

橋軸直角方向力による合成桁ずれ止めの挙動の把握に関する研究

A study on behavior of shear connectors in composite girder bridge subjected to transverse force

中島章典*, 斉木 功**, 安中真紀***, 和田敏雄****, 吉田育生†

Akinori NAKAJIMA, Isao SAIKI, Maki ANNAKA, Toshio WADA and Ikuo YOSHIDA

*工博 宇都宮大学助教授 工学部建設学科建設工学コース (〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

**修士(工) 宇都宮大学助手 工学部建設学科建設工学コース

***宇都宮測量株式会社 (〒321-0838 宇都宮市吉野 1-8-6)

****トピー工業株式会社 鹿沼製作所 (〒322-0014 鹿沼市さつき町 13-1)

†東網橋梁株式会社 大阪営業所 (〒592-8331 堺市築港新町 2-6-1)

In composite girder bridge, shear connectors are commonly used for connecting steel girders with concrete slabs. When the composite girder bridge is subjected to the load on the slab between steel girders, the shear connector may be subjected to forces from transverse direction as well as longitudinal direction.

In this paper, a series of experiments and rigid-body-spring model analysis are conducted to investigate the behavior of shear connectors subjected to the force in the transverse direction. As a result, the effect of the arrangement of studs and the vertical stiffener of the web on the axial force of studs was clarified qualitatively.

Key Words : composite girder, shear connector, transverse force, rigid-body-spring model analysis

キーワード : 合成桁, ずれ止め, 橋軸直角方向力, 剛体ばねモデル解析

1. はじめに

近年, 公共事業費の削減の要求に伴い, 橋梁の架設においても様々な技術が開発されている。その中で, プレートガーダー橋の主桁を減らすことによって, 施工の省力化, 工期の短縮等の合理化を目的としたいわゆる少主桁橋は, 現在建設されている第二東名でも採用され, 今後の標準となることが予想される。

このような少主桁橋においては, 桁間隔が従来よりも大きくなることから, 橋軸直角面内における曲げやせん断を十分に考慮しなければならない。特に, この形式を合成桁に適用する場合には, コンクリート床版と鋼桁とを一体化させる鋼桁フランジ上のずれ止めに作用する橋軸直角方向の力は無視できない¹⁾。既往の研究^{2), 3)}により, ずれ止めには主桁上の床版の回転拘束によって引抜き力が発生することが報告されているが, 応力伝達性状のより詳細なメカニズムの検討と引抜き力の定量的評価については, まだ研究の余地がある。

そこで本研究では, 合成桁橋の橋軸直角面内の応力伝達がずれ止めとしてのスタッドに与える影響を明らかにするため, 合成桁橋の主桁間に活荷重が作用した状態を想定したはり試験体を製作し, 静的載荷試験を行った。また, はり試験体を, 剛体ばねモデルによりモデル化し, スタッドへの応力伝達性状を数値解析により調べた。その際, 鋼主桁とコンクリートの境界面での力学特性を, スタッド部に着目した要素試験を行うことによっ

て求めた。これらの実験および数値解析から, 橋軸直角面内の曲げやせん断がスタッドの応力伝達性状に及ぼす影響を明らかにした。

2. はり試験体の静的載荷試験

はり試験体は, 2本の主桁とコンクリート床版を橋軸方向に, ある長さで切り出した状況を考えて図-1のような形状とした。左右の溶接組立 H 鋼は鋼主桁をモデル化したものであり, コンクリートはりはコンクリート床版をモデル化している。コンクリートはりは高さ 15cm, 幅 20cm とし, 全長 2m, 鋼桁間隔 1.5m とした。実際の鋼主桁は, 橋軸方向まわりのトルクに対しねじり剛性で抵抗するため, 床版はこのねじり剛性による弾性回転拘束を受けることになり, 結果的に床版の回転拘束力はスタッド等を通して鋼桁に伝達される。したがって, 実際よりも回転拘束の度合いが高い本試験体のスタッドには, 実際よりもやや大きな荷重が作用することになると予想される。このようにした理由は, 本研究では特に初期の荷重段階からのスタッドの応力伝達性状の検討を目的としたためである。

垂直補剛材の有無に関しても, 床版の回転拘束, スタッドに作用する力に大きな影響を与えることが予想される。そこで, この影響と, 鋼主桁の上フランジ幅, 橋軸直角方向スタッド間隔を考慮するため, H 鋼の上フランジ幅, スタッド中心間隔, 垂直補剛材の有無をパラメ

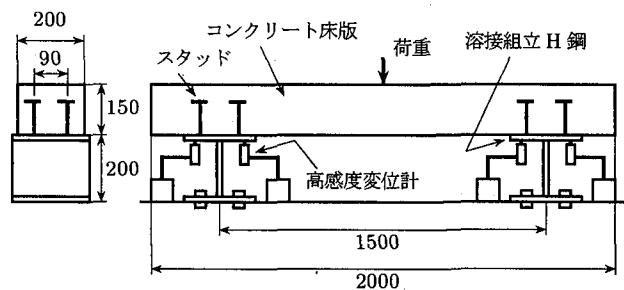


図-1 はり試験体の概要

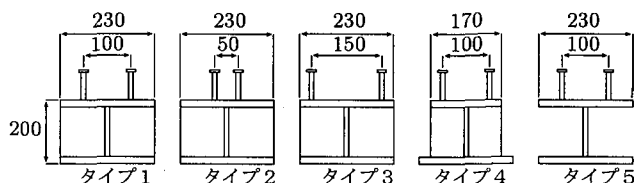


図-2 溶接組立 H 鋼のタイプ

表-1 はり試験に用いた材料の材料特性

	圧縮強度	弾性係数
コンクリート	30.9 N/mm ²	32.3 kN/mm ²
	降伏応力	弾性係数
主鉄筋	343.5 N/mm ²	181.3 kN/mm ²
フランジ	313.0 N/mm ²	206 kN/mm ²
ウェブ	270.3 N/mm ²	206 kN/mm ²
スタッド	360.0 N/mm ²	206 kN/mm ²

タとして図-2に示すような5タイプの鋼桁形状を有する試験体を製作した。なお、試験体に用いたスタッドは径13mm、全高10cmとし、橋軸方向には9cm間隔で2列配置した。

コンクリートはりの設計については、ずれ止めの挙動が十分に観察できるように、活荷重のうちT荷重の後輪荷重程度の98kN (10tf)を設計荷重とし、配筋を図-3に示すように決定した。また、はり試験体に用いた材料の材料特性を表-1に示す。なお、コンクリートの材料特性は材令28日現場養生テストピースの圧縮試験により得られた値である。

スタッドには、軸ひずみを計測するため中央高さの橋軸直角方向に対して前面と後面にひずみゲージを貼付した。また、載荷点のたわみを測定するために載荷点下にダイヤルゲージを設置し、鋼桁上フランジとウェブの回転を調べるために、図-1のように高感度変位計を取り付け、フランジの鉛直変位を計測した。さらに、鋼桁上フランジとコンクリート床版の橋軸直角方向水平ずれ変位を、高感度変位計を図-4のように設置することにより計測した。

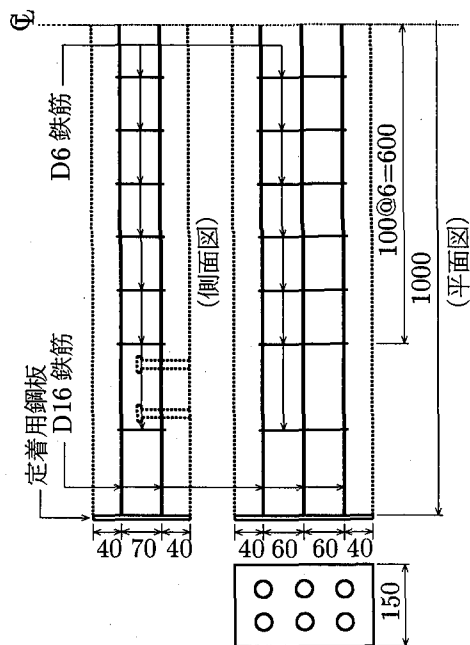


図-3 鉄筋配筋図

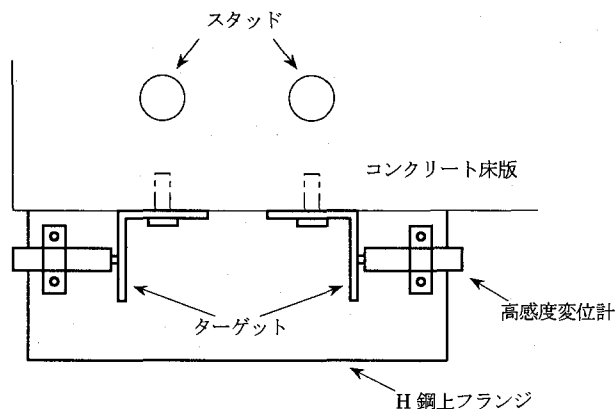


図-4 橋軸直角方向ずれ変位計設置状況

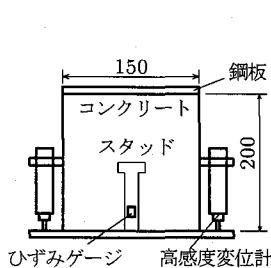


図-5 圧縮要素試験体

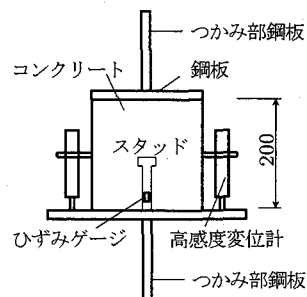


図-6 引張要素試験体

3. 要素試験

スタッド周辺の鋼桁・コンクリート界面の力学挙動を把握することと、後述する剛体ばねモデル解析で用いるばね特性を求めることを目的とし、スタッド周辺の鋼

表-2 要素試験に用いた材料の材料特性

	圧縮強度	弾性係数
コンクリート	40.8 N/mm ²	33.1 kN/mm ²
	降伏応力	弾性係数
主鉄筋	351.0 N/mm ²	187.7 kN/mm ²
鋼板	271.0 N/mm ²	206 kN/mm ²
スタッド	371.0 N/mm ²	206 kN/mm ²

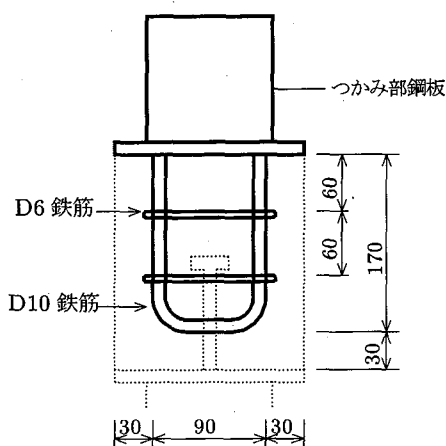


図-7 要素試験配筋: 立面図

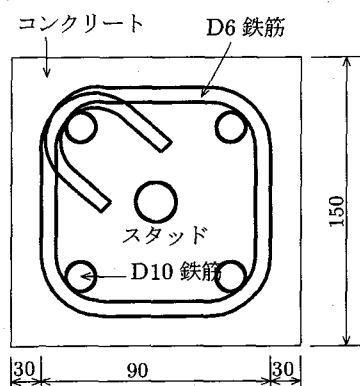


図-8 要素試験配筋: 断面図

桁上フランジ、コンクリートをモデル化した要素試験を行った。

3.1 試験方法

1本のスタッド周辺を切り出した状況を考え、スタッド付き鋼板にコンクリートを打設した要素試験体を製作し、圧縮試験と引張試験を行った。圧縮試験および引張試験に用いた要素試験体を、それぞれ図-5,6に示す。特に、引張試験体は、早期のコンクリートの割裂を防止しスタッドへ引張力を確実に伝達させるため、図-7,8に示すように鉄筋を配置し、引張载荷のためにつかみ部を設けた。使用したスタッドの寸法は、引張試験体、圧縮試験体ともにはり試験体と同じ径13mm、全高

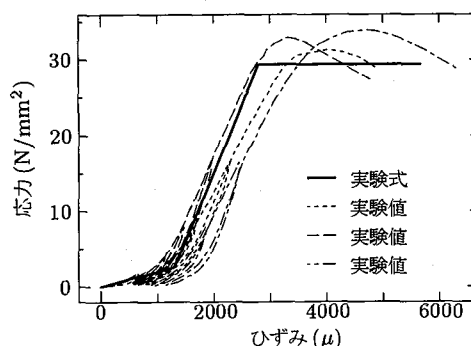


図-9 界面付近のコンクリートの応力-ひずみ関係(圧縮)

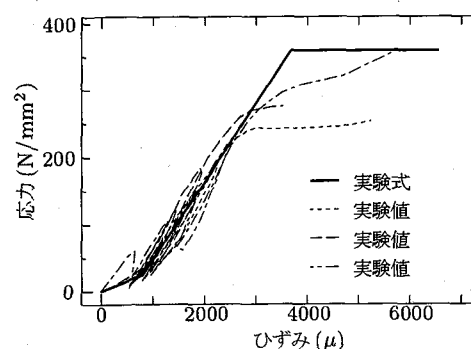


図-10 スタッドの応力-ひずみ関係(圧縮)

10cmのものである。この試験に用いた材料の材料特性を表-2に示す。なお、コンクリートの材料特性は材令28日現場養生テストピースの圧縮試験により得られた値である。

スタッドに作用する軸力を測定するため、図-5,6のように、底鋼板から3cmの位置のスタッド軸部に2枚ずつひずみゲージを貼付した。また、試験体10cmの高さと底鋼板の区間の相対変位を、高感度変位計で計測した。この相対変位を、以後、中間点の変位と呼ぶこととする。

3.2 試験結果

要素試験で測定したスタッドの軸ひずみ ϵ_s から、スタッドに作用している応力 σ_s 、軸力 N_s を算定することができる。全荷重 P から、算定したスタッドの軸力 N_s を差し引いた荷重をコンクリートが負担する荷重 N_c とし、さらにコンクリートの断面積 A_c を用いてコンクリートに作用する直応力 σ_c を

$$\sigma_c := N_c / A_c \quad (1)$$

と定義する。また、中間点の変位 v と底鋼板からの距離 $d (= 10\text{cm})$ により、次式のように要素試験体のひずみ ϵ_e を定義する。

$$\epsilon_e := v / d \quad (2)$$

要素圧縮試験により得られた計測値から、以上のように

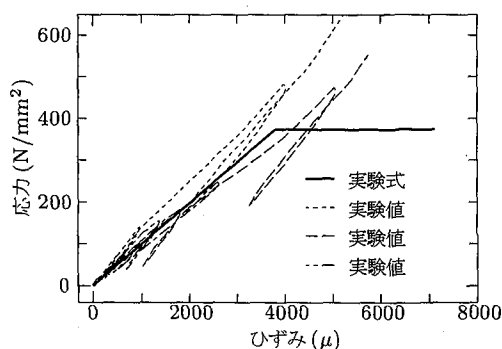


図-11 スタッドの応力-ひずみ関係 (引張)

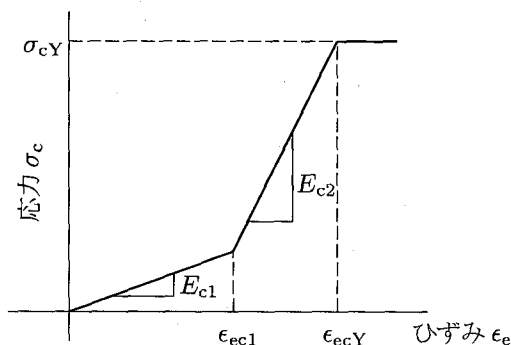


図-12 実験式の定義

に定義されたコンクリートの応力 σ_c と試験体のひずみ ϵ_e を求め、図-9に示す。図中に3つある実験値は、3体製作した同じタイプの試験体に対するそれぞれの結果である。载荷のごく初期段階において、見かけ上の剛性が小さくなっている。これは、コンクリートとスタッド周辺の鋼板との間に遊びがあり、完全に密着するまでの間に変形が大きくなるためだと考えられる。その後、ほぼコンクリート本来の剛性と同程度の剛性へと回復し、最終的にコンクリートブロックの圧壊などの終局に伴って、剛性が低下している。

一方、圧縮を受けるスタッドの応力-ひずみ関係の実験値を図-10に示すが、コンクリートブロックが圧壊する以前の応力-ひずみ関係の定性的な傾向は、基本的にコンクリートの応力-ひずみ関係のそれと一致している。

次に、要素引張試験から得られた結果より、先ほど定義したスタッドの応力 σ_s と試験体のひずみ ϵ_e の関係を図-11に示す。引張に関しては、荷重をすべてスタッドで受け持つものの、試験体の変形としてはコンクリートの変形も含むため、見かけ上の剛性はスタッドそのものの剛性よりも小さくなっている。

以上の結果から、後述する剛体ばねモデル解析のための、各種応力-ひずみ関係の実験式を以下のように定義した。コンクリートの圧縮応力 σ_c -要素ひずみ ϵ_e 関係

は、図-9を元に以下のようなトリリニア関係とした。

$$\sigma_c := \begin{cases} E_{c1}\epsilon_e & (\epsilon_e < \epsilon_{ec1}) \\ E_{c2}(\epsilon_e - \epsilon_{ec1}) + E_{c1}\epsilon_{ec1} & (\epsilon_{ec1} < \epsilon_e < \epsilon_{ecY}) \\ \sigma_{cY} & (\epsilon_{ecY} < \epsilon_e) \end{cases} \quad (3)$$

ただし、 ϵ_{ec1} と σ_{cY} との間には次に示す関係

$$\sigma_{cY} = E_{c2}(\epsilon_{ecY} - \epsilon_{ec1}) + E_{c1}\epsilon_{ec1} \quad (4)$$

を設定している。したがって、独立なパラメタは E_{c1} 、 E_{c2} 、 ϵ_{ec1} 、 ϵ_{ecY} であり、この定義に従って決定された関係を図-9に実験式として実線で示した。なお、実験式のパラメタの関係を図-12に模式的に示している。また、スタッドの圧縮応力-要素ひずみ関係も図-10に実線で示すように、トリリニア関係とした。この関係は、式(3)および式(4)における各記号の添字 'c' を 's' に換えることによって表すことができる。

一方、スタッドの引張応力-要素ひずみ関係は、図-11を元に完全弾塑性型として理想化した。その結果を、同図に実験式として実線で示した。

ただし、これらの実験式は、解析に用いることを考慮して、上述のコンクリートの応力-ひずみ関係の圧縮強度 σ_{cY} およびスタッドの応力-ひずみ関係の降伏応力 σ_{sY} には、それぞれ表-1に示すはり試験体の材料特性を適用した。

4. 解析モデルおよび解析方法

合成桁を解析するためには、鋼およびコンクリート部分のみならず、ずれ止めをも適切にモデル化して解析に組み込む必要がある。さらに、本研究ではずれ止めに作用する支圧や引抜きを対象としているため、鋼とコンクリートの界面での力学挙動を考慮する必要がある。このようないわゆる不連続面を含む問題を解析するためには、離散化モデルである剛体ばねモデルが簡便である⁴⁾。特に、桁上に離散的に配置されたずれ止めに対し、押抜き試験などから得られるずれ止めの変形特性を、剛体間に連結しているばねの特性として容易に取り入れられるという利点を有している⁵⁾。以上の理由から、本研究では剛体ばねモデルを用いて解析を行うこととする。

前章の実験で用いた図-1に示すはり試験体を、図-13に示すような剛体と、それぞれを結合する長さを無視できるばねからなる、剛体ばねモデルにモデル化した。それぞれの剛体間のばね要素を図-14に示す。ここでは、コンクリートはり、鋼フランジ、ウェブを、それぞれ、はり要素と仮定し、コンクリート床版同士の剛体間は数本の軸ばねとせん断ばねで結合し、フランジ、ウェブの鋼部分同士の剛体間は軸ばね、せん断ばねおよび回転ばねで結合した。コンクリート床版と鋼桁上フランジ間およびフランジと補剛材間、水平ばねと鉛直ばねで結合した。なお、要素分割数は、コンクリートはり

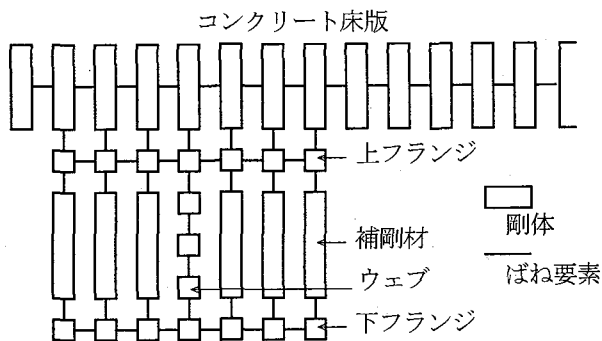


図-13 解析モデル

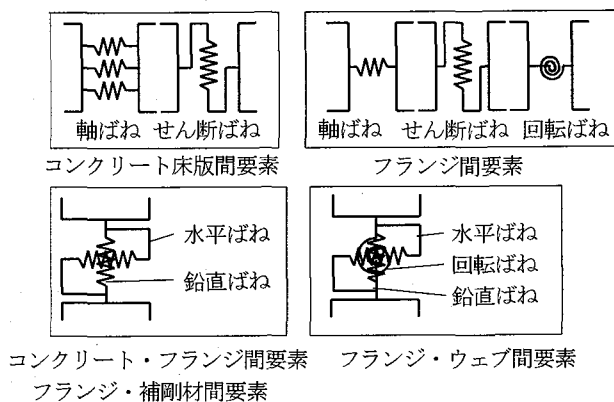


図-14 剛体間ばね要素

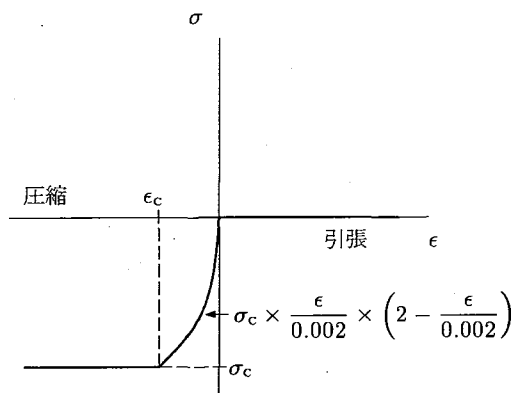


図-15 剛体ばねモデル解析におけるコンクリートの構成モデル

が 80, H 鋼フランジは本試験における標準の幅 23cm のもので 10, H 鋼ウェブは高さ方向に 8 とした。

剛体ばねモデルとして考えられるコンクリートはりや鋼桁におけるばね特性は、対応する連続体モデルと (増分) ひずみエネルギーが等価となる条件から決定される^{5),6)}。特に本解析では、コンクリートはり部のコンクリートを表わす軸ばねに対応する連続体の構成関係は図-15に示すようなコンクリート標準示方書⁷⁾に与えられる二次曲線型の応力 - ひずみ関係を、鉄筋に関しては図-16に示すような完全弾塑性型の構成関係を用いた。

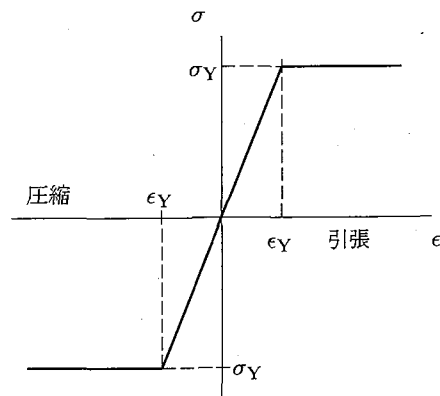


図-16 剛体ばねモデル解析における鉄筋の構成モデル

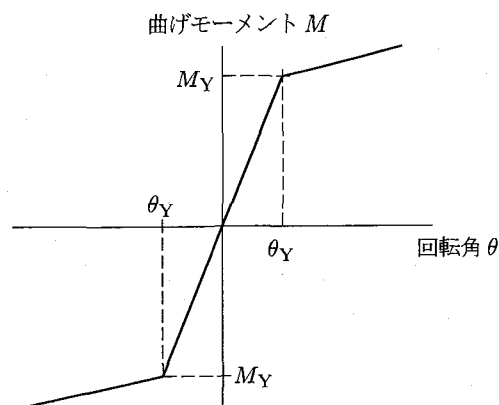


図-17 剛体ばねモデル解析における鋼桁の回転ばね特性

また、フランジ部、ウェブ部およびフランジとウェブ間の回転ばねは、図-17に示すような線形硬化型の弾塑性ばねとした。なお、それぞれの構成関係におけるパラメータは材料試験により決定した。

一方、コンクリート床版と鋼桁の界面には、鉛直ばねのみ弾塑性挙動を考慮し、以下に示す 2 つのケースにより解析を行うこととした。ケース 1 として、コンクリート部には前述のコンクリート標準示方書に与えられる応力 - ひずみ関係、スタッドには前述の鉄筋と同様の完全弾塑性型の構成関係を用いた。ケース 2 では、コンクリート部、スタッド共に前章の要素試験の結果から求めた実験式を用いた。ただし、いずれのケースにおいても、コンクリート部には引張力の伝達はないものとした。また、その他のばね特性はすべて弾性とし、そのばね定数は既往の文献^{5),6)}と材料試験の結果により決定した。

なお、図-14に示すそれぞれのばね要素をもつ場合の要素剛性マトリックスの算定法は既往の文献^{5),6),8)}において示されている。

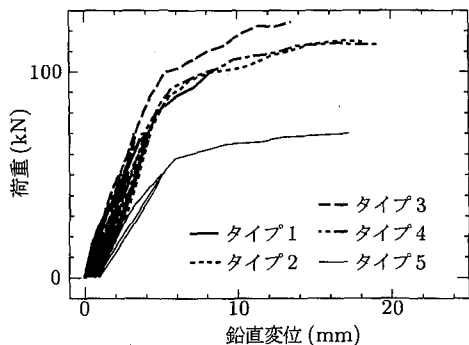


図-18 載荷点における荷重 - 変位関係 (実験結果)

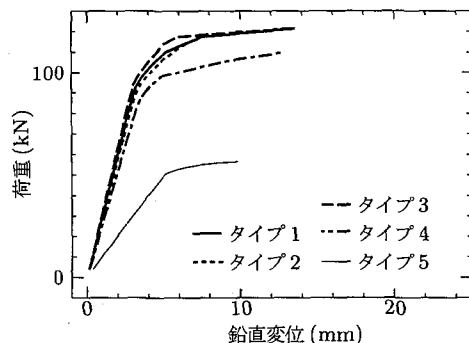


図-19 載荷点における荷重 - 変位関係 (解析ケース 1)

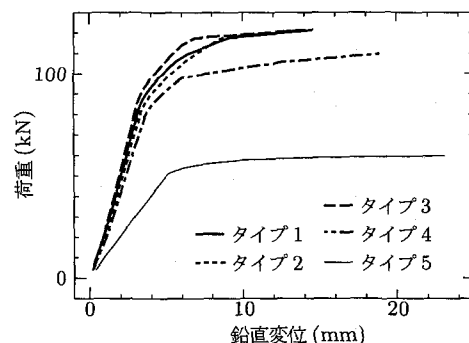


図-20 載荷点における荷重 - 変位関係 (解析ケース 2)

5. 実験結果および解析結果

はり試験体の静的載荷試験結果と剛体ばねモデル解析結果とを、荷重載荷点の鉛直変位、スタッドの軸ひずみ、コンクリートと H 鋼フランジとのずれ変位、H 鋼フランジの鉛直変位などについて比較し、以下に述べる。

5.1 荷重載荷点の鉛直変位

図-18 に、はり試験体の静的載荷実験より得られた載荷点の荷重 - 鉛直変位関係を示す。タイプ 5 は補剛材がないために、他のタイプに比較すると同じ大きさの荷重で変位が大きくなっている。そして、荷重が 60kN 辺りのところで、鉛直変位が急激に大きくなったので試験を

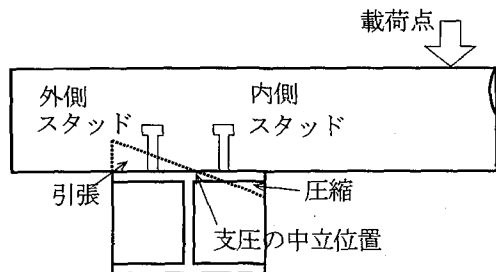


図-21 着目スタッドの位置および支圧分布の例

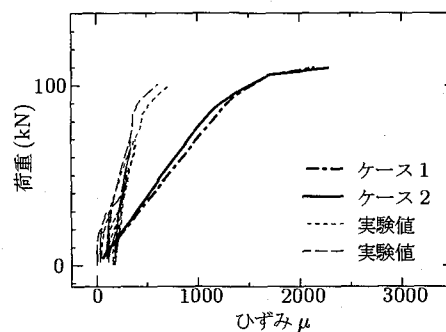


図-22-a 外側スタッド

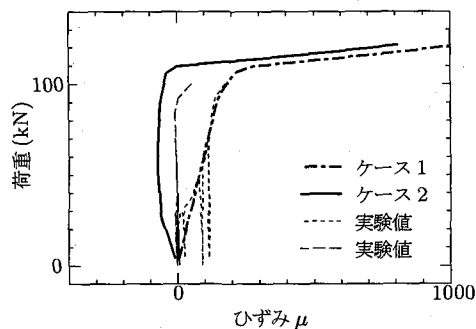


図-22-b 内側スタッド

図-22 スタッドの軸ひずみ (タイプ 1)

終了させた。また、タイプ 5 以外の補剛材がある試験体については、荷重が 100kN 付近でコンクリートはり支点部のせん断、もしくは載荷点直下の曲げにより、コンクリートはりが降伏した。スタッド間隔がもっとも大きなタイプ 3 のみ、他のタイプと比較して 20% 程度剛性が高くなっているが、タイプ 1, 2, 4 に関しては同程度の変位が生じている。この結果から、コンクリートはりの変形には、補剛材の影響が大きく、補剛材がある場合のスタッド間隔、上フランジ幅が及ぼす影響は、さほど大きくないと考えられる。

補剛材のないタイプ 5 において、弾性範囲の曲げ剛性が低く、また、最高荷重が小さいことの原因は、床版の回転拘束が小さいこと、さらにそのために荷重載荷点での曲げモーメントが補剛材のあるタイプのものよりも大きくなること、上フランジとの接合部付近のウェブ上端の塑性化が考えられる。ただし、実橋の鋼主桁には、数

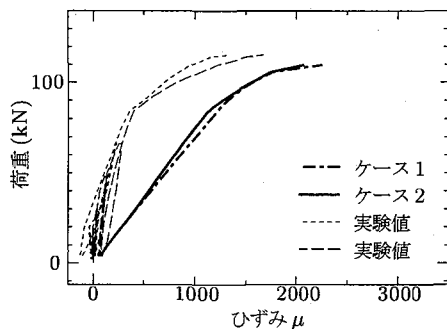


図-23-a 外側スタッド

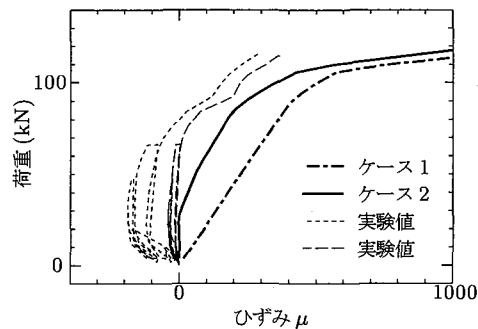


図-23-b 内側スタッド

図-23 スタッドの軸ひずみ (タイプ2)

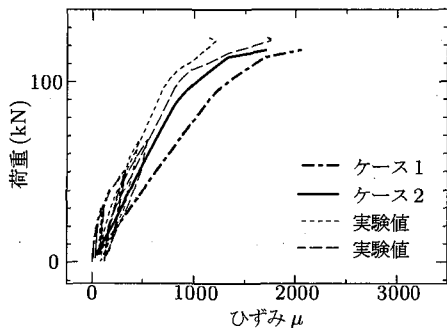


図-24-a 外側スタッド

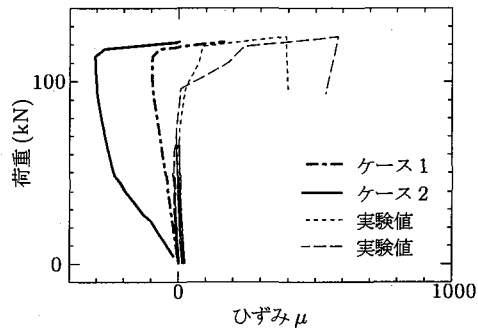


図-24-b 内側スタッド

図-24 スタッドの軸ひずみ (タイプ3)

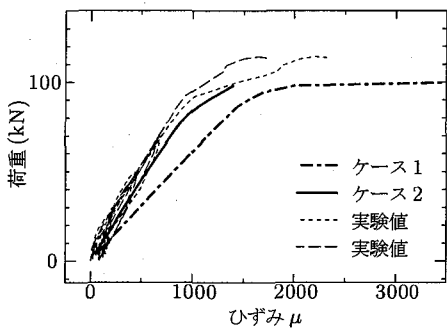


図-25-a 外側スタッド

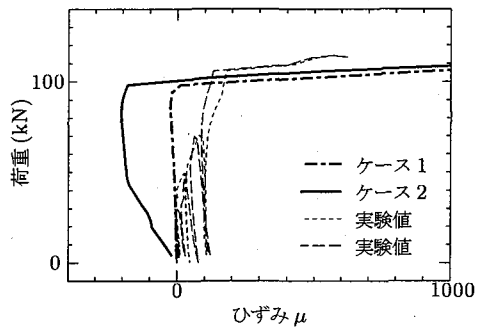


図-25-b 内側スタッド

図-25 スタッドの軸ひずみ (タイプ4)

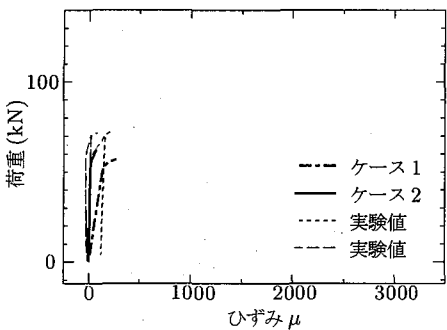


図-26-a 外側スタッド

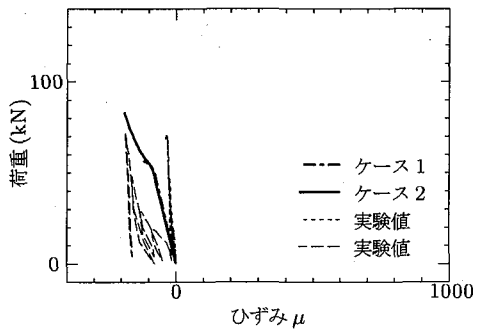


図-26-b 内側スタッド

図-26 スタッドの軸ひずみ (タイプ5)

m ごとに垂直補剛材が設けられていることから、垂直補剛材のない部分においても、床版の回転拘束は本実験のタイプ5の場合よりも大きいと考えられる。

剛体ばねモデル解析による同様の荷重 - 鉛直変位関係

の結果を解析ケース1および2について図-19, 20に示す。図-18に示す実験結果と図-19, 20に示す解析結果を比較すると、いずれの解析ケースも試験体のタイプごとにほぼ傾向を捉えている。したがって、載荷点の鉛

直変位に関しては、解析ケースによる差異、すなわちスタッド周辺の支圧のばね特性は優位な影響を及ぼさないと考えられる。

5.2 スタッドの軸ひずみ

ここでは、はり試験体の静的載荷試験において、スタッドに生じる軸ひずみ性状を解析結果と比較しながら各試験体のタイプごとに調べる。以下では、図-21のような試験状況において、載荷点の反対側のスタッドを外側スタッド、載荷点側を内側スタッドと呼ぶ。図-22~26に試験体のタイプごとにスタッドの軸ひずみと荷重の関係を解析結果とともに示す。いずれの図においても、横軸は軸ひずみ、縦軸は荷重であり、正のひずみは引張を意味する。また、図中に2つある実験値は片側鋼桁の橋軸方向に配置した2本のスタッドの実験結果である。

タイプ1の実験値を基準にして、各タイプの実験値と比較すると、スタッド間隔の広いタイプ3、スタッド間隔は同じであるが上フランジの幅が狭いタイプ4では、外側スタッドの軸ひずみはタイプ1よりも大きく、内側スタッドの軸ひずみは荷重が100kNを超えた辺りで引張ひずみが急激に大きくなっていることがわかる。これに対して、スタッド間隔の狭いタイプ2では、外側スタッドの軸ひずみはタイプ1と同様の傾向を示しているが、内側スタッドでは荷重が50kNを超えた辺りから引張ひずみを受けていることがわかる。

合成桁において、鋼桁間に荷重を受けると、鋼桁上フランジとコンクリート床版間には、曲げが作用することになるため、上フランジとコンクリート床版下面との界面では、図-21に示すように外側が引張側、内側が圧縮側となり、その間に支圧の中立位置が存在することになる。コンクリートと鋼上フランジとの界面では引張をほとんど負担できないため、引張力はすべてスタッドに集中する。したがって、中立位置はウェブ上よりも載荷点側になり、結果的にスタッド間隔の広い場合の方が外側スタッドに作用する引張軸ひずみが大きくなり、スタッド間隔の狭いタイプ2では、最大荷重の約1/2の荷重段階から中立位置が内側スタッドよりも載荷点側となったため、内側スタッドにおいても引張軸ひずみが生じたものと考えられる。

これらの実験結果を解析結果と比較すると、外側スタッドの引張軸ひずみ、内側スタッドの圧縮軸ひずみについては、解析結果が実験値を過大評価している傾向がある。しかし、鋼フランジとコンクリート床版との界面の支圧ばね特性に要素試験の結果を用いた解析ケース2の方が、外側スタッドの引張軸ひずみを良く評価していると言える。また、タイプ1、3、4において、内側スタッドの軸ひずみが最大荷重付近で急激に引張ひずみとなっているが、解析結果はこのような傾向も良く捉えている。

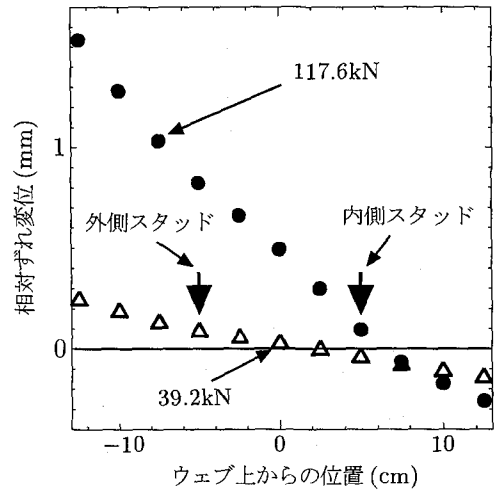


図-27 支圧ばねの相対変位(タイプ1)

ここで、タイプ1について、解析で求められた鋼上フランジとコンクリート床版間の支圧ばねの相対変位分布を図-27に示す。縦軸は支圧ばねの相対変位で、引張側を正として示し、横軸は鋼桁ウェブ位置からの距離で、載荷点側を正として示している。また、図中にはスタッド位置も示している。荷重が比較的小さい39.2kN時には、内側スタッド位置は圧縮側となっているが、外側スタッドが降伏した最大荷重付近(117.6kN)では、支圧の中立位置が載荷点側に移動するため、内側スタッドも引張側となり、結果的に引張軸ひずみが生じている。したがって、図-22-bに示したように内側スタッドの軸ひずみが最大荷重付近で圧縮側から急激に引張側になったことがわかる。

一方、タイプ5では、補剛材がなく鋼桁によるコンクリート床版の回転拘束が極端に弱いので、荷重の小さい段階で上フランジとウェブとの結合部付近に変形が集中するために、スタッドにはほとんど軸ひずみが生じていない。解析結果においても同様の傾向が認められる。

5.3 水平ずれ変位

図-28,29は、荷重と水平ずれ変位の関係の実験値と解析値の例をタイプ1およびタイプ5について示している。ここでの水平ずれ変位とは、鋼桁とコンクリート床版間の橋軸直角方向の水平ずれ変位であり、通常、合成桁で対象とする橋軸方向のずれ変位ではない。

実験値に着目すると、どちらのタイプにおいても最大荷重付近まで水平ずれ変位は 10^{-2} mm程度のオーダーと非常に小さい。これらの結果と合成桁ずれ止めのずれ性状に関する既往の研究⁹⁾を参考にすると、本実験においては橋軸直角方向力により鋼フランジ上のスタッドに作用する水平せん断力は小さいことがわかる。また、図中の解析値はケース1の結果を示すが、やはり水平ずれ変位の大きさは非常に小さく、ケース2においても同様

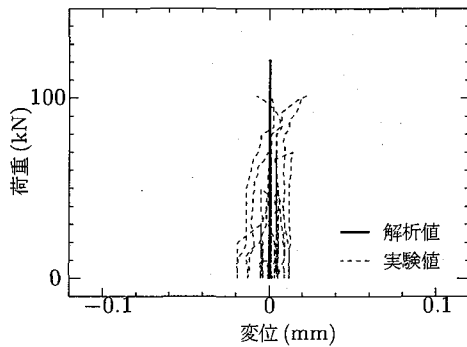


図-28 水平ずれ変位 (タイプ1)

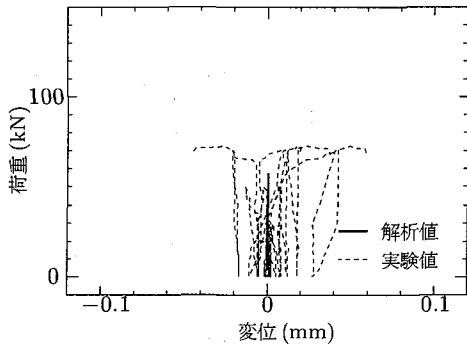


図-29 水平ずれ変位 (タイプ5)

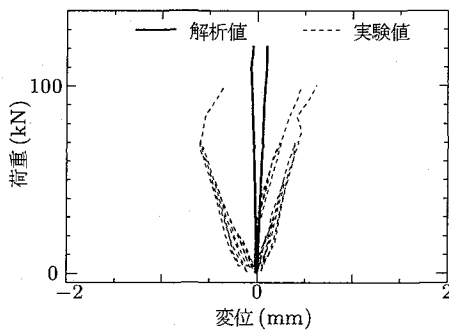


図-30 H鋼上フランジ鉛直変位 (タイプ1)

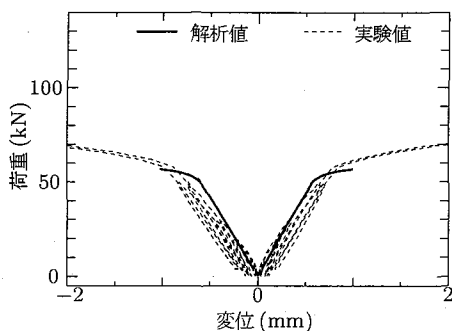


図-31 H鋼上フランジ鉛直変位 (タイプ5)

の結果となっていた。

5.4 フランジの鉛直変位

図-30, 31は、荷重とH鋼上フランジの鉛直変位の関係を試験体タイプ1および5について示している。

実験値は、鋼ウェブ中心から70mm、幅方向中心から80mmの位置にて計測した値であり、解析値は実験で計測した位置に近い部分の上フランジの鉛直変位を表している。これらの図から、補剛材のないタイプ5の鋼フランジの鉛直変位は、補剛材のあるタイプ1の値の10倍程度と大きいことがわかる。ただし、実橋の鋼主桁では前述のように垂直補剛材がある間隔で設けられているため、上フランジの鉛直変位は本実験のタイプ5ほど大きくはならないと考えられる。また、補剛材のあるタイプ2~4に関してはここには示さないが、タイプ1と定性的に同様の結果が得られた。

解析結果に関しては、補剛材のないタイプ5で実験値よりも小さい値となる傾向はあるものの、その差は10%程度と良い一致を示している。しかし、他のタイプでは、本解析による結果は、実験結果と比較して非常に小さい値となっている。これは、実際には鋼フランジ、ウェブ、補剛材は板であるが、ここで用いた解析においては、これらをはりあるいは棒部材にモデル化していることによると考えられる。

6. おわりに

本研究では、合成桁橋の鋼主桁間に走行車両などによる活荷重が作用した状況における、橋軸直角方向の応力伝達に着目し、実験および数値解析を行った。ここでは、特に、ずれ止めであるスタッドの力学挙動に着目した検討を行い、以下の知見を得た。

- 鋼桁上フランジ上に取り付けられたスタッドに生じる軸力は、スタッド間隔、鋼桁上フランジの幅により影響を受ける。載荷側と反対側のスタッドには引張軸ひずみが生じるが、その大きさは鋼桁上フランジとコンクリート床版下面との間の鉛直方向相対変位に依存し、鉛直方向相対変位の中立位置より離れているスタッドほど大きな引張軸ひずみが生じる。なお、本解析法による結果は、スタッドの引張軸ひずみを大きめに評価している。
- 鋼桁の垂直補剛材の有無がスタッドの軸引張力に及ぼす影響は非常に大きく、垂直補剛材がない場合には、鋼桁の上フランジとウェブの結合部付近が回転することによって力が伝達されるために、スタッドに生じる軸引張力は小さくなる。
- 本実験の範囲では、主桁間に作用する荷重により、スタッド取り付け位置における鋼桁とコンクリートはりの橋軸直角方向の水平ずれは非常に小さいことから、橋軸直角方向の力によりスタッドに生じる水平せん断力は小さいと考えられる。

ここで用いた剛体ばねモデル解析では、解析精度にまだ改善の余地があるものの、初期の荷重段階における橋軸直角方向力を受けるスタッドの挙動の定性的な傾向を捉えることができた。また、要素試験で得られた実験式

を用いることによって、軸引張力を受けるスタッドの実験結果をより良く追跡することができた。今後は、実際的なプロポーシオンを有する同種の実験結果と、ここで用いた解析結果とを比較し、さらに本解析法の有効性を確認する予定である。また、実際の合成桁の状況を考慮して、橋軸方向および橋軸直角方向の両方から荷重の影響を受けるずれ止めの応力伝達性状をより詳細に検討することと、それらを反映した設計法を確立することが是非必要である。

参考文献

- 1) 大垣賀津雄, 川口喜史, 八部順一, 長井正嗣: 連続合成2主桁橋のずれ止め設計に関する一考察, 鋼構造論文集, 第4巻第15号, pp.81-91, 1997.9.
- 2) 石川裕一, 長井正嗣, 八部順一, 大垣賀津雄, 瀧藤英明: PC床版合成2主桁橋の床版-鋼桁結合部の応力特性に関する実験的研究, 土木学会第53回年次学術講演会概要集, I-A317, pp.634-635, 1998.10.
- 3) 瀧藤英明, 大垣賀津雄, 八部順一, 長井正嗣, 石川裕一: PC床版合成2主桁橋の床版-鋼桁結合部の終局耐力に関する実験的研究, 土木学会第53回年次学術講演会概要集, I-A318, pp.635-636, 1998.10.
- 4) Tadahiko Kawai: Some considerations on the finite element method, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 16, pp.81-120, 1980.
- 5) 中島章典, 池川真也, 山田俊行, 阿部英彦: ずれ止めの非線形挙動を考慮した不完全合成桁の弾塑性解析, 土木学会論文集, No.537/I-35, pp.97-106, 1996.4.
- 6) 阿部英彦, 中島章典: SRCはりの力学性状に及ぼすずれ止め位置の影響, 構造工学論文集, Vol.33A, pp.307-316, 1987.3.
- 7) 土木学会: 平成3年版コンクリート標準示方書(設計編), 土木学会, 1995.3.
- 8) 川井忠彦, 野上邦栄: 鋼構造部材と骨組の離散化極限解析, コンピュータによる極限解析法シリーズ7, 培風館, 1991.6.
- 9) 中島章典, 阿部英彦, 岸省治, 斎藤崇, 宮田明: 合成桁ずれ止めの水平せん断伝達性状に着目した実験的研究, 鋼構造年次論文報告集, 第1巻, pp.669-676, 1993.7.

(1999年9月17日 受付)