

鋼合成桁と PC 桁接合部におけるウェブずれ止めの設計に関する研究

A Study on Design Method for Web Shear Connector in Joints of Composite Steel Girder and PC Girder

篠崎 裕生 HIROO SHINOZAKI
有川 直貴 NAOKI ARIKAWA
浅井 洋 HIROSHI ASAI

著者らが提案する鋼合成桁と PC 桁の接合構造では、上下フランジおよびウェブのずれ止めによって接合部に作用する曲げモーメントとせん断力に抵抗する機構となっている。ウェブのずれ止めが必要なずれ抵抗を発揮するためには、ウェブの面外方向に十分な拘束力が働くことが重要である。本論文では、拘束力を変化させたずれ止めのせん断試験により面外拘束力と面外変位を定式化し、これを有限要素解析におけるジョイント要素の構成モデルとして組み込んだ。この解析法を用いて、鋼合成桁-PC 桁のウェブ接合部に着目した載荷実験を対象とした非線形有限要素解析を行い、ウェブ接合面の耐荷性状および面内・面外変形挙動を比較検証するとともに、簡易なずれ止めの設計法を提案した。

キーワード：混合桁橋接合部，ずれ止め，頭付きスタッド，鋼管ジベル

The authors have devised the joint of composite steel girder and PC girder using shear connecting method. In this joint, web shear connector show performance in sufficient out-of-plane restriction. In this paper, simplified design methods of web shear connector is proposed and verified through loading tests of the scaled model together with three-dimensional nonlinear finite element analyses using joint elements for shear connector in consideration of out-of-plane restriction. Further, it is proved that new shear connector using mortar filled steel tube inserted in perforated steel plate are effectively available as web shear connector.

Key Words: Joint of Mixed Girder Bridge, Shear Connector, Headed Stud, Steel Pipe Dubel,

1. はじめに

著者らは、鋼合成桁と PC 桁の接合方式に着目し、少数主桁形式の桁に対して図-1 に示すような接合構造を提案し、実験・解析により設計法の提案を行ってきた¹⁾。この接合方式では、上下フランジおよびウェブに配したずれ止めによって、曲げモーメントとせん断力に抵抗する機構になっているが、ウェブのずれ止めが必要なずれ抵抗を発揮するためには、ウェブの面外方向に十分な拘束力が働くことが重要である。本接合方式では、ウェブ部分に働く面外拘束力は、フランジに配したずれ止めと上床版の横補強筋によって発揮されることを想定しているが、これを設計するためには、面外拘束力がずれ止めと接合部の挙動に及ぼす影響を定量的に評価可能な

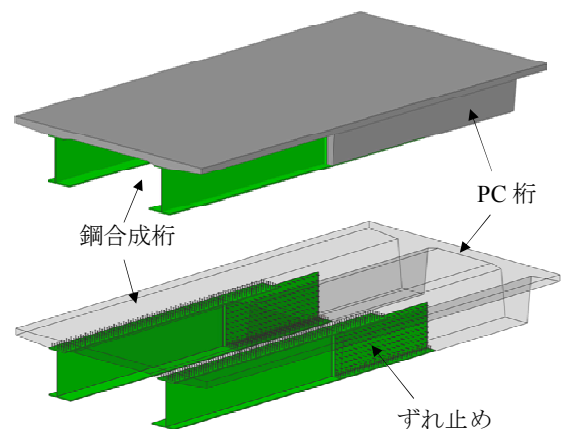


図-1 鋼合成桁と PC 桁のずれ止め方式による接合

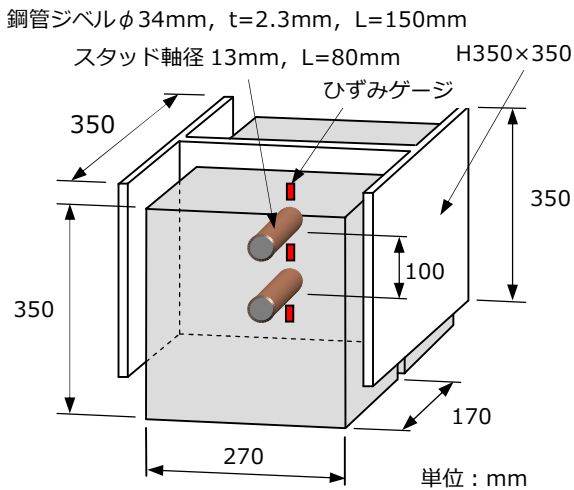


図-2 試験体形状

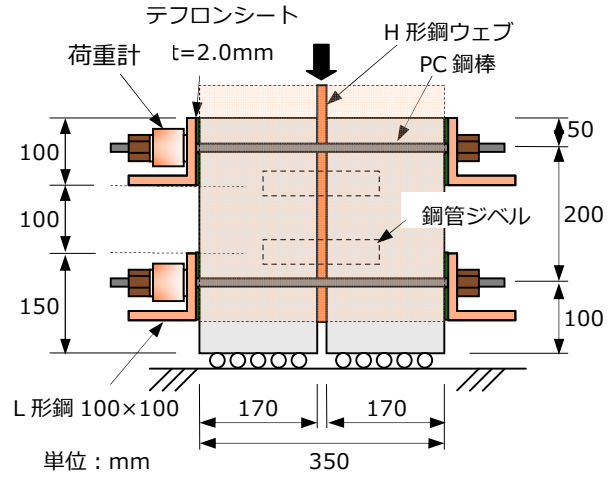


図-3 水平方向の拘束

手法が必要である。しかし、ずれ止めのせん断方向と鉛直方向の力と変形を連成モデルとして定式化した研究はまだない。

そこで本研究では、ウェブ接合面に働く面外拘束力が接合面の耐荷・変形挙動に与える影響を明らかにすることを目的として、解析的検討を行った。まず、ずれ止めとして頭付きスタッドおよび鋼管に高強度モルタルを充填した鋼管ジベル²⁾を用い、表-1のように面外方向の拘束度を変化させた押抜き試験の結果に基づいて、ずれ止めのせん断力-ずれ変位関係に及ぼす面外拘束力と面外変位（開き変位）の影響を定式化するとともに、これを有限要素解析におけるジョイント要素の構成モデルとして組み込んだ。この解析法を用いて、鋼合成桁-PC桁のウェブ接合部に着目した載荷実験を対象とした非線形有限要素解析を行い、ウェブ接合面の耐荷性状および面内・面外変形挙動を比較検証した。さらに、面外拘束力を変化させた解析により、拘束力がウェブ接合面の耐荷・変形挙動に及ぼす影響を解析的に明らかにした。最後に、これらの結果を基にウェブずれ止めの簡易な設計法を提案した。

表-1 拘束の条件

試験体名	拘束 PC 鋼棒	初期張力 (kN)
K-1, ST-1	—	0.0
K-2, ST-2	φ 23	0.0
K-3, ST-3	φ 23	1.0
K-4, ST-4	φ 16	1.0
K-5, ST-5	完全拘束	—

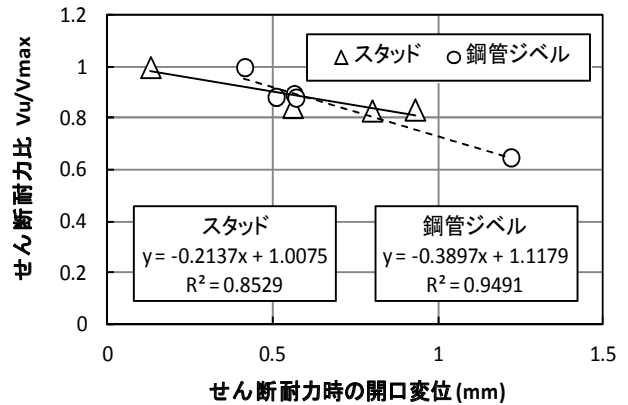


図-4 関数 $g(\delta_n)$ の定式化

2. ずれ止めのせん断-鉛直連成モデルの構築

(1) 面外方向拘束度を変化させた押抜き試験の概要³⁾

せん断-面外連成モデルの構築のため、H型鋼ウェブにずれ止めを配置し、フランジ間にコンクリートを打設した試験体を用い、PC鋼棒による拘束力をコンクリートブロック間に与えた状態で、H型鋼の断面に載荷して押し抜く試験を実施した(図-2, 図-3)。無拘束条件と合わせて拘束度を数水準変化させた試験の結果、拘束度に応じてせん断耐力が増加することが明らかとなった。また、面外方向の拘束がない場合のせん断耐力は、開口

変位の増大によって、通常の二面せん断方式の押抜き試験⁴⁾によって構築されたせん断耐力評価式^{2), 5)}による計算値を大きく下回ることが分かった。

(2) 面外拘束の影響を反映したずれ止め挙動の定式化

ずれ止めのせん断力が面内ずれ変位と開口変位の影響を受けること、面外方向の力は、ずれ止め自体の面外方向の抵抗力と、面内ずれ変位に起因して生じる力(せん断力と開口変位の関数で表す)の和で表せることを仮定して、以下のように定式化した。

$$V = V_{max} \cdot f(\delta_s) \cdot g(\delta_n) \quad (1)$$

$$N = K_n \delta_n - \Delta N \quad (2) \quad \text{れ変位による非線形性を表す関数, } g(\delta_n) : \text{開口変位に}$$

$$\Delta N = V \cdot h(\delta_n) \quad (3) \quad \text{よる非線形性を表す関数, } N : \text{面外方向の力 (引張を}$$

表-2 単純押抜き試験結果に基づいて決定したパラメータ

パラメータ	V_{max} (kN)	d_s (mm)	α	β	a_1	a_2	b_1	b_2
頭付きスタッド	80.0	13.0	16.1	0.40	-0.214	1.01	1.09	0.374
鋼管ジベル	96.3	34.0	34.0	0.44	-0.390	1.18	0.857	0.0343
備考	頭付きスタッド： $\phi 13\text{mm}$, $L=80\text{mm}$, 降伏強度 373N/mm^2 , 引張強度 454N/mm^2 , コンクリートブロックの圧縮強度 39.6N/mm^2 , 割裂引張強度 2.71N/mm^2 に対する係数 鋼管ジベル： $\phi 34\text{mm}$, 鋼管厚 $t=2.3\text{mm}$, 降伏強度 427N/mm^2 , 引張強度 460N/mm^2 , 高強度モルタルの圧縮強度 81.2N/mm^2 , コンクリートブロックの圧縮強度 39.6N/mm^2 , 割裂引張強度 2.71N/mm^2 に対する係数							

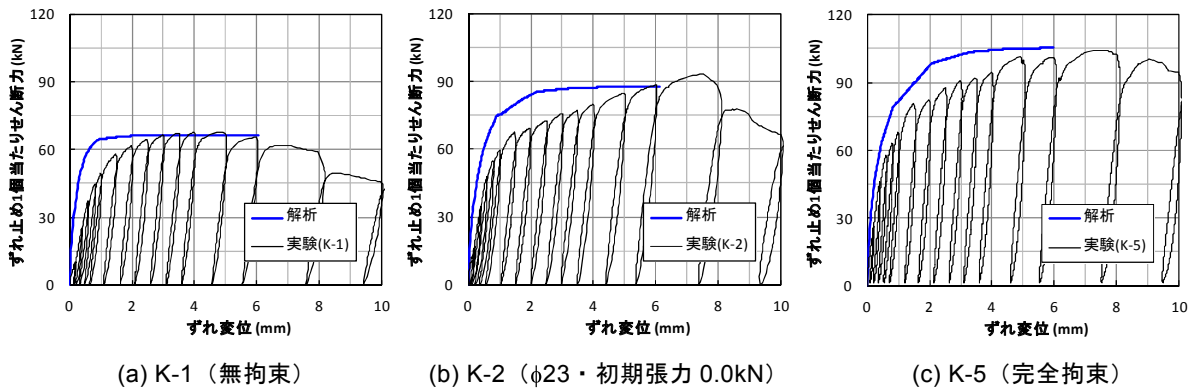


図-5 せん断一面外連成構成式の検証結果 (鋼管ジベル試験体)

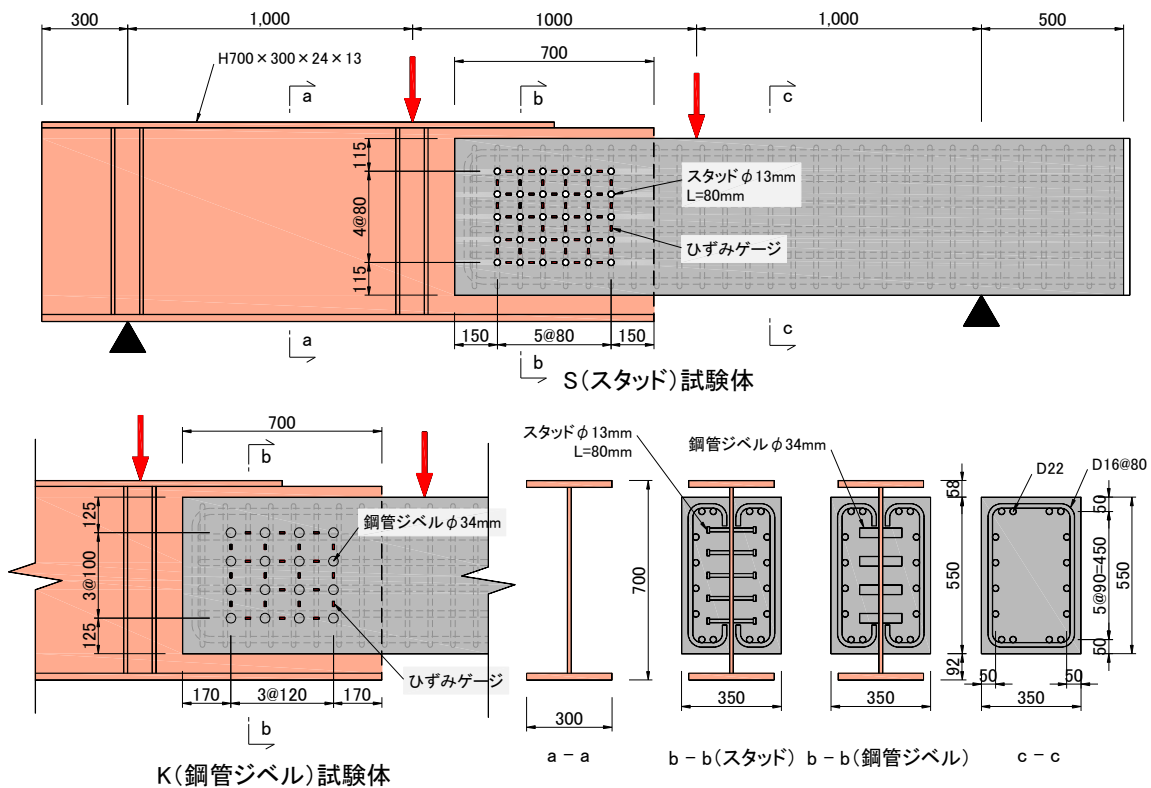


図-6 解析対象とした試験体諸元

ここに, V : せん断力, δ_s : ずれ変位, δ_n : 開口変位, V_{max} : 二面せん断試験でのせん断耐力, $f(\delta_s)$: ず

正), K_n : 面外方向の引張剛性, ΔN : ずれ変形に起因して生じる鉛直方向の圧縮力, $h(\delta_n)$: ΔN と V の関係

を表す係数であり、開口変位 δ_n の関数で表されるものと仮定した。関数 $f(\delta_s)$ は複合構造標準示方書⁵⁾を参考に、式(4)で表されるものと仮定し、関数 $g(\delta_n)$ 、 $h(\delta_n)$ は、それぞれ鉛直変位の一次関数を仮定した。

$$f(\delta_s) = (1 - e^{-\alpha \delta_s / d_s})^\beta \quad (4)$$

$$g(\delta_n) = a_1 \cdot \delta_n + a_2 \quad (5)$$

$$h(\delta_n) = b_1 \cdot \delta_n + b_2 \leq 1.0 \quad (6)$$

ここに、 d_s ：ずれ止めの直径であり、 $\alpha, \beta, a_1, a_2, b_1, b_2$ はずれ止めの種類や寸法、強度等に応じた係数である。

関数 $f(\delta_s)$ における係数 α, β は、頭付きスタッドに対しては複合構造標準示方書⁵⁾に基づいて決定し、鋼管ジベルに対しては、二面せん断試験におけるせん断力-ずれ変位関係²⁾に適合するように決定した。関数 $g(\delta_n)$ における係数 a_1, a_2 は、拘束力を変化させた単純押抜き試験で得られたせん断耐力 V_u ³⁾ と完全拘束試験体のせん断耐力 V_{max} ²⁾ の比、および耐力時の開口変位に基づき、図-4のように決定した。関数 $h(\delta_n)$ における係数 b_1, b_2 は、同一開口変位時における無拘束試験体と拘束試験体のせん断力の差 ΔV で、その時のPC鋼棒に生じる拘束力 N_{PC} を除した値を算定し、これを近似することによって決定した。以上の手順により決定した係数を表-2にまとめて示す。

(3) 適合性の検証

一例として、鋼管ジベルを用いた単純押抜き試験体3体 (K-1：無拘束、K-2： $\phi 23$ 初期張力0.0kN、K-5：完全拘束) に対して、上述のモデルとパラメータを適用して計算した結果を図-5(a)～(c)に示す。これらより、面外拘束条件の違いがせん断耐力に与える影響を定量的に再現可能であることが示された。

3. 鋼合成桁-PC桁接合部の非線形有限要素解析

(1) 実験の概要

本研究では、提案接合方式における、ウェブのずれ止めの設計法の構築を目的として実施した鋼合成桁-PC桁のウェブ接合部のみをモデル化した模型試験体の載荷実験を対象として解析を行った。試験体は、図-6に示すように、H形鋼 (SS400、H-700×300×24×13) のウェブにずれ止めを配置してRC桁と接合したものである。RC桁部は幅350mm、高さ550mmで、鋼桁との接合長さは700mmとした。接合部が等曲げモーメント区間となるよう、二つの載荷点に同一鉛直荷重を載荷する4点曲げ載荷を行った。試験体はずれ止め種類が異なる2体で、S試験体は直径13mm、高さ80mmの頭付きスタッドを片面30本、K試験体は外径34mm、全長150mmの鋼管ジベル16本が、それぞれ接合部領域に配置されている。頭付きスタッドと鋼管ジベルの材料特性値は、表-2の備考欄に示す通りである。コンクリートの圧縮強度は41.5N/mm²、弾性係数28.3kN/mm²であった。

本実験では、鋼桁とRC桁をウェブのみで接合する代わりに、面外拘束力を測定することを意図して、図-7に

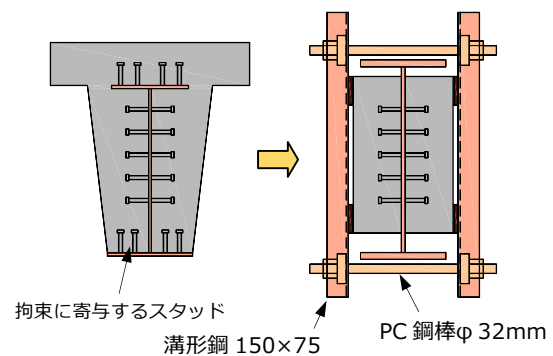


図-7 接合部の面外拘束方法

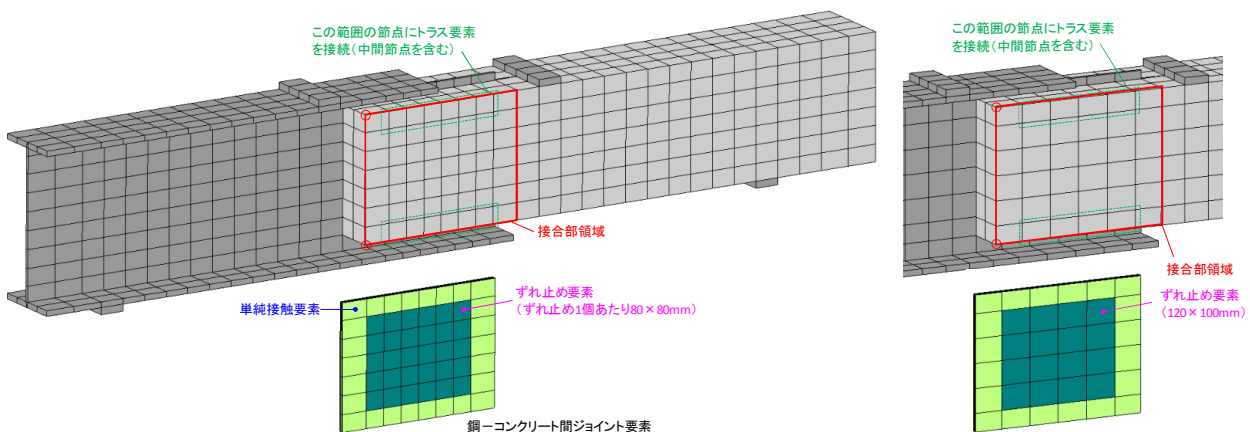


図-8 解析に用いたメッシュ図 (左：S試験体、右：K試験体の接合部拡大図)

示すように、鋼板と溝形鋼（150×75mm）およびPC鋼棒（φ32mm×4本、初期緊張力1.0kN/本）を介して接合部コンクリートを面外方向に拘束することで、実際の接合部の上下フランジおよび上床版の横補強筋による拘束力を模擬した。

（2）解析モデルと解析手法

前述のはり試験体に対して、非線形有限要素解析⁶⁾によるシミュレーションを行った。解析に用いたメッシュを図-8に示す。鋼桁、RC桁、載荷版はすべて20節点ソリッド要素でモデル化し、鋼材要素とコンクリート要素の境界面には16節点ジョイント要素を配置した。PC鋼棒による面外拘束力は、ウェブ表裏のコンクリート表面節点同士を接続するトラス要素を66本（S試験体）ないし46本（K試験体）配置することで、拘束力がコンクリート表面で分散して働く挙動を模擬した（トラス要素の合計面積は実際のPC鋼棒と同じ）。ただし、この実験では、溝形鋼が変形したため、計測された面外変位に対して、PC鋼棒張力が非常に小さい値であった。そこで、実験で得られた面外変位とPC鋼棒張力の関係から、PC鋼棒の見かけのヤング係数を算出（ 4.38kN/mm^2 ）し、解析ではこれをトラス要素に入力している。

ずれ止めの位置に配したジョイント要素に、2章で定式化した式(1)~(6)に示すずれ止めの構成則を導入した。ずれ止め以外の場所のジョイント要素には、接触・剥離を考慮可能な単純接触要素を用いた。なお、実際の荷重条件に合わせるため、解析は二つの荷重点に同じ荷重増分を与える荷重制御により行った。したがって、実験で見られるようなポストピーク領域は再現されていないことに注意されたい。

（3）解析結果

2試験体の荷重-はり中央たわみ関係を、実験結果と合わせて図-9に示す。S試験体では、剛性が大きく変化する荷重レベルが実験に比べてやや小さいが、全体の傾向は概ね再現できている。解析でも実験と同様、S試験体の方がK試験体に比べて、初期の剛性や耐力が大きい結果となった。

（4）面外拘束度の影響とずれ止めのせん断力分布

前述した通り、本解析では、実験で計測された面外変位とPC鋼棒張力との関係から、PC鋼棒の見かけのヤング係数を算出し、これをトラス要素に入力した。しかし、実験におけるPC鋼棒の直径と荷重前の導入プレストレス（1.0kN）は、実際の接合部の上下フランジのスタッ

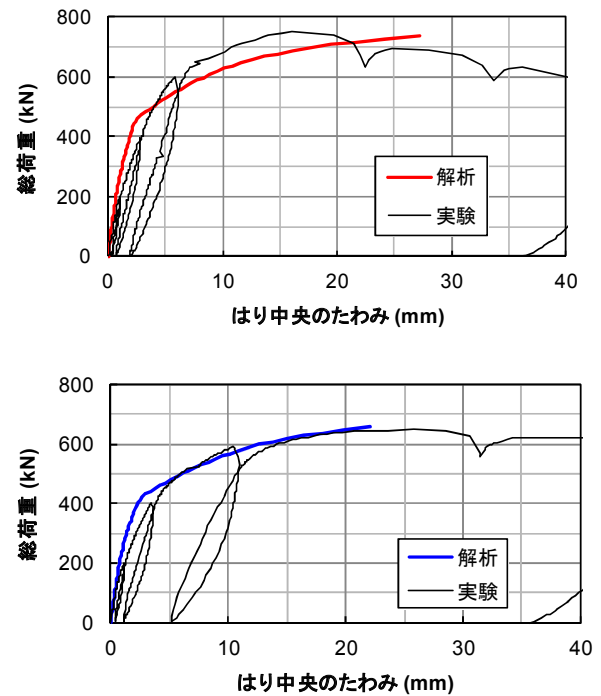


図-9 荷重-たわみ関係（上：S試験体、下：K試験体）

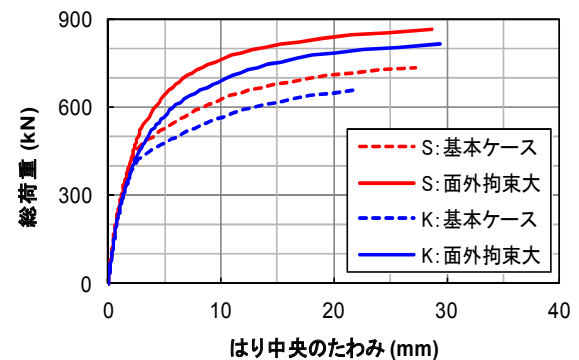


図-10 面外拘束度が荷重-たわみ関係に及ぼす影響

ドおよび上床版の横補強筋剛性を念頭に設定されている。そこで、トラス要素のヤング率に本来の値（ 200kN/mm^2 ）を入力し、面外変位に対して高い拘束力が作用する状態として解析を行った（溝形鋼が完全に剛との条件に相当する）。荷重-はり中央たわみ関係を図-10に示す。基本ケースに比べて、初期の剛性はほとんど変わらないが、面外変位が大幅に抑制されることによって耐力が向上していることが分かる。

図-11と図-12は、図中に示した横一列（縦一列）のずれ止めに着目して、ずれ止め上下（左右）のウェブ鋼板のひずみ差の分布を実験値と計算値と比較したものである。ひずみ差が大きいほどずれ止めのせん断力も大きいと考えられる。図より、回転中心が接合部の中央付近にあり、距離に比例したひずみ差が生じていることが

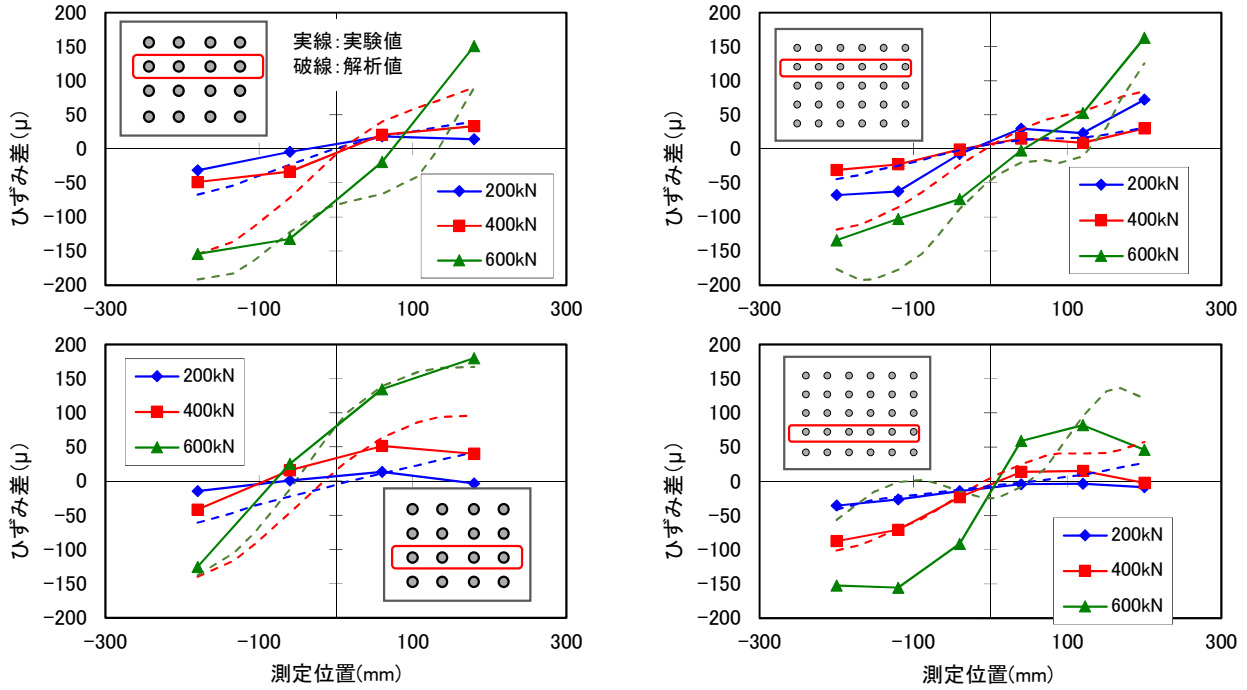


図-11 ずれ止め前後の鋼板ひずみ差の分布 (鉛直ひずみ, 左: 鋼管ジベル, 右: スタッド)

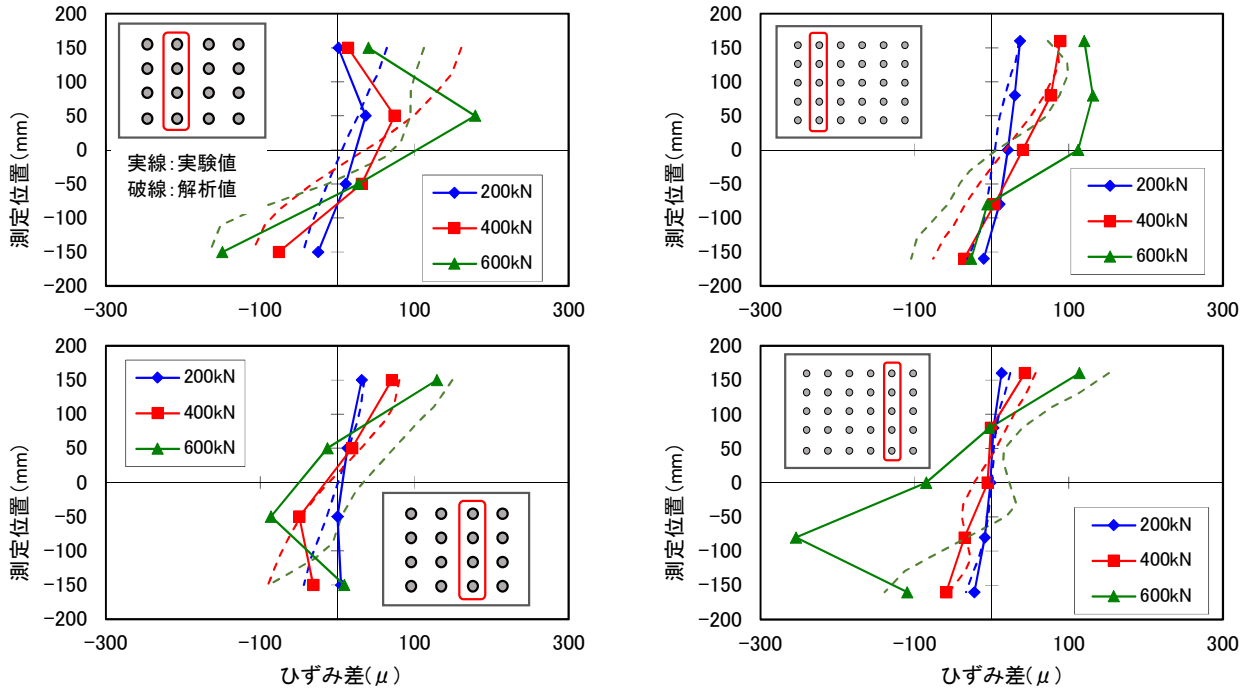


図-12 ずれ止め前後の鋼板ひずみ差の分布 (水平ひずみ, 左: 鋼管ジベル, 右: スタッド)

分かる。また、実験値と計算値は概ねよく一致している。

(5) ウェブずれ止めの設計

最外縁のずれ止めがその耐力に達した時点が接合部の耐力であると仮定すると、抵抗力の総和は以下の式で示すことができる。

$$M_{max} = \frac{V_{max}}{x_0} \sum_{n=1}^n x_n \tag{7}$$

ここに、 M_{max} : 接合部の最大抵抗モーメント、 x : n 番目のずれ止めの回転中心からの距離、 x_0 : 最外縁ずれ止めの回転中心からの距離、 n : ずれ止めの本数、であ

る。式(7)を用いて計算した最大抵抗モーメントは、S試験体で446kNm（荷重換算で892kN）、K試験体で378kNm（756kN）となり、図-10の結果と概ね一致している。拘束度を上げた解析結果では、最大荷重時の開口変位は極めて小さく（K試験体：0.2mm、S試験体：0.3mm）、完全拘束に近い条件での耐力を発揮していると考えられる。したがって、解析の対象とした試験体接合部においては、フランジに配したずれ止めと上床版の横補強筋によって発揮される面外拘束があれば、接合部に作用する回転力に対してずれ止めが最大限抵抗できると考えられる。また、ここで示した解析手法により、ずれ止めが最大限抵抗するために必要な面外拘束度を検討することが可能である。

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた知見を以下に列挙する。

- ① 面外拘束を与えた単純押抜き試験結果に基づき、頭付きスタッドおよび鋼管ジベルを対象として、面外拘束圧がせん断力-ずれ変位関係に及ぼす影響を考慮可能なせん断-面外連成構成式を定式化した。この構成式を構成モデルとしてジョイント要素に組み入れた非線形有限要素解析を用いて、鋼桁-RC 桁接合部の載荷実験の再現解析を行った。提案した連成モデルおよび解析手法は、実験の傾向を概ね再現可能であることが明らかとなった。
- ② ウェブ接合部での面外拘束度を増加させた試験解析を行った結果、対象とする鋼桁-RC 桁接合部では、面外変位が抑制されることによって、耐力が向上することを解析的に示した。接合部の耐力は、接合部中央を回転中心としてそこからの距離に比

例したせん断抵抗を仮定し、最外縁のずれ止めが耐力に達した時の抵抗力の総和として計算することができる。

謝辞：本論文における解析的検討は、埼玉大学大学院理工学研究科牧剛史准教授のご指導・ご協力をいただき実施したものです。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 篠崎裕生，浅井洋，紙永祐紀，牧剛史，睦好宏史：少数主桁形式の鋼合成桁と PC 桁のずれ止め方式による接合構造の研究，構造工学論文集 Vol.60A，pp.861-871，2014.3
- 2) 篠崎裕生，浅井洋，牧剛史，睦好宏史：鋼板孔を利用した円柱部材によるずれ止めの実験的研究，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.69，No.3，543-556，2013.
- 3) 有川直貴，篠崎裕生，浅井洋，牧剛史：押抜き試験における横方向拘束が鋼管ジベルのせん断耐力に与える影響，第23回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.399-402，2014.10
- 4) 頭付きスタッドの押抜き試験方法（案），JSSC テクニカルレポート，No.35，pp.1-24，（社）日本鋼構造協会，1996.11
- 5) 複合構造標準示方書 2009年制定，土木学会，pp.60-62，2009.
- 6) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, 2003