

パイプトラス橋現場溶接継手部の構造研究

A Study on the New Connecting System of Pipe Welding Joint in Yard

保坂鐵矢*, 市川篤司**, 磯江暁***, 落合盛人****, 橋本靖智*****, 阿部和浩*****

Tetuya Hosaka, Atushi Ichikawa, Akira Isoe, Morito Ochiai, Yasusato Hashimoto, Kazuhiro Abe

*工博、(株)ルネサンスエンジニアリング (前日本鉄道建設公団設計技術室) (〒100-0014 東京都千代田区永田町 2-14-2)

**工博、(財)鉄道総合研究所 (前東京工業大学工学部土木工学科) (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

***工博、川崎重工業 (株) 航空宇宙部 (前川崎重工業 (株) 関東技術研究所) (〒278-8585 各務原市川崎町 1 番地)

**** 川崎重工業 (株) 橋梁・水門技術部 (〒278-8585 野田市二ツ塚 118)

*****工修、川崎重工業 (株) 汎用機部 (前川崎重工業 (株) 橋梁・水門技術部) (〒673-8666 明石市川崎町 1-1)

*****工修、川崎重工業 (株) 橋梁・水門技術部 (〒673-8666 明石市川崎町 1-1)

In the areas of heavy snowfall, not only cost performance but also protection against snow and icicle is needed for railway bridges. On account of these demands, steel pipe truss is proposed as a new type bridge. The authors think it rational to fabricate K-shape node parts in factory and construct truss in yard by connecting straight pipe members. In this case well known bolt joint settled inside pipe is available, but easy joining method utilizing the merit of composite structure is desired. In this paper, new connecting method of pipes which is filled with concrete is proposed and its mechanical performance is shown by experiment and FE analysis.

key words : pipe truss, joint, bridge, construction, CFT

キーワード: パイプトラス, 継手部, 橋梁, 構造, コンクリート充填鋼管

1. はじめに

豪雪地帯における鉄道橋は、列車を安全に運行する上で雪が積もり難くかつ氷柱が成長し難い構造が望ましい。また、最近の社会情勢から、新規構造を実現するためには従来構造に比べてコストパフォーマンスに優れていることが要求される。以上の条件を満たすものとして、従来多用されてきた箱トラスに代えてパイプトラスを使用することが検討されている。パイプトラスを製作する場合は規格品のパイプを使用することを前提としており、これにより平板を組立てて断面を構成する箱トラスに比べて溶接量が少なくなること、また構造上重要な格点部についても内部に若干の補強材を設置しコンクリートを充填することで比較的容易に必要な強度（静的な耐力および動的な疲労強度）を確保できる目処が実験および解析によりたっていることから¹⁾、コストパフォーマンスに優れた構造にすることが十分可能であると考えられる。

一方、パイプトラスを対象とした着雪試験では、積もった雪の脱落が早く、氷柱が成長しないなどの成果も報告されている。このような事情からパイプトラスの実現は大いに期待されるところであるが、残念ながら国内鉄

道橋には過去にパイプトラスを使用した実績がないようである。

パイプトラス形式を採用する場合、重要な構造要素のひとつとなるのが鋼管を相互に接合する現場溶接継手部である。現場継ぎ手部は、現地での施工が容易でかつ十分な荷重伝達機能を有する構造とする必要がある。従来は、引張り継手部を溶接により製作する場合に、母材と同等の強度を確保するため完全溶込み溶接が施されている。また、鋼管内部にコンクリートを充填した構造はあるが、これらは柱等の圧縮または曲げ荷重を支持するために使用されており、引張り部材としては使用されていない。

現場で完全溶込み溶接、あるいは品質がそれと同等の溶接を行うのは、効率の面で困難である。完全溶込み溶接を行うには鋼管の内側と外側の両方から溶接作業を行うことになるが、そのためには人が入れるだけのスペースとマンホールが必要となり、手間もかかる。内側からの溶接をせずに外側からのみの溶接で完全溶込み相当の品質を確保する方法として、裏当て材の使用、およびTIG溶接の採用といった2種類の方法が考えられる。

内側に裏当てを設置する場合は通常継手部付近にいく

つかのハンドホールを設ける必要があり、ハンドホールを塞ぐ作業が複雑なことに加え、構造物の継手部強度に影響を与える可能性がある。TIG 溶接を用いて裏当てなしの片側からの溶接で裏波を出す方法もあるが、TIG 溶接は MAG 溶接に比べて溶接スピードが遅く、また開先部分の隙間を精度良く管理する必要があり、特に構造物を現場で架設する際に使用するには効率が悪いと考えられる。

我が国で鋼管を用いた道路橋の例としては、宇品橋のアーチ橋がある。宇品橋では鉛直材がφ609.2mm 程度ではガウジング方式を、小口径では裏当て金を用いた FP 方式である。

国外においては、幾つかの例がある。スイスの Lully 橋はパイプトラスによりコンクリート床版を支持する合成橋梁であるが、景観性が優れているなどの点から最近注目されている^{2), 3)}。架設の際、弦材同士の継ぎ目は裏当てを用いて外側からの溶接で結合しているが、弦材が直径 50cm 程度と細いこと、板厚は 25~50mm と厚いことなど、ここで対象としている構造とはかなり異なる点がある。同橋の疲労問題に関しては不明な点もあるが、かなり安全側で設計しているようである。ドイツでは新ベルリン中央駅のフンボルト・ハーフェン橋(上路アーチ構造)の例があり、格点部を鋳鋼製としている。

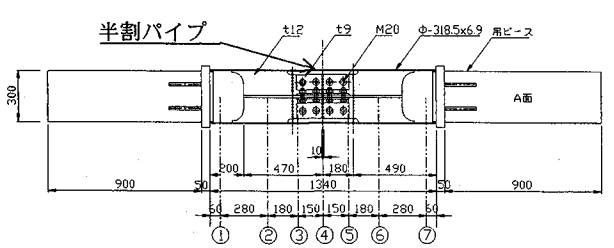
本研究では、パイプトラス弦材の現場溶接継手部に着目し、鋼管相互の溶接を、施工性を考慮して裏当てなしの外側からの部分溶け込み溶接とし、完全溶け込み溶接と比較して低下すると考えられる強度を、コンクリートを充填することにより補う構造について提案する。そこで、提案した現場継手構造に対して載荷試験を行い、静的耐力について検討を加えるものである。

2. 試験体および試験方法

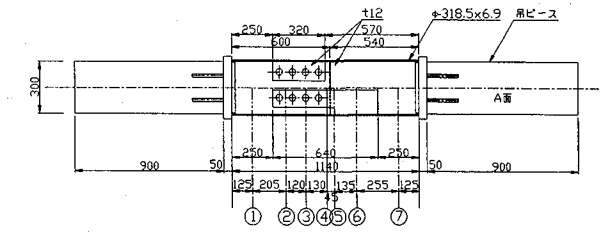
(1) 試験体

この試験体は、著者らが一連のパイプトラス研究の中で対象としている新幹線信濃川橋梁の下弦材をパイプに置換した場合を想定しており、試験体のスケールは約 1/2、設計荷重相当の軸力は 1,060kN である。

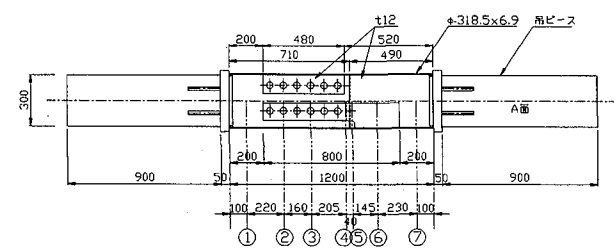
ここでは、差込定着方式と呼ぶ新形式のパイプ継手と、建築構造などでパイプ構造の継手として一般的に使用されている十字継手の 2 種類を試験し、その性能を比較している。パイプトラスを現地で架設する場合、従来の方法で使用可能なものは図 1(1)に示す十字継手方式である。これは結合する両側のパイプ断面内に十字形のリブを設けておき、これらの添接板を介してボルトで結合する方法である。十字継手の外側には半割したパイプを被せて溶接しており、通常はこの状態で使用するが、本研究ではコンクリート充填による補強効果を期待してコンクリートを充填している。他方、差込継手は、一方のパ



(a) 試験体 B-1(十字継手)



(b) 試験体 B-2(差込継手、差込深さ:1 φ)



(c) 試験体 B-3(差込継手、差込深さ:1.5 φ)

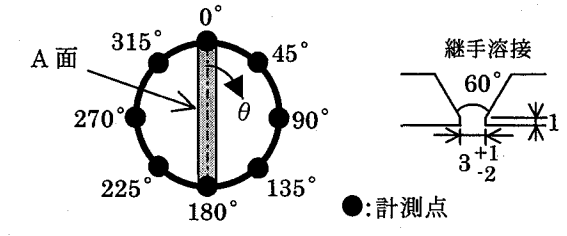


図1 試験体および計測点

表1 パイプ継手試験体

N o	試験体の構造	差込深さ
B-1	十字継手方式	—
B-2	差込定着方式	1 φ
B-3	差込定着方式	1.5 φ

パイプ内部には十字継手と同様のリブを設け、コンクリートと一体化するための孔を開けておく（凸側）。もう一方の管には孔あき鋼板ジベルを鋼管内部に90度ピッチで4枚設ける（凹側）。凸側を凹側に差込み、鋼管部を溶接した後内部にコンクリートを充填する。実際の架設では外部に架設用治具を設けておき、溶接前にボルト結合し、溶接後除去するが、今回の試験体製作でも同様の手順を用いた。差込継手は、差込深さが鋼管直径相当とその1.5倍の2種類を製作し、差込深さの影響を調査した。また、TIGで溶接を行った場合にどの程度裏波が出るかを調べるため、1層目をTIG溶接、その後の層を通常のMAG溶接で盛り、試験終了後マクロ試験を行った。

新形式の継手と十字継手は以下の差がある。

- ① 差込継手は軸力の伝達が主として繋いだパイプ同士で行われ、内部のリブおよび充填コンクリートによる軸力伝達は補助としている。逆に、十字継手は内部のリブで主として軸力を伝達し、パイプ部による軸力伝達は補助的なものである。
- ② 架設する場合の現地における溶接量が異なる。差込継手の溶接量は十字継手の1/3程度であり、また内部リブのボルト接合を必要としない。

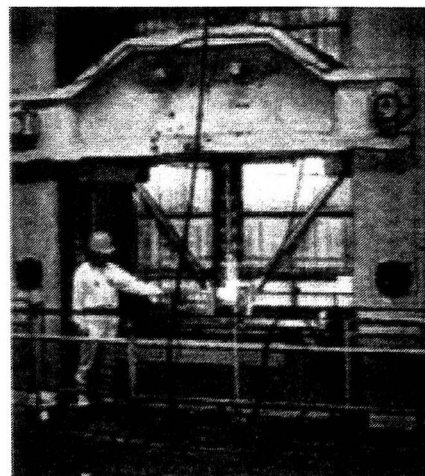
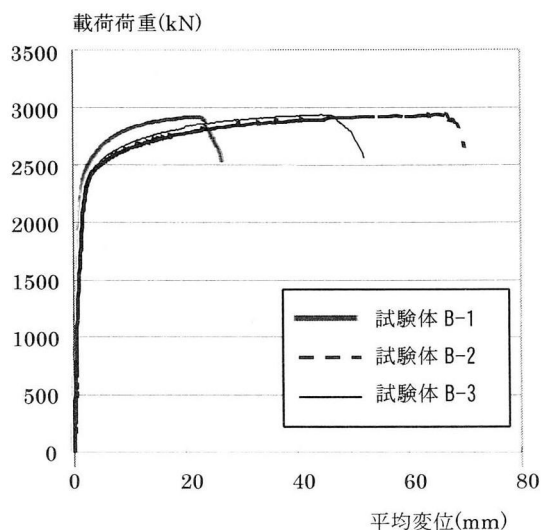
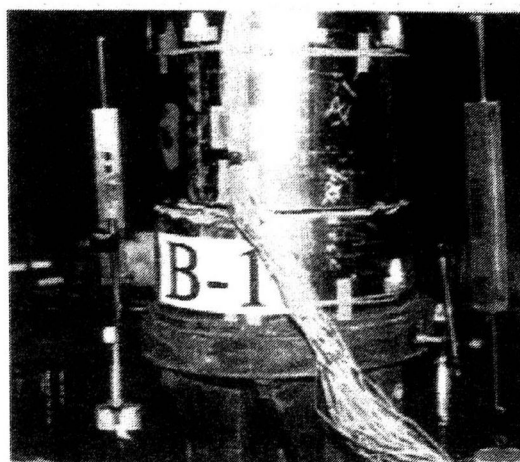


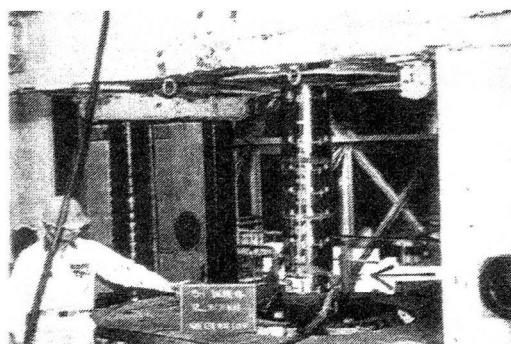
図2 試験実施状況



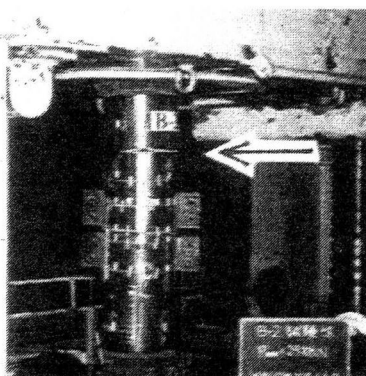
(a) 荷重－変位関係



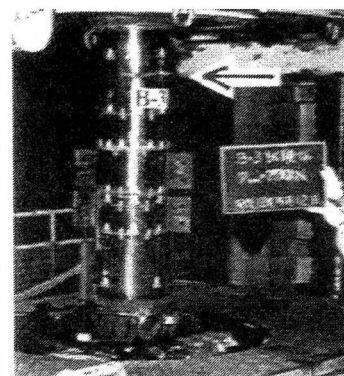
(b) 試験体 B-1 破壊断面



(c) 試験体 B-1



(d) 試験体 B-2



(e) 試験体 B-3

図3 荷重－変位関係と破壊状況

(2) 載荷方法と計測点

試験体は、10,000kNまで載荷可能な引張り試験器で軸方向に引張ることにより載荷した(図2参照)。荷重は、以下に示すように載荷ステップ①から載荷ステップ③まで3段階に分けて負荷している。本継手のモデルとしている橋の場合(信濃川橋梁、68×3=204m、支管中央付近の場合)はモデル縮尺は約1/2になり、列車通過相当の弦材変動荷重は430kN、架設時の荷重も含む静的な設計荷重は1,060kNである⁴⁾。

載荷ステップ①：0 → 500kN → 0

載荷ステップ②：0 → 1,000kN → 0

載荷ステップ③：0 → 破断

パイプ引張試験体の伸び変位は、試験体両端の厚板間にワイヤを張り、両者の相対変位を変位計で計測することにより求めた。試験体の周方向位置は、載荷用板の片面をA面と呼び、周方向位置を記すための基準面とした。各試験体の計測点を図1に合わせて示す。

(3) 材料試験結果

コンクリートおよび鋼管の材料試験結果を、表2に示す。コンクリートは早強コンクリートを用いており、弾性係数を打設後17日目に計測した。鋼管は試験体製作に用いた同じ鋼管から母線方向に引張り試験用のピースを取り出し、応力-歪関係を調べた。

3. パイプ継手引張り試験結果

(1) 破壊状況と各計測点の荷重増加に伴う履歴

各試験体の破壊状況および荷重-変位関係を図3に示す。

各試験体は内部補強がなされていない端部付近が最も弱く、全て試験体端部が約3,000kNの引張り力により破断した。これは鋼管の材料引張り試験結果(破断応力：436MPa、断面力換算値：3,010kN)に良く対応している。試験の結果から、継手の静的な耐力は一般鋼管部より強い事が確認された。

図4に、破断に至るまでの各計測断面における平均歪の履歴を示す。ただし、図4(1)は全載荷過程を、図4(2)は載荷ステップ①、②に着目した初期載荷過程を示している。断面により鋼管部の支持する軸力にかなり差があることが分かる。試験体B-1では両端の断面①および⑦

の歪は1,500kN付近までほぼ線形に増加し、その後非線形に増加し、破断する。試験体中央部の断面③、④および⑤の平均歪はほぼ線形に増加しているが、その他の断面②および⑥の計測点ごとの歪はばらつきが大きく、また載荷荷重2,000kN当たりから平均歪の増加が急激に増大している。

試験体B-2では、断面①および⑦の平均歪が1,000kN付近までほぼ線形に増加した後に非線形に増加し破断する。差込部分中央(断面③)の平均歪はほぼ線形にตอบสนองしているが、平均歪の大きさから考えて2,000kN載荷時点では塑性化したものと考えられる。その他の断面は計測点ごとの歪のばらつきが大きく、かなり変動している。

試験体B-3では、荷重1,000kNを越えた当たりから断面①および⑦の歪が増大するが、他の計測断面は、全体としてB-2と比べて平均歪が減少している。

以上3試験体において、どの試験体も設計荷重の3倍近い耐力を示した。しかし、図4(2)の載荷初期の挙動を見ると、多くの計測断面で鋼管の全断面塑性荷重(1640kN)よりかなり低い荷重レベル(600~800kN)で平均歪が急増しており、鋼管内部に何らかの変化があったと考えられる。考えられる現象として、ボルトの滑り、鋼管-内部充填コンクリート間の付着剥離および充填コンクリートの割れがあるが、これらは試験後に内部を観察することにより検討した。

(2) 鋼管断面の支持する断面力

内部のリブやコンクリートの寄与(引張り力をどの程度分担支持しているか)を調べるため、鋼管の7断面に設けた歪ゲージから各断面における鋼管の荷重増分に対する分担率を求めた。荷重分担率は式(1)で計算している。ただし、計測は荷重を50kN増加させるごとに実施しており、記号 Δ は、計測データの前回計測からの増分を示している。

$$\text{分担率} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \bar{\varepsilon}} \times 100 \quad (1)$$

ただし、 $\Delta \varepsilon$: 計測した歪増分

$$\Delta \bar{\varepsilon} : \text{平均歪増分} \left(= \frac{\Delta N}{EA} \right)$$

ΔN : 引張り力増分

A : 鋼管断面積

荷重ステップ間で増加した引張り力の全てを鋼管が支持している場合は、分担率は歪ゲージ位置によりばらつきはあるが約100%であり、それより少ない場合はその分を十字リブあるいは内部コンクリートが支持しているこ

表2 材料定数

材料	材料定数 (MPa)
鋼 管	弾性定数 2.057x10 ⁵
	降伏点 237
	引張り強さ 436
コンクリート	弾性定数 1.74x10 ⁴
	圧縮強度 31

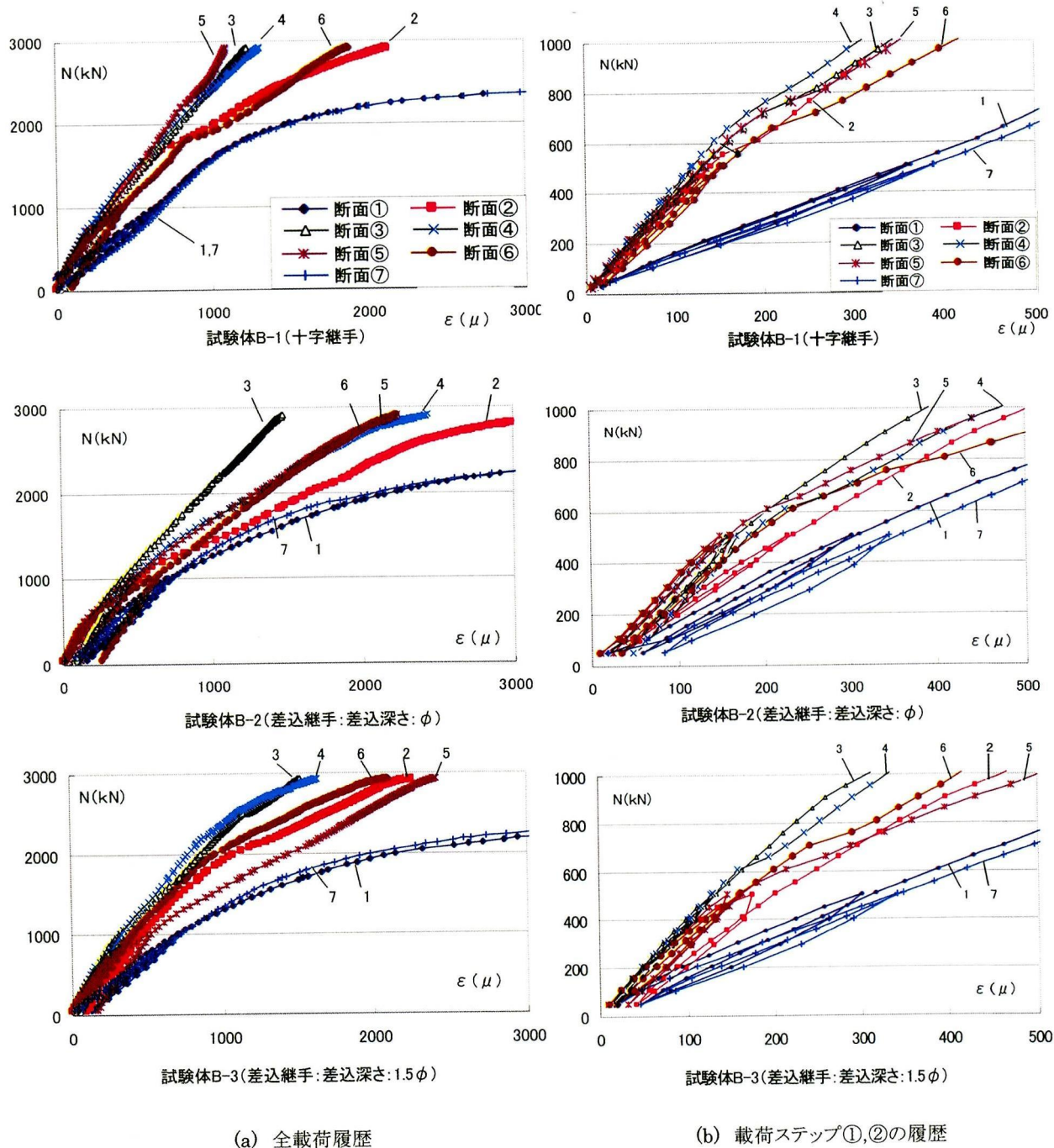


図4 試験体各断面における鋼管軸方向平均歪の履歴

とになる（例えば鋼管の支持力分担率が70%の場合は、残り30%を内部リブおよびコンクリートが支持している）。

各試験体の鋼管溶接線付近（断面⑤）の荷重分担率を図5に示す。結果を見ると、どのモデルにおいても荷重レベル600～800kNにおいて鋭いピークを示す断面が多く、またこのピーク以降多くの断面で荷重分担率が増加している。後に示す試験体解体結果と合わせて考えて、この変化は鋼管-コンクリート間の付着切れが原因であ

ると思われる。すなわち、载荷の初期は鋼とコンクリートは付着しており鋼管の荷重分担率は低い、载荷の過程で付着が切れてコンクリート部に荷重が伝わりにくくなり、鋼管の荷重分担率が上がったと思われる。

十字継手（試験体B-1）は、コンクリートを無視した場合、すなわち内部の十字リブと鋼管のみで引張り力を支持するとした場合、両者の断面積比（約1:1）に応じてそれぞれが約50%ずつ荷重を持つと考えられるが、载荷初期の鋼管の荷重分担率は約40%であり（図5(a)上、中

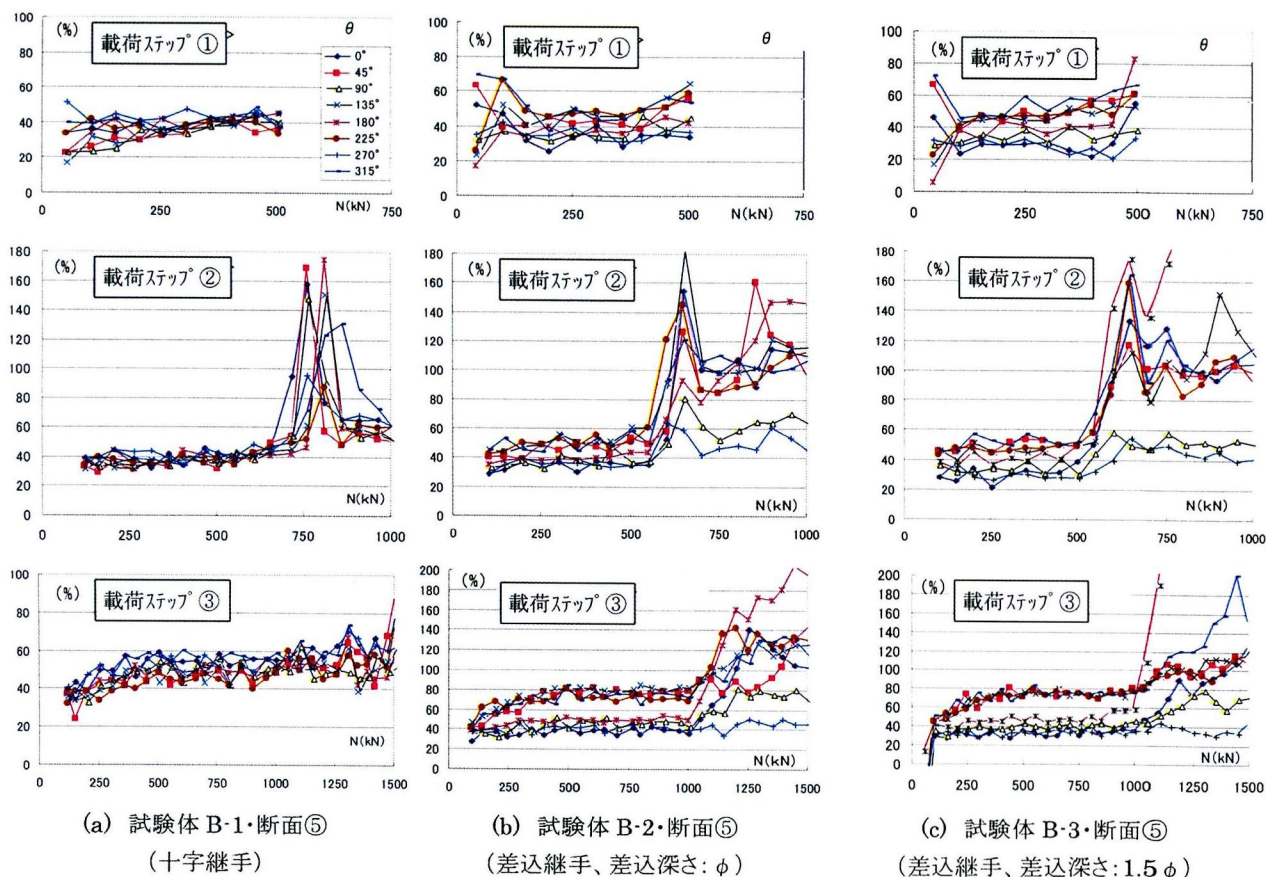


図5 各試験体の鋼管の荷重分担率

段)、このことからコンクリートが 10%以上の軸力を負担支持していたことが分かる。载荷ステップ③では、周方向に配置した 8 計測点の平均荷重分担率は 50%程度で、载荷ステップ②と比べて約 10%高めである。計測は 50kN 载荷する毎に行っているが、各計測点の歪値は 40~60%の範囲で変動しており、鋼管-コンクリート間のずれを含む複雑な挙動をしていると思われる。

試験体 B-2 および B-3 は孔あき鋼板ジベルを介して鋼-コンクリートを一体化しているため、付着の有無に係わらず内部コンクリートが引張り荷重を支持する。载荷を繰り返すと鋼管の荷重分担率は増加するが、挙動は安定する。試験体 B-2、B-3 どちらの場合も、鋼管内部のリブプレートと同一平面に設けた歪ゲージ 4 枚 ($\theta=0^\circ$ 、 90° 、 180° 、 270°) と、その間の歪ゲージ 4 枚では荷重分担に差が生じており、特に载荷ステップ③では前者の方がリブの影響により応力が低くなることが分かる。図には示していないが、载荷ステップ③の荷重分担率は、最も値の低い差込部分中央(断面③)において、試験体 B-2 が 40~60%、試験体 B-3 が 35~50%程度であり、差込深さの大きい後者が、鋼管の負担する荷重が小さくなる結果を確認している。

(3) 試験体解体および溶接部マクロ試験

载荷試験実施後、十字継手および差込み継手の試験体

1 体ずつを切断し内部状態を観察するとともに、溶込み状況を把握するため、溶接部のマクロ試験を実施した。

①十字継手試験体 (B-1)

試験体 B-1 の解体結果を図 6 に示す。試験体はまず $\Delta 1$ 、 $\Delta 2$ および $\Delta 3$ で切断し、部分 A および部分 BC を切り出した。その後、部分 BC を $\Delta 4$ で切断し、部分 B と部分 C に分割した。 $\Delta 1$ 、 $\Delta 2$ 、 $\Delta 3$ の切断面についてはコンクリートの割れは見られず、ボルト周辺にもうまくコンクリートが充填されていた。部分 B および部分 C は、ボルトの滑りを観察するため内部の添接ボルト中央面で分割した。図 6 (a) に部分 C 断面を示しているが、左右から来るリブを 2 枚の板で挟んでボルトで締めている様子が分かる。左右のリブ中央にもコンクリートが詰まっており、隙間が無く、またコンクリートが割れていないことから、ボルト添接部は滑っていないと判断される。また部分 C のコンクリートと鋼管は付着が切れており、部分 B と部分 C を切断している途中で両者にずれが発生している。

部分 A の鋼管円周方向の溶接部、および部分 C の鋼管母線方向の溶接部について、TIG 溶接による裏面への溶け込み状況を図 7 に示す。特に A1 および A5 は周方向および母線方向の溶接線が交差する部分であり、試験片の写真右側部分は鋼管母線方向の溶着金属の断面である。鋼管内側に溶着金属がかなり解け出しているのが分かる。また、鋼管断面が真円でないことから、場所により板厚

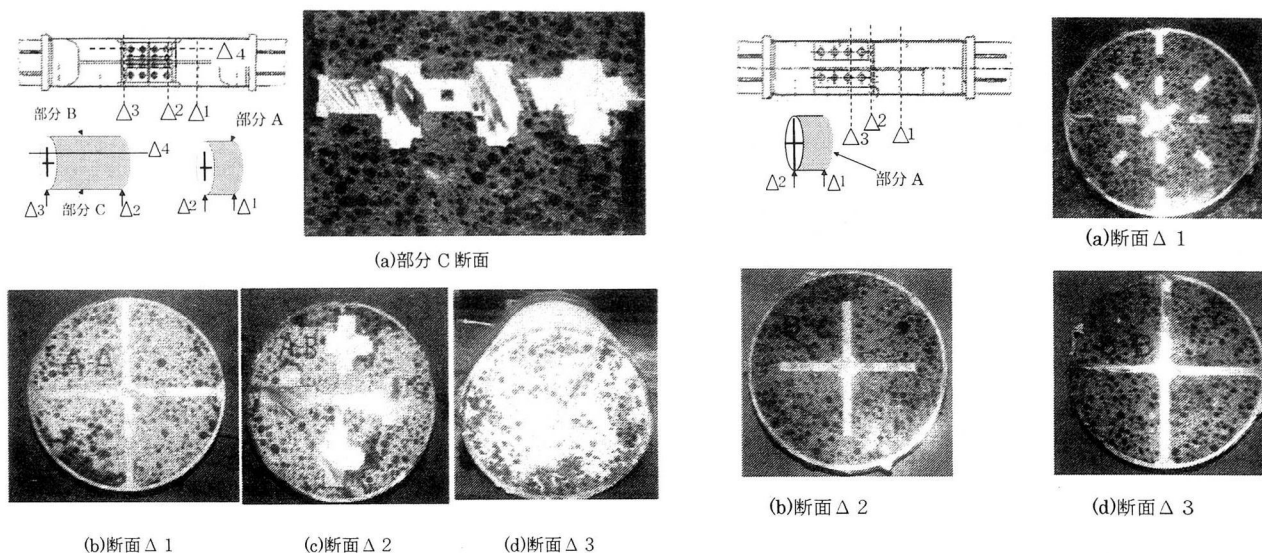


図6 十字継手解体状況(試験体 B-1)

図8 差込継手解体状況(試験体 B-2)

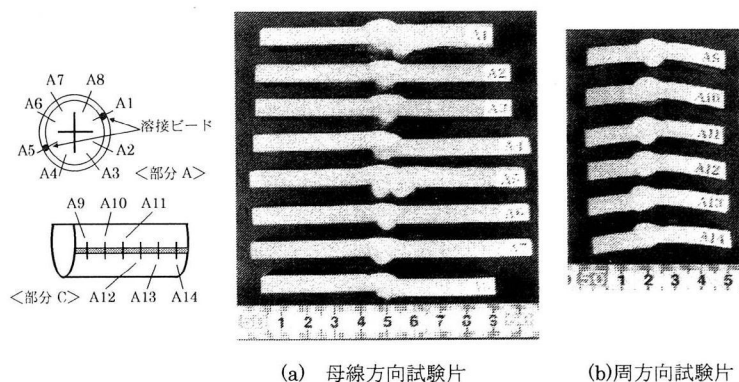


図7 試験体 B-1(十字継手)マクロ試験

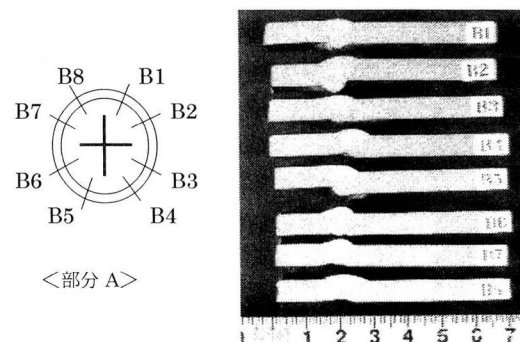


図9 試験体 B-2(差込継手)マクロ試験

の 1/2 程度の食い違いが見られる。

②差込継手 (B-2)

試験体 B-2 は $\Delta 1, 2, 3$ の 3 断面で切断し、部分 A については溶接部のマクロ試験を行った。断面の状態を図 8 に示す。どの断面もコンクリートの割れは見られず、継手部分はかなり丈夫であることが理解できる。TIG 溶接による裏面への溶け込み状況を図 9 に示す。試験体 B-1 と同様、溶着金属はかなり鋼管内側に溶け込んでおり、また最大で板厚の 1/3 相当の食い違いがある。

4. パイプ張り継手 FEM 解析

(1) 解析モデルと解析条件

解析により、鋼管、内部リブおよびコンクリートに発生する応力分布を弾性解析により求めた。求めたい挙動は継手に設計荷重レベルの軸力 (1000kN) を载荷した場合の継手内部応力分布である。この荷重は鋼管が塑性するよりかなり低い荷重レベルであり、また試験体を試験後切断して内部状況を調べた結果コンクリートの割れは認

められていないことから、鋼管とコンクリートは弾性体として挙動すると考えて弾性解析を行ったものである。ただし、鋼管-コンクリート部の剥離は载荷レベル 600-800kN で発生すると考えられることから、解析ではコンクリート部の solid 要素と鋼管部 shell 要素を剛結したモデルと、接線方向の滑りを許したモデルの 2 種類を作成し、両者の解析結果を試験結果と比較した。

解析は、ABAQUS (Version5.7) で実施した。解析に用いる材料定数は材料試験データを基に決定した。解析モデルはモデルの対称性を考慮して、試験体 B-1 (十字継ぎ手) に対しては周方向 1/8、軸方向 1/2 の 1/16 モデルを用いている。モデルを、図 10 に示す。鋼管内部に図 10(a) のような十字リブ相当の要素を設置している。図右側が中央で、実際は添接板とボルトにより相対するリブと結合される。ボルトの突起はソリッド要素によりモデル化し、コンクリートを模擬している要素と噛合うようにした。図には示していないが、コンクリート相当の要素がこれに付け加わる。

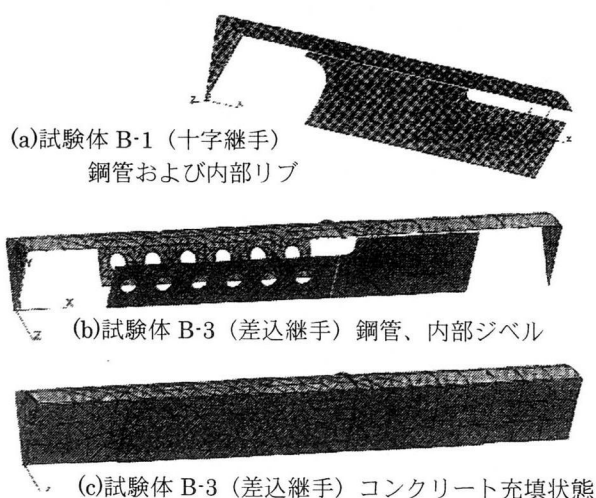


図 10 FEM モデル

試験体 B-2 および B-3 (差込継手) は軸方向に対称ではないので、周方向 1/8 モデルとした (図 10(b))。解析ではリブまたはジベルが対称面内にあるため板厚を 1/2 にした。

(2) 解析結果

図 11 に十字継手 (試験体 B-1) 各部の応力分布を示す。ただし、図 11 (a) は鋼要素とコンクリート要素が密着している場合 (以下付着ありと呼ぶ) であり、図 11 (b) は鋼とコンクリートのずれる場合 (以下付着なしと呼ぶ) である。引張り荷重は 1,000kN (1/8 断面で 125kN) で、これを鋼管のみで支持した場合は平均 145MPa の応力が発生する。

図 11 (b)、鋼-コンクリートの付着がない場合は、鋼管端部で 120~140MPa の応力が発生している。継手中央部は、引張り力の一部を内部十字リブが支持するため鋼管部の応力は 80MPa 程度になっている。

図 11 (a) 付着がある場合は鋼-コンクリート接触面からコンクリートに力が導入され、局所的に応力集中が生じている部分を除いて、内部コンクリートに 3~5MPa 程度の引張り応力が発生する。鋼管部の応力は端部で 60~80MPa 程度であり、付着なしの場合に比べてかなり低くなっている。リブに発生する応力も全体的に低く、分布も緩慢である。リブ端部およびそれと対応する鋼管部に応力集中が見られる。

図 12 に差込継手 (試験体 B-2) 各部の応力分布を示す。図 12 (a) 付着ありの場合は、鋼管端部応力が 80MPa 程度で、継手中央部はさらに低い応力 60MPa になる。内部コンクリートの引張り応力は 5MPa 程度である。

図 12 (b) の付着のない場合は、コンクリートは全般的に応力が低く、両側鋼管のジベルに挟まれる箇所のみ応力が発生する。図 (b) 中段から、2 枚のジベルに引張り応力が導入される様子が分かる。試験体 B-3 の解析結果は

試験体 B-2 と同傾向であった。

5. 解析結果と実験結果の比較

図 13 および表 3 に、解析結果および実験データから得られた各部の荷重分担率を示す。解析結果による分担率は式 (2) で計算した。

$$\text{分担率} = (\sigma_1 / \sigma_0) \times 100 \quad (2)$$

ただし、

σ_1 : 鋼管外表面の軸方向応力

$\sigma_0 = N/A$

N: 引張り力

A: 鋼管部断面積

これは実験データから求めた荷重分担率とほぼ同じであるが、実験では歪から求めたのに対して (式 (1))、ここでは応力から求めている。

実験では荷重を 3 回に分けて載荷しているが、解析と比較するために、載荷ステップ②の載荷過程 300~500kN および載荷ステップ③の載荷過程 300~1,000kN の平均分担率をそれぞれ求めた。これら範囲の計測値は安定しており、前者は鋼管-コンクリート間の付着が切れる前の状態、後者はかなりの部分で付着が切れたと考えられる状態である。

図 13 (a) は十字継手の場合で、解析モデルが試験体端部から中央までの半分であることに合わせて、実験結果も対称位置のデータはまとめて示した。解析結果では付着ありの場合中央部分の荷重分担率は 40%、付着なしの場合は 55%程度であり、残りの断面力は内部の十字リブもしくはコンクリートが支持する。鋼管と十字リブが 100%有効でかつコンクリートの剛性を無視した場合の鋼管の荷重分担率を計算すると 53~54%であるから、後者はコンクリートの寄与がほとんど無い結果となっている。

実験結果では載荷ステップ②と載荷ステップ③で分担率が異なり、付着のまだ切れていないと考えられる前者の方が鋼管の荷重分担率は低い。付着の有無の差は微妙であるが、解析と良く対応しており、付着が 100%有効な場合のコンクリートの荷重分担率は 10~15%程度と推定される。

差込継手 (試験体 B-2) について、分担率を図 13 (b) および (c) に示す。解析では付着ありの場合鋼管の荷重分担率はどの断面位置でも 40~60%の間にあり、長さ方向に大きな変化はない。付着のない場合は、鋼管両端の荷重分担率は 100%であり、鋼管が断面力を 100%支持しており、ジベルと差込部の重なる部分中心断面において荷重分担率が最も低く、60~75%程度になる。

これらの傾向は試験体 B-3 に対しても見られるが、差

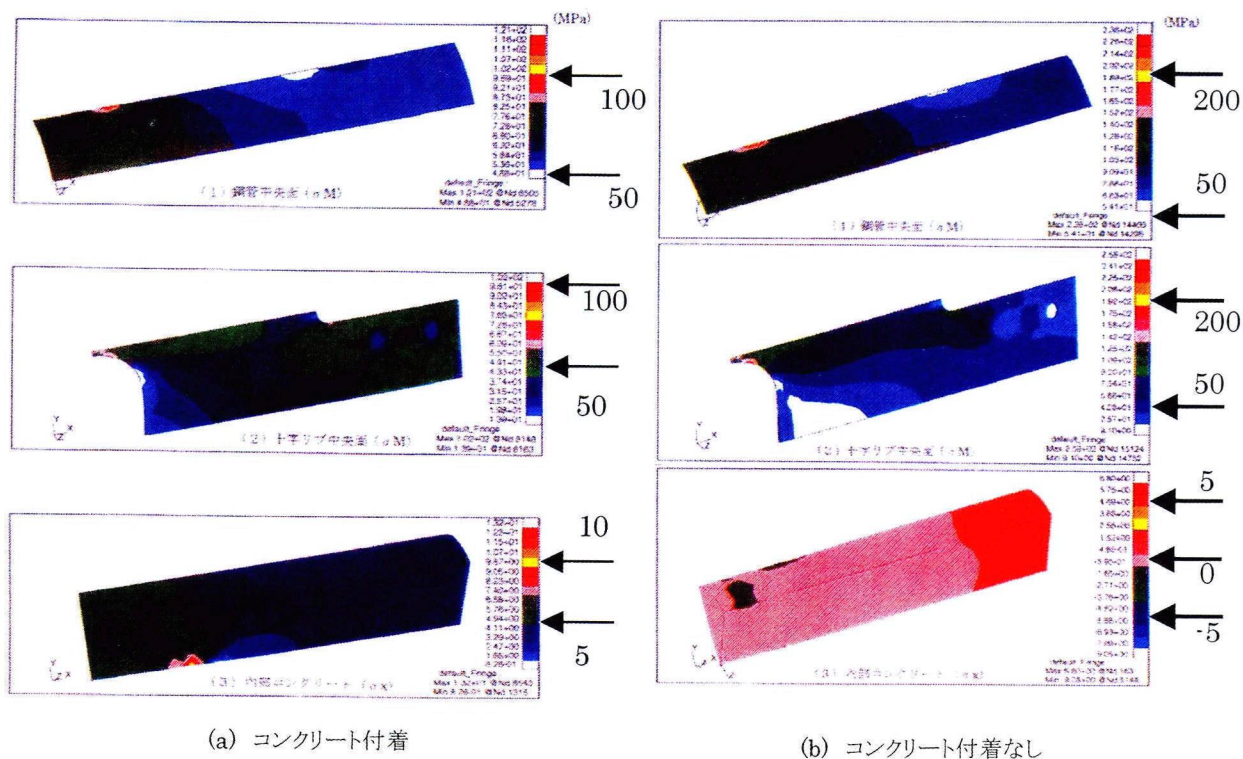


図 11 FEM 解析による応力分布(試験体 B-1:十字継手):軸力 1,000kN

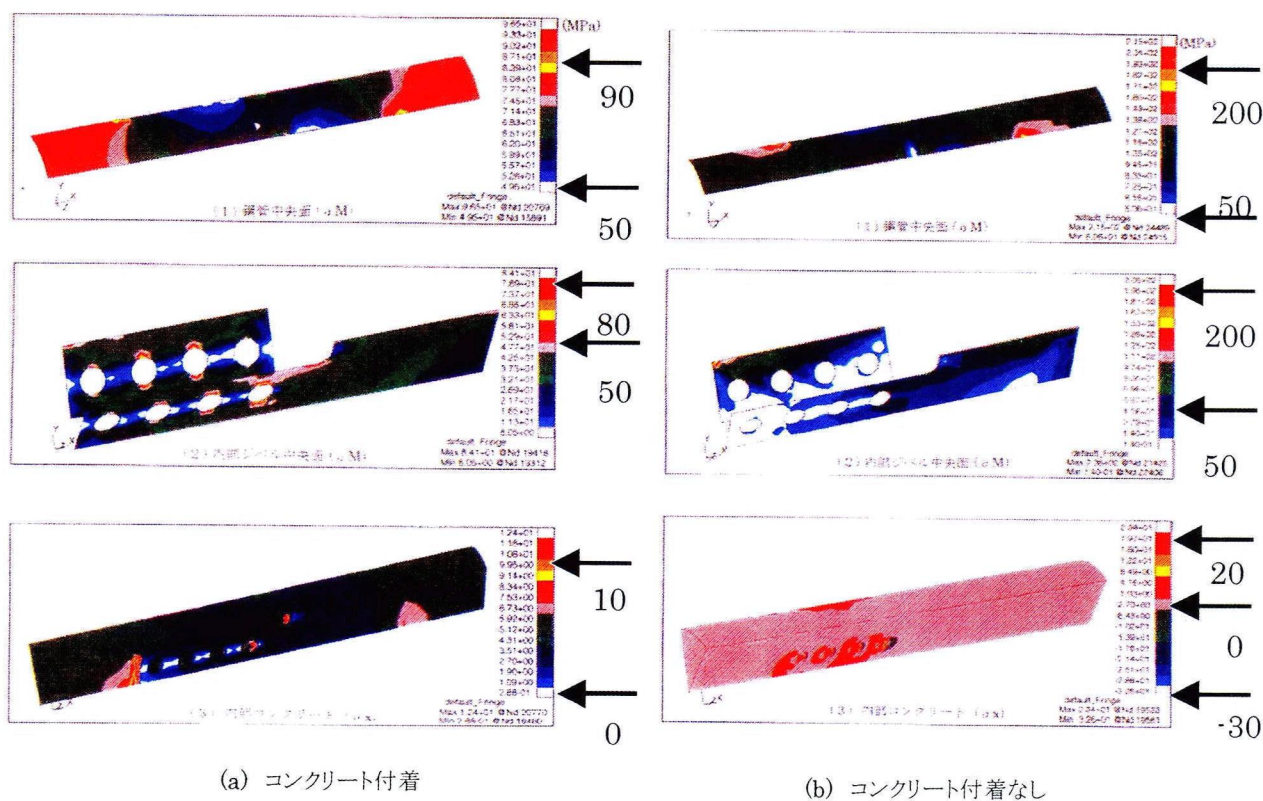


図 12 FEM 解析による応力分布(試験体 B-2:差込継手):軸力 1,000kN

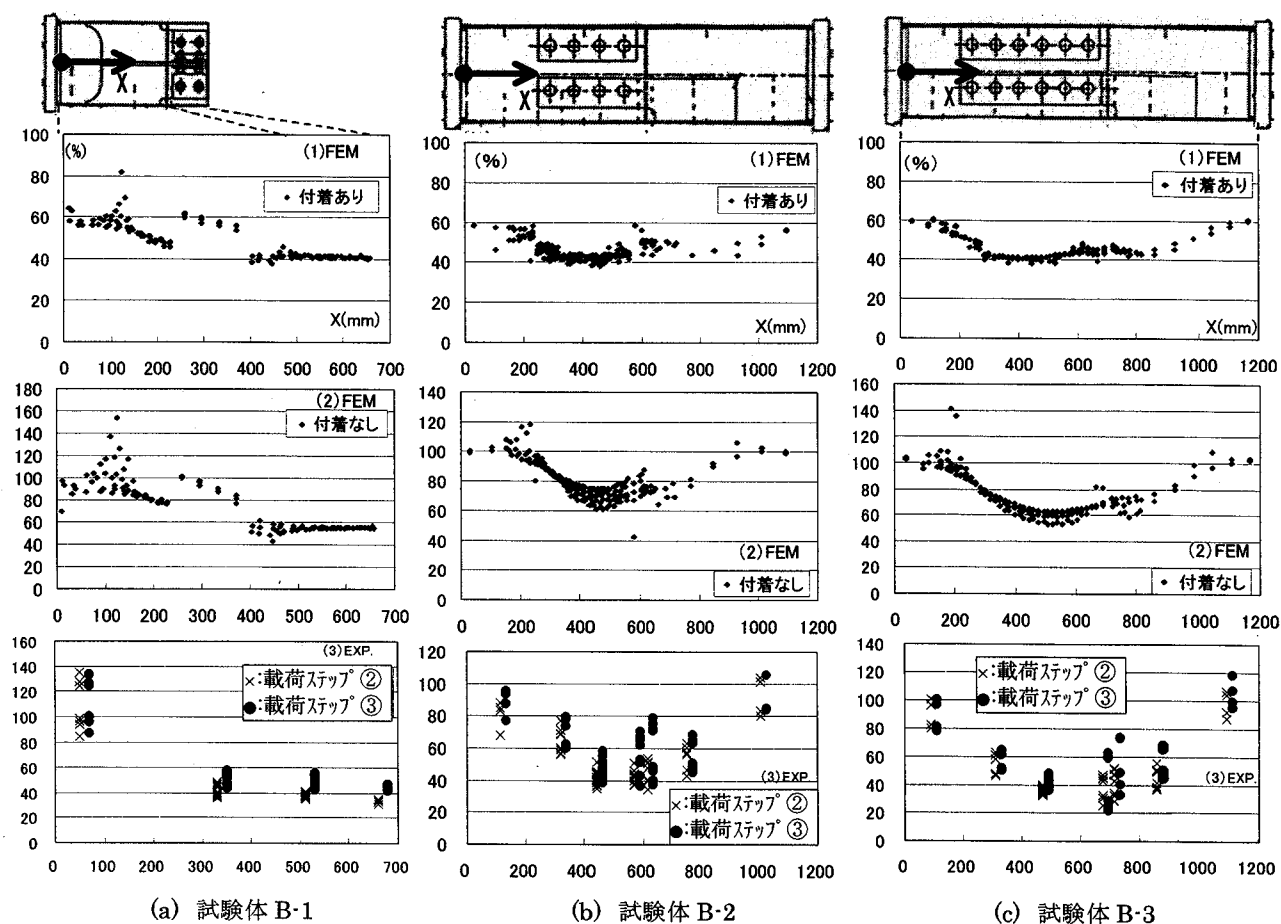


図 13 荷重分担率の実験結果と解析結果の比較:軸力 1,000kN

表 3 鋼管部の荷重分担率(鋼管部の応力/ σ_o) (単位: %)

		B-1 (十字継手)	B-2 (差込深さ: ϕ)	B-3 (差込深さ: 1.5 ϕ)
<実験> 載荷ステップ②	溶接線付近	35-40	35-55	25-50
	継手中央	30-35	35-55	30-40
<実験> 載荷ステップ③	溶接線付近	40-60	40-80	20-75
	継手中央	40-50	40-60	35-50
<FEM> 付着あり	溶接線付近	40-45	45-60	45-55
	継手中央	40	40-45	40
<FEM> 付着なし	溶接線付近	50-60	40-90	70-80
	継手中央	55	60-75	50-65

込深さの違いにより、ジベル差込部中心断面の荷重分担率は50～60%まで低下する。解析では、以上のように差込深さの影響および付着の有無の影響が明確に出ている。実験結果でもこれらの影響は明らかで、差込深さが大きく、また付着がある方が鋼管の荷重分担率は低い。実験結果と解析結果は良く対応している。

6. まとめ

以上の結果から以下のことが明らかになった。

- (1) 十字継手および差込継手の引張り試験により、継手部は一般鋼管部より静的耐力が大きいことを確認した。
- (2) 実験終了後、試験体を解体し充填コンクリートの

割れを観察した。どの試験体も破断した断面のコンクリートは割れているが、継手部中心のコンクリートに割れは見られなかった。また、十字継手では、ボルト結合した内部リブに滑りは見られなかった。

- (3) 継手部試験体に引張り力を作用させた場合に対し、全軸力を鋼管のみで支持した場合の平均応力 (σ_0) を基準として、鋼管各部に生じる応力と σ_0 の比率 (荷重分担率) を調査した。実験では、鋼-コンクリート間の付着があまり切れていないと考えられる荷重ステップ②と、付着のかかなりの部分が切れたと思われる荷重ステップ③では差が出ており、後者の方が鋼管の応力は高くなった。また、鋼管内部に設けたリブの中央断面 (継手中央) では充填コンクリートの寄与が最も高く、鋼管の応力が最も低くなった。鋼管の溶接線は継手中央からずれた位置にあり、その分鋼管の応力が高くなることが確認された。
- (4) FEM 解析により、鋼-コンクリート間に付着がある場合とない場合の 2 種類に対して、同じく鋼管部応力の σ_0 に対する比率を計算した。解析結果は、先に述べた実験結果の傾向と良く一致している。
- (5) 十字継手溶接部の鋼管応力は、内部リブおよび充填コンクリートの寄与で σ_0 の 60% 以下に低下した。
- (6) 差込継手の溶接部鋼管応力は、差込深さ ϕ の場合は σ_0 の 90% 以下、差込深さ 1.5ϕ の場合は同じく 80% 以下であった。また、同じ差込継手の継手中央部鋼管応力は、差込深さ ϕ および 1.5ϕ に対して、それぞれ σ_0 の 75% 以下、65% 以下であった。

以上の内容から、十字継手および今回提案した差込継手のいずれも、継手部にコンクリートを充填することにより、外側の溶接を片側からの部分溶け込み溶接として

も、充填コンクリートが応力を一部負担して一般部以上の耐力を有し、本試験時の溶接は現地でも施工可能であると考えられることから、静的には十分実用に耐える構造であると考えられる。本研究で提案した継手構造は、継手部応力を低減させることが可能であり、耐疲労性も向上するものと考えられるが、今後さらに疲労強度について検討する必要があるものと考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたっては、東京工業大学工学部土木工学科・三木教授にご指導を頂きました。ここに記して厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Pison Udomworarat, Chitoshi Miki, Atsushi Ichikawa, Masanori Komechi, Kaoru Mitsuki, Tetsuya Hosaka: Fatigue Performance of Composite Tubular K-Joints for Truss Type Railway Bridge, Structural Eng. /Earthquake Eng., JSCE, No. 710/I-60, July 2002
- 2) H.G. Dauner, G. Decorges, A. Oribasi, D. Wery: The Lully Viaduct, a Composite Bridge with Steel Tube Truss, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 46, No. 1-3, 1998
- 3) Jean-Paul Lebet: Composite Bridges in Switzerland, ICOM-Steel Structure, 1015 Lausanne EPFL Switzerland, 1999
- 4) 保坂鐵矢, 堀地紀行, 磯江暁: トラス格点部合理化構造の強度に関する一検討, 構造工学論文集, Vol. 47A, 2001

(2002年9月13日受付)