

論文 接合面における面外拘束を考慮した鋼合成桁－PC 桁接合部の非線形解析

牧 剛史^{*1}・篠崎 裕生^{*2}・有川 直貴^{*3}・浅井 洋^{*2}

要旨：著者らが提案するずれ止め方式による鋼合成桁－PC 桁接合部のウェブ接合面に着目し、面外方向の拘束度を考慮した非線形有限要素解析を行った。まず、面外方向の拘束度を変化させた単純押抜き試験結果に基づいて、ずれ止めのせん断力－ずれ変位関係に及ぼす拘束力と開き変位の影響を定式化した。これを有限要素解析で用いるジョイント要素の構成モデルとして組み込み、鋼合成桁－PC 桁接合部の載荷試験の再現解析を行った。その結果、実験の荷重－変位関係やずれ変位、面外変位の発生程度を概ね再現可能であるとともに、面外方向の拘束度の大きさによって、これらが変化することを示した。

キーワード：接合部、ずれ止め、せん断力－ずれ変位関係、面外拘束、非線形有限要素解析

1. はじめに

篠崎ら¹⁾は、図－1に示すような、少数主桁形式の鋼合成桁と PC 桁をずれ止めにより接合する接合方式を提案してきた。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接合部の変形と抵抗に及ぼす影響を定量的に評価可能な手法が必要である。ずれ止めのせん断耐力に及ぼす面外力の影響については、頭付きスタッドを対象とした既往の研究が幾つかある²⁾が、せん断方向と面外方向の力と変形の関係を連成モデルとして定式化した研究はまだない。

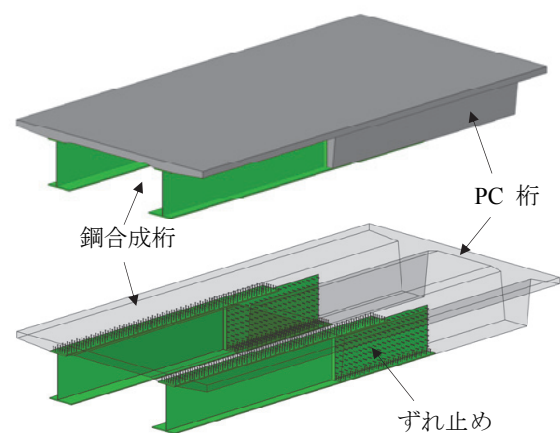
そこで本研究では、鋼合成桁－PC 桁接合部において、ずれ止めによって接合されたウェブ接合面に働く面外拘束力が接合面の耐荷・変形機構に与える影響を明らかにすることを目的として、解析的検討を行った。まず、ずれ止めとして頭付きスタッドおよび鋼管に高強度モルタルを充填した鋼管ジベル³⁾を用い、面外方向の拘束度を変化させた押抜き試験の結果に基づいて、ずれ止めのせん断力－ずれ変位関係に及ぼす面外拘束力と面外変位（開き変位）の影響を定式化するとともに、これを有限要素解析におけるジョイント要素の構成モデルとして組み込んだ。この解析法を用いて、鋼合成桁－PC 桁のウェブ接合部に着目した載荷実験を対象とした非線形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

外変形挙動について検討した。最後に、面外拘束力を変化させた解析を行い、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。

2. ずれ止めのせん断－面外連成モデルの構築

2.1 対象とした押抜き試験の概要

せん断－面外連成モデルの構築にあたり、図－2のように、H 形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 形鋼ウェブに載荷して押し抜く試験⁴⁾を対象とした。表－1に示すように拘束度を変化させた試験の結果、ブロックを面外方向に拘束するとせん断耐力が増加する傾向が見られた。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⁵⁾によって構築されたせん断耐力評価式^{3), 6)}による計算値を大きく下回ることが示された。



図－1 鋼合成桁と PC 桁のずれ止め方式による接合

*1 埼玉大学 大学院理工学研究科 博(工) (正会員)

*2 三井住友建設 (株) 技術開発センター 博(工) (正会員)

*3 三井住友建設 (株) 技術開発センター (正会員)

2.2 面内変形と面外変形の定式化

(1) 一般式

ずれ止めの構成則として、せん断力-ずれ変位関係と面外力-開口変位関係、およびそれらの連成挙動を定式化することを試みた。両者の関係式は、以下の式で表される。

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

$$N = K_n \delta_n - \Delta N \quad (2)$$

$$\Delta N = V \cdot h(\delta_n) \quad (3)$$

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、 $f(\delta_s)$ ：ずれ変位による非線形性を表す関数、 $g(\delta_n)$ ：開口変位による非線形性を表す関数、 N ：面外方向の力（引張を正）、 K_n ：面外方向の引張剛性、 ΔN ：ずれ変形に起因して生じる面外方向の圧縮力、 $h(\delta_n)$ ： 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⁶⁾を参考にして式(4)で表されるものと仮定し、関数 $g(\delta_n)$ 、 $h(\delta_n)$ は、それぞれ開口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。

(2) 各係数の決定

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⁶⁾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³⁾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 ⁴⁾と完全拘束試験体のせん断耐力 V_{max} ³⁾の比、および耐力時の開口変位に基づき、図-3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} を除いた値を算定し、これを近似することによって図-4のように決定した。以上の手順により決定した係数を表-2に示す。これらの係数は、表中の備考に示した条件下に対して適用可能な値であり、異なる諸元に対しては、別途試験等を行って定める必要がある。

(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

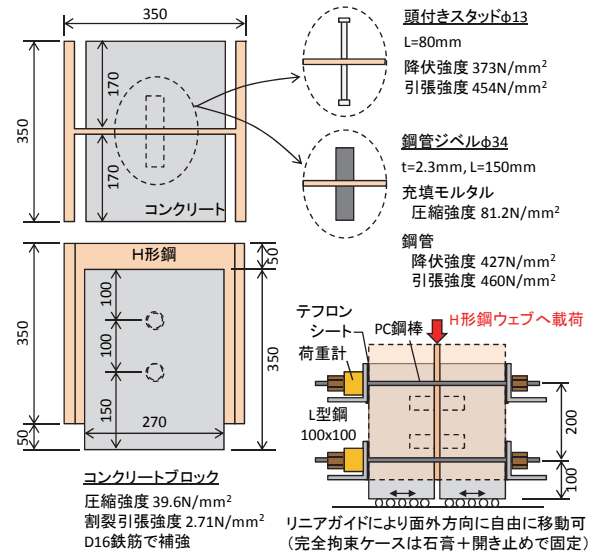


図-2 単純押抜き試験体の諸元と面外拘束の方法⁴⁾

表-1 単純押抜き試験の試験ケース⁴⁾

試験ケース	拘束条件	PC鋼棒	初期張力
K-1, ST-1	無拘束	—	—
K-2, ST-2	拘束	$\phi 23$	0.0 kN
K-3, ST-3	拘束	$\phi 23$	1.0 kN
K-4, ST-4	拘束	$\phi 16$	1.0 kN
K-5, ST-5	完全拘束	—	—

※ K-1～5: 鋼管ジベル試験体, ST-1～5: スタッド試験体

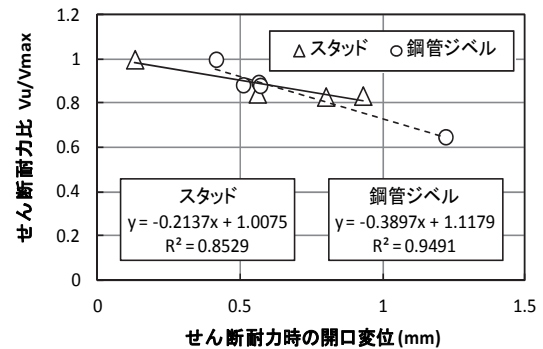


図-3 関数 $g(\delta_n)$ の定式化

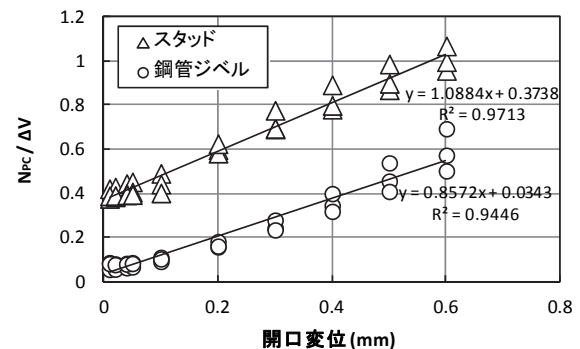


図-4 関数 $h(\delta_n)$ の定式化

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							

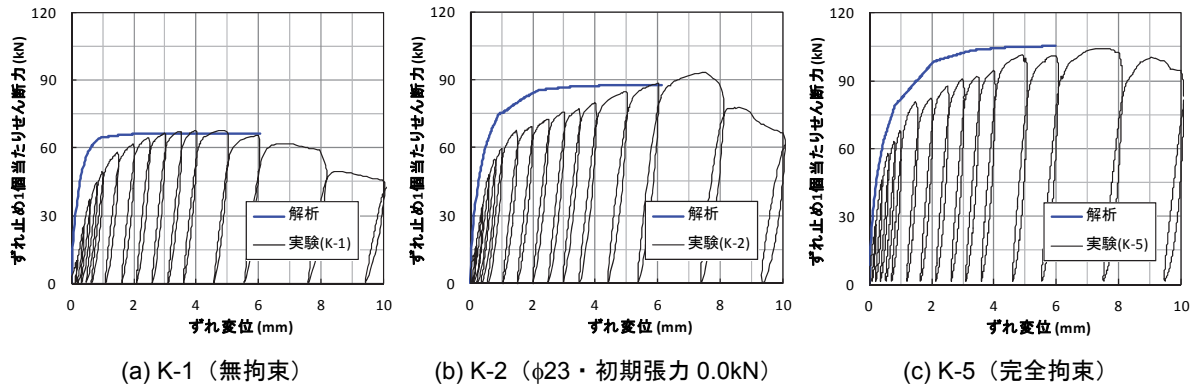


図-5 せん断一面外連成構成式の検証結果（鋼管ジベル試験体）

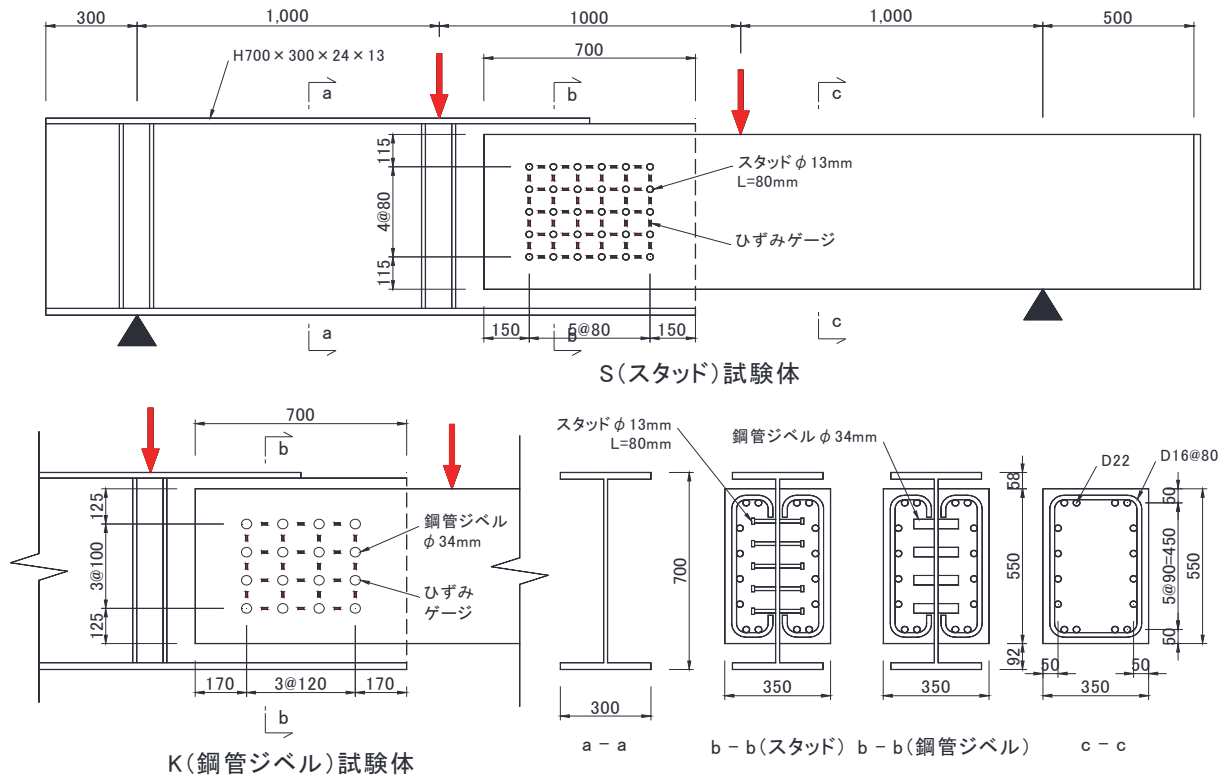


図-6 解析対象とした試験体諸元

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

3.1 対象とした载荷実験の概要

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载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， $H-700 \times 300 \times 24 \times 13$ ）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 の鋼管ジベルを 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/mm^2 、弾性係数 28.3kN/mm^2 であった。

1 章で述べたように、著者らが提案する接合方式の場合、接合部の面外拘束の程度によって、接合部の耐力に差が生じると考えられる。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、この面外拘束力を陽に測定することを意図して、図-7 に示すように、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。

3.2 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⁷⁾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。RC 桁部はずれ止めと鉄筋の配置を勘案して要素分割を決定した。PC 鋼棒による面外拘束力は、図-7 に示したように、鋼板を介して溝形鋼からコンクリート表面へ伝達されるが、この鋼板要素がコンクリートの補強材として働くのを避けるため、本解析では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か、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は、2 章で定式化した式(1)~(6)に示すずれ止めのせん断力-ずれ変位関係および面外力-開口変位関係を構成モデルとして導入したずれ止め要素を用いた。ずれ止め要素のパラメータには表-2 の値を入力した。ただし、せん断力や面外力は、ジョイント要素の面積で除したせん断応力および面外応力として計算される。K 試験体のずれ止めは、水平方向と鉛直方向の配置間隔が異なるため、厳密には面内二方向せん断特性に異方性を有する構成式とする必要があるが、本研究では簡単のため、等方的なモデルを用いた。また、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、実際の載荷条件に合わせるため、解析は二つの載荷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。また、実験では所定の荷重レベルで数回の除荷・再載荷を行っているが、解析は全て単調載荷にて行った。

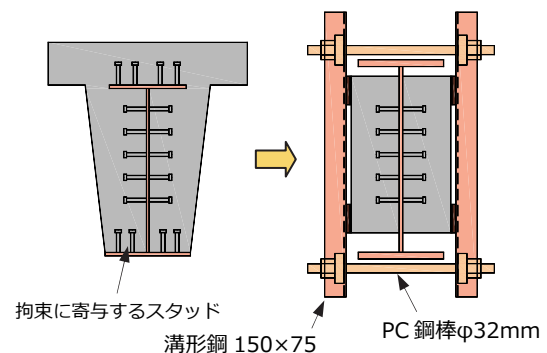


図-7 接合部の面外拘束方法

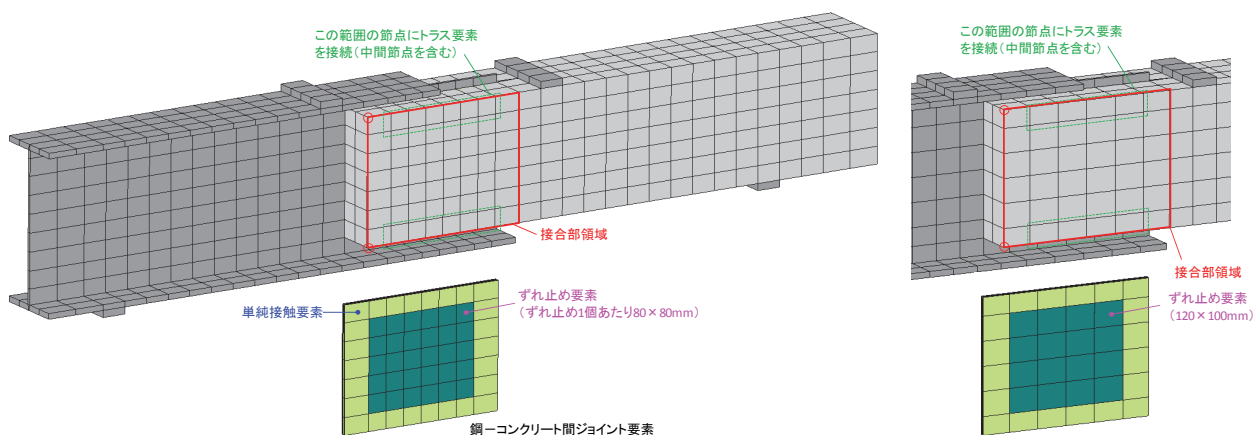


図-8 解析に用いたメッシュ図 (左: S 試験体, 右: K 試験体の接合部拡大図)

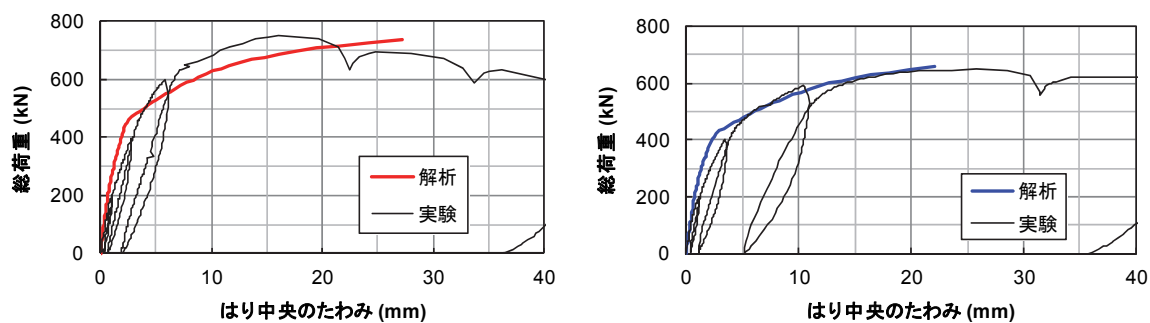


図-9 荷重-たわみ関係（左：S 試験体，右：K 試験体）

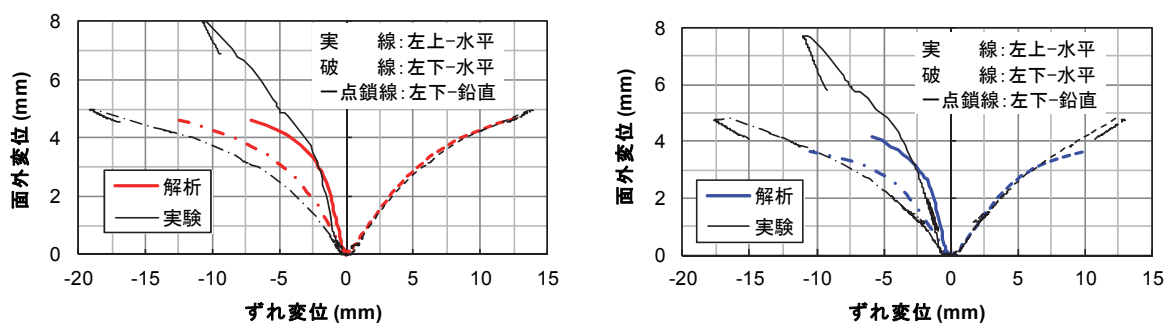


図-10 接合部領域左端でのずれ変位-面外変位関係（左：S 試験体，右：K 試験体）

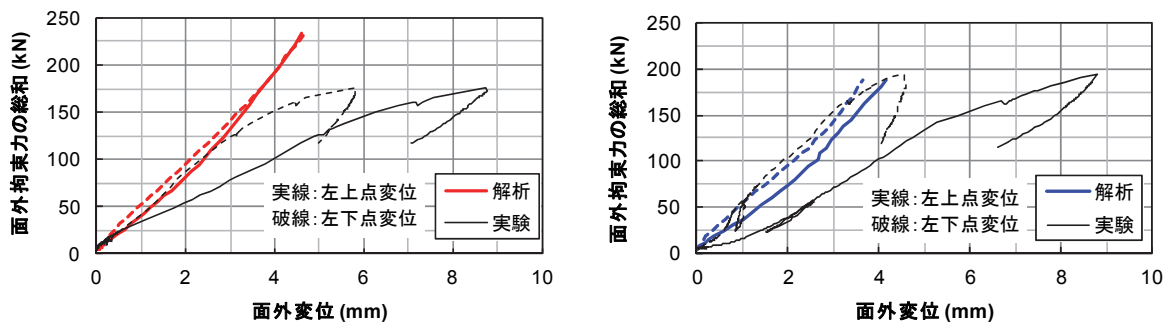


図-11 接合部領域左端での面外拘束力-面外変位関係（左：S 試験体，右：K 試験体）

3.3 解析結果

(1) 荷重-たわみ関係

2 体の試験体の荷重-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。

(2) 接合部の変形と面外方向の拘束力

接合部領域の左端におけるずれ変位と面外変位の関係を図-10に示す。ずれ変位と面外変位は、図-8中の赤丸の節点と、その近傍の鋼桁要素の節点との相対変位を算出してプロットした。また、左上点の鉛直ずれ変位は、載荷版の位置との関係で変位計の設置が困難であったため、計測値がない。よって、左上点の水平ずれ変位および左下点の水平・鉛直ずれ変位をプロットしている。これよりいずれの試験体においても、ずれ変位と面外変位

の関係は概ね再現されており、本研究で提案したせん断-面外連成構成式の妥当性を示唆する結果である。ただし、左上点での水平ずれ変位に対する面外変位の伸びが実験に比べて小さい。これは左上点で局所的なひび割れが多く生じたために、実験結果がその影響を受けているものと考えられる。

接合部領域の左端における面外変位の増加に伴う、面外拘束力の総和の変化を図-11に示す。実験では、左上点と左下点で面外変位に差異が見られるが、解析ではその差は小さい。面外拘束力の総和は、実験と解析で概ね同等の値が得られている。

3.4 面外拘束度の影響

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 鋼棒の直径と載荷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ド

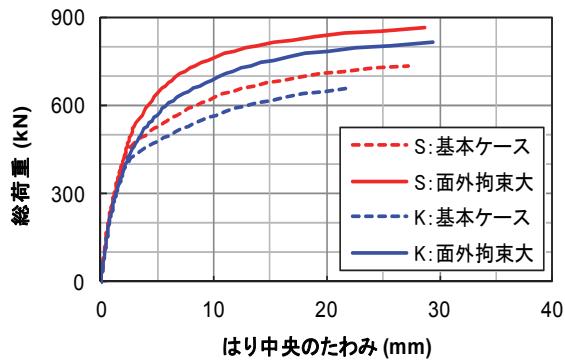


図-12 面外拘束度が荷重-たわみ関係に及ぼす影響

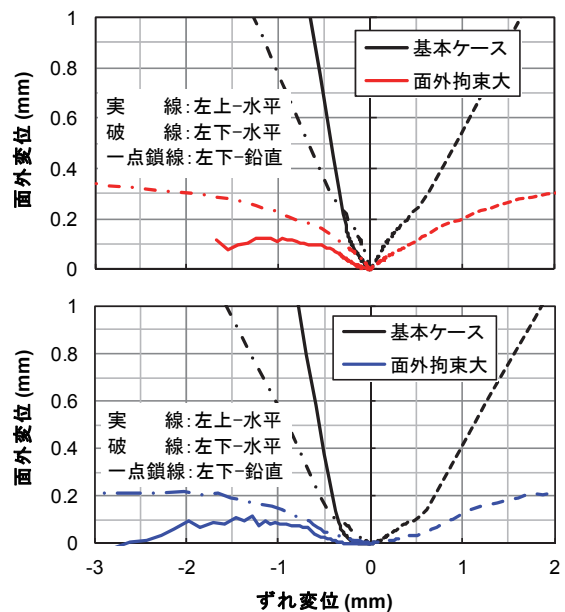


図-13 面外拘束度が接合部の変形に及ぼす影響
(上：S 試験体，下：K 試験体)

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-12 に、接合部の変形性状を比較したものを図-13 にそれぞれ示す。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。

接合部での回転力に対し、接合部領域中央を回転中心として、距離に比例したせん断力がずれ止めに作用すると仮定すると、最外縁のずれ止めがその耐力に達するときの抵抗力の総和は、S 試験体で 446kNm （荷重換算で 892kN ）、K 試験体で 378kNm （ 756kN ）となり、図-12 の結果と概ね一致している。すなわち本解析により、回転力に対して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

本研究では、鋼合成桁-PC 桁接合部において、ずれ止めによって接合されたウェブ接合面に働く面外拘束力が接合面の耐荷・変形機構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。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。
- (2) (1)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。
- (3) 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。

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.861-871，2013
- 2) 例えば，平 陽兵，渡辺忠朋，斉藤成彦，溝江慶久，島 弘，中島章典：制御されたせん断力と軸力を受ける頭付きスタッドのせん断耐力とせん断力-ずれ変位関係，第 10 回復合・合成構造の活用に関するシンポジウム論文集，pp.52-1~52-8，2013
- 3) 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，pp.534-556，2013
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 土木学会：2009 年制定 複合構造標準示方書，2009
- 7) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, 2003