

平鋼を挿入した膨張コンクリート充填鋼管ブレース材の 平鋼とコンクリートとの圧縮時の付着特性

大田和彦*

Bond Characteristic between Flat Bar and Concrete in Expansive-Concrete-Filled-Steel-Tube with Flat Bar in Center under Compression Load

Kazuhiko OHTA

Synopsis

This study is on the bond characteristic between a flat bar and a concrete in the expansive concrete filled steel tube with the flat bar in center. This tube is used for the brace member of the energy dissipative braced frame. To obtain the bond characteristic, I carried out the repeated tension and compression loading test of the tube. And then obtained the relationship between the bond stress and the slip on the interface under compression load. Based on this relationship, by solving the differential equation on this bond characteristic, I found the possibility of the evaluation of this tube's stiffness.

Keywords : brace, concrete filled tube, expansive concrete, prestress, bond

1. はじめに

著者らは、図1に示すようなK型ブレースの頂点に簡単な鋼板履歴ダンパーを取り付けた制振ブレース架構を提案している。制振ブレース架構は、梁と柱が鉛直荷重を支え、鋼板履歴ダンパーが地震時の入力エネルギーを消費し、ブレース材が水平力を負担する仕組みになっている。この制振ブレース機構を高層建築架構の下層部に取り付ければ、我々は、ブレース材に座屈を起こさず、耐力低下のない、また、地震入力エネルギー吸収効率がよく、繰り返し力に対して粘り強い建築構造物を造り上げることができる^{1)~6)}。

制振ブレース架構の地震入力エネルギー吸収は、柱・梁架構の梁とブレース頂部との水平方向相対変位に

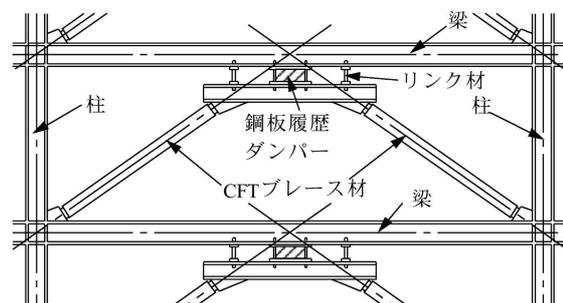


図1 制振ブレース架構

よる、履歴ダンパーの塑性変形によって行われるので、そのエネルギー吸収性能をよくするためには、ブレース

* 近畿大学工学部建築学科

Department of Architecture, School of Engineering,
Kinki University

ス材としては、履歴ダンパー降伏時のブレース材の応力を上回る引張・圧縮強度を保有し、なるべく剛性の高い部材を安価に提供することが求められる。

著者らは、この制振ブレース架構のブレース部材として、その最も簡単な製作方法の一つとして、円形鋼管に建築架構の上下梁とブレースとの接続のための平鋼を挿入して、エトリンガイト系の高性能膨張材を混和したコンクリートを充填したブレース材(以下、CFT ブレース材と呼ぶ)を提案している。この CFT ブレース材の鋼管とコンクリートは、ブレース材の軸方向力の約7割を負担する。そこで、文献 16) では、CFT ブレース材の単調引張時の平鋼とコンクリートとの付着応力度分布とすべり分布を実験を通して求め、平鋼とコンクリートとの付着応力度-すべり曲線を明らかにし、付着応力度-すべり曲線をトリリニアモデルに理想化し、付着問題の基礎微分方程式を解くことによって、CFT ブレース材に挿入される平鋼の引張力分布の予測を検討し考察した。本論文はその研究の続編である。

本論文では、CFT ブレース材が圧縮荷重を受けるとき、挿入される平鋼の圧縮力分布の予測について、文献 16) と同様の手法で検討を行っている。なお、過去の研究においても、鉄筋コンクリート部材や鉄骨鉄筋コンクリート部材の鉄筋や鋼板とコンクリートとの付着特性を扱った文献はいくつかある(例えば文献 19 ~ 21)。しかし、異形鉄筋のコンクリートに対する短期許容付着応力度は、高くても 4N/mm^2 程度である。これに対して CFT ブレース材では、コンクリートにあらかじめ極めて高い圧縮膨張圧を加えて平鋼とコンクリートとの摩擦力を高めることで、 10N/mm^2 以上の極めて高い付着強度を発生させていることに特色がある。

2. 実験方法

2.1 試験体

試験体の形状と寸法を図2に示す。試験体は、幅100mm、厚さ16mmの平鋼を挿入した全長1.2mの円形鋼管に膨張コンクリートを充填させて製作した。試験体両端部は開放されており、コンクリートが見える状態になっている。CFT ブレース材は制振ブレース架構に使用することを目的にしているので高引張力を受けるが、試験体断面のプロポーシオンは高引張力に対してこれまでの実験結果から図2に示す断面寸法比が適当であると考えている¹⁵⁾。また、試験体の長さは、鋼管厚方向膨張圧が 20N/mm^2 の極めて高いプレストレスが生じていれば平鋼とコンクリートとの付着の影響は試験体の両端部から鋼管外径の2.8倍以内になることがわかっているので、作業性のことも考え

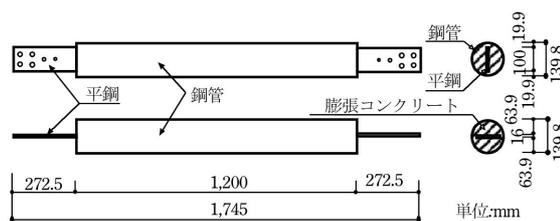


図2 試験体の形状と寸法



写真1 引張・圧縮静的繰り返し加力装置

て決めている⁸⁾。

2.2 材料

膨張コンクリートには、エトリンガイト系の高性能膨張混和材を使用している。コンクリートの調合は、水結合材比を25%にし、膨張材置換率を35%にした。水結合材比を25%にしたのは、過去の研究成果¹⁷⁾から、水結合材比25~30%のときに極めて高い膨張能力を示すことが明らかになっているからである。また、膨張材置換率35%は、拘束鋼管を降伏させることを意図して投入した膨張材量である。膨張材を含まないコンクリートの力学特性は、圧縮強度 66.6N/mm^2 、割裂強度 3.73N/mm^2 、ヤング係数 45.4kN/mm^2 、ポアソン比0.202である。

一方、平鋼(ウエルテン590RE)の力学特性は降伏強度 565N/mm^2 、引張強度 664N/mm^2 である。また、円形鋼管には、外径139.8mm、管厚3.5mmのSTK400鋼を使用した。その力学特性は、降伏強度 378N/mm^2 、引張強度 455N/mm^2 で、平鋼、鋼管ともヤング係数はともに 206kN/mm^2 である。

2.3 試験体の製作および養生

試験体は、鋼管に平鋼を挿入し、専用の打設台に約45度傾けた状態で設置し、膨張コンクリートを打設した。このとき鋼管に振動を加え、空気を巻き込まないように注意しながらコンクリートを流し込み、コンクリートを鋼管上端近くまで打設した後、試験体を垂直にして残りのコンクリートを鋼管上端まで打設し

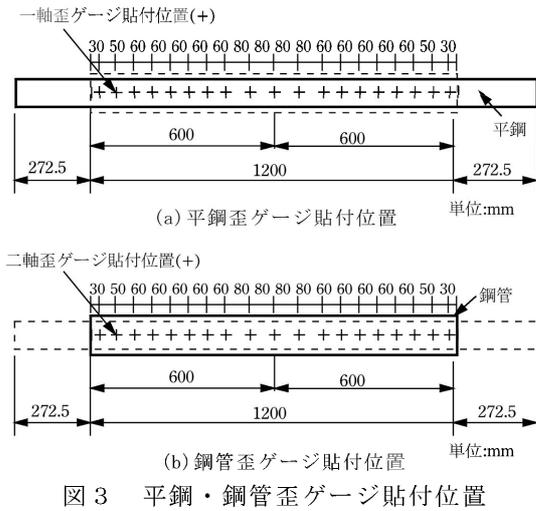


図3 平鋼・鋼管歪ゲージ貼付位置

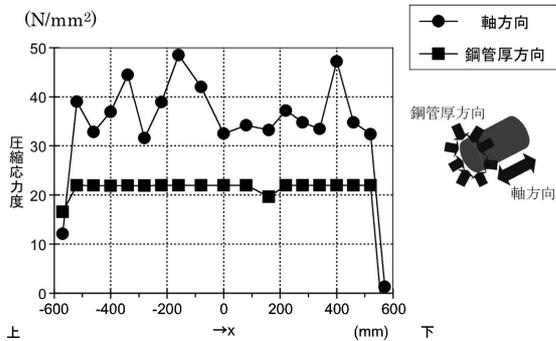


図4 コンクリート膨張圧

た。コンクリート打設後、打ち込み面をラップ材で密封し水分の蒸発を防いだ。試験体は、コンクリート打設後約 15℃の部屋に放置し、翌日恒温恒湿室(20℃、60%)に入れて6週間気中養生した。

2.4 加力・計測システム

1) 加力プログラム

写真1に本実験で用いた引張・圧縮静的繰り返し加力装置を示す。本論文の目的は、単調圧縮時の平鋼とコンクリートとの付着特性を明らかにすることであるから、最初に圧縮側から加力を始め、荷重800kNまで引張・圧縮の繰り返し加力を5サイクル実施した。最大荷重を800kNとしたのは大地震時に平鋼降伏強度500 N/mm²レベルの荷重を想定したからである。

2) 計測方法

図3に示すように、平鋼と鋼管の応力を測定するために、平鋼には材軸方向に埋め込み一軸歪ゲージを、鋼管には軸方向と周方向に二軸歪ゲージを貼付した。平鋼の歪ゲージのリード線は、貼付面から引き出し、鋼管表面上に貼付した歪ゲージから少なくとも4cm以上離れた位置の鋼管に3mm程度の穴を開け、そこから外部に取り出している。これらの平鋼の軸方向歪

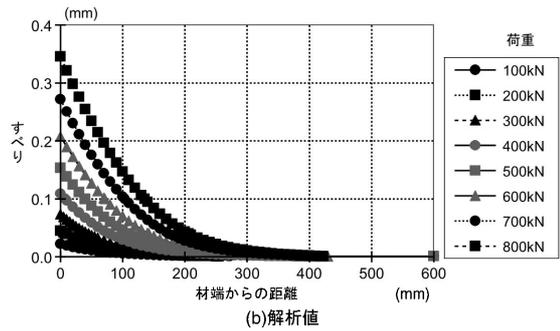
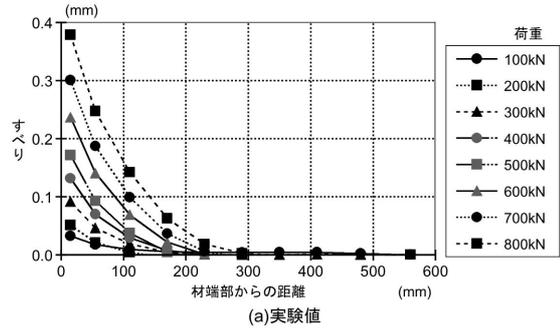


図5 すべり分布

と鋼管軸方向歪及び周方向歪を加力実験時だけでなく、養生期間中も計測した。平鋼、鋼管、コンクリートの各応力はこれらの歪をもとに文献9)に示す計算方法で求めている。

2.5 加力実験前のプレストレス

図4に加力実験前のコンクリートの膨張圧を示す。縦軸にコンクリートの圧縮応力度を、横軸に試験体の材軸位置(試験体中央部を原点にしている)を示している。コンクリートの膨張圧は次のようにして求めている。最初に鋼管軸方向歪及び周方向歪をもとに鋼管の軸方向応力度および鋼管の周方向応力度を計算する。次にコンクリートの鋼管厚方向応力度を、薄肉鋼管であると仮定して鋼管の周方向応力度をもとに求めている。一方、平鋼の軸方向応力度は、平鋼の軸方向歪とコンクリートの鋼管厚方向応力度をもとに求める。最後に、コンクリートの軸方向応力度を、鋼管と平鋼の軸方向応力度からそれぞれの引張力を計算しその反作用力がコンクリート断面に一樣に作用しているものとして求めている。

図4から、本試験体は鋼管厚方向には材端部近傍を除けば20N/mm²程度のほぼ一定の圧縮応力度が生じていることがわかる。他方、軸方向のコンクリート膨張圧は平鋼の軸応力がばらつくので大きくばらついてはいるが、材端部近傍を除けば少なくとも30N/mm²以上の圧縮応力度が生じている。このように本論文では、本試験体のようなコンクリートに極めて高い膨張

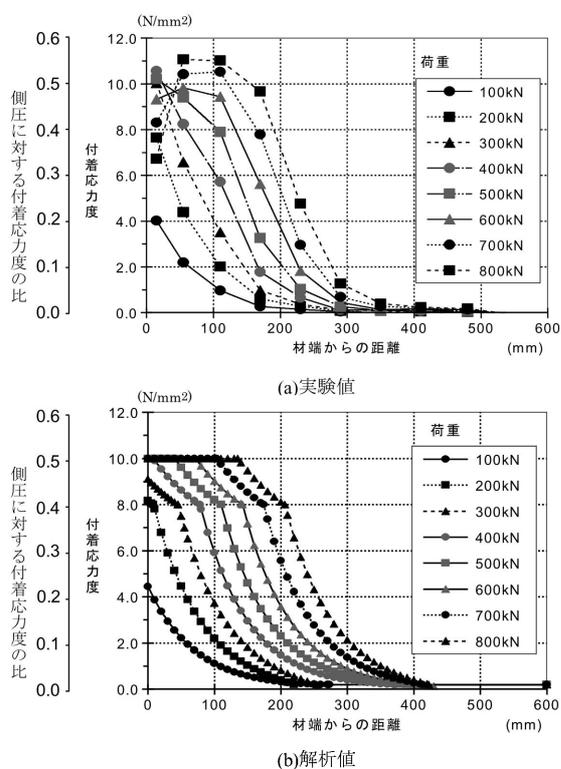


図6 付着応力度分布

圧が生じている場合の平鋼とコンクリートとの界面での付着特性を論じている。

2.6 実験結果

1) すべり分布

図5に1サイクル目圧縮加力時のすべり分布を示す。実験は両引き両押し試験であるので、試験体の材軸中央を対称に試験体両端ですべりが観察されるが、両端とも同じような分布図を示すので、本論文では、コンクリート打設時の試験体上端部側を示している(以下の図も同様)。縦軸にすべりを、横軸に試験体の材軸位置(試験体材端を原点にしている)を示している。なお、すべり量は平鋼とコンクリートの軸歪をもとに計算する必要があるが、コンクリートの軸歪を直接測定していないので、文献16)と同様に鋼管の軸歪を代用している。

図5から、最大引張荷重800kN時では、最大すべりは試験体材端部で生じ、その大きさは約0.35mm程度であることがわかる。しかし、すべりは材端からの距離に伴って低下し、100mm(鋼管外径の0.71倍)で約0.15mm、200mm(鋼管外径の1.43倍)で約0.05mmとなり、すべりが生じる範囲は材端部から約300mm(鋼管外径の2.18倍)の距離である。

2) 付着応力度分布

図6に1サイクル目圧縮加力時の付着応力度分布を

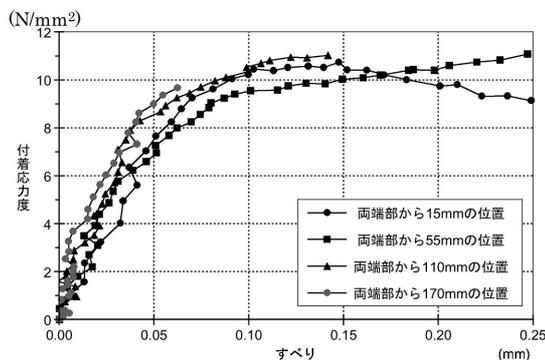


図7 付着応力度-すべり曲線

示す。縦軸には付着応力度と側圧に対する付着応力度の比の二つの軸を示している。これは、コンクリートの拘束圧(膨張圧)が付着応力度に対して重要な因子であると考えたからである。横軸は試験体の材軸位置を示している。ここで、付着応力度は次の手順によって求めている。最初に平鋼軸歪と側圧をもとに平鋼の軸方向応力度を求め、それに平鋼の断面積を乗じることで平鋼の引張力分布を明らかにする。次に各歪計測区間の付着応力度は等しいと仮定して、各区間の平鋼引張力の差を求め、それを対応する区間の表面積で除することによって、その区間の付着応力度を求めている。したがって、各区間の付着長さは、材端部から30mm、50mm、60mm 4区間、80mm 2区間となる(図3参照)。

図から、最大付着応力度は荷重300kN時あたりで試験体材端部に生じる。最大付着応力度に達すると試験体材端部から平鋼とコンクリートの界面においてすべり破壊が生じ、試験体内部へ進行することになる。このすべり破壊時の最大付着応力度は約10N/mm²であることがわかる。この最大付着応力度が平鋼とコンクリート間に作用する摩擦力であるとするれば、このときの摩擦係数は0.5程度であると考えられる。さて、荷重レベルが400kN以上に上がると、材端部での付着応力度は低下する傾向にある。一方で、材端部からの距離が50~100mm(鋼管外径の0.36~0.71倍)になるとすべり破壊面の付着応力度は若干増加する。最大圧縮荷重800kN時の付着破壊は材端部から100mm(鋼管外径の0.71倍)程度にまで達する。他方、平鋼からコンクリートへの力の伝達範囲は最大圧縮荷重800kN時に材端部から300mm(鋼管外径の2.18倍)にまで達する。

3) 付着応力度-すべり曲線

上述のすべり分布と付着応力度分布をもとに求めた1サイクル目圧縮加力時の付着応力度-すべり曲線を図7に示す。図は縦軸に付着応力度を、横軸にすべりを取り、圧縮力の伝達が主になされていると思われる

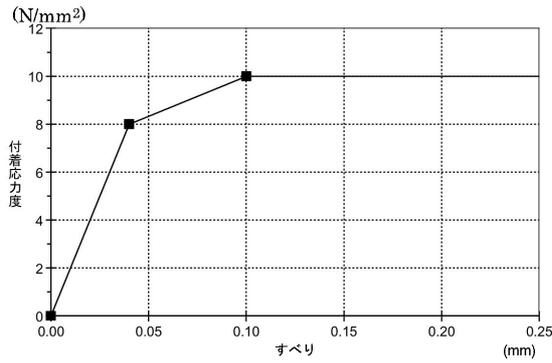


図8 ブレース材引張時の付着
応力度—すべり曲線のモデル化

材端部から 15mm、55mm、110mm 及び 170mm の位置での付着応力度とすべりの関係を図示している。

図を見ると端部からの距離によって、付着応力度—すべり曲線は、ばらつきはあるものの同様の曲線を描く。すべり 0.04mm までは付着応力度はすべりに対してほぼ直線的に増加し、すべり 0.04mm を超えると付着応力度の増加に比べてすべりが徐々に増し、すべり 0.1mm 前後の時に約 10N/mm² の付着応力度に達する。その後は 10N/mm² の付着応力度の大きさを保持しながら、すべりのみが増大する。

3. 付着問題の基礎微分方程式¹⁹⁾と実験結果との比較検討

3.1 付着応力分布の基礎微分方程式

文献 16) にしたがって、①横ひずみは無視でき、垂直応力に対して弾性である。②垂直応力は横断面内等分布である。③鋼管とコンクリートはすべりを生じないと仮定すれば、付着問題の基礎微分方程式は下式で表される。

$$\frac{d^2 S_x}{dx^2} = \frac{1+np/(1+nq)}{E_s A_s} \psi \tau_x \quad (1)$$

ここに、 τ_x と S_x は材端から距離 x 離れた位置での平鋼とコンクリートとの付着応力度とすべりを表す。一方、 ψ は平鋼の周長を表す。 E_s は鋼材のヤング係数を表し、 A_s は平鋼の断面積を表す。また、 n はヤング係数比を、 p は平鋼のコンクリートに対する断面積比を、 q は鋼管のコンクリートに対する断面積比をそれぞれ表す。

式(1)において、

$$\tau_x = f(S_x) \quad (2)$$

という付着応力度—すべり曲線が与えられれば、境界条件のもとで式(1)を解けばすべり分布が求まり、それによって、付着応力度分布や平鋼の軸方向力分布を知ることができる(文献16参照)。

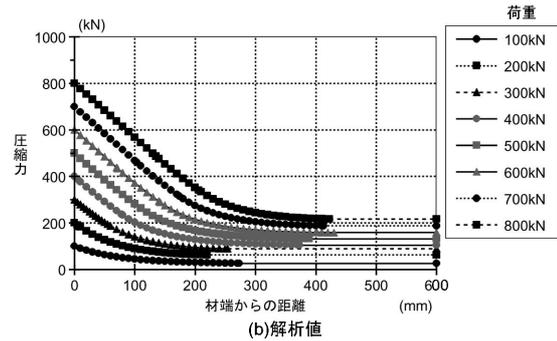
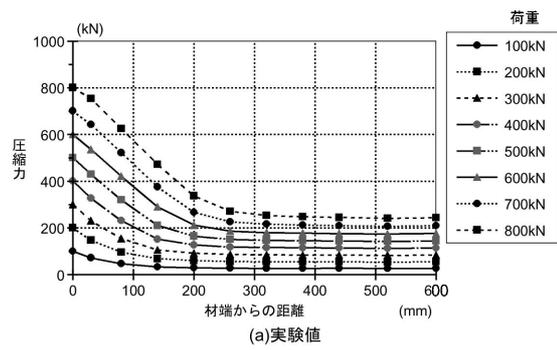


図9 平鋼圧縮力分布

3.4 付着応力度—すべり曲線の理想化

2.6節の実験結果と図6から、ブレース材圧縮時の付着応力度—すべり曲線を図8のように理想化した。すなわち、コンクリートの接着力及び平鋼とコンクリートとの摩擦抵抗力による範囲は、原点から付着応力度 8N/mm²、すべり 0.04mm の座標点までとする。次に、主として平鋼とコンクリートとの摩擦抵抗力による範囲は、その座標点から付着応力度 10N/mm²、すべり 0.1mm の座標点までとする。すべり 0.1mm 以上では、付着応力度を保持したまますべりが進行するものとする。

3.5 解析結果と実験結果との比較

1) すべり分布

図5(b)にすべり分布の解析結果を示す。縦軸にすべりを、横軸に試験体の材軸位置を示している。

図5の実験値と解析値を比較すると、解析値は実験値よりもすべりを若干小さく評価するが、実験値と解析値はほぼ良い対応を示す。一方、すべりを生じている範囲も、最大引張荷重 800kN 時では、実験値も解析値も材端部から 300mm (鋼管外径 2.18 倍) あたりまでで実験値と解析値はほぼ一致している。

2) 付着応力度分布

図6(b)に付着応力度分布の解析結果を示す。縦軸に付着応力度を、横軸に試験体の材軸位置を示している。

図6の実験値と解析値を比較すると、材端部でのすべり破壊時の付着応力度の低下を解析モデルでは表すことはできないが、最大圧縮荷重 800kN まで実験値

と解析値は大変良い対応を示していることがわかる。

3) 平鋼の圧縮力分布

図9に平鋼圧縮力分布の実験値と解析値を比較して示す。図(a)は実験値を、図(b)は解析値を示している。両図とも縦軸に平鋼の圧縮力を、横軸に試験体の材軸位置を示している。

図9から実験値と解析値を比較すると、最大圧縮荷重 800kN まで、解析値は実験値に対して大変良い対応を示していることがわかる。

4. 結語

本論文は、制振ブレース架構のブレース部材として用いられる平鋼を挿入した膨張コンクリート充填管材(CFT ブレース材)に関する一連の研究の一つである。

CFT ブレース材は平鋼からコンクリートへ、コンクリートから鋼管へと引張力や圧縮力が伝達されるので、本論文では、圧縮力を受けるときの平鋼とコンクリートとの付着特性を明らかにして、CFT ブレース材の剛性評価を可能にすることを目的にしていた。

そこで、CFT ブレース材の引張・圧縮の繰り返し加力実験を実施した結果、本鋼管ブレース材が単調圧縮力を受けるときの付着応力度-すべり曲線に関しては、以下の知見を得た。

- 1) 圧縮力を受ける CFT ブレース材の付着応力度-すべり曲線は、材端部からの距離によってばらつくが、ほぼ同様の曲線を描く。
- 2) 付着応力度-すべり曲線は、すべり 0.04mm まではほぼ直線的に増加し、それを超えるとすべりの増大が次第に増し、すべり 0.1mm 前後で最大付着応力度 10N/mm² 前後に達する。
- 3) 最大付着応力度到達後の付着応力度-すべり曲線は、最大付着応力度をほぼ保持しながら、すべりのみが進行する。

次に、ブレース材が圧縮力を受けるときの付着応力度-すべり曲線を材端部からの距離に関係なく図8に示すようなトリリニアモデルに理想化し、付着問題の基礎微分方程式を解き、実験値との比較を行った。その結果、本解析法は最大圧縮荷重レベルまで、すべり分布、付着応力度分布および平鋼圧縮力分布をほぼ予測できることがわかった。

参考文献

- 1) 玉井宏章、近藤一夫、花井正実他：低降伏応力度鋼を用いたK型ブレース制振装置付架構の力学性状、鋼構造年次論文報告集、第1巻、pp.209-216、1993
- 2) 玉井宏章、近藤一夫、花井正実他：低降伏応力度

鋼のK型ブレースへの適用について、鋼構造論文集、第1巻、第1号、pp.41-52、1994.3

- 3) 玉井宏章、近藤一夫、花井正実：履歴減衰装置の極低サイクル疲労特性と実地震応答下における疲労寿命の予測、日本建築学会構造系論文報告集、第462号、pp.141-150、1994.8
- 4) 玉井宏章、近藤一夫、花井正実他：K型制振ブレースの実地震応答下における疲労寿命の予測（その1、その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、構造Ⅲ、pp.389-391、1995.8
- 5) 玉井宏章、近藤一夫、花井正実他：制振ブレースの実大エネルギー吸収部材の力学的特性（その1、その2）、日本建築学会中国・九州支部研究報告、第10号、pp.561-568、1996.3
- 6) 玉井宏章、國末晃寛、近藤一夫、花井正実：下層部に制振ブレースを有する鉄骨造高層架構の実地震応答性状、日本建築学会技術報告集、第2号、pp.55-61、1996.4
- 7) 大田和彦、在永末徳、花井正実：平鋼を挿入した膨張コンクリート充填鋼管ブレース材の引張特性に及ぼすケミカル・プレストレスの効果、日本建築学会技術報告集、第3号、pp.139-145、1996.12
- 8) 大田和彦、在永末徳、花井正実：平鋼を挿入した膨張コンクリート充填鋼管ブレース材のケミカル・プレストレスと引張特性、日本建築学会構造系論文集、第502号、pp.157-164、1997.12
- 9) 大田和彦、小尾幸雄、在永末徳、花井正実：平鋼を挿入した膨張コンクリート充填鋼管ブレース材の圧縮特性、日本建築学会構造系論文集、第518号、pp.127-134、1999.4
- 10) 大田和彦、在永末徳、花井正実：膨張コンクリート充填鋼管材の力学特性に及ぼすケミカル・プレストレスの効果、日本建築学会構造系論文集、第529号、pp.179-186、2000.3
- 11) 大田和彦：膨張コンクリート充填鋼管材の開発とその制振ブレース建築架構への適用に関する研究、平成12年度科学研究費補助金（基盤研究（C）（2））研究成果報告書（課題番号：11650602）、2001.3
- 12) 大田和彦、在永末徳、花井正実：高膨張コンクリートの調査とその充填鋼管材の圧縮特性、コンクリート工学論文集、第12巻、第2号、pp.61-70、2001.5
- 13) 大田和彦、在永末徳、花井正実：膨張コンクリート充填鋼管材の圧縮時の力学モデル、コンクリート工学論文集、第13巻、第2号、pp.99-108、2002.5
- 14) 大田和彦、在永末徳、花井正実：制振ブレース架構に用いられる膨張コンクリート充填鋼管ブレース

- ス材の開発、膨張コンクリートによる構造物の高機能化／高耐久化に関するシンポジウム論文集、pp.33-40、2003.9
- 15) 大田和彦、在永末徳、花井正実：平鋼を挿入した膨張コンクリート充填鋼管材の膨張特性に関する研究、コンクリート工学論文集、第 16 巻、第 1 号、pp.23-30、2005.1
- 16) 大田和彦：平鋼を挿入した膨張コンクリート充填鋼管ブレース材の平鋼とコンクリートとの引張時の付着特性、日本建築学会構造系論文集、第 634 号、pp.2253-2261、2008.12
- 17) 大田和彦：制振ブレース架構に用いられる膨張コンクリート充填鋼管材ブレース材の開発、平成 17 年度科学研究費補助金（基盤研究（C）（2））研究成果報告書（課題番号：14550584）、2005.4
- 18) 大田和彦：平鋼を挿入した膨張コンクリート充填鋼管ブレース材の平鋼とコンクリートとの付着特性に関する基礎的研究、日本建築学会中国支部研究報告書、第 31 巻、2008.3
- 19) 六車 熙、森田司郎、富田孝次郎：鋼とコンクリートに関する基礎的研究（I 付着応力分布について）－（I）（II）、日本建築学会論文報告集、第 131 号、pp.1-8、1967.1、第 132 号、pp.1-6、1967.2
- 20) 瀬戸強士、堀田久人：拘束下のコンクリートと鋼板・異形鉄筋の付着特性に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集（C-1 分冊）、1996.9、pp.937-938
- 21) 中林一久、堀田久人：拘束下のコンクリートと鋼板の付着特性に関する研究（その 1、その 2）、日本建築学会大会学術講演梗概集（C-1 分冊）、1998.9、pp.1067-1068、1999.9、pp.1129-1130