関係と破壊性状

全試験体の荷重-変形関係を図-8に示す。荷重-変形関係において荷重はジャッキによる載荷荷重、変形は図-6で定義したガセットプ

レート接合部変形 $d_j$ である。図-8中の▼はエポキシ接着界面の剥離時を、▽は接着系アンカー部分での破断もしくはコーン破壊時を示す。

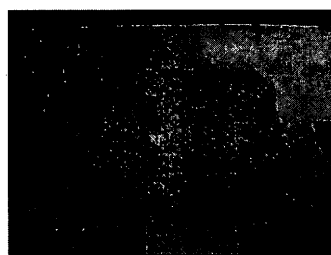
エポキシ樹脂のみでスラブ面に接合したB0-sでは、引張側、圧縮側ともに安定した剛性を保っていたが405.7kNでエポキシがコンクリート接着界面で剥離する形で耐力が低下した。一方、接着面積の同じB0-s、B4-s、B8-sを比較すると接着系アンカー本数に応じてエポキシ剥離時の耐力が上がる事が確認できた。ガセットプレート近傍に接着系アンカーを打設したB8-sは4隅に打設したB4-sに比べ耐力上昇が高く接着系アンカーが効果的に作用していることがわかる。また、接着面積の違うBシリーズ、Lシリーズ、Wシリーズのうち接着系アンカーの本数が同じであるB8-s、L8-s、W8-sを比べると、エポキシ剥離時の耐力はエポキシ接着面積に概ね比例している。試験体B8-sとガセットプレートを延長させたB8-e、柱面ワンサイドボルトの本数を減らしたB8-sbを比較すると、耐力に顕著な違いが見られないことから本実験の範囲ではガセットプレートの延長、柱面ボルト本数減による影響は少ないと言える。

破壊性状は、接着系アンカーの少ない試験体では、写真-1のように、まずエポキシ接着面のコンクリート表面側で接着面が剥離し、柱面から遠いスラブ面プレート縁端が開き、梁材軸方向へずべるように壊れた。なお、写真-2のように、エポキシの剥離は接着面全域で生じ(実験時観察の結果、スラブ表面とスラブ面プレートの隙間は全域に見られた)、接着面内のある部分が破壊応力度に達した瞬間、接着面全体で



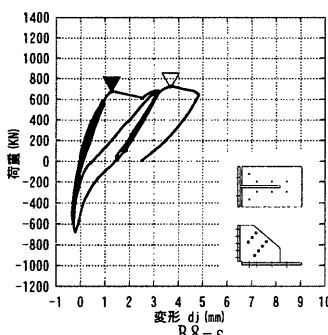
プレート先端が開いて壊れる

写真-1: エポキシ剥離時

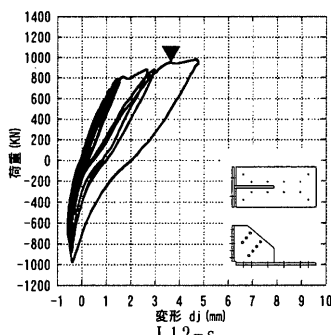


接着面全域で剥離

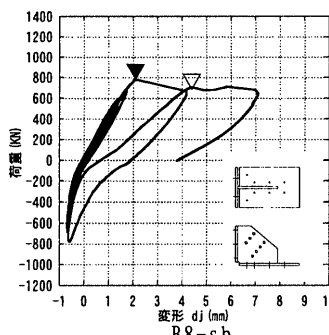
写真-2: 接着面破壊状況



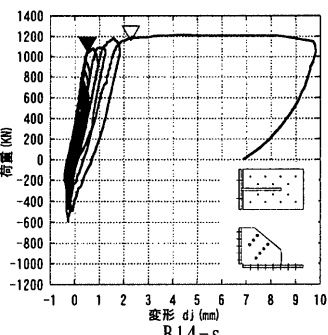
B0-s



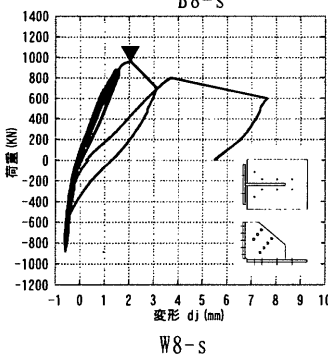
B4-s



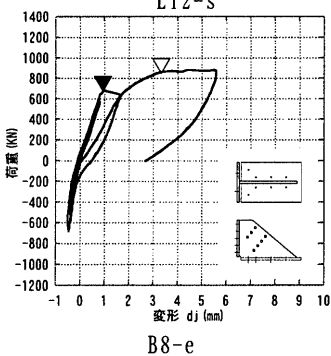
B8-s



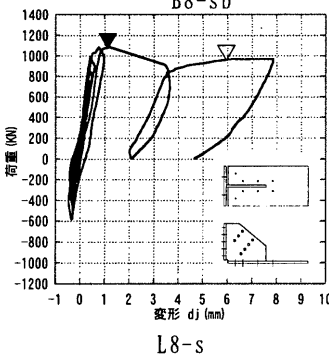
B8-sb



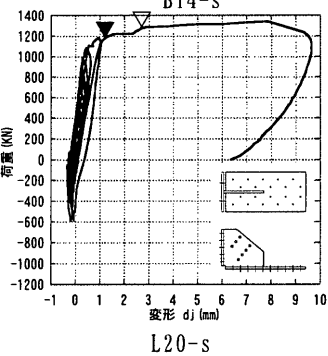
L12-s



L8-s



W8-s



B8-e

図-8 荷重-変形関係

剥離するものと考えられる。エポキシ接着面剥離後は接着系アンカーと柱面ワンサイドボルトで接合した形になり、最終的には接着系アンカーが破断する。この時、接着系アンカーは柱面から遠い順に破断していくことを確認した。エポキシが完全に剥離したほとんどの試験体で最終的に接着系アンカーの破断で壊れたが、柱面のボルト本数の少

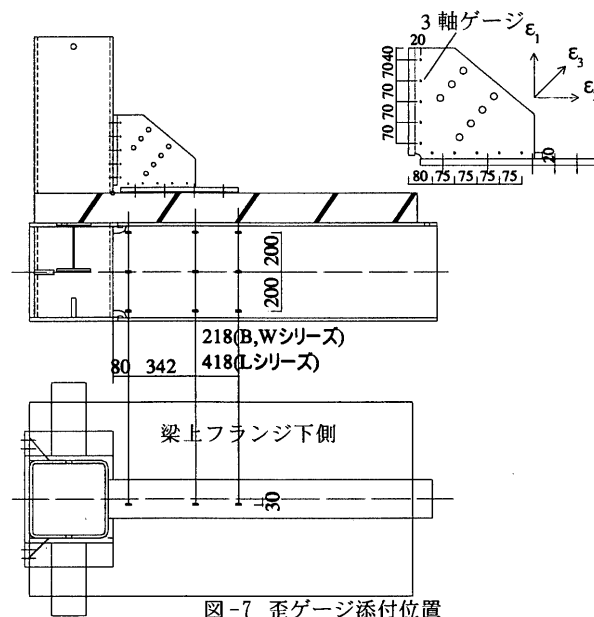
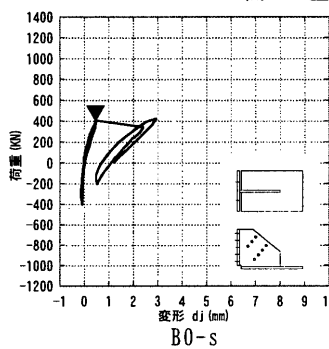
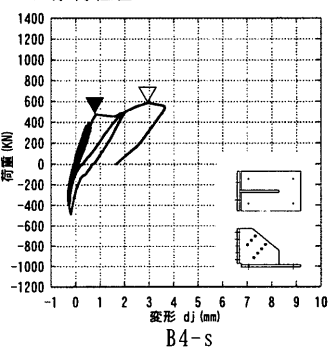


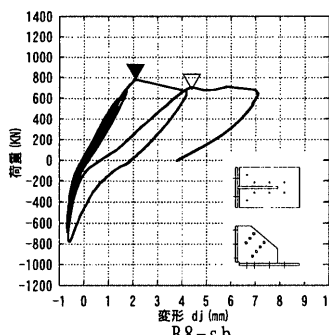
図-7 歪ゲージ添付位置



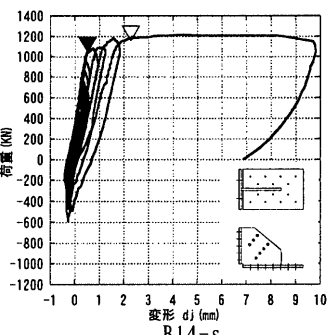
B0-s



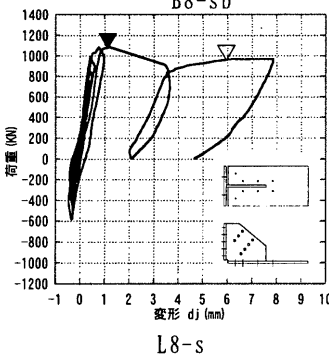
B4-s



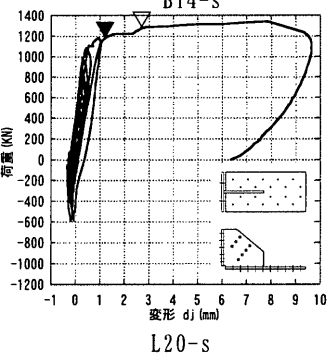
B8-s



B8-sb



L12-s



L8-s



W8-s



B8-e

ないB8-sbのみコーン破壊した。また、接着系アンカー本数の多いB14-s、L20-sにおいてはエポキシ界面での剥離は部分的なものにとどまり、コンクリート側のコーン破壊が先行して耐力が完全に低下するという結果になった。L-12Sでは800kN付近で直行梁上のスラブにクラックが発生し、これにより剛性が低下したものと考えられる。その後耐力は上昇しエポキシ樹脂が剥離した。

またエポキシが剥離する前までは柱面プレートと柱の接合部、荷重治具とガセットプレートの接合部においてすべり等の損傷はいずれの試験体でも観察されなかった。ただしエポキシ剥離後は鋼管の面外変形が観察された。

エポキシ剥離後、接着系アンカーと柱面ワンサイドボルトのみで力を負担しており、接着面破壊後の急激な耐力低下は抑制できるが、エポキシの剥離は脆性的な破壊であるため、実用上はエポキシ剥離時の耐力を最大耐力とすることが妥当であろう。

#### 4.2 ガセットプレート接合部周辺の歪分布

図-9、図-10は荷重荷重588kNにおける各試験体での柱側の最大主歪分布とスラブ側の最大主歪分布である。各試験体において柱側、スラブ側ともに歪分布の概形はほぼ同じであり、本実験の範囲ではスラブ面プレート大きさ、接着系アンカーの本数が歪分布に与える影響は少ない。ガセットプレートの歪はいずれの試験体も、柱側ではスラブ面から150mmのゲージ位置で、スラブ側では柱面から155mmのゲージ位置でそれぞれ主歪が最大となっており柱面プレート、スラブ面プレートでも同様の位置で応力が最大になるものと予想できる。また接着系アンカーに作用する応力もスラブ面プレートと同様の付近で最大応力を示すものと予想できる。

図-11と図-12はL8-sを例として各荷重段階における最大主歪分布の推移を示したものであるが、柱側、スラブ側ともに荷重に応じて歪が増加することが確認でき、他の試験体においても同様の結果となった。

図-13は荷重荷重392kNと588kNでのガセットプレート各点での主応力方向を示したものである。主応力方向はブレースの取り付け角度に概ね対応している。

図-14は、ブレースが引張軸力を受けた時の鉄骨梁部分の歪分布である。梁上フランジ下側に引張歪が発生し、梁ウェブには曲げ引張の応力状態での歪分布が観察されることから、スラブ面プレートからスラブ、スタッドコネクタを介して梁上フランジに材軸方向の引張り力が発生していることがわかる。

### 5 接合部の耐力評価

#### 5.1 耐力評価の方針

ここでは、前項の実験結果を踏まえ、ブレース接合部の耐力評価式を提案する。本実験の範囲では接合部の柱側は十分に強く、スラブ側の接着面で壊れると仮定し、エポキシが剥離したときの荷重を接合部の耐力と定義する。耐力評価の方針としては、まずエポキシ樹脂とコンクリート間の接着における破壊条件を調べるために接着面の要素実験を行い、破壊条件における $\sigma$ - $\epsilon$ 関係を定義する。前項での接合部実験の結果と有限要素法解析から接着面での応力分布を仮定し、その分布の最大応力点が破壊条件に達する時にエポキシの剥離により破壊すると考え、その時点での力の釣合いから破壊時のブレース軸方向力を求める。

#### 5.2 エポキシ樹脂接着面の要素実験

##### 5.2.1 試験体

試験体は図-15のように、コンクリートピースをエポキシ樹脂で挟み、上下鋼製治具と接着させたものである。各試験体は、水平面に対し角度を有しており、上下鋼製治具の引張荷重によりエポキシ接着界面でせん断+引張の複合応力状態を発生させる。水平面に対する角度 $\alpha$ は $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ である。各試験体の形状を表-4に、試験日におけるコンクリート強度を表-5に示す。

#### 5.2.2 結果と考察

エポキシ接着界面での応力状態を考えるにあたり、鋼製治具部分に引張

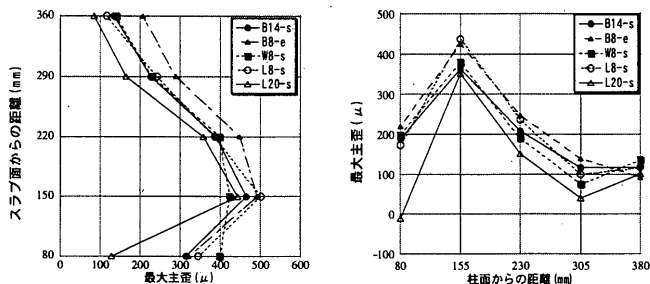


図-9: 柱側主歪分布(+588kN) 図-10: スラブ側主歪分布(+588kN)

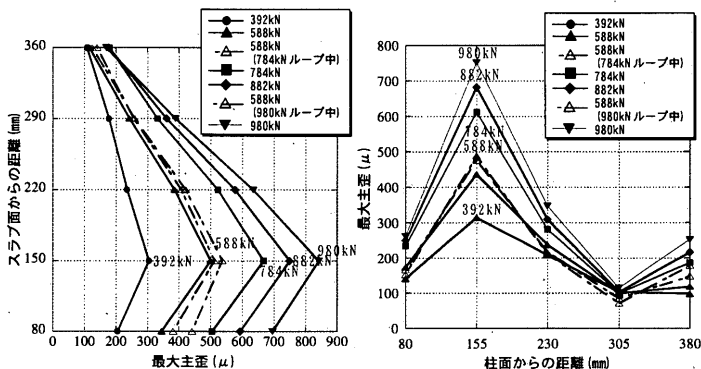


図-11: 柱側主歪分布(L8-s) 図-12: スラブ側主歪分布(L8-s)

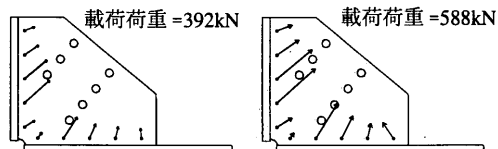


図-13: ガセットプレート主応力方向(B14-s)

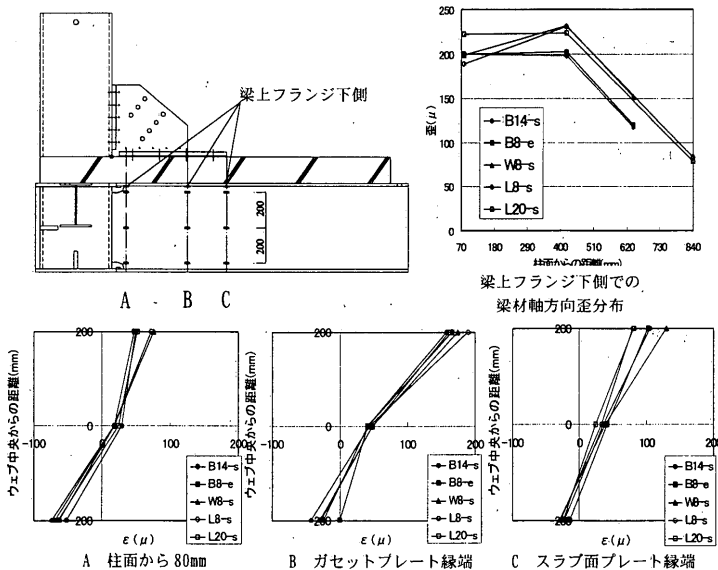


図-14: 鉄骨梁部分歪分布

荷重  $P$  が作用する試験体のコンクリートピース周辺部を取り出し、図-16のような平面応力を仮定し、コンクリートピースに作用する力の釣り合いを考える。

まず、コンクリート接着面垂直方向に引張力  $T$ 、水平方向にせん断力  $Q$  が作用していると考え、ここで、試験体への載荷荷重  $P$  は左右コンクリートピースに均等に配分され、鋼製治具はエポキシ樹脂に比べて充分剛性が高いことから、左右のピース間で加力治具に直行する力の授受が無いと仮定すると左右のコンクリートピースの接着面中心に鉛直方向の  $P/2$  の力が作用すると思われる。  $T$ 、 $Q$  は各試験体の角度  $\alpha$  を用いて

$$T = \frac{P}{2} \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

$$Q = \frac{P}{2} \cdot \sin \alpha \quad (2)$$

の関係で表される。また、図-16においてコンクリートピースを自由体として取り出し、力の釣り合いを考える。コンクリートピース両面のエポキシ接着面での境界条件は同じであると考え、せん断力  $Q$  により発生する曲げモーメントはコンクリートピース両面で等しいと仮定するとエポキシ接着面に作用する曲げモーメントは  $M = Q \cdot \frac{t}{2}$  となる。

ここで、接着面での垂直応力を  $\sigma_t$ 、せん断応力を  $\tau$  とし、せん断応力がエポキシ接着面に一様に分布していると仮定すると、接着面積を  $A = b \times d$  として、

$$\sigma_t = \frac{T}{A} = \frac{P \cdot \cos \alpha}{2A} \quad (3)$$

$$\tau = \frac{Q}{A} = \frac{P \cdot \sin \alpha}{2A} \quad (4)$$

で表される。また、(3)、(4)式から

$$\tau = \sigma_t \cdot \tan \alpha \quad (5)$$

の関係が成り立つ。

一方、接着面に作用する曲げモーメント  $M = Q \cdot \frac{t}{2}$  による接着面最外縁での応力を  $\sigma_b$  とし、平面保持を仮定すると  $b=100\text{mm}$ 、 $d=100\text{mm}$ 、 $t=50\text{mm}$  なので、

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} = \frac{Qt/2}{bd^2/6} = \frac{3Qt}{Ad} = 1.5 \frac{Q}{A} = 1.5\tau \quad (6)$$

で表される。

接着界面では接着面最外縁において垂直応力  $\sigma_t$  と曲げモーメント  $M$  による引張応力  $\sigma_b$  により最も大きな引張応力が作用していると考え、その接着面最外縁における引張応力を  $\sigma_t'$  とすると

$$\sigma_t' = \sigma_t + \sigma_b = \sigma_t + 1.5\tau \quad (7)$$

が成り立つ。

実験における接着面最外縁では応力状態  $(\sigma_t', \eta)$  にあるものとし、最大荷重  $P_{\max}$  に達した時の応力状態  $(\sigma_t', \eta)$  をエポキシ接着面破壊時の応力状態  $(\sigma_u, \tau_u)$  と仮定する。ここで、(3)、(4)、(5)、(7)式より(8)、(9)式が得られる。

$$\sigma_u = \sigma_t + 1.5\tau = \sigma_t + 1.5\sigma_t \tan \alpha = (1 + 1.5 \tan \alpha) \frac{P_{\max} \cos \alpha}{2A} \quad (8)$$

$$\tau_u = \frac{P_{\max} \sin \alpha}{2A} \quad (9)$$

角度  $\alpha$  に対する  $(\sigma_u, \tau_u)$  を表6に示す。

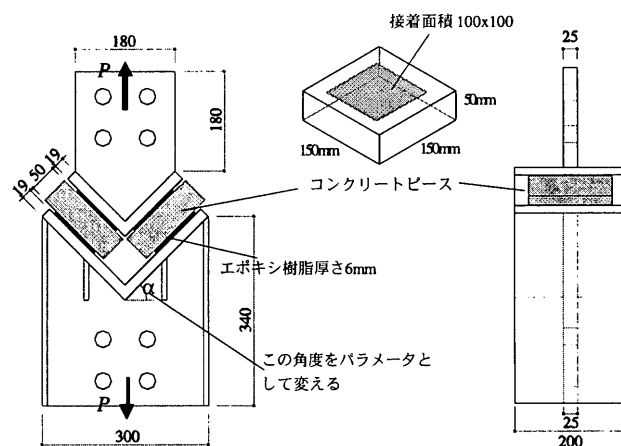


図-15 試験体概要

表-4 試験体一覧

| $\alpha$ | 0  | 15 | 30 | 45 | 60 |
|----------|----|----|----|----|----|
| 試験体      | 1体 | 1体 | 1体 | 2体 | 1体 |
| 形状       |    |    |    |    |    |

表-5 コンクリート材料試験結果

|       | 圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> ) | 引張強度(N/mm <sup>2</sup> ) |
|-------|--------------------------|--------------------------|
| 試験日強度 | 19.2                     | 1.66                     |

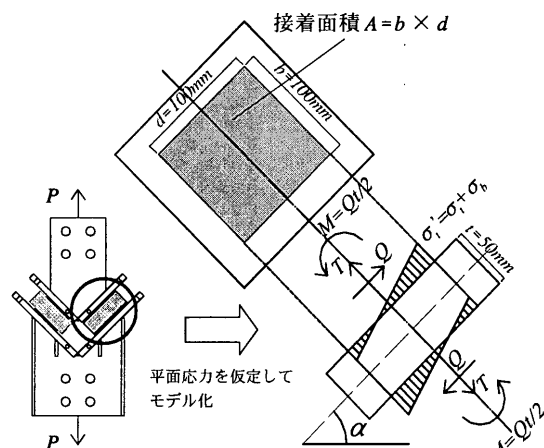


図-16 エポキシ接着界面応力状態のモデル化

次に破壊局面を考察し、実験結果から得られた  $(\sigma_u, \tau_u)$  関係と比較検討を行う。

まず、図-16における接着界面最外縁での応力  $(\sigma_t', \eta)$  が図-17のような応力状態にあると仮定する。この応力状態における最大主応力  $\sigma_1$  は

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_t'}{2} + \sqrt{\frac{\sigma_t'^2}{4} + \tau^2} \quad (10)$$

で表される。

この主応力  $\sigma_1$  がコンクリート引張強度  $f_t$  に達した時にエポキシ接着界面で破壊すると仮定し、その時の応力  $(\sigma_t', \eta)$  を  $(\sigma_u, \tau_u)$  とすると、

$$\frac{\sigma_u}{2} + \sqrt{\frac{\sigma_u^2}{4} + \tau_u^2} = f_t \quad (11)$$

が成り立つ。

(11)式を図示したものと、表-6の値をプロットしたものが図-18であ

る。これらを比較すると概ね良い対応を示すことから、本研究においては(11)式をエポキシ接着界面における破壊条件であると仮定する。

### 5.3 FEM (有限要素法) 解析

接合部実験におけるガセットプレートでの歪分布の検証とエポキシ接着面における応力分布を予測するために、接合部周辺のFEM解析を行った。解析プログラムは汎用プログラムABAQUSを用いた。

解析モデルを図-19に示す。ガセットプレート、柱面プレート、スラブ面プレート及び鋼管柱スキムプレートはシェル要素によりモデル化し、コンクリートスラブとエポキシ樹脂はソリッド要素にモデル化した。柱とガセットプレートの接合部は、鋼管スキムプレートと柱面プレートとの接合部分の板厚を足し合わせたシェル要素として置き換えている。接合アングル部分の外縁で囲まれる領域もアングル板厚とガセットプレート板厚を足し合わせたシェル要素とし、その部分に588kNの荷重を作用させた。なお、境界条件はコンクリートスラブ下面の鉄骨梁フランジ幅領域にあたる節点を完全固定、鋼管柱スキムプレートシェル要素の3辺を固定として解析した。図-20にガセットプレートにおける主歪分布のコンターを示す。図-21より、ガセットプレート柱面近傍の主歪では、実験値と同様スラブ面から約150mmの位置で最大値となる傾向にあり、ブレース接合部実験で得られた歪分布(実験値)と解析値は良い対応を示す。また、スラブ側においても図-22に示すように、柱面からの距離が約150mmにおいて最大値になった。このように、ガセットプレートでの主歪分布は実験値と概ね対応することから、ガセットプレート周辺部材への力の伝達もこの解析モデルにおける結果から推測する事とした。図-23はエポキシ接着面における最大主応力分布である。図-24は梁材軸方向のA-A'セクションの最大主応力分布を取り出したものであるが、そのピーク値は柱面から約150mmに位置し、これはアングル部の先端に最も近い位置にある。また、図-25においてB-B'セクションではスラブ面プレート縁端では応力が小さくガセットプレートに近づくにつれて応力が高くなる山型の応力分布を示しており、ガセットプレート直下に応力が集中していることがわかる。

以上より、エポキシの接着面の反力分布はガセットプレートのほぼアングル接合部のスラブに最も近い位置あたりをピークとし、接着面端部に向かって減少していく四角錐状であることが予測できる。

### 5.4 接合部の耐力評価

ここでは、要素実験で検討した破壊局面(11)式とFEM解析により示したエポキシ接着界面における主応力分布を踏まえて、ブレース接合部の耐力評価式を考える。エポキシ剥離時の耐力を接合部耐力と定義し、その評価法として、エポキシのみで接合したときの耐力 $P_{ep}$ と接着系アンカーによる耐力寄与分 $P_a$ を別に評価し、その和 $P_{cw} = P_{ep} + P_a$ を接合部耐力として計算する。

まず、エポキシによる寄与分 $P_{ep}$ を考えるにあたり、図-26のようにエポキシのみで接合した場合の接合部の力学モデルを考える。4.2のガセットプレート接合部周辺の歪分布測定結果、5.3のFEM解析からスラブ接着面における応力 $\sigma$ 、 $\tau$ は、接合アングルの最もスラブに近い位置を頂点とする四角錐応力分布に従うと仮定し、その四角錐の頂点と柱面との距離を $L_g$ とする。このエポキシ接着面での応力分布の最大値(頂点)が(11)式の破壊条件 $(\sigma_u, \tau_u)$ に達したときにエポキシが剥離すると仮定する。この時、 $\sigma_u = \tau_u \tan \theta$ の関係にあるものと仮定し、エポキシ接着面での水平反力 $H_p$ と鉛直反力 $V_p$ はともに $(\sigma_u, \tau_u)$ を頂点とする四角錐の体積分で集約されると考える。

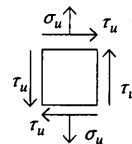


図-17 応力状態の仮定

表-6 実験値による $(\sigma_u, \tau_u)$

| 角度 | $\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $\tau_u$ (N/mm <sup>2</sup> ) |
|----|---------------------------------|-------------------------------|
| 0  | 1.66                            | 0.00                          |
| 15 | 1.66                            | 0.32                          |
| 30 | 1.64                            | 0.51                          |
| 45 | 1.33                            | 0.53                          |
| 45 | 1.74                            | 0.70                          |
| 60 | 1.38                            | 0.66                          |

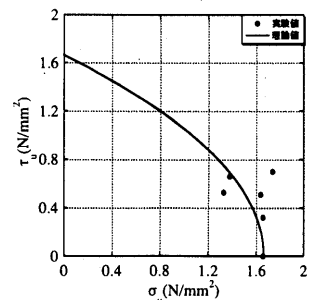


図-18  $\sigma_u$ - $\tau_u$ 関係

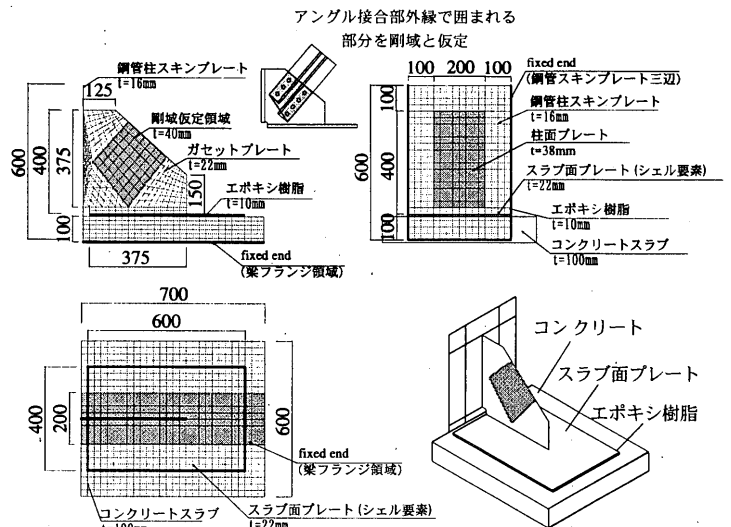


図-19 ガセットプレート最大主歪分布

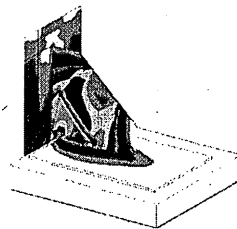


図-20 ガセット主歪分布

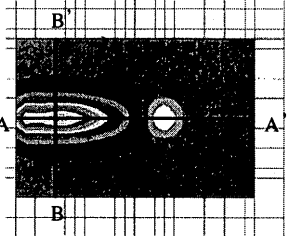


図-23 接着面主応力分布

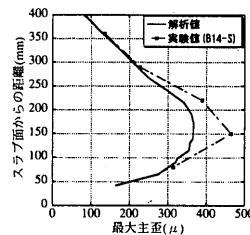


図-21 主歪分布(柱側)

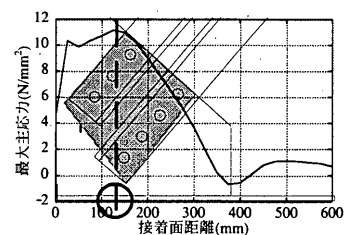


図-24 A-A' 主応力分布

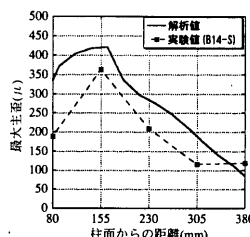


図-22 主歪分布(スラブ側)

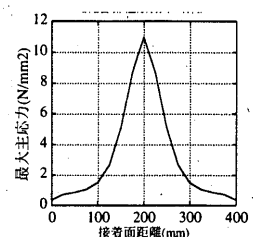


図-25 B-B' 主応力分布

柱側の反力は、ワンサイドボルト配置の図心位置でその水平集約反力  $H_B$ 、鉛直集約反力  $V_B$  が作用すると仮定する。そして、その図心位置とスラブ面からの距離を  $h_B$  とし、その柱集約反力作用点周りの力の釣り合いからエポキシ寄与分  $P_{ep}$  を(12)、(13)式より求める。

$$-P_{ep} \cdot h_B \cos \theta + V_{ep} \cdot L_{ep} + H_{ep} \cdot h_B = 0 \quad (12)$$

$$P_{ep} = \frac{H_{ep} h_B + V_{ep} L_{ep}}{h_B \cos \theta} \quad (13)$$

ここで、

$$V_{ep} = \frac{BL\sigma_u}{3} \quad H_{ep} = \frac{BL\tau_u}{3} \quad L_{ep} = \frac{L + L_g}{3} \quad (14)$$

で表される。

次に、接着系アンカーの寄与分  $P_a$  についても  $P_{ep}$  と同様のモデルを考え、

$$P_a = \frac{H_a h_B + V_a L_a}{h_B \cos \theta} \quad (15)$$

ここで、

$$V_a = n \cdot T_0 \quad H_a = \frac{V_a}{\tan \theta} = n \cdot \frac{T_0}{\tan \theta} \quad L_a = L_g \quad (16)$$

で表されるとする。接着系アンカーによる鉛直反力  $V_a$  は、 $n$  をアンカー本数、 $T_0$  をエポキシ剥離耐力時点におけるアンカー1本あたりの負担引張力として  $V_a = n \cdot T_0$  の形で表されると仮定した。 $T_0$  については、アンカーの有無のみをパラメータの違いとした試験体 B0-s と試験体 B8-s の実験結果を比較し、その接合部耐力の差分を試験体 B8-s の  $P_a$  とし、(15)式を用いた逆算により求めた。その計算結果より、エポキシ剥離耐力時に接着系アンカー1本あたりが負担する引張力を  $T_0 = 13.7 \text{ kN}$  とした。なお、文献6)による設計式で求めた接着系アンカーの引張り耐力は  $23.2 \text{ kN}$ 、せん断耐力は  $16.2 \text{ kN}$  であり、 $T_0$  を上回っていることを確認している。 $V_a$  のモーメントアーム  $L_a$  はいずれの試験体においても  $L_g$  とした。これは、接着系アンカーの効き方は、エポキシ接着面応力分布に影響を受けると考えられるので、仮定した接着面応力分布の最大位置である  $L_g$  を  $L_a$  とすることで、その影響を考慮した。また、水平反力  $H_a$  は  $V_a$  に対して、 $H_a = V_a \tan \theta$  の関係にあるものとしている。

以上より  $P_{ep}$  と  $P_a$  により接合部耐力を  $P_{cal} = P_{ep} + P_a$  として計算した。計算値  $P_{cal}$  と実験結果  $P_{ex}$  を比較したものを図27に示す。実験結果に対する計算値の値は  $0.90 \sim 1.23$  の間にあり、実験値と計算値は概ね良い対応を示したと言える。ただしスラブ面プレートの接着面における応力分布はスラブ面プレートの板厚により左右される。したがって今回提案した応力分布モデルはおよび耐力評価式は、本実験で使用した板厚近傍で有効である点に留意する必要がある。

## 6. 結論

本研究では、エポキシ樹脂と接着系アンカーを用いた施工性の良い耐震補強ブレース接合部を提案し、周辺部材を考慮に入れたブレース接合部の実大実験を通して、ブレース接合部としての性能を検討した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- 1) ブレース接合部は、エポキシ樹脂接着界面で剥離し耐力が決まるが、柱面の高力ボルトにより接合部は柱梁から乖離せず急激な耐力低下は抑制できる。
- 2) 接着系アンカーを併用することでエポキシ剥離時の耐力は上昇す

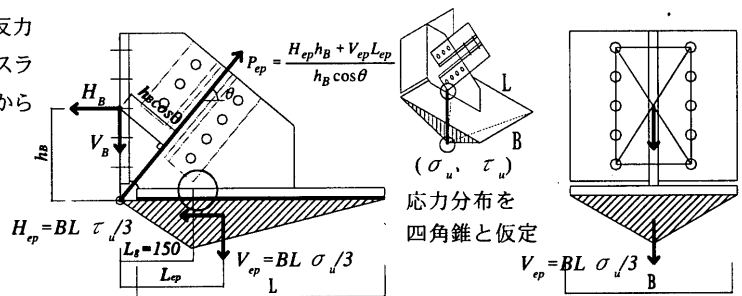


図-26 接合部のモデル化

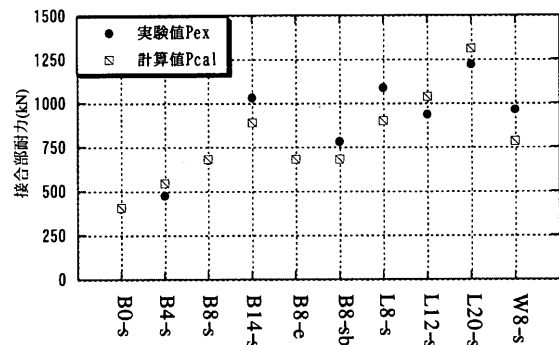


図27 実験値と評価式の接合部耐力比較

る。スラブ面プレート4隅に接着系アンカーを打設した試験体よりもガセットプレート近傍、スラブ面プレート全面に打設した試験体でその効果は高い。

3) FEM解析結果による接着界面応力分布を基にしたガセットプレート周辺の力学モデルより得られた耐力評価式から、本実験の範囲内での接合部耐力を概ね評価することができた。

本実験は柱梁接合部を取り出した実験であるため、フレームの変形に伴うコンクリートスラブの変形や亀裂の発生が再現されていない。そのため本接合方法をフレーム内に適応した実験により確認することは不可欠であり今後の課題とする。

## 謝辞

本研究を行うにあたり(株)東邦アーステック樋口哲郎氏、米田信一氏にご助言、ご協力を戴きました。ここに深く感謝いたします。

## 【参考文献】

- 1) 久木田真一, 荻野谷学, 宮川和明, 木下陵二, 藤澤一善, 藤永隆, 大谷恭弘, 三谷勲: 鋼管ブレースを使用した既存RC造建築物の耐震補強工法に関する実験的研究(その1 実験概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1分冊, pp377-378, 2000. 9
- 2) 毛井崇博, 宮内靖昌: 接着接合された鉄骨ブレース補強骨組の力学特性, 日本建築学会構造系論文集 第539号, pp103-109, 2001. 1
- 3) 日本建築防災協会, 日本鋼構造協会: 既存鉄骨造建築物の耐震改修施工マニュアル, pp50-53, 1996
- 4) 竹内徹, 山田哲, 北川まどか, 鈴木一介, 和田章: 構面外剛性の低い接合部により接合された座屈拘束ブレースの座屈安定性, 日本建築学会構造系論文集 第575号, pp121-128, 2004. 1
- 5) 日本建築学会, 鋼構造接合部設計指針 pp35-36, 2001
- 6) 日本建築防災協会, 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 pp197-198, 1990

(2004年4月10日原稿受理, 2004年8月6日採用決定)