

トラス系ジベルを用いたハーフプレハブ鋼合成床版の ジベル押し抜きせん断挙動に関する一考察

An Evaluation on Push-out Tests of Half-prefabricated Composite Slabs
with Truss-formed Shear Connectors

井澤衛*, 中川敏之*, 山本晃久**, (故)若下藤紀***, 松井繁之****

Mamoru IZAWA, Toshiyuki NAKAGAWA, Akihisa YAMAMOTO, Fujinori WAKASHITA and Shigeyuki MATSUI

*住友金属工業株式会社 橋梁部橋梁技術グループ (〒104-6111 東京都中央区晴海 1-8-11)

**川崎重工業株式会社 橋梁・水門技術部橋梁第二グループ (〒675-0155 兵庫県加古郡播磨町新島 8)

***工博 日本大学 理工学部土木工学科 (〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14)

****工博 大阪大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

This paper reports studies of Half-prefabricated Composite Slabs Committee. The contents describe push-out test results of half-prefabricated composite slabs with truss-formed shear connectors, and outlines of Design and Construction Manual on half-prefabricated steel-concrete composite slabs.

Principal results and conclusions are as follows,

- ① Truss-formed shear connectors have high proof and ultimate strength.
- ② Truss-formed shear connectors have effect that confined concrete to truss-formed shear connectors.

Key Words: *Truss-formed Shear Connectors, push-out test, half-prefabricated composite slabs*

1. はじめに

近年、道路橋建設においてはコスト削減の社会的ニーズに伴ない設計・施工における種々の新技術・新工法が開発、実用化されている。コスト削減に寄与する構造の簡略化・合理化・施工の省力化、工期短縮さらに維持管理の容易さ等を目的とした、少数主桁橋や連続合成桁、複合構造物等の採用が注目されている。道路橋床版においては、長支間化に伴う死荷重の軽減、現場施工の省力化、疲労耐久性の向上等の要求からプレキャスト化されたPC床版や合成床版が広く普及し始めている。

こうした背景の中で、鉄筋棒鋼やフラットバーをトラス形状に成形加工したトラス鉄筋、あるいはトラス型ジベルと称されるトラス形鋼材を、鋼板あるいはプレキャスト(PCa)版と一体化して用いたハーフプレハブ合成床版を主題として、(財)災害科学研究所内に調査研究会を設け、3年間の活動^{1),2),3)}を行ってきた。本文では、埋設型枠に底鋼板を使用する合成床版に関する調査および開発・研究を実施してきた鋼合成床版分科会での活動内容を報告する。

鋼合成床版は図-1に示すように、リブ系、トラス系、スタッド系の3タイプに分類され、それぞれの特性は図-1に示す通りである。トラス形鋼材は、a)架設時(コンクリート打込み時)の型枠主部材としての機能、b)輪荷重に対するせん断補強材、c)コンクリートと底鋼板を一体化させるジベルとしての機能を合わせもっている。

a)の架設系での力学的な挙動や b)の疲労耐久性に関

して、すでに形鋼材が床版の構造特性に及ぼす有用性を輪荷重移動走行試験等により検証している。

本分科会において、トラス系鋼合成床版の最も特徴的な点であるトラス形鋼材のずれ止めとしての構造機能の解明に主眼をおいて各種の押し抜きせん断試験を実施し、これまで明らかでなかったトラス形鋼材とコンクリートとの協同作用による効果等に注目して調査・研究を行い、その結果、トラス系鋼合成床版のずれ止めに関する設計資料を提示することができた。本論文では、項2. にトラス形鋼材のずれ止め特性に関する詳細な報告を、項3. に最終的に取りまとめた「トラス構造のずれ止めを有するハーフプレハブ鋼合成床版設計・施工マニュアル(案)」の概要を紹介する。

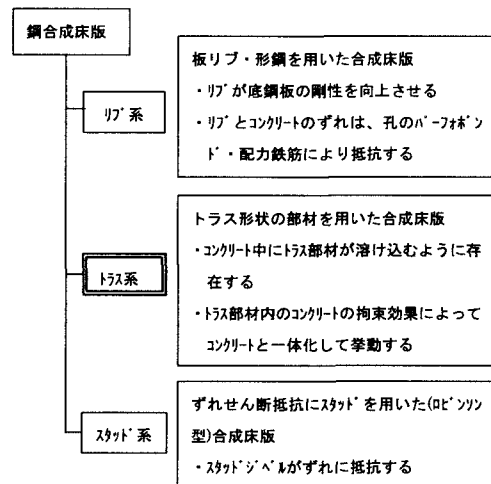


図-1 鋼合成床版の分類

2. トラス形鋼材のずれ止め特性

2. 1 トラス型ジベルのずれ止め特性

図-2に示すトラス型ジベル合成床版に用いられるジベルの押し抜きせん断特性について、既往の研究である押し抜きせん断実験結果⁴⁾を再度検討し、トラス型ジベル内にコンクリートが満たされていることによるコンプラインド効果について考察する。

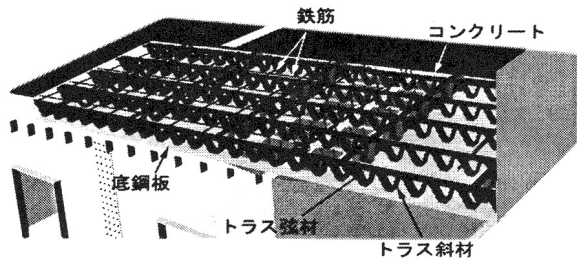


図-2 トラス型ジベル合成床版の概念図

(1) 実験の概要

図-3に示すように、トラス斜材の板厚 t 、および溶接長 B をパラメータとして抽出し、押し抜きせん断実験を行った。供試体の寸法および荷重方法を、図-4に示す。なお、ジベルの溶接はH形鋼両側のトラス型ジベル2山の内、中央に配置されたジベル部のみに行った。これらの供試体に100t油圧ジャッキによって残留ずれ量 δ が0.08mmになるまで荷重と除荷とを数回繰り返す。その後、破壊に至るまで漸増荷重した。また、溶接長のパラメータとして $t=4.5\text{mm}$ 、および $B=50\text{mm}$ を選び、まわし溶接による効果も調べた。代表的な荷重-ずれ曲線を、

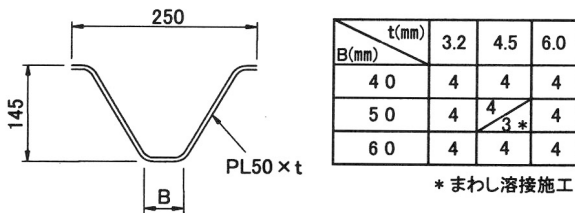


図-3 トラス型ジベルの形状と試験の種類および供試体数

表-1 限界せん断耐力、破壊荷重および水平せん断バネ定数

| ジベルの厚さ(mm) | ジベルの溶接長(mm) | 限界せん断耐力平均値(kN) | 破壊荷重平均値(kN) | 破壊形式 | 水平せん断バネ定数(kN/mm/山) |
|------------|-------------|----------------|-------------|--------|--------------------|
| 3.2 | 40 | 56 | 102 | ジベル | 542 |
| | 50 | 59 | 128 | ジベル | 515 |
| | 60 | 62 | 151 | ジベル | 584 |
| 4.5 | 40 | 70 | 126 | ジベル・溶接 | 463 |
| | 50 | 79 | 168 | ジベル | 462 |
| | 50* | 108 | 211 | ジベル | 601 |
| | 60 | 85 | 174 | ジベル・溶接 | 506 |
| 6.0 | 40 | 96 | 182 | 溶接 | 679 |
| | 50 | 109 | 251 | 溶接 | 707 |
| | 60 | 113 | 250 | 溶接 | 631 |

注：ジベルの溶接長 $B=50*$ のものは、まわし溶接を行っている。

図-5に示す。ここで、残留ずれ量0.08mmに対応する荷重を限界せん断耐力、また破壊に至るまでの最大荷重を破壊荷重と呼ぶこととする。

(2) 実験結果と考察

1) トラス型ジベルの種類と限界せん断耐力、破壊荷重との関係

押し抜きせん断実験結果を表-1に示す。同表より、破壊形式はトラス型ジベルの板厚が薄いものは、ジベルが破壊しているが、ジベルの板厚が厚いものは溶接部のせん断破壊が先行している。また、ジベルの断面積と限界せん断耐力および破壊荷重の関係を図-6に示す。同図より、限界せん断耐力および破壊荷重は、ともにジベルの断面積にほぼ比例して増加し、原点の近傍を通る直線で近似できる。

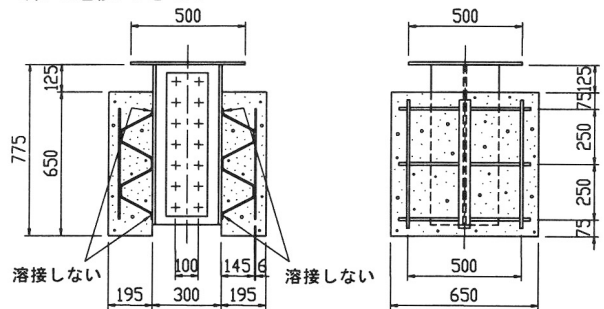


図-4 押し抜きせん断実験供試体と荷重方法

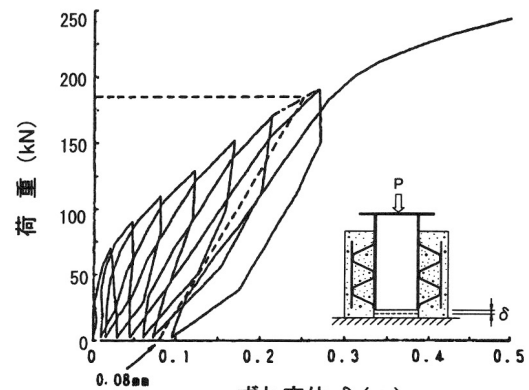


図-5 荷重-ずれ曲線の一例

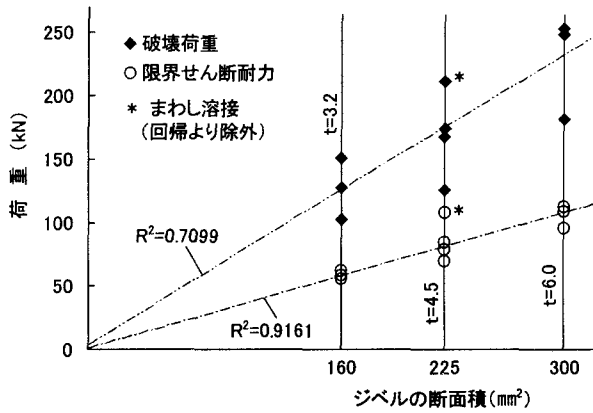


図-6 ジベルの断面積と限界せん断耐力，破壊荷重との関係

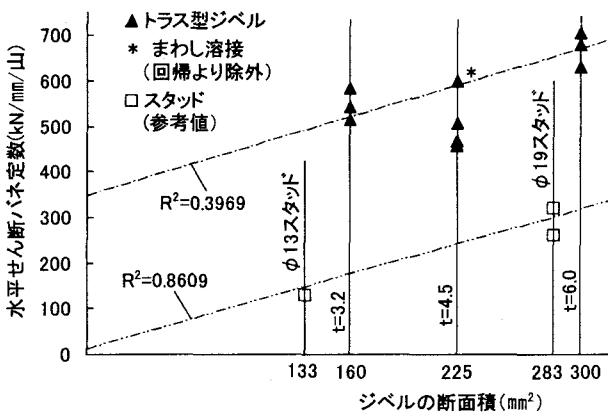


図-7 ジベルの断面積と水平せん断バネ定数との関係

2) トラス型ジベルの種類と水平せん断バネ定数との関係

押し抜きせん断実験結果より，残留ずれ量 0.08mm に対するトラス型ジベル 1 山あたりの水平せん断バネ定数を表-1 に示す。また，ジベルの断面積と水平せん断バネ定数との関係を図-7 に示す。なお，同図にはスタッドジベルの押し抜きせん断実験結果⁵⁾も合わせて示す。同図より，スタッドジベルの水平せん断バネ定数は，概ねスタッドの断面積に比例して増加し，原点近傍を通る直線で近似できる。これに対して，トラス型ジベルでは，ジベルの断面積とは弱い相関であるが，原点を通らない直線で近似でき，水平せん断バネ定数はトラス型ジベルの形状に支配されていると推測される。破壊荷重時での押し抜きせん断機構の概念図を図-8 に示す。スタッドジベルの押し抜きせん断機構は，スタッドジベル全域で線状に前面のコンクリートを支圧し，その後スタッドジベル基部がその断面積に対応した微小な変形を起こすと考えられる。一方，トラス型ジベルでは，ジベル内にコンファインされたコンクリートが一体となってジベルの幅全域にわたって面的に作用し，前面のコンクリートを支圧するため，ジベルとコンクリートとの相乗作用により水平せん断バネ定数が高くなるものと思われる。

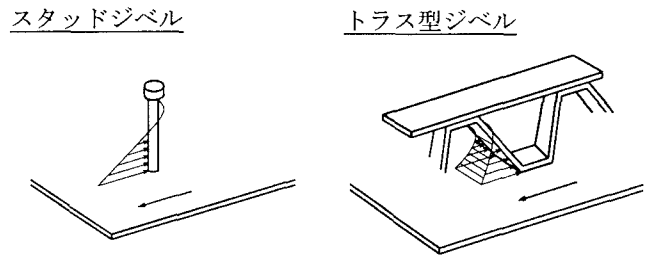


図 8 押し抜きせん断機構の概念図

(3) まとめ

トラス型ジベルの押し抜きせん断実験の結果より，以下の考察が得られる。

- ① トラス型ジベルの限界せん断耐力および破壊荷重は，ともにジベルの断面積にほぼ比例して増加し，ジベル断面積に支配される。
- ② トラス型ジベルと，それにコンファインされたコンクリートとが一体となってジベルの幅全域にわたって面的に作用し，前面のコンクリートを支圧するため，水平せん断バネ定数はジベルとコンクリートとの相乗作用により決定され，ジベル断面積の影響は少ない。

本文では，既往の実験結果を基に考察を行ったが，トラス型ジベルのコンファインド効果の定量化に関して，今後検討を進めていきたい。

2. 2 トラス鉄筋ジベルのずれ止め特性

図-9 に示すトラス鉄筋ジベル合成床版に用いられるジベルの押し抜きせん断特性について，押し抜きせん断試験結果を検討するとともに，試験結果と計算モデルによる結果との比較から，ずれ止めの剛性について検討した。

今回報告する内容に関しては以下の点に着目する。

- ① 底鋼板厚 (t=6mm) における鋼板の局部曲げ変形のもたらすせん断強度とずれ剛性 (=水平せん断バネ定数) に及ぼす影響
- ② トラス鉄筋によるコンファインド効果がずれ剛性に与える影響
- ③ 橋軸直角方向 (主鉄筋方向) のずれ剛性，ならびに橋軸方向 (配力鉄筋方向) のずれ剛性とその性状

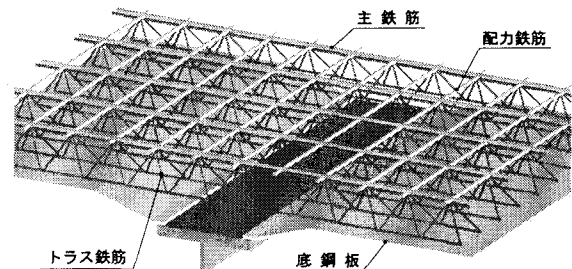


図-9 トラス鉄筋ジベル合成床版の概念図

表-2 供試体一覧

| 供試体 No. | 荷重方向 | 載荷方法 | 底鋼板板厚 | 溶接方法 |
|---------|-------|-------|-------|------------|
| ① | 主筋方向 | 漸増繰返し | 6mm | 中央1列(8箇所) |
| ② | 主筋方向 | 漸増繰返し | 15mm | 中央1列(16箇所) |
| ③ | 主筋方向 | 漸増繰返し | 6mm | 中央1列(16箇所) |
| ④ | 配力筋方向 | 漸増繰返し | 6mm | 中央2列(4箇所) |

表-3 限界せん断耐力, 破壊荷重および初期ずれ剛性

| 供試体 No | Q _{max} kN/山 | Q _y kN/山 | δ _{max} mm | K _{st} ^o kN/mm/山 | 破壊形式 |
|--------|--------------------------|------------------------|------------------------|---|-----------|
| ① | 119 | 73 | 1.160 | 492 | 溶接部のど断面破壊 |
| ② | 133 | 81 | 0.680 | 500 | 溶接部のど断面破壊 |
| ③ | 127 | 88 | 0.837 | 321 | 溶接部のど断面破壊 |
| ④ | 111 | 65 | 0.848 | 412 | 溶接部のど断面破壊 |

(1) 実験の概要

押し抜き試験供試体は実物大の部分モデルとし、トラス鉄筋の上・下弦材径に異形鉄筋D10を、斜材に丸鋼φ6mmを用いた。下弦材と底鋼板の溶接は脚長6mm(溶接長30mm)としている。溶接箇所は水平面内中央の2列とした。コンクリートブロックの厚さは既往実験と同じ180mmとした。今回の試験では底鋼板溶接部の局所的な変形をもたらす影響を確認するために、実際と同じ底鋼板板厚(t=6mm)で試験を実施した。供試体はスタッドの押し抜きせん断試験で用いられるH形鋼にずれ止めを溶接するモデルではなく、6mm鋼板を使用した箱断面にトラス鉄筋を溶接したモデルを採用し、6mm鋼板の座屈防止のため押し抜き形式ではなく引き抜き形式の載荷を採用した。供試体の一覧を表-2に、また供試体の概要図を図-10に示す。

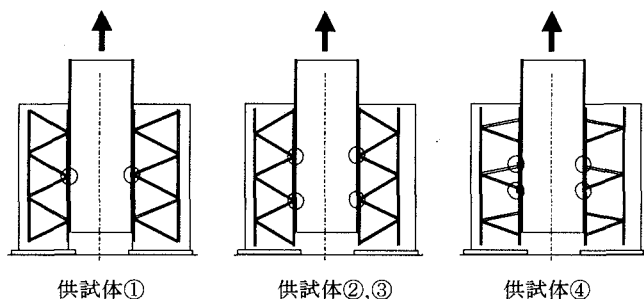


図-10 供試体概要

(2) 実験結果

1) トラス鉄筋ジベルの限界せん断耐力と破壊荷重
供試体①~④の試験結果を表-3に、代表的な荷重-ずれ関係(供試体③)を図-11に示す。

トラス鉄筋ジベルの限界せん断耐力はトラス型ジベルと同様、残留ずれ量が0.08mmとなるときの荷重とし、初期のずれ剛性 K_{st}^o (水平せん断バネ定数)は、限界せん断耐力に至るときの傾きとする。

ここで、ずれ止めに作用するせん断力はトラス筋1山当たりのせん断力で表記しており、1山当たりの溶接箇所が2箇所であることより載荷荷重Pとずれ止めせん断力Qは次式の関係にある。Q=P/(溶接箇所数/2)

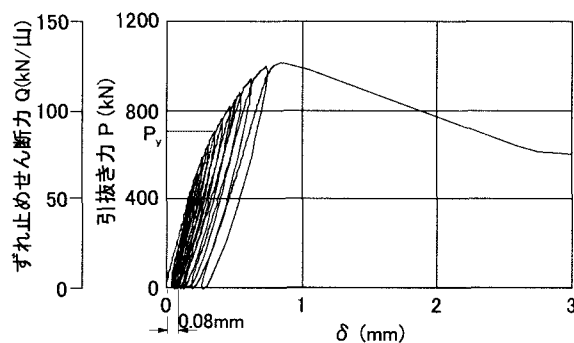


図-11 荷重-ずれ関係(供試体③)

表-3より以下のことが確認できた。

- a) 1山当たりのせん断力 Q (kN/山)は供試体の種類に関わらず概ね一定である。
- b) ②, ③供試体(底鋼板板厚のみ相違)を比較すると、限界せん断耐力 Q_y, 破壊荷重 Q_{max} には大差は見受けられないが、初期ずれ剛性については板厚による影響が認められる。
- c) 実験結果より得られる限界せん断耐力は、図-12に示す破断面(のど断面)での計算値 Q_y^{cal} と概ね一致する。

$$Q_y^{cal} = 2 \times 8.5\text{mm (のど厚)} \times 30\text{mm (溶接長)} \times 235\text{N/mm}^2 / \sqrt{3} = 69,200 \text{ N/山} = 69 \text{ kN/山}$$

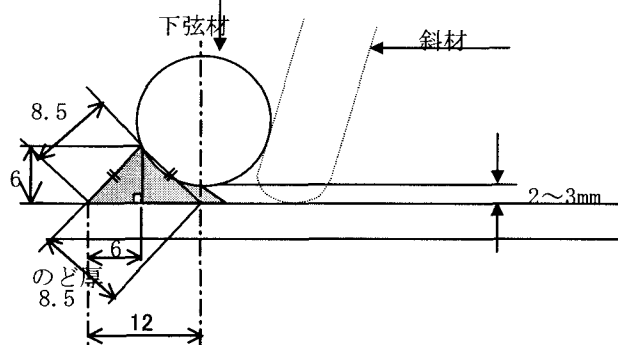


図-12 溶接部のど断面

次に、のど断面積と限界せん断耐力の関係を図-13に、破壊荷重との関係を図-14に示す。なお図中には別途疲労載荷を実施した結果も併記するが、その詳細な内容は別の機会に報告する。

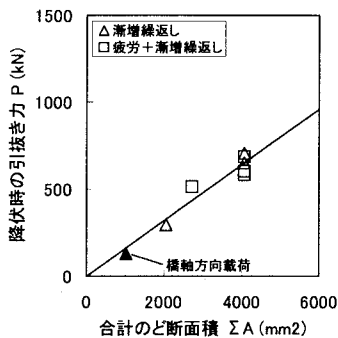


図-13 断面積と限界せん断耐力の関係

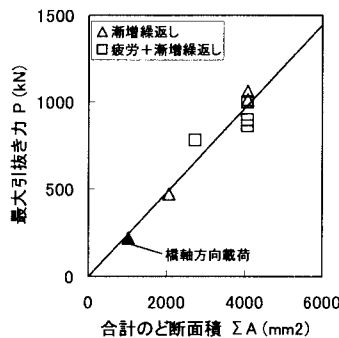


図-14 断面積と破壊荷重との関係

断耐力の関係

限界せん断耐力、破壊荷重はのど断面積にほぼ比例し、原点の近傍を通る直線で近似できる。溶接サイズが同じであれば溶接箇所数に比例して増大することが明らかになった。

(3) トラス鉄筋ジベルのずれ剛性

図-15 にのど断面積と初期ずれ剛性の関係を示す。前述より、ずれ止めの静的強度に関しては、トラス鉄筋と底鋼板との溶接部ののど断面積で概ね評価できるが、初期ずれ剛性はのど断面積に比例していないため、トラス鉄筋内に包含されたコンクリートのコンファインド効果と相俟って、トラス鉄筋とコンクリートとの協同作用があると推量される。

ここでは、トラス鉄筋とコンクリートの重ね合わせによる計算モデルによりトラス鉄筋ジベルが保有するずれ止め作用に対する剛性度合いについて検討する。

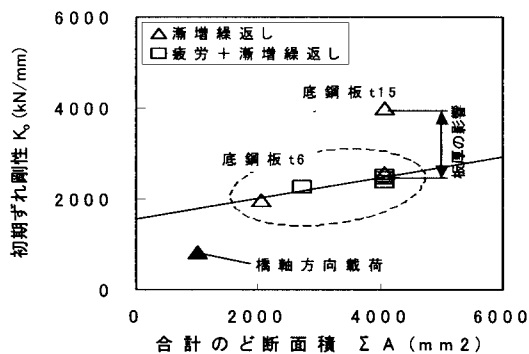


図-15 のど断面積と初期剛性の関係

1) 計算モデル

計算時に用いたモデルを図-16 に示し、各要素について次のように設定した。

a) トラス鉄筋

- ① 斜材、下弦材、底鋼板を梁要素とする二次元骨組みとして構成する。
- ② 上弦材位置で固定されたラーメン構造(格点部は剛結)として扱う。
- ③ 斜材一下弦材溶接部(格点部)はコンクリートに拘束されているので、この格点部をピン・ローラー支承として表現する。

b) コンクリート

- ① 上弦材、斜材、下弦材で囲まれたコンクリート

がせん断力に抵抗すると考え、この部分のコンクリートのみを考慮する。またコンクリート要素は上弦材位置で固定する。

- ② コンクリート要素は平面応力状態の弾性要素とし、要素の厚さは斜材直径と同じとする(トラス鉄筋1構面当たり)。

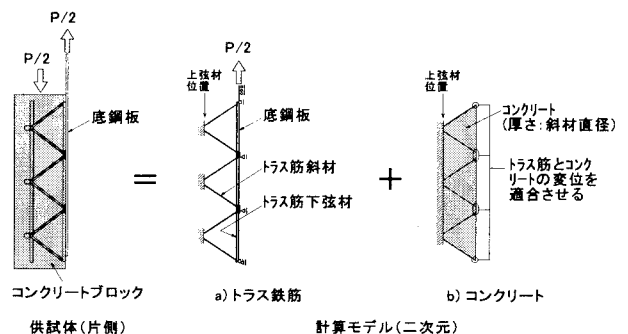


図-16 計算モデル

2) ずれ剛性に関する評価

供試体①～③の試験結果と計算結果をまとめて表-4 に示す。また、供試体③について、荷重—ずれ関係と斜材の軸ひずみを比較した結果を図-17 に示す。これらより以下のことが確認できた。

- a) 実験で得られた供試体間の初期ずれ剛性の大小関係は、計算モデルでもほぼ再現されている。
- b) 初期ずれ剛性の実験値と計算値の比は 0.97～1.49 の範囲にばらつくが、供試体②を除き、実験値に比較的近い計算結果が得られた。
- c) 表-4 の計算結果から、コンクリートの寄与分は 8 割程度にも達すると推定される。すなわち、ずれ剛性に対するコンクリートの寄与率が高いことを確認した。
- d) 図-17 より、斜材軸ひずみに関しては、圧縮側、引張側とも実験値が計算値を下回っている。特に、圧縮斜材について実験値と計算値の乖離が大きい。これは、実験では格点部(ずれ止め溶接部)の鋼板の局部曲げ変形に伴って圧縮斜材が抜け出しているためと考えられ、計算モデルではこの影響が考慮されていないためと考えられる。

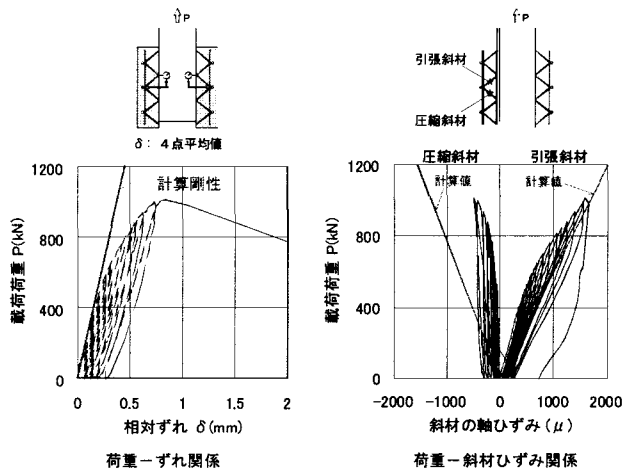


図-17 荷重—ずれ関係、斜材ひずみ

表-4 初期ずれ剛性の比較

| No. | 供試体 | | | 実験値 | | | 計算値 | | | 実験値 /計算値 |
|-----|-------------|------------------|-------------|-------------------|---|----------------------------------|---|-------------------|-------------------------------|-------------|
| | 荷 方 向 | 溶 接 方 法 | 底 鋼 板 | 全 体 (kN/mm) | 一 山 当 り ^{*)} (kN/mm/山) | ト ス 筋 寄 与 (kN/mm) | コ ン ク リ ー ト 寄 与 (kN/mm) | 全 体 (kN/mm) | 一 山 当 り (kN/mm/山) | |
| ① | 橋軸 直角 | 中央1列 | 6mm | 1,968 | 492 | 327 | 1,513 | 1,840 | 460 | 1.07 |
| ② | 〃 | 中央2列 | 15mm | 4,003 | 500 | 449 | 2,235 | 2,684 | 336 | 1.49 |
| ③ | 〃 | 中央2列 | 6mm | 2,571 | 321 | 467 | 2,191 | 2,658 | 332 | 0.97 |

(4) まとめ

トラス鉄筋ジベルの引き抜きせん断試験より、以下の考察が得られた。

- ①トラス鉄筋ジベルの限界せん断耐力、破壊荷重はともにジベルの溶接部の断面積に比例して増減し、溶接部の断面積に支配される。
- ②ずれ剛性は断面積に正比例せず、トラス鉄筋とそれにコンファインされたコンクリートの寄与が大きく、ずれ剛性の概ね8割程度がコンクリートの寄与分であると推定できる。

今後の検討課題として、トラス鉄筋ジベル合成床版のさらなる合理的な設計手法の確立に向けて検討を進めていきたい。

3. 設計・施工マニュアル(案)の概説

鋼合成床版分科会における活動として、トラス形鋼材のずれ止め特性に関する研究成果である「トラス構造のずれ止めを有するハーフプレハブ鋼合成床版設計・施工マニュアル(案)」¹⁾を取り纏めた。

この設計・施工マニュアル(案)は、設計編、製作編および施工編の内容で構成されている。本論文では鋼板パネルを工場で作製し、現場にて鉄筋の配筋とコンクリート打込みを行って完成するハーフプレハブ鋼合成床版のずれ止めに関する事項のみを記載している。

4. あとがき

本研究会は、トラス形鋼材を有するハーフプレハブ合成床版に対して「鋼製」および「コンクリート製」のそれぞれに関する設計・施工マニュアルの作成を目的に、各分科会に分かれて活動を進めてきた。

鋼合成床版分科会では、本文でも述べた通りこれまでに未解明であったトラス形鋼材とコンクリートの協同作用に主眼をおいて研究・調査を進め、かつ構造分科会における活動成果とともに、トラス形鋼材を使用した鋼合成床版の設計手法を提案し、設計・施工マニュアルを取り纏めた。

トラス形鋼材のずれ止め特性について、以下のよう

①限界せん断耐力、破壊荷重に関しては、トラス形ジベルにおいてはジベルの断面積に、またトラス鉄筋ジベルにおいてはジベル溶接部の断面積に支配されており、これらの耐力を評価できることが明らかになった。

②ずれ剛性(水平せん断バネ定数)の評価に関しても定量的な評価が得られ、スタッドジベルのずれ剛性に対してトラス形ジベルおよびトラス鉄筋ジベルとも約2倍程度のずれ剛性を有することが明らかになった。

③床版内部に埋め込まれたトラス形鋼材とコンファインド効果を発揮するコンクリートとの協同作用が明らかになり、ずれ剛性に寄与する割合が概ね8割程度にも昇ることが確認できた。

以上の成果を踏まえて、今後トラス形鋼材のずれ止めに関してより合理的な設計手法が提案できるものと推察できる。

本分科会における活動成果は、今後ハーフプレハブ鋼合成床版の設計に有用な基礎資料となり、さらにトラス形鋼材を使用した新工法の開発にも役立つものと考えられる。

最後に鋼合成床版分科会において、熱心に御参加を戴いた日本大学(故)若下藤紀先生に多大かつ貴重な御教示と御助言を賜り、設計・施工マニュアル(案)の完成に至ったことをここに付記し、謝意を表します。

【参考文献】

- 1) (財)災害科学研究所、ハーフプレハブ合成床版研究会：トラス構造のずれ止めを有するハーフプレハブ鋼合成床版設計・施工マニュアル(案)、平成14年10月
- 2) (財)災害科学研究所、ハーフプレハブ合成床版研究会：トラス型鋼材を有するハーフプレハブ合成床版の構造特性に関する調査報告書、平成14年10月
- 3) (財)災害科学研究所、ハーフプレハブPC合成床版設計・施工マニュアル(案)、平成14年10月
- 4) (財)災害科学研究所：トラス型ジベルを用いた合成床版の実験的研究、平成2年3月
- 5) 中井博：プレキャスト床版合成桁橋の設計・施工、森北出版、1988.5、pp65-71