

孔あき鋼板ジベルを用いた合成桁の曲げ挙動

Bending Behavior of Composite Girder Restrained Its Slip by Perfobond-rib Shear Connector

藤井堅*, 有吉孝文**, 藤村伸智***

Katashi FUJII, Takafumi ARIYOSHI, and Nobutoshi FUJIMURA

* 工博 広島大学助教授 工学部第4類 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

** 工修 大日本コンサルタント(株)中部支社 技術部 構造計画室 (〒450-0003 名古屋市中村区名駅南 1-18-19)

*** 広島大学大学院 工学研究科 構造工学専攻 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

Abstract : This paper presents bending behavior of a composite girder used by perfobond-rib shear connector through tests and finite element analysis. In the analysis, joint elements consisting of springs are developed in order to express not only the slip behavior of the shear connector but also the boundary behavior between concrete slab and steel girder flange. On the other hand, both concrete slab and steel girder are constituted by iso-parametric shell elements. Push-out tests are also made to investigate the slip behavior and to determine the spring constants in a joint element. It is verified that analytical method proposed here can predict the bending behavior of composite girders with enough accuracy, by reflecting the slip behavior obtained from push-out test.

Keywords: Perfobond- rib shear connector, Slip behavior, Composite girder, Joint element, Push-out test

1. はじめに

近年, 合成桁やコンクリート充填鋼管柱に代表される合成構造は, 力学的のみならず経済的にも優れていることから, 土木構造物や, 建築構造物において多用されるようになった. このような合成構造においては, 鋼とコンクリートを一体化させるためにずれ止めが用いられる. このずれ止めの力学特性を把握することは, 合成構造を考える上で非常に重要である.

従来, ずれ止めには頭付きスタッドジベル (以下スタッドと略す) が多用されてきた. そして, その力学特性評価は押抜きせん断試験が用いられており, スタッド押抜きせん断試験の標準化もなされようとしている¹⁾. 一方, スタッドに代わる新しい形式のずれ止めとして, 孔あき鋼板ジベルが近年注目されつつある²⁾. 孔あき鋼板ジベルは, 穴付き鋼板プレートを鋼フランジに溶接してコンクリート中に埋め込み, ずれは穴を埋めるコンクリートのせん断(割裂)抵抗によって抑制しようというものである. 従来の孔あき鋼板ジベルの押抜きせん断試験結果からは, スタッドジベルよりも剛性が高く, 疲労特性にも優れているという報告がなされている³⁾. 現在, 孔あき鋼板ジベルの研究が精力的に行われているが, そのほとんどが押抜きせん断試験を扱った基礎的試験であり⁴⁻⁷⁾, 合成桁にこのずれ止めを用いた研究はあ

まりなされていない⁸⁾. 一方, ジベルのずれを考慮した合成桁の終局挙動解析については, 中島らのスタッドジベル合成桁を対象とした剛体-バネモデル解析⁹⁾があるものの, 孔あき鋼板ジベル合成桁の解析はないようである. したがって, 孔あき鋼板ジベルを, 合成桁をはじめ種々の合成構造に適用するためには, ジベルの特性を明らかにするとともに終局挙動を精度よく推定できる解析手法の開発が望まれる.

そこで本研究では, まず押抜きせん断試験を行って孔あき鋼板ジベルのずれ特性を把握する. 次にこのジベルを用いた合成桁の3点曲げ試験を行って, 合成桁における孔あき鋼板ジベルのずれ挙動を調べるとともに, 押抜きせん断試験のずれ挙動と比較する. さらに, 押抜きせん断試験と合成桁曲げ試験でのジベルのずれ挙動の対応を調べるために, 4節点アイソパラメトリックシェル要素を用いて有限要素解析を行う. このとき, コンクリートスラブと鋼桁フランジの接合境界面の状態とジベルのずれを考慮できる結合要素をばねを用いて定式化する. そして, 押抜きせん断試験で得られたずれ剛性を結合要素に反映させて合成桁の力学挙動解析が可能かどうかを調べる.

ところで, 孔あき鋼板ジベルを合成桁に用いる場合, 一定の長さの孔あき鋼板ジベルをある間隔において配置する場合と, 連続した一枚板のジベルをフランジ全長にわたって配置する場合が考えられる. 前者はジベル鋼板の端面がコンクリートを圧すことによるずれ抵抗も

生じると考えられるが、いままでの研究では、これがどの程度ずれ剛性に影響するかは検討されていなかった。そこで本研究では、この影響についても押抜きせん断試験を行って調べることとする。なお、後者ではジベルを一枚板にすることにより自動溶接が可能となるので省力化が期待できよう。

2. 押抜きせん断試験

2.1 押抜き供試体および荷荷方法

押抜きせん断試験用の供試体は、Table 1 に示す 3 体である。全ての供試体の孔あき鋼板ジベルは、板厚 9mm、高さ 70mm で孔径 30mm、コンクリート厚さ 100mm である。Table1 の供試体 Type-A は、Fig.1 に示すように、ジベル端に発泡スチロールを置いて孔のみのずれ特性を解明することが目的である。一方、Type-B は、

Type-A の発泡スチロールを取り除きコンクリートでジベル全体を覆ったもので、ずれに対してジベル端と孔で抵抗する。また、Type-C は、Type-A の孔数を 2 つとしたもので、ずれ抵抗の孔数の影響を調べることを目的とする。なお、鋼板とコンクリートの接触面における付着を低減するなどの対処は行わなかった。

合成桁における孔あき鋼板ジベルは、Fig. 2a) のように一定の長さの孔あき鋼板ジベルを間隔をおいて配置する場合と、Fig. 2b) のように一枚板としてジベルを設ける場合が考えられる。前者は、ジベル孔内コンクリートのせん断抵抗だけでなく、ジベル端面がコンクリートを圧することによるずれ抵抗が生じるが、Type-B はこのようなジベル配置を想定している。他方、Type-A あるいは Type-C は後者に対応する。

供試体の形状、製作方法および荷荷手順は、頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)¹⁾に準じた。荷荷は、500tf 耐圧試験機を使用した。荷荷状況を Photo.1 に示す。

Table 1 供試体種類

供試体名	孔数 (個)	端面の 影響	孔間隔 (mm)	降伏荷重 (kN/ジベル1枚)	終局荷重 (kN/ジベル1枚)
Type-A	1	なし	—	83.8	58.8
Type-B	1	あり	—	252	252
Type-C	2	なし	250	162	198

Table 2 貫通鉄筋の材料試験

供試体 番号	引張試験		
	ヤング率 (kN/mm ²)	降伏応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
No.1	190	373	537
No.2	200	393	569
平均	195	383	553

Table 3 コンクリートの材料試験

供試体番号	圧縮試験結果			供試体番号	割裂試験結果	
	ヤング率 (kN/mm ²)	ポアソン比	圧縮強度 (N/mm ²)		破壊荷重 (kN)	引張強度 (N/mm ²)
No. C-1	24.5	0.170	32.3	No. T-1	100	2.89
No. C-2	26.5	0.166	32.3	No. T-2	72.4	2.09
平均	25.5	0.168	32.3	平均	86.2	2.49

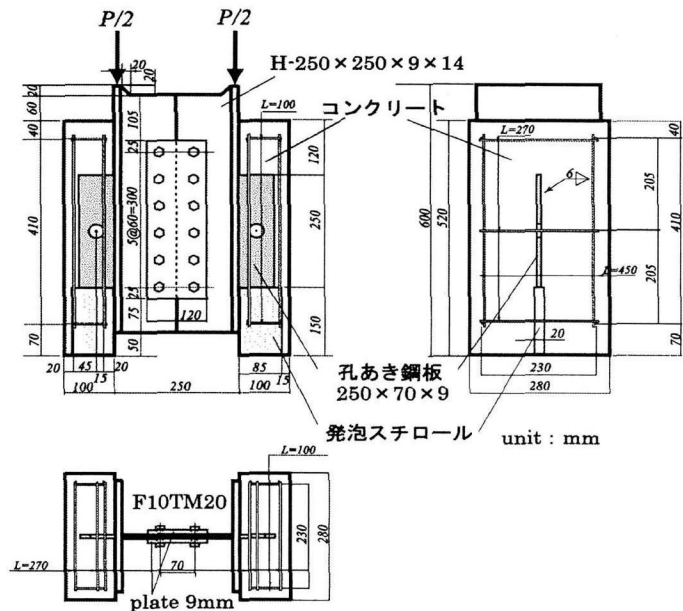


Fig.1 押抜き供試体

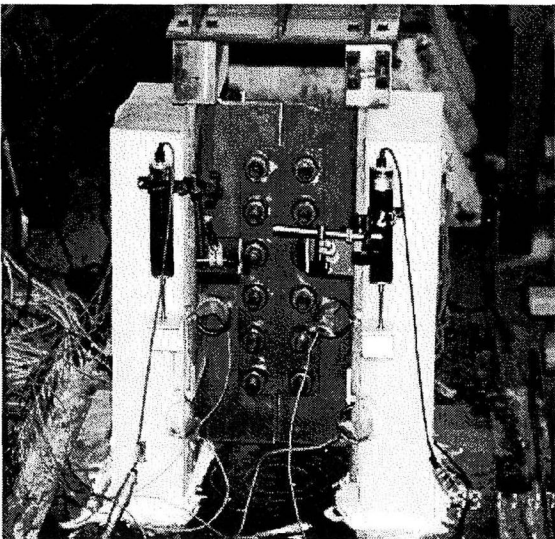


Photo.1 荷荷状況

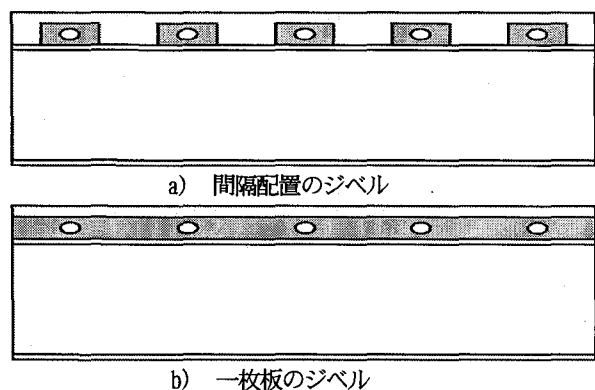


Fig. 2 合成桁における孔あき鋼板ジベルの配置

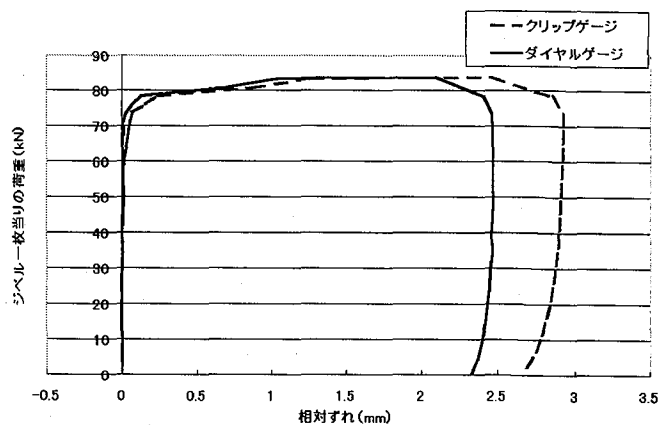


Fig. 3 荷重—ずれ関係 (ゲージ比較)

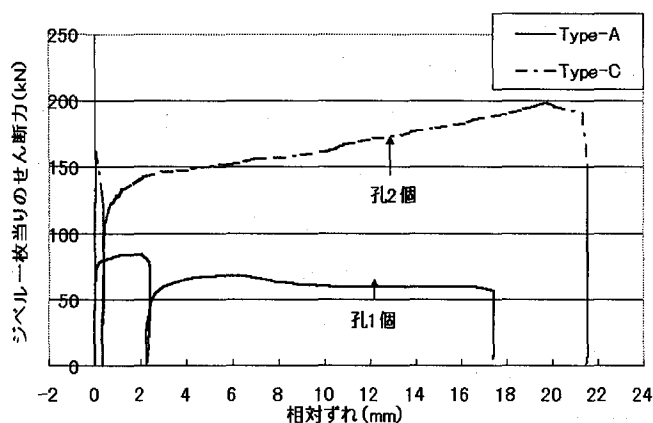


Fig. 4 荷重—ずれ関係 (孔数の影響)

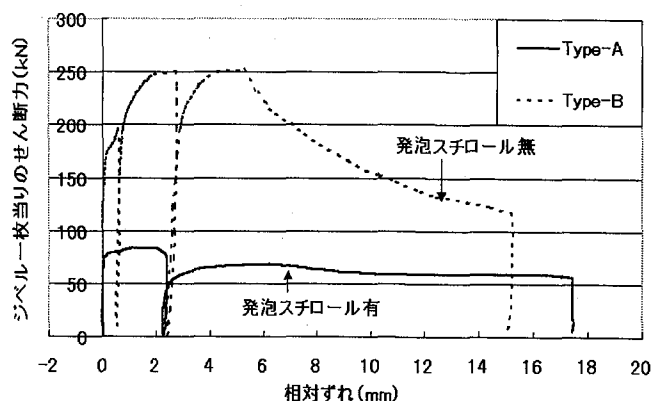


Fig. 5 荷重—ずれ関係 (ジベル端面の影響)

コンクリートと鋼フランジのずれは、孔の中心とフランジ裏面との相対ずれをダイヤルゲージで、また、コンクリートと鋼の界面のずれをクリップゲージにて測定した (Photo.1 参照)。

Fig. 3 に 2 つの相対ずれについて荷重—ずれ曲線を示す。図に示すように、ずれが小さい場合には両者にほとんど差はない。しかし、ずれが大きくなると若干差が現れているのがわかる。

実験に使用した孔内貫通鉄筋 D10 (SD295A) の材料特性を Table 2 に、コンクリートの材料特性を Table 3 に示す。

2.2 実験結果

(1) 荷重—ずれ関係

押抜きせん断試験から得られた荷重—ずれ関係を Fig. 4 および Fig. 5 に示す。これらの図で、縦軸はジベル一枚当りのせん断力を、横軸にダイヤルゲージで測定したジベル孔と鋼桁フランジ裏面の相対ずれを示す。

これらの図から、たとえば Type-A では、荷重が 73.5 kN からずれが急増し始めるが、その後も荷重は増加を続け 83.8 kN に達した後荷重低下を起こしているのがわかる。Type-C では 162 kN で急激な荷重低下を起こしたが、その後は 20 mm 位の大きなずれ

を生じるまで耐力が上昇している。ずれが急増してもなお荷重が増加するのは、孔内を貫通する鉄筋があるためと考えられる。

ここでは、最初に荷重が低下したときの荷重を降伏荷重、貫通鉄筋の降伏により最終的に荷重が低下するときの荷重を終局荷重と呼んで区別することとする。Table 1 にジベル一枚当りの降伏荷重および終局荷重を示す。

Table 1 からわかるように、Type-C の降伏荷重は、Type-A のその約 2 倍であり、ずれ耐力は孔数に比例するとした既往の研究結果と一致している。藤井ら⁵⁾は、ずれ耐力は必ずしも孔数に比例しないという結果を得ているが、藤井らの実験ではジベルを孔径 50 mm、孔間隔 90 mm で孔が近接しているために 1 つの孔の破壊が他の孔の破壊と相互に関連し合ったことに起因すると思われる。本実験ではジベル孔間隔を十分にとっているので最高荷重は孔数に比例したと考えられる。一方、Fig. 4 および Table 1 からわかるように、終局荷重については、Type-C は Type-A の 3.4 倍であり、孔数に比例していない。試験終了後に孔内貫通鉄筋の位置を調べたところ、Type-C の孔内貫通鉄筋の 1 本は中心に配置されていなかった。したがって、この貫通鉄筋が早期にジベル鋼板に接触して耐力が上昇したことなどがこの要因として考えられるが、十分な検討はできなかった。

一方、ジベル端面がコンクリートを圧す Type-B と発泡スチロ

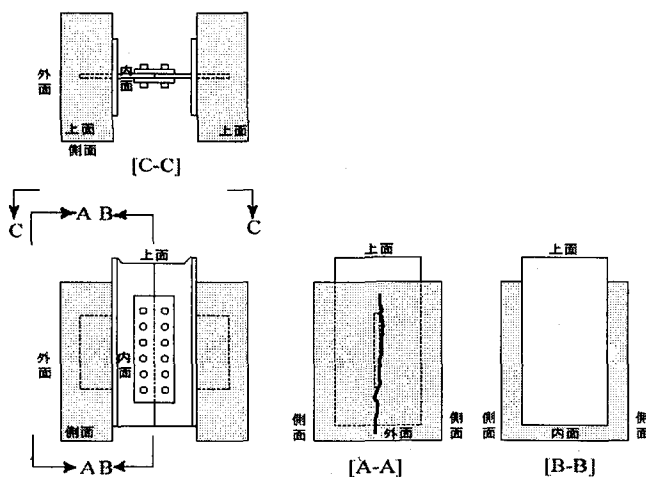


Fig. 6 押抜き試験結果 (Type-A)

ールを入れて端面の影響を除いた Type-A を比較すると、Type-B の降伏荷重 (252kN) は Type-A (83.8kN) の約 3 倍である。これは明らかにジベル端面がコンクリートを圧すことに起因する。しかし、Type-B では降伏荷重後急激な耐力低下を生じているのが Fig. 5 からわかる。このように、降伏荷重後に急激に耐力低下を起こすのは好ましいことではないが、ジベル端付近に鉄筋を配置してコンクリートのひび割れを防ぐことができれば、より高い耐力が期待できると推察される。

(2) 破壊状況

Fig. 6 および 7 に試験終了後のひび割れスケッチを示す。Type-A は、降伏荷重に達すると同時に、コンクリート外面にジベル板に沿うひび割れが発生したが、上面、側面、内面ともにひび割れは確認できなかった。Type-C のひび割れも Type-A と同様であった。Type-B については、Fig. 7 に示すように、コンクリート外面のジベル板に沿うひび割れのほかにジベル端部から大きなクラックが 3 本発生して急激な耐力低下を起こし、側面にもひび割れが発生した。

このように、孔あき鋼板ジベルの崩壊はコンクリート外面のジベルに沿ったひび割れによる。頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)¹⁾では、スタッドのかぶり最低 30mm とされているが、孔あき鋼板ジベルの場合には、上記ひび割れを防ぐためにさらに大きいかぶりが必要であろう。

3. 合成桁の曲げ試験

3.1 合成桁供試体および実験概要

孔あき鋼板ジベルを用いた鋼・コンクリート合成桁の供試体形状を Fig. 8 に示す。供試体全長は 4.4m (載荷スパン 4m) で、鋼桁は溶接 H500×140×6×9 (単位: mm), コンクリート断面は幅 280×厚 100 (mm) である。合成桁断面は完全合成とした場合に中立軸が鋼桁ウェブに位置するように設計した。コンクリー

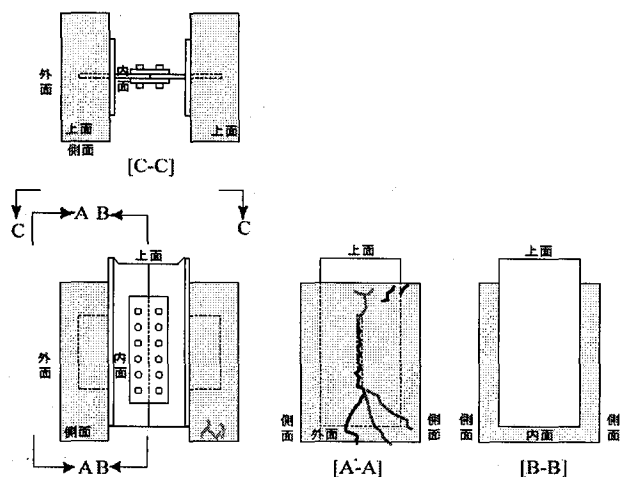


Fig. 7 押抜き試験結果 (Type-B)

ト断面内には鉄筋 D10 (SD295A) を 2 本配置し、ジベル孔の中心に鉄筋 D10 (SD295A) を貫通させている。

崩壊形式は、ジベルの孔数によりジベル孔内のコンクリートが先行して破壊する場合 (ジベル破壊型) とコンクリートスラブあるいは鋼桁の崩壊が先行する場合 (桁崩壊型) が考えられる。本試験体は、孔数を 9 個としたジベル破壊型である。載荷は、50tf の油圧ジャッキを使用し、2 点支持、中央 1 点集中荷重単調増加の 3 点曲げ試験である。

合成桁実験状況を Photo. 2 に示す。

3.2 合成率

合成桁の設計は、一般に、完全合成を仮定して行われているが、ジベルによってずれを拘束してせん断力を伝達する機構である以上、ずれが発生して初めてせん断力が伝達されることになる。ここでは、弾性範囲の挙動を示す指標として合成率の概念を導入して不完全合成桁の弾性挙動を把握することを試みる。いま、完全合成桁と重ね梁のそれぞれの曲げ剛性を $E_d I_c$, $E_d I_D$ とし、実際に現れる不完全合成状態での曲げ剛性を EI とすると、 EI は $E_d I_c$, $E_d I_D$ を用いて次式のように表現できると仮定する。

$$EI = \alpha E_d I_c + (1 - \alpha) E_d I_D \quad (1)$$

式(1)は、 $\alpha=1$ のときは完全合成桁、 $\alpha=0$ は重ね梁を示し、ここでは α を合成率と呼ぶ。

荷重 P は完全合成桁としての分担荷重 P_c と重ね梁としての分担荷重 P_D の 2 つの成分に分けて与えられるとすれば、実際に現れるたわみを d とすると、実際の合成桁、完全合成桁、重ね梁、それぞれの場合に発生するたわみは d であるから、

$$d = \frac{PL^3}{48EI} = \frac{P_c L^3}{48\alpha E_d I_c} = \frac{P_D L^3}{48(1 - \alpha) E_d I_D} \quad (2)$$

となる。式(1)および(2)から P_c , P_D を求めると以下のようになる。

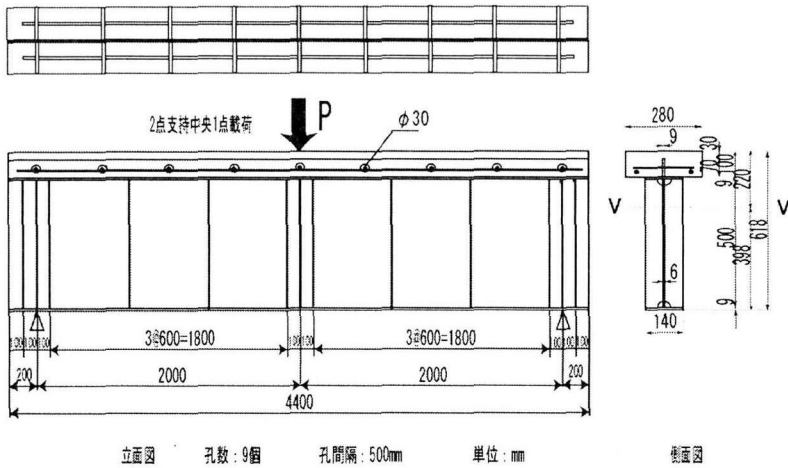


Fig. 8 曲げ供試体

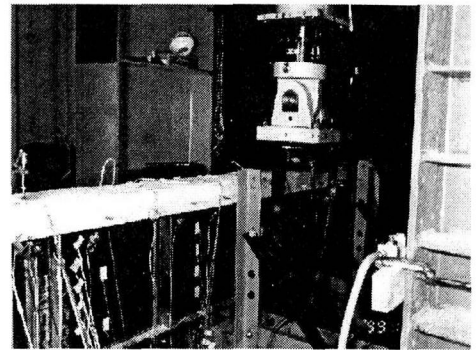


Photo. 2 曲げ試験載荷状況

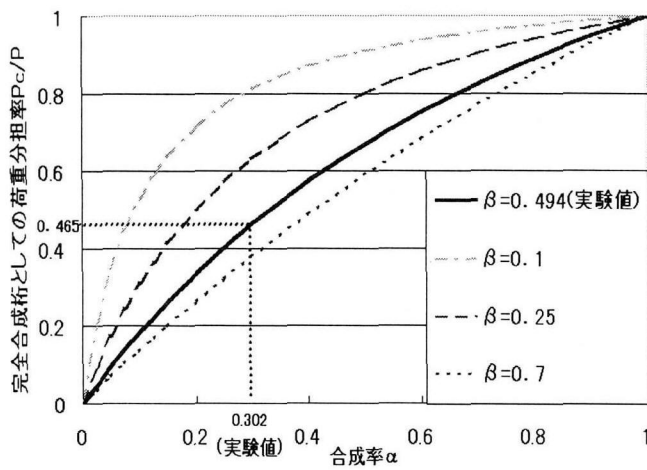


Fig. 9 荷重分担率と合成率の関係

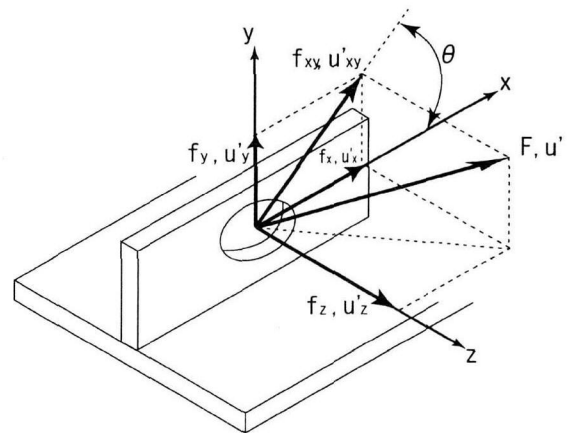


Fig. 10 ジベルに作用するずれ力

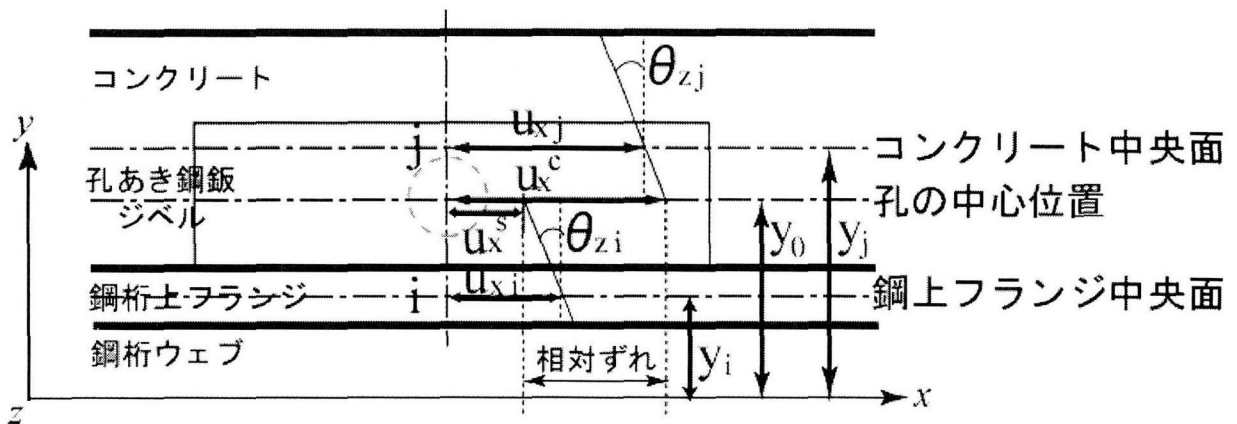


Fig. 11 孔の位置における相対ずれ

$$P_C = \frac{\alpha E_C I_C}{EI} P = \frac{\alpha E_C I_C}{\alpha E_C I_C + (1-\alpha) E_D I_D} P, \quad (3)$$

$$P_D = \frac{(1-\alpha) E_D I_D}{EI} P = \frac{(1-\alpha) E_D I_D}{\alpha E_C I_C + (1-\alpha) E_D I_D} P. \quad (4)$$

重ね梁と完全合成桁の曲げ剛性の比 $\beta = \frac{E_D I_D}{E_C I_C}$ を用いる

と、それぞれの荷重分担率は、

$$\frac{P_C}{P} = \frac{\alpha}{\alpha + (1-\alpha)\beta}, \quad (5)$$

$$\frac{P_D}{P} = \frac{(1-\alpha)\beta}{\alpha + (1-\alpha)\beta} \quad (6)$$

と導出される。

曲げ剛比 β をパラメーターとして、合成率 α と完全合成桁として働く荷重分担率 P_C/P との関係を示せば、Fig. 9 のようになる。

実験から得られた供試体の曲げ剛性は、 $EF=5.63 \times 10^4$ (kN m²) であり、また、 $E_D I_D = 8.70 \times 10^4$ (kN m²)、 $E_C I_C = 4.30 \times 10^4$ (kN m²) と計算されるから、合成率 $\alpha=30.2$ (%) となり、それぞれの荷重分担 $P_C=0.465P$ 、 $P_D=0.535P$ が得られる。

4. 合成桁の有限要素解析

4.1 結合要素

(1) ジベルの結合要素

異種材料からなる合成構造を有限要素法解析する場合、最も重要な要因となるのが接合境界面のモデル化であろう。以下では、鋼・コンクリート合成桁のコンクリートスラブと鋼桁フランジを結ぶ孔あき鋼板ジベルのモデル化を行い、有限要素法への定式化を示す。なお、本解析ではコンクリートスラブおよび鋼板は板で構成される構造物とみなし、4 節点アイソパラメトリックシェル要素¹⁰⁾を適用する。この際に注意すべきことは、板の中央面およびジベル孔の位置関係を正確に表現しておく必要がある。すなわち、コンクリートスラブの中央面と鋼桁のそれとは両者の板厚の半分の和だけ離れており、また、ジベル孔の中心もこれらの中央面から離れているために、板の回転変位を考慮してずれを表現しなくてはならない。

さて、Fig. 10 に示すように、孔の中心にずれ力 F が作用し、その方向に相対ずれ u' が生じたとする。図示のように座標系を定め、ずれ力あるいは相対ずれベクトルを z 軸方向成分 f_z 、 u_z と xy 平面内の成分 f_{xy} 、 u_{xy} に分解すると、 xy 平面においては、ずれ力—ずれ関係はジベル孔のずれ剛性 k を用いて、

$$f_{xy} = k u_{xy} \quad (7)$$

と表すことができる。一方、 z 方向には、孔のずれ抵抗ではなくジベルプレートの折れ曲がりに対するずれ剛性 k_z を用いて、

$$f_z = k_z u_z \quad (8)$$

と表すことができる。

式(7)は、さらに x 、 y それぞれの成分に分解され、

$$f_x = k u'_x, \quad (9)$$

$$f_y = k u'_y \quad (10)$$

となる。

したがって、ずれ止めの孔の位置における鋼の作用力 f_x^S 、 f_y^S および変位 u_x^S 、 u_y^S 、 u_z^S とコンクリートの作用力 f_x^C 、 f_y^C 、 f_z^C および変位 u_x^C 、 u_y^C 、 u_z^C を用いて式(7)~(10)をマトリクス表示すると次のようになる。

$$\{f\} = [K_e] \{u\} \quad (11)$$

ここに、

$$\{f\}^T = [f_x^S \quad f_y^S \quad f_z^S \quad f_x^C \quad f_y^C \quad f_z^C],$$

$$[K_e] = \begin{bmatrix} k & 0 & 0 & -k & 0 & 0 \\ & k & 0 & 0 & -k & 0 \\ & & k_z & 0 & 0 & -k_z \\ & & & k & 0 & 0 \\ \text{sym.} & & & & k & 0 \\ & & & & & k_z \end{bmatrix},$$

$$\{u\}^T = [u_x^S \quad u_y^S \quad u_z^S \quad u_x^C \quad u_y^C \quad u_z^C]$$

となる。また、 f_x^S などの f はジベル孔中心に作用する力、また u_x^S などの u は変位を示し、それぞれの添字 S は鋼、 C はコンクリート、 x 、 y 、 z は各軸方向成分を示す。

一方、ジベル孔中心の変位と板要素中央面の変位の関係は、Fig. 11 を参照して、

$$\{u\} = [C] \{u_0\} \quad (12)$$

と表すことができる。ここに、

$$[C] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & y_i - y_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y_i - y_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & y_j - y_0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & y_j - y_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\{u_0\}^T = [u_{xi} \quad u_{yi} \quad u_{zi} \quad \theta_{xi} \quad \theta_{yi} \quad \theta_{zi} \quad u_{xj} \quad u_{yj} \quad u_{zj} \quad \theta_{xj} \quad \theta_{yj} \quad \theta_{zj}]$$

である。

一方、節点力 $\{f\}$ はジベル中心の作用力 $\{f_0\}$ を用いて

$$\{f\} = [C]^T \{f_0\} \quad (13)$$

と表せる。ここに、

$$\{f_0\} = [f_{xi} \quad f_{yi} \quad f_{zi} \quad M_{xi} \quad M_{yi} \quad M_{zi} \quad f_{xj} \quad f_{yj} \quad f_{zj} \quad M_{xj} \quad M_{yj} \quad M_{zj}]$$

である。式(11)、(12)を式(13)に代入すると

$$\begin{aligned} \{f\} &= [C]^T [K_e] [C] \{u_0\} \\ &= [K] \{u_0\} \end{aligned} \quad (14)$$

となる。ここに、

$$[K] = [C]^T [K_e] [C]$$

であり、 $[K]$ は結合要素の剛性マトリックスである。 $[K_e]$ の中のばね定数 k および k_z は、押抜きせん断試験から得られたずれ力—ずれ曲線の傾きによって決定される。

以上、孔あき鋼板ジベルの孔内のコンクリートと鋼板をつなぐ結合要素の剛性マトリックスを示した。ここで、式(11)からわかるように、鋼板の面内 (Fig. 10 における xy 平面内) の任意の方向にずれ力が作用するとき、これを直行する 2 方向成分に分解したときの各軸方向のずれ剛性 (バネ定数) はどちら方向についても同じ値 k となる。そして、ずれ剛性 k の値は、各軸方向のずれ力の合力および全ずれ量を基に決定しなくてはならない。すなわち、ずれ力が作用する方向のずれ合力—全ずれ関係式(7)が、押抜きせん断試験で得られるずれ力—ずれ関係式と対応することに留意する必要がある。

(2) コンクリートスラブ—鋼桁フランジ境界の結合要素

コンクリートと鋼桁フランジ界面の付着はないものと仮定すると、Fig.10 に示す x および z 方向については両者間の力の伝達はない。一方、 y 方向については、コンクリートスラブの y 方向節点変位 u_y^C と対応する鋼フランジのそれ u_y^S の大きさによ

って、界面が接触しているか離れているかが判断され、接触しているときには y 方向力が伝達されることになる。すなわち

$$u_y^C - u_y^S > 0 \text{ のとき, } k^* = 0$$

$$u_y^C - u_y^S < 0 \text{ のとき, } k^* = \infty$$

のばね定数 k^* を用いて

$$(f_y^C - f_y^S) = k^* (u_y^C - u_y^S) \quad (15)$$

の関係式から結合要素の剛性マトリックスが導出される。

4.2 解析モデル

押抜きせん断試験では、鋼桁フランジとコンクリート界面のずれ、および鋼桁フランジ裏面とコンクリートずれ止め位置での相対ずれを測定したが、ジベル孔の鋼とコンクリートのずれは直接的には測定できない。したがって、Fig.12 に示すような解析モデルを用いて、押抜きせん断試験結果を近似できるようにずれ剛性を試算した。このとき、解析結果は両板要素の中央面での変位が得られるので、この結果を押抜きせん断試験で測定したずれに対応するように補正計算して比較したのは言うまでもない。

ずれ剛性 k は、押抜きせん断試験で得られた荷重—ずれ曲線

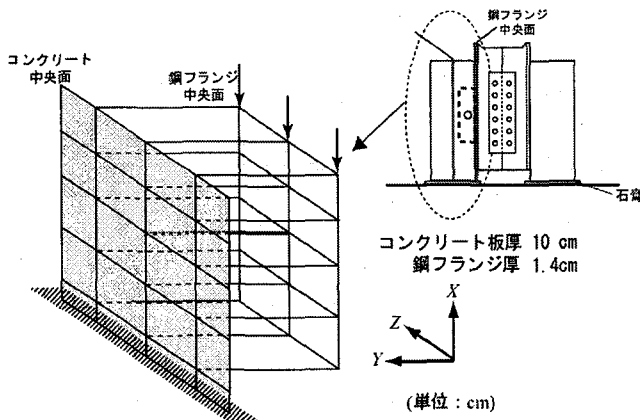


Fig.12 押抜き解析モデル

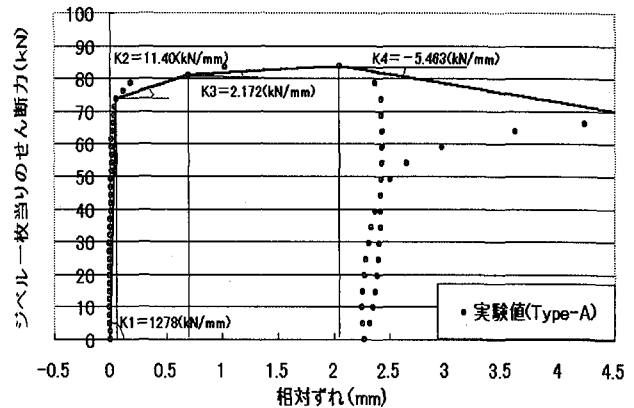


Fig.13 バネ定数の決定

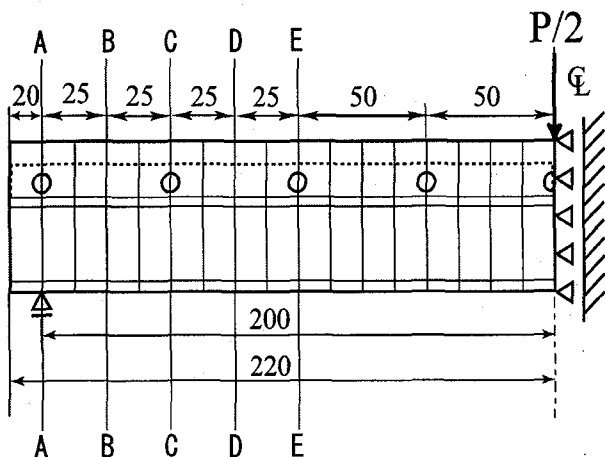
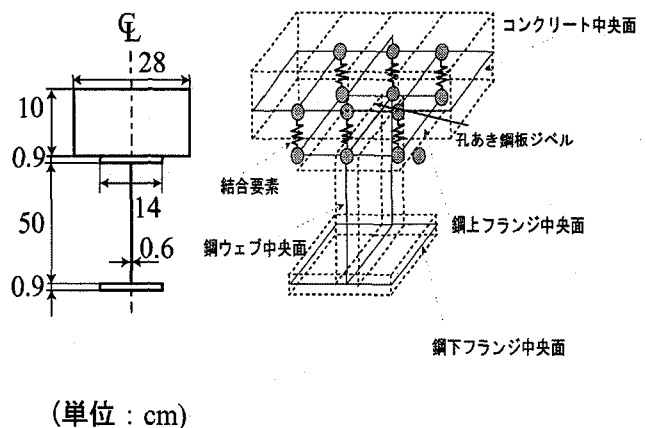


Fig.14 合成桁解析モデル



をいくつかの直線でモデル化して求めた。押抜き供試体 Type-A について、解析で使用したずれ剛性と押抜きせん断試験結果を Fig.13 に比較して示す。

合成桁の解析モデルを Fig.14 に示す。対称性を考慮して解析領域は桁全体の半分とし、載荷点の鋼フランジ上面全体に鉛直方向に強制変位を与えた。要素の分割数は、コンクリート床板：17×4、鋼フランジ：17×2、鋼ウェブ：17×3 である。材料特性は、Table2 および 3 に示す値を用い、完全弾塑性と仮定した。

5. 結果と考察

5.1 荷重－たわみ曲線

実験および解析から得られた荷重－たわみ曲線を Fig.15 に示す。図中、たわみは合成桁中央（載荷点）の鋼桁下フランジに配置したダイヤルゲージの測定値である。また、図には完全合成および重ね梁、さらに、3.2 の合成率を用いたはり理論による計算結果もあわせて示す。Fig.15 から、有限要素解析結果は実験結果とよく一致しており、押抜きせん断試験結果から求めたずれ剛性を解析に反映させれば、十分な精度で解析できることがわかる。

また、図から荷重が 150kN まではほぼ線形的であるが、150kN 以降からジベル孔内コンクリートがせん断破壊してずれが大きくなり、剛性が低下したと推察される。

5.2 荷重－ずれ関係

解析値と実験値の荷重－ずれ関係を Fig.16 に示す。Fig.16 の横軸は鋼・コンクリート界面のずれを示すが、解析でのずれは、解析から得られたコンクリートスラブおよび鋼桁上フランジ中央面の変位を用いて実験に対応するずれを算出している。また、縦軸には、荷重のほかに、鋼・コンクリート界面におけるせん断応力をはり理論から求め、これからジベル孔 1 個当りのせん断力を算出したずれ力もあわせて示す。なお、図中の(A-A)などは、Fig.14 に示す合成桁断面の位置を示す。

ジベル孔 1 個当りのせん断力をずれ力とみなし、Fig.16 と Fig.13 を比較すると、Fig.13 では、ずれ力が 80kN 付近からずれが急増しその後の耐力上昇はほとんどないのに対して、Fig.16 では、50kN 付近からずれが増加傾向を示すもののその後の耐力上昇が認められる。このように、押抜きせん断試験と合成桁のずれ挙動を直接比較すると、両者の挙動は大きく異なるように見える。ところが、押抜きせん断試験結果からモデル化したずれ剛性を結合要素に反映して解析した FEM 結果は、Fig.16 に示すように、合成桁のずれ挙動をよくとらえていることが確認できる。したがって、両図の違いは、コンクリートと鋼桁フランジの板要素中央面の隔たりと板要素の回転角（たわみ角）によって現れるみかけのずれが付加されていることに起因すると考えられる。これらのことから、板要素を適用して合成桁の解析を行う場合、中央面の隔たりを考慮した結合要素式(11)に

押抜きせん断試験結果を反映させれば、精度よく合成桁の挙動を把握できるといえる。

5.3 ずれ分布とずれ力分布

合成桁のコンクリートスラブ－鋼フランジ界面の相対ずれを Fig.17 に示す。図中、解析値は、有限要素解析から得られた中央面の変位を用いて測定位置のずれに対応するよう補正計算を施している。また、Fig.17 に対応してジベル孔に生じるずれ力（結合要素の橋軸方向力）を Fig.18 に示す。

Fig.17 からわかるように、解析結果、実験結果ともに、ずれは支承部（断面 A-A、断面の位置については Fig.14 参照）が最大ではなく、断面 C-C（支承から 500mm）付近で最大となっている。そして、Fig.18 のずれ力分布でもずれ分布と対応して支承よりも中央よりの位置でずれ力が最大となっている。ただし、荷重が 200kN を越えた辺りから、支承位置で最大となるようなある直線に漸近する傾向が現れ、ずれ力の増加がなくなっていることに気付く。Fig.19 は、ジベルの孔に働く全せん断力（解析区間におけるジベル結合要素の橋軸方向力の総和）と荷重の関係（解析結果）を示すが、荷重が 200kN を越えると全せん断力は一定値に漸近する傾向が認められる。これは、ジベル孔内コンクリートが破壊した後はずれ抵抗がなくなり、その後の荷重増分に対しては重ね梁的な挙動に移行するためと考えられる。Fig.18 から、この重ね梁的な挙動に移行するのは、支承から中央に向かって進行していき桁全体の曲げ剛性が低下すると考えられる。

Fig.19 には、有限要素解析結果のほかに、完全合成、3.2 の合成率 $\alpha=30.2\%$ の場合について、はり理論によるコンクリート－鋼フランジ界面に沿うせん断力もあわせて示した。重ね梁ではせん断力は生じない。合成率を用いた場合は、完全合成の場合の荷重分担率 $P_c/P=0.465$ （式(5)参照）を乗じた値となる。Fig.19 からわかるように、合成率を用いた場合は、有限要素解析結果よりも全せん断力が低めの値となっている。合成率 $\alpha=30.2\%$ は、荷重－たわみ曲線 Fig.15 から決定した値であるが、実際よりもかなり低めに評価したと推察される。

5.4 ひずみ分布

Fig.14 の断面 E-E の曲げひずみ分布を Fig.20 および 21 に示す。Fig.20 は荷重 $P=150\text{kN}$ 、一方 Fig.21 は $P=300\text{kN}$ である。図には、完全合成、有限要素解析のほかに、合成率 $\alpha=30.2\%$ の曲げひずみ分布もあわせて示す。有限要素解析結果は実験結果をよくとらえていることが両図からわかる。合成率を用いた場合、Fig.20 では実験値と大きな差があるが、Fig.21 ($P=300\text{kN}$) では概ね一致している。これは、Fig.19 から推察できるが、合成率を実際よりも低めに評価したためである。

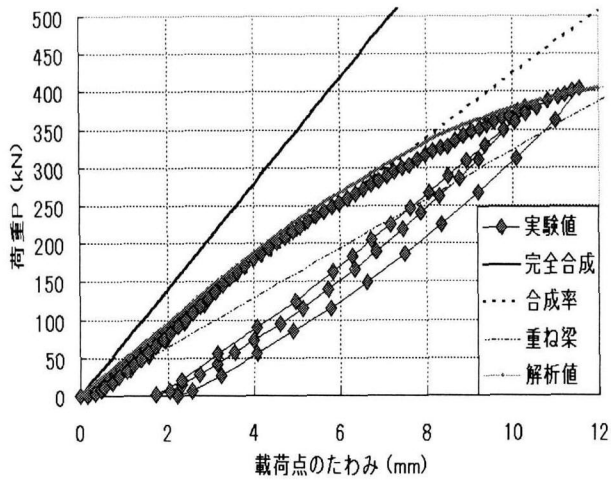


Fig. 15 荷重—たわみ曲線

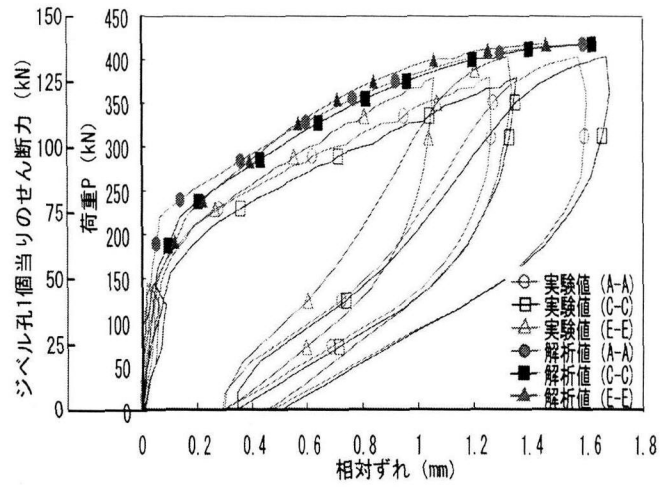


Fig. 16 荷重(せん断力)—相対ずれ関係

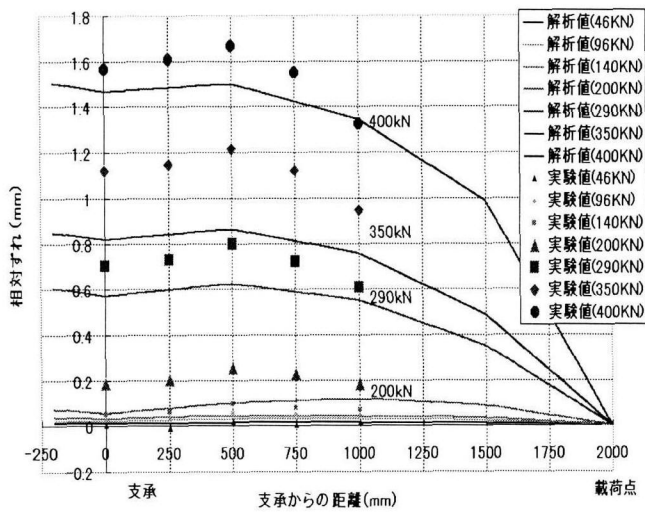


Fig. 17 相対ずれ分布

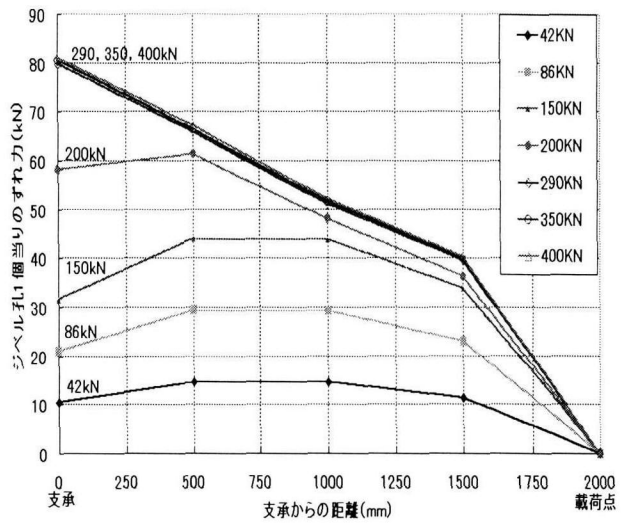


Fig. 18 ずれ力分布

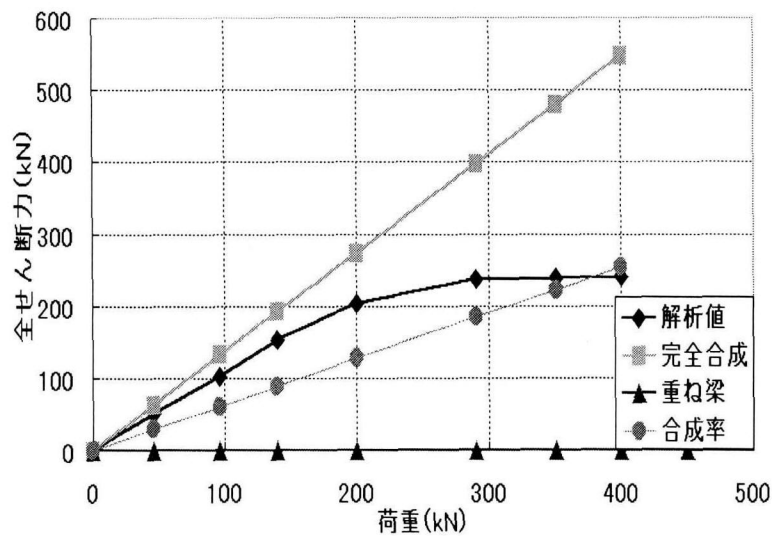


Fig. 19 全せん断力—荷重関係

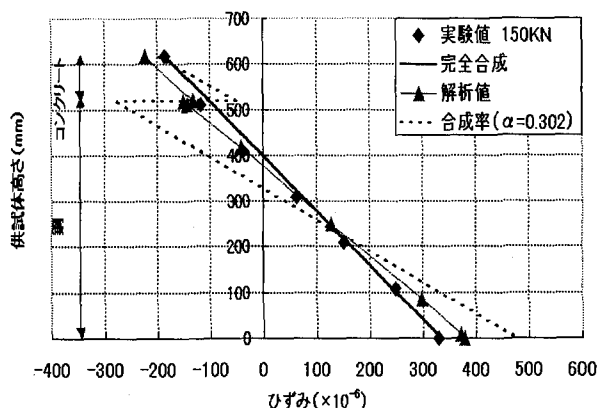


Fig. 20 曲げひずみ分布 (150kN)

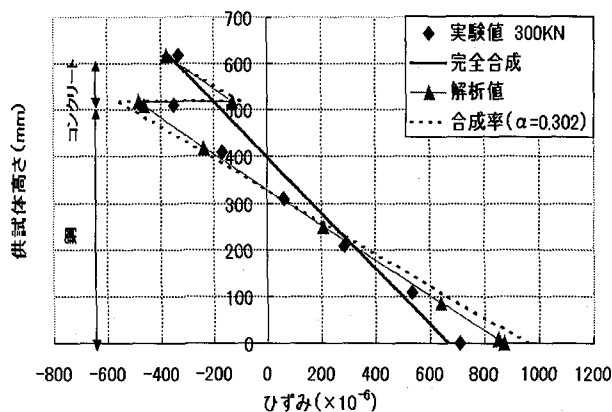


Fig. 21 曲げひずみ分布 (300kN)

6. 結論

本研究では、合成桁の曲げ試験および押抜きせん断試験を行って、孔あき鋼板ジベルのずれ特性と合成桁の力学挙動を調べた。また、板要素による合成桁 FEM 解析のための結合要素を開発して、押抜きせん断試験から得られたずれ特性を反映させて解析し、実験結果と比較することによって解析法の妥当性を検証した。

本研究で得られた結果をまとめて以下に示す。

- (1) 板要素を適用する場合の有限要素法による合成桁解析のための結合要素を示した。この結合要素のずれ剛性 (ばね定数) を押抜きせん断試験結果から求めて合成桁の曲げ挙動解析を行った結果、本解析法は実験結果を精度よく推定できることが示された。
- (2) 合成率の概念を導入すると、応力やたわみなどの合成桁の弾性挙動を把握することができる。
- (3) 押抜きせん断試験から、ジベルプレートの端面がコンクリートを圧すような孔あき鋼板ジベルは、ずれ耐力が著しく上昇することが確認された。したがって、一枚板の孔あき鋼板ジベルよりも切断されたジベルプレートの方が有利といえる。ただし、最高荷重後、ずれ耐力が著しく低下するのでジベル端付近に拘束鉄筋などを配置してひび割れを防止する必要がある。
- (4) 孔あき鋼板ジベルのかぶり、スタッドジベルの最小かぶり (30mm) を満たすように設計した。しかし、すべて供試体のコンクリート表面に孔あき鋼板ジベルに沿うひび割れが生じたことから、かぶりは 30mm よりも大きくするべきと考えられる。

参考文献

- 1) ed. by 松井繁之: 頭付きスタッドの押抜き試験方法 (案) とスタッドに関する研究の現状, (社)日本鋼構造協会, 1996, 11.
- 2) Leonhardt, F. et al: Neues vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton-und Stahlbetonbau, Heft 12/1987
- 3) 平 陽平, 天野玲子, 大塚一雄: 孔あき鋼板ジベルの疲労特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, 1997.
- 4) 西海健二, 富永知徳, 室井進次, 古市耕輔: 拘束条件を考慮した孔あき鋼板ジベルのずれ止め特性に関する研究, コンクリ

ート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, 1998.

- 5) 藤井堅, 西土隆幸, 有吉孝文: 押し抜きせん断試験による孔あき鋼板ジベルのずれ特性, 鋼構造年次論文報告集, 第 7 巻, P225~233, 1999, 11.
- 6) M.R.Veldanda and M.U.Hosain: Behavior of perfobond rib shear connectors: push-out tests, Can.J.Civ.Eng.19, P1~10, 1992.
- 7) E.C.Oguejiofor and M.U.Hosain: A parametric study of perfobond rib shear connectors, Can.J.Civ.Eng.21, P614~625, 1994.
- 8) E.C.Oguejiofor and M.U.Hosain: Tests of full-size composite beams with perfobond rib connectors, Can.J.Civ.Eng.22, P80~92, 1995.
- 9) 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, P97~106, 1996, 4.
- 10) WORSACK KANOK-NUKULCHAI: A simple and efficient finite element for general shell analysis, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.14, P179~200, 1979.
- 11) E.C.Oguejiofor and M.U.Hosain: Numerical Analysis of Push-out Specimens with Perfobond rib Connectors, Computers & Structures, Vol.62, No.4, P617~624, 1997.
- 12) ed. by 池田尚治: 構造工学シリーズ 3 鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン, 土木学会, 1989, 3.
- 13) ed. by 中井博: 鋼構造シリーズ ⑨B 鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物, 土木学会, 1998, 10.
- 14) 佐藤浩一: 合成二層板の合成度に関する実用的評価式について, 構造工学論文集, Vol.39A, P1289~1301, 1993, 3.
- 15) T.Nishido, K.Fujii, T.Ariyoshi: Slip Behavior of Perfobond Rib Shear Connectors and its Treatment in FEM, Composite Construction IV, Banff, Canada, 2000.
- 16) 望月秀次, 安藤博文, 宮地真一, 柳澤則文, 高田嘉秀: 孔あき鋼板ジベルを用いた混合桁接合部の静的力学特性に関する実験的検討, 構造工学論文集 Vol.46A, P1479~1490, 2000, 3.

(2000 年 9 月 14 日受付)