

門型ラーメン形式角太橋の開発

～角形鋼管を用いた上・下部一体橋梁～

Development of KAKUTA Rahmen Bridge ～Rigid Frame Bridge using Square Tube～

藤川 敬人 Norihito FUJIKAWA
建築・鋼構造事業部 鋼構造営業部
ゼネラルマネージャー

水上 繁樹 Shigeki MIZUKAMI
建築・鋼構造事業部 鋼構造営業部
エコパイル・橋梁商品営業室 マネージャー

櫻井 信彰 Nobuaki SAKURAI
技術開発第一研究所 構造商品開発室
室長

大嶽 敦郎 Atsuo OTAKE
技術開発第一研究所 構造商品開発室
シニアマネージャー

中山 逸人 Hayato NAKAYAMA
技術開発第一研究所 構造商品開発室

田村 康行 Yasuyuki TAMURA
技術開発第一研究所 構造商品開発室

抄 録

戦後から高度経済成長期にかけて数多く建設されてきた橋梁の経年劣化に伴い、早急な維持管理・更新が求められている中、小規模橋梁の老朽更新を対象として開発された角太橋[®]は、短工期、軽量、省力化などの特徴を活かして、現在までに200橋を超える実績を収めてきた。この度開発した『門型ラーメン形式角太橋』は、この角太橋[®]の適用範囲の拡大を目的として、上部工(角太橋[®])と下部工(RC)の一体化構造への展開を図ったものである。本構造の開発コンセプトは上下部結合部における確実な荷重伝達性能と製作・施工性の省力化であり、これらの妥当性を確認するために、上下部結合部の実大試験および実橋計測試験を実施したので、その結果について報告する。

Abstract

With the aged deterioration of a number of bridges in Japan which were constructed from the post war period to high economic growth period, maintenance and rebuild of bridges is an urgent issue. Against this backdrop, the number of supply record of “Kakutabashi[®]”, that was developed for rebuild of aging and short span bridges, achieved more than 200 as of now taking advantage of short construction period, lightweight, and labor-saving. To expand applicable scope of “Kakutabashi[®]”, we developed “KAKUTA Rahmen Bridge” that was improved to be rigid connection between steel girder (“Kakutabashi[®]”) and abutment(RC). Concept of this development is secure load transfer at the connection, and ease of fabrication and construction. To confirm validity of this concept, we conducted full size test of the connection and field loading test. We report the results as follows;

1 緒言

近年、橋梁分野では戦後から高度経済成長期にかけて数多く建設されてきた橋梁構造物の経年劣化に伴い、早期に点検、診断、補修、更には更新が必要

な状況にある。我が国には橋長2m以上の橋梁が約67万橋あり、そのうち橋長2～15mの小規模橋梁が約54万橋を占めると言われている¹⁾。既設橋梁の架け替えに際しては、経済性に加え、急速施工性や上部工軽量化、桁下空間の確保等の多様な性能が

求められる。そこで、小規模橋梁の老朽更新を対象に、軽くて高い剛性を有する角形鋼管を用いて、工場製作や現場架設を容易かつ短工期で施工できることをコンセプトとした角太橋[®]が開発された^{2~6)}。角太橋[®]は角形鋼管を幅員方向に敷き並べ、鋼管同士を横繋ぎ鋼管とコンクリートにて一体化を図った構造であり、耐久性で問題となりうる溶接や高力ボルト接合を用いていない点が最大の特徴である。この角太橋[®]は、開発された2004年から現在までに200橋を超える実績を有しており、角太橋[®]の更なる適用範囲の拡大を目的として、上部工(角太橋[®])と下部工(鉄筋コンクリート橋台)を一体化した門型ラーメン形式角太橋を開発した。

本稿では、門型ラーメン形式角太橋の特徴や構造を示すとともに上下部結合部に着目した静的荷重試験結果について報告する。また、君津製鉄所構内に初適用された実橋荷重試験結果についても報告する。

2 門型ラーメン形式角太橋の概要

2.1 構造

門型ラーメン形式角太橋の概要図を図-1に示す。門型ラーメン形式角太橋は、基本的には角太橋[®]の構造を踏襲しており、角太橋[®]と異なる点を以下に示す。

(1) 結合部

上部工(主桁)と下部工(橋台)間の結合部の構造および荷重伝達機構を図-2に示す。主桁に作用する荷重は、まず主桁下フランジからの支圧により下部工および充填コンクリートに伝達される。つぎに充

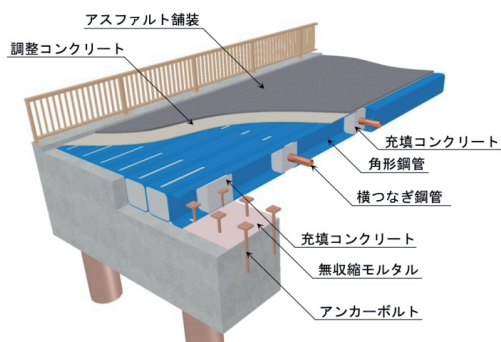


図-1 門型ラーメン形式角太橋
Fig. 1 KAKUTA Rahmen bridge

填コンクリートからアンカーボルト上部に設置した支圧板を介し、アンカーボルト、下部工へと荷重伝達を図る。

常時荷重作用時に結合部に発生する曲げモーメントに対しては、背面アンカーボルトの引張力と主桁・橋台コンクリート間の支圧力で抵抗する。一方、地震時には常時荷重と反対方向の曲げモーメントが作用することから、橋台前面側にもアンカーボルトを設けている。

(2) 継手部

橋長が16mを超える場合には、部材の輸送制限を考慮する必要があることから主桁に継手を設けなければならない。一般的な主桁の継手には、全面ボルト継手や溶接継手が採用されるが、防食性や品質管理の課題を有している。そこで、従来の角太橋[®]と同様に横繋ぎ鋼管とコンクリートだけを用いた継手構造を考案した。

継手位置を図-3に、継手部の断面図を図-4に示す。継手部は曲げモーメントがゼロとなる支間約1/4点に設けられ、奇数No.桁と偶数No.桁で互い違いの配置とする。継手の両側に500mm程度の

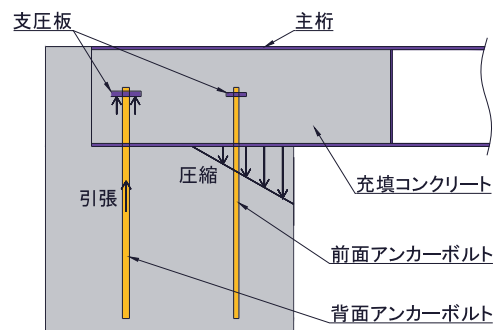


図-2 荷重伝達機構(常時荷重作用時)
Fig. 2 Stress transfer mechanism

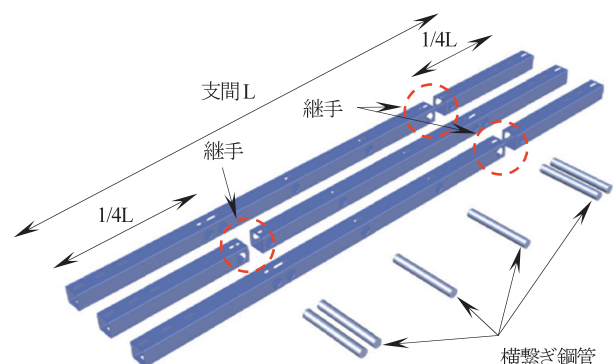


図-3 継手位置
Fig. 3 Joint position

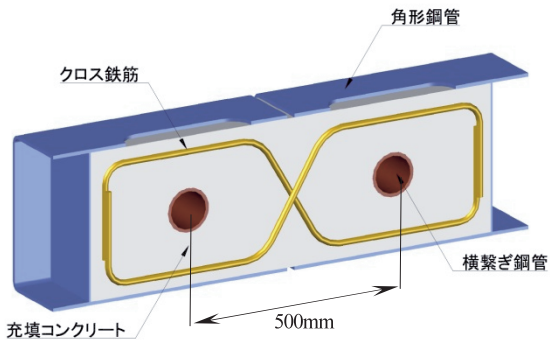


図-4 継手断面図
Fig. 4 Joint cross section

間隔で横繋ぎ鋼管を2本配置し、角形鋼管内部にコンクリートを充填することにより主桁を一体化する。この継手部には、充填コンクリート内部にクロス鉄筋を配置しており、クロス鉄筋の引張力により継手部に作用するせん断力に抵抗するものとしている。これは方杖ラーメン橋などで実績のあるメナーゼヒンジを参考にしたものである。なお、鋼管内部とコンクリート間にずれ止めを設けていないなどの理由により、この継手部では曲げモーメントを伝達する機能を期待していない。そのため、格子解析を行う際には、本継手部をせん断力だけを伝達し、曲げモーメントを伝達しないヒンジ構造としてモデル化する必要がある。

2.2 特徴

(1) 長支間化

構造形式を従来の単純桁構造からラーメン構造とすることにより、正曲げモーメントおよび支間中央部の鉛直変位を低減することができるため、従来の角太橋[®]の適用支間約16mから約20mまで適用支間範囲を拡大することができる。

(2) 経済性・短工期

門型ラーメン形式角太橋は、コンクリート橋に比べて、上部工が軽量であるため下部工・基礎断面をコンパクト化することができる。また、上部工を施工する際には足場や型枠支保工、配筋作業を殆ど必要としないため、現場施工費を抑えられ、他社工法に比べ1割ほど安価となる⁷⁾。

(3) 支承や伸縮装置の省略

桁端部は狭隘であるためにメンテナンスがしにくい箇所となっており、橋梁損傷の約6割が桁端部で

発生している⁸⁾。上下部一体構造とすることで、維持管理の上で弱点となりやすい支承や伸縮装置を省略できるため、維持管理が容易となる。また、伸縮装置の省略は、車両走行性の向上や桁端部での騒音・振動の軽減にも繋がる。

3 静的載荷試験

3.1 試験概要

(1) 試験目的

考案した結合部の構造は、アンカーボルトだけで連結された簡易な構造であり、支圧力で応力伝達を行うものである。このような結合部は過去に例が少なく、その破壊メカニズムや終局耐力を明らかにする必要があると考え、結合部に着目した静的載荷試験を実施した。

(2) 試験体

試験状況を図-5に示す。試験体は結合部に着目するため、上部工は想定する実橋支間(17m程度)の1/4部分を対象とし、角形鋼管1本とした。本試験は結合部の耐力と破壊形態を明らかにすることが目的であるため、主桁の耐力が結合部の耐力を上回るような部材サイズ(□400-9)とした。

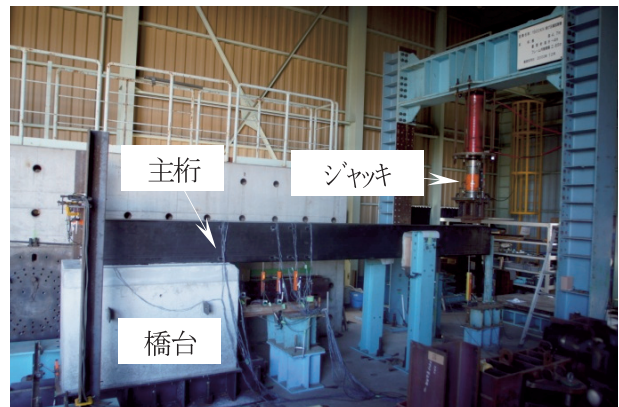


図-5 試験状況
Fig. 5 Static loading test

また、結合部付近の上部工において、剛性急変に伴う主桁鋼管の応力集中を回避するため、角形鋼管内にコンクリートを充填した。コンクリート充填範囲はFEM解析により、橋台前面から主桁の桁高の1.5倍の範囲まで充填すれば、主桁鋼管の応力集中の影響を排除できることが確認できたため、本試験では橋台前面から600mmの範囲までコンクリート

を充填した。

(3) 材料諸元

角形鋼管、アンカーボルト、無収縮モルタル及びコンクリートの諸元を表-1、2に示す。なお、表中に示す試験結果は、いずれも試験片3体の平均値を示している。

表-1 鋼材の材料諸元
Table. 1 Material specification of steel

	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)
角形鋼管 SMA400AW	409	493
アンカーボルト SD295A, D32	358	534

表-2 コンクリートの材料諸元
Table. 2 Material specification of concrete

	材齢(日)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
橋台コンクリート	22	32.4	2.80E+04
無収縮モルタル	13	50.6	1.89E+04
主桁充填コンクリート	8	26.9	2.71E+04

(4) 計測項目

計測項目は、図-6に示す鉛直変位(図中緑△印)、主桁のひずみ(図中桃□印)、アンカーボルトのひずみ(図中青□印)とした。なお、アンカーボルトに貼付するひずみゲージは主桁下フランジ下面から橋台側50mmの位置に設置した。

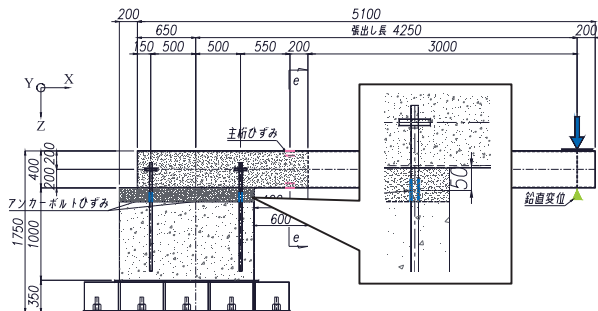


図-6 計測項目
Fig. 6 Measurement points

(5) 荷重方法

試験体の荷重方法については、主桁の張り出し部先端に鉛直荷重を与えることとし、図-7に示す荷重ステップとした。結合部の設計荷重やアンカーボルトの降伏荷重(実降伏点から算出した荷重)などを漸増荷重した後、終局状態までの荷重を行った。試験機は日鉄住金環境(株)殿が所有している200t試験機を使用した。

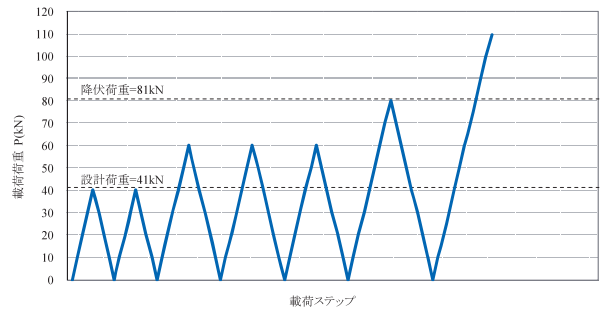


図-7 荷重ステップ
Fig. 7 Load step

3.2 試験結果

(1) 荷重-鉛直変位関係

載荷荷重と載荷点の鉛直変位の関係を図-8に示す。図中の実験結果は繰り返し載荷により得られた実験結果の包絡線を示している。また、図中に併記している設計値(全断面有効)は主桁充填コンクリートを全断面有効として計算した場合の荷重変位関係であり、設計値(引張無視)は主桁充填コンクリートの引張域を無視した場合のもの、設計値(鋼断面)は主桁充填コンクリートを全く考慮せずに計算した場合のものである。

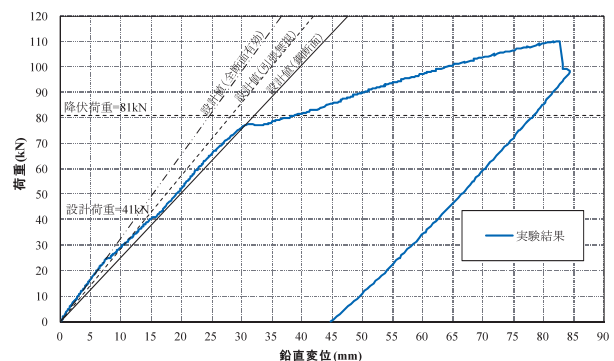


図-8 荷重変位関係
Fig. 8 Load-displacement relationship

載荷初期から25kNまでは全断面有効に近い挙動を示し、その後、設計荷重レベルでは引張無視に近い挙動を示している。その後剛性が急変し、最大荷重は110kNとなり、設計荷重に比べ約2.7倍であった。荷重-変位関係は概ね設計において想定していた挙動を示し、設計計算によって剛性・耐力の算出が可能であることが明らかとなった。

(2) アンカーボルトのひずみ、主桁のひずみ

図-9に載荷荷重とアンカーボルトのひずみの関係を示す。図中に示す実験結果は、前面および背面

アンカーボルトの側面に貼り付けたひずみゲージの値を示したものである。なお、(1)と同様に実験結果の包絡線を示している。

背面アンカーボルトは、ほぼ設計値に近い実験結果を示しており、降伏荷重も設計計算とほぼ一致している。このことから、図-8で示した荷重変位関係において81kN付近で剛性が大きく変化したのは背面アンカーボルトの降伏によるものと考えられる。

一方、前面アンカーボルトの発生ひずみは、載荷荷重25kN付近までは設計計算に近い傾向を示しているが、その後は設計値と大きく乖離し、圧縮域から引張域に転じている。ここで、図-10に載荷荷重25kN時に撮影した試験体上面の様子を示す。主桁充填コンクリート部にひび割れが発生しており、その位置は前面アンカーボルト位置とほぼ一致する。図-8で示した荷重変位関係において載荷荷重25kN時に剛性が変化しているのは、このひび割れが原因であると考えられる。また同じタイミングで結合部断面における圧縮力と引張力のバランスが変化して(中立軸位置が橋台前面側に移行して)、前面アンカーボルトが引張側に転じたものと考えられる。すなわち、結合部断面は載荷初期においては複鉄筋断面として抵抗し(図-11の状態①)、その後は橋台前面を支点とするアンカーボルトの引張抵抗(図-11の状態②)に変化したと考えられる。

載荷荷重と主桁のひずみ(図-6のe断面)の関係を図-12に示す。なお、(1)と同様に実験結果の包絡線を示している。載荷初期から降伏荷重に到達するまでは上フランジは鋼断面に近い挙動、下フランジは引張コンクリート無視に近い挙動を示しており、上フランジのひずみに比べ下フランジのひずみの方が小さいのは、圧縮域のコンクリートが効いているためと考えられる。また、主桁のひずみは最大荷重を迎えても弾性挙動を示しており、概ね設計で想定した値を示していることから主桁充填コンクリートの充填範囲は妥当であると考えられる。

(3) 破壊状況

試験体の破壊状況を確認するため、図-13に示す位置で桁端部を切断し、図-14にその様子を示す。なお、桁端部に発生したひび割れに沿って橋台コンクリートを研った。背面アンカーボルト定着コンク

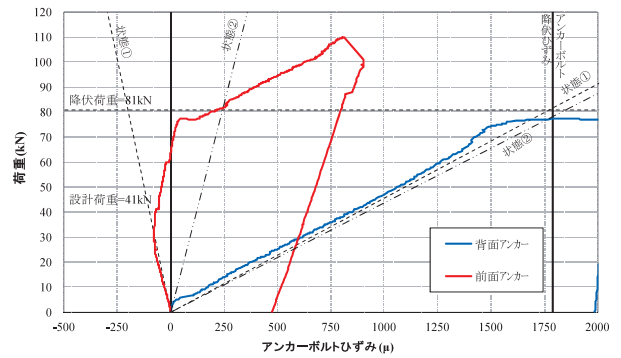


図-9 荷重ひずみ関係
Fig. 9 Load-strain relationship



図-10 ひび割れ状況(前面アンカーボルト付近を上面から撮影)
Fig. 10 Appearance of crack

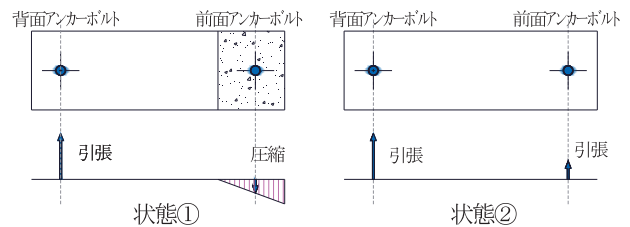


図-11 結合部断面の耐荷機構
Fig. 11 Resistance mechanism of joint cross section

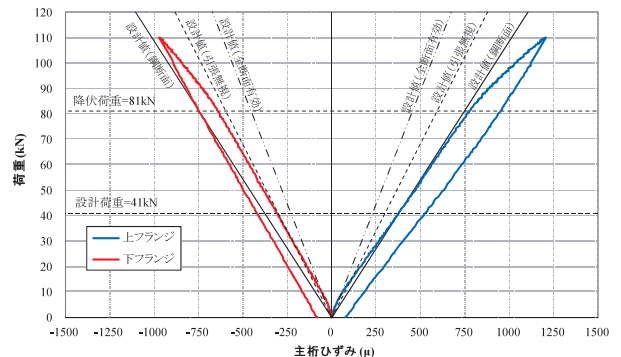


図-12 主桁e断面のひずみ
Fig. 12 Strain in the girder "e" cross section

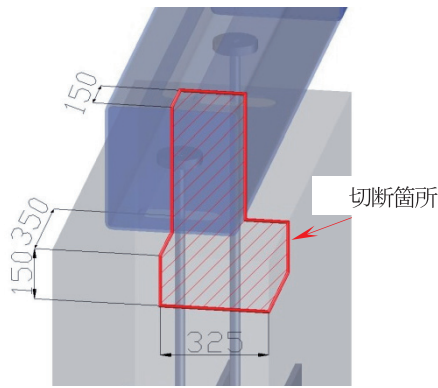


図-13 切断箇所
Fig. 13 Cutting section

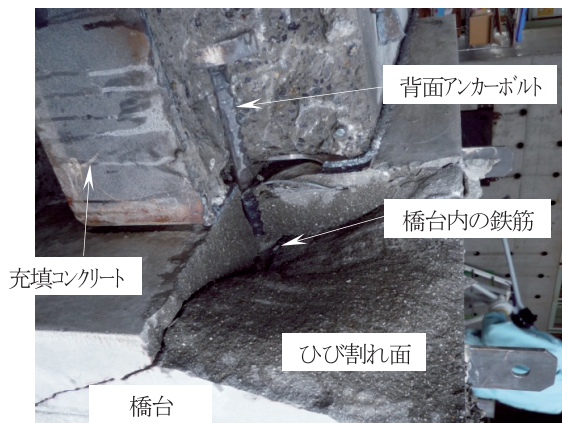


図-14 破壊状況(桁端部から撮影)
Fig. 14 Failure condition

リート部に橋台の最上段鉄筋部を起点としたコーン破壊が見られた。一方、支圧板付近では付着切れや局所的な圧壊現象は見られなかった。主桁充填コンクリートは、図-10で示した上面部のひび割れ以外に目立った損傷は見られず、健全な状態であった。

4 実橋計測

4.1 試験概要

(1) 試験目的

君津共同火力橋は門型ラーメン形式角太橋の適用第一号であり、君津製鉄所構内における架け替え工事として平成26年9月に竣工したものである。製鉄所構内にかかる道路橋であるため、特殊車両(設計最大重量206.9t)が通行する点が一般的な道路橋と異なる。対象橋梁の設計条件を表-3、平面図および断面図を図-15に示す。なお、本橋梁は一般橋梁と比較して、載荷荷重が大きいことから、背面アンカーボルトは2本配置している。

表-3 対象橋梁
Table. 3 Design specification

形式	ラーメン形式角太橋
橋長	18.0m
支間長	17.3m
全幅員	9.2m
有効幅員	8.0m
斜角	90°00'00"
活荷重	140tCP 他
舗装	アスファルト舗装 7cm
横断勾配	1.5%直線振分
縦断勾配	レベル

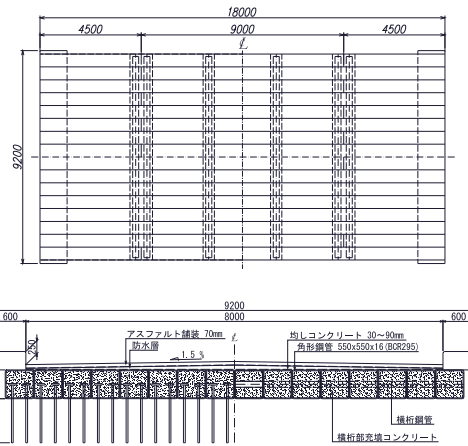


図-15 平面図および断面図
Fig. 15 Plane view and cross section

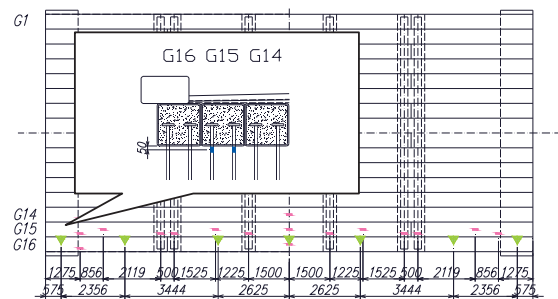


図-16 計測項目
Fig. 16 Measurement points

本試験ではラーメン橋としての挙動を示していること、上部工と下部工の結合部の設計法が妥当であることを検証するために実車両による実橋計測を行った。

(2) 計測内容

計測項目は、図-16に示す鉛直変位(図中の緑▽印)、上フランジのひずみ(図中の桃□印)とした。ひずみはG15桁を着目桁とし、鉛直変位は光波計測器を用いた計測を行うことからG16桁を着目桁とした。また、結合部におけるG15桁の背面アンカーボルトのひずみを計測した。

(3) 荷重方法

荷重車両は全長12.85m、総重量55.7t、軸数5、輪重約5.6tの130tトレーラーを使用した。図-17に荷重時の写真を示す。計測は主桁に生じる断面力を正確に計測するために、舗装を施工する前に行った。荷重位置は図-18に示すように正曲げモーメント最大位置と負曲げモーメント最大位置とした。車輪がひずみゲージを踏むことにより、ゲージが損傷する可能性があったため、車両は片輪がG14桁上に配置されるように荷重した。



図-17 実橋計測試験
Fig. 17 Field loading test

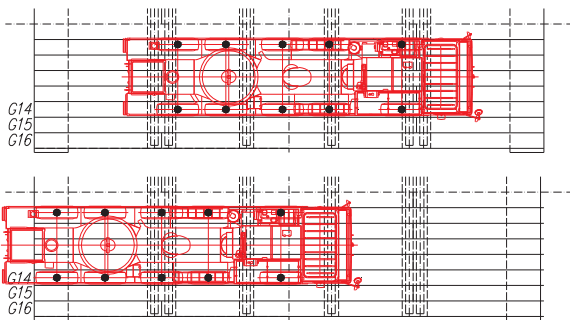


図-18 荷重位置
(上段：正曲げ最大位置、下段：負曲げ最大位置)
Fig. 18 Load position
(upper : maximum positive bending moment position
lower : maximum negative bending moment position)

4.2 計測結果

(1) 主桁の鉛直変位

主桁の正曲げモーメントが最大となるように荷重した場合の各計測点における鉛直変位を図-19に示す。ここで、実験結果は荷重前と荷重後の鉛直変位を計測し、その差分を相対変形量として算出したものである。図中に示す設計値は、上下部構造をモデル化した骨組み解析モデルの解析結果を示したものである。

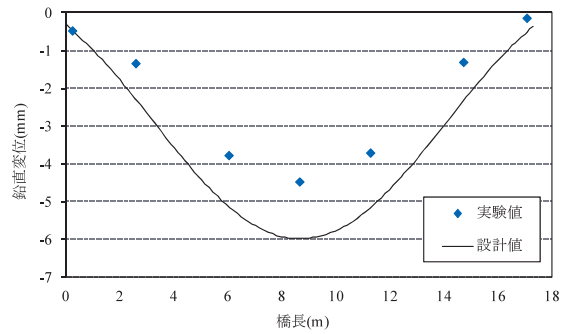


図-19 変位分布
Fig. 19 Displacement distribution

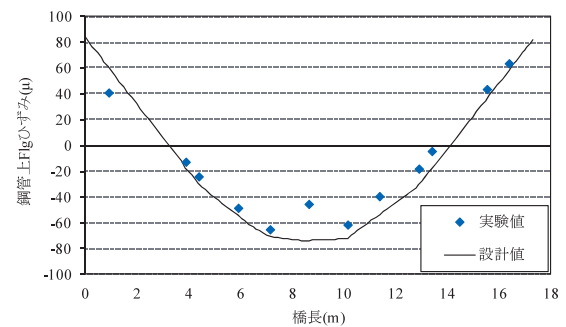


図-20 ひずみ分布
Fig. 20 Strain distribution

実験結果は設計値よりもやや小さい値を示している。実橋では主桁同士の摩擦による荷重分配⁴⁾が行われると思われるが、骨組み解析では摩擦の影響を考慮していないため、実験値との差が生じたものと考えられ、設計計算は構造物の挙動を安全側に評価することができている。

(2) 主桁上フランジのひずみ

主桁の正曲げモーメントが最大となるように荷重した場合の各計測点におけるひずみを図-20に示す。前述した鉛直変位と同様に設計値よりも安全側の結果を示していると共に、上下部結合部付近では上フランジに引張ひずみを確認することができた。このことから、本橋では上下部が結合されており、ラーメン構造としての挙動を示していると考えられる。

(3) アンカーボルトのひずみ

アンカーボルトに発生する軸ひずみが最大となるように荷重した結果、設計値101μ(図-11の状態①を仮定して算出)に対して計測値80μとなり、鉛直変位や主桁上フランジのひずみと同様に、設計値よりも安全側の結果を示すことが確認できた。

5 結言

本稿に示したように、結合部に着目した静的載荷試験や実橋を用いた計測試験を実施し、門型ラーメン形式角太橋の構造成立性を検証した。今後、更なる設計簡略化や構造標準化を行い、実案件への適用拡大を図っていききたい。

最後に、君津製鉄所構内での実橋計測の際に、様々な便宜を図って頂いた新日鉄住金(株)菅野浩樹様、仲原寛昭様、その他の関係各位の皆様へ感謝の意を表してここに記します。

参考文献

- 1) 全国道路利用者会議：道路統計年報，2004年版，2004.12
- 2) 高木，本間，後藤：角形鋼管を用いた床版橋の耐荷性能に関する実験的研究，鋼構造論文集，2005.9
- 3) 高木，本間，後藤：角形鋼管を用いた床版橋の現場接合構造に関する実験的検討，鋼構造論文集，2006.11
- 4) 高木，本間，後藤：角形鋼管を用いた床版橋の実大載荷試験，鋼構造論文集，2007.6
- 5) 高木，本間：床版橋を構成する角形鋼管の疲労試験，鋼構造論文集，2007.12
- 6) 高木，上醉尾，篠原，古木，川村，萩野：小沢田橋の設計・施工－角形鋼管を用いた新形式床版橋－，橋梁と基礎，2005.9
- 7) 門型ラーメン形式角太橋，新日鉄住金エンジニアリング技報 vol.06
- 8) 鋼橋の維持管理に配慮した設計・施工の留意点，日本橋梁建設協会，2009.4