

# 論文 鋼・コンクリート合成床版の平面保持成立要件に関する検討

櫻井 信彰<sup>\*1</sup>・藤山 知加子<sup>\*2</sup>・前川 宏一<sup>\*3</sup>・松井 繁之<sup>\*4</sup>

**要旨：**一般に、鋼・コンクリート合成床版は、頭付きスタッドや孔あきジベル構造などで鋼板とコンクリートの一体化が図られている。床版支間方向および支間直角方向の2方向の曲げモーメントに伴い、コンクリートの圧縮側にあるリブ周面には、付着および支圧力による摩擦が発生している。このため、このうちの静止摩擦力を断面に作用する水平せん断力が超えない限り、平面保持されることが期待できる。本研究では、設計上想定される最も疎なリブ間隔に対して、リブの表面状態をパラメータとした実験を行い、実務設計で前提とする平面保持の仮定の成立要件を検証した。

**キーワード：**鋼・コンクリート合成床版、平面保持、摩擦伝達、ずれ止め、実験

## 1. はじめに

鋼・コンクリート合成床版は、一般に頭付きスタッドや孔あきジベル構造をずれ止めとして、断面の一体化を図っている。

筆者らの提案・研究しているI形鋼リブを有する合成床版(図-1)は、図-2に示すように床版全厚に対して、リブ高さが高く、床版のように2方向の曲げモーメントを受ける場合は、中立軸よりも上のI形鋼リブに支圧力が作用する。この支圧力に対する静止摩擦力および鋼・コンクリート間の付着力が、断面に作用する水平せん断力を上回っていれば、一体化が図られ断面の平面保持が成り立つ。

本研究では、設計で想定されるリブの最大間隔(間隔が高さの3倍)を一定値として、表面の状態を変えて、かつ孔あきジベル加工を行ったものも加えて、支圧力の有効性を比較検討した。

なお、载荷は単なる押抜きせん断だけではなく、少なくとも繰返し数と荷重の移動を考えた動的载荷試験を行った後に、押抜きせん断試験を行うものとした。

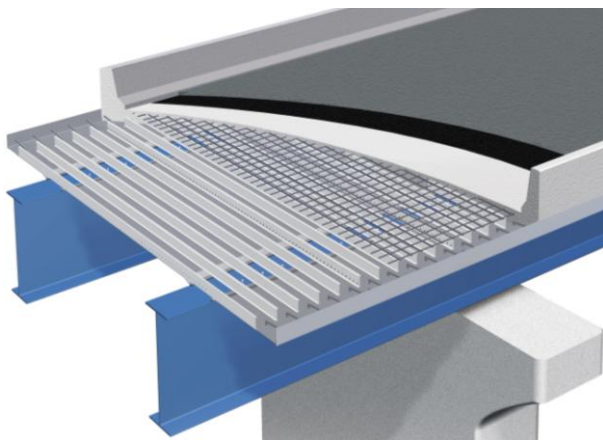


図-1 I形鋼合成床版

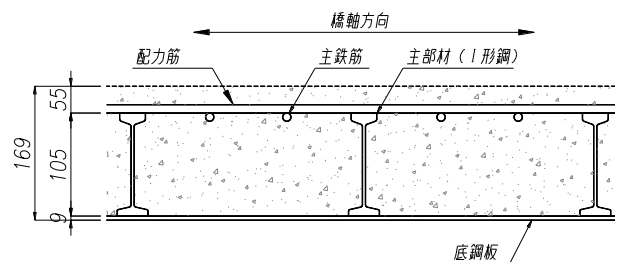


図-2 I形鋼合成床版断面図(単位: mm)

## 2. 実験概要

### 2.1 実験目的

筆者らの研究している合成床版構造は、これまで静的载荷試験や輪荷重走行試験にてその構造の妥当性を検証してきた<sup>1)</sup>が、I形鋼とコンクリートとの界面に発生する摩擦力による鋼とコンクリートとの一体性を確保する耐荷力機構については不明確な点があり、現状は、I形鋼ウェブに孔あけ加工を施し、この孔による機械的ジベル作用によりコンクリートとの一体化を図る構造となっている(図-3)。

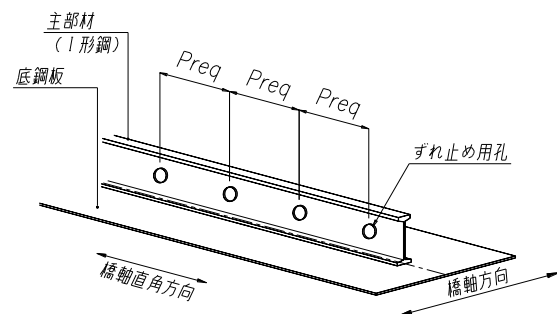


図-3 孔あきジベル

一般に、鋼とコンクリートとの界面における摩擦係数は0.60~0.70と言われ、既往の研究成果<sup>2)</sup>でも界面に作用する支圧応力の0.6程度の摩擦抵抗があることが確認

<sup>\*1</sup> 新日鉄エンジニアリング(株) 技術開発研究所 (正会員)

<sup>\*2</sup> 東京大学大学院 工学系研究科 (正会員)

<sup>\*3</sup> 東京大学大学院 工学系研究科 教授 工博 (正会員)

<sup>\*4</sup> 大阪工業大学 構造実験センター 教授 工博 (正会員)

されている。

図-4に示すように、I形鋼等のリブ（以下、主部材）を有する鋼とコンクリートとの合成版構造に荷重が作用したとき、主部材とコンクリートとの界面に主部材方向の曲げ圧縮応力によるコンクリートのポアソン比分の支圧応力とともに主部材直角方向の曲げ圧縮応力（支圧応力）も作用するため、主部材の適切な間隔を確保すれば孔あけ加工などの機械的接合を設けなくとも、鋼とコンクリートとの一体性を確保できると想定される。下図において説明すると、主部材直角方向の曲げにより生ずる圧縮応力 $\sigma_{cX}$ のうち、主部材上端から中立軸までの圧縮応力 $\sigma_{cX1}$ はそのまま主部材側面に支圧応力として作用する。また、主部材方向の曲げにより生ずる $\sigma_{cY}$ のうち、主部材上端から中立軸までの圧縮応力 $\sigma_{cY1}$ のポアソン比分の圧縮応力 $1/6 \sigma_{cY1}$ も同様に主部材の側面に作用する。さらに、 $\sigma_{cX1}$ と $\sigma_{cY1}$ のポアソン比分の直交圧縮応力 $1/6 (\sigma_{cX1} + \sigma_{cY1})$ が主部材の上面に支圧応力として作用することになる。

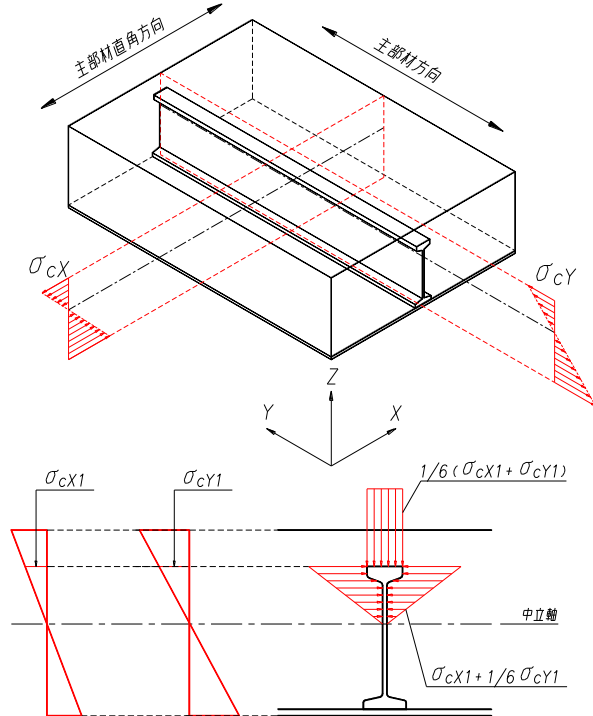


図-4 主部材を有する合成版における支圧応力

そこで、本実験では、界面に発生する摩擦力により鋼とコンクリートとの一体性を確保できる主部材間隔を明確にすること、界面に発生する摩擦力による鋼とコンクリートとの一体性を確保する耐荷力機構解明のための基礎データを取得することを目的とした。

なお、本研究では、初期値として確実に作用する主部材直角方向の曲げに伴う圧縮応力に対してのみ摩擦力を期待することとして静止摩擦係数 0.6、すべりに対する安全率 1.7 で設計し主部材配置を仮決定している。

## 2.2 実験設備と供試体

実験は、東京大学所有の構造物試験機を使用した。

供試体の形状は、実験設備の制約から幅：1.5m、長さ：1.5m、床版支間：1.2m とし、主部材に I-105 を使用し床版厚は 160mm とした。図-5 に供試体図を示す。

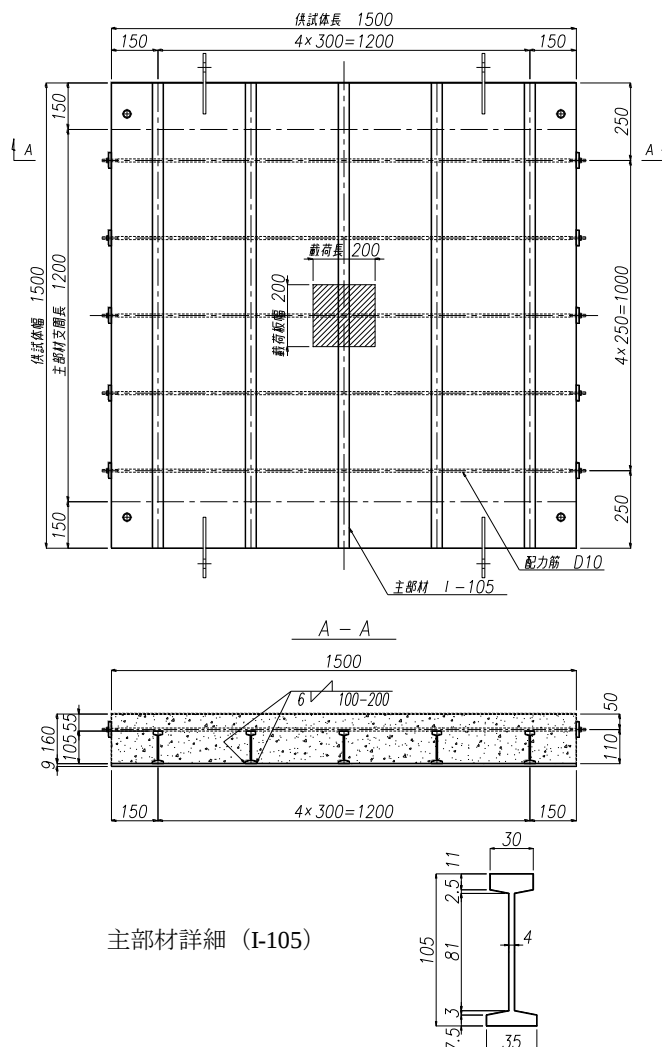


図-5 供試体図（単位：mm）

使用したコンクリートの配合は、表-1 に示すとおりであるが、合成床版として一般に用いられるものとし、「合成床版設計・施工の手引き」<sup>3)</sup>に準拠して決定した。

表-1 コンクリートの配合

| 呼び強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 粗骨材<br>最大寸法<br>(mm) | スランプ <sup>°</sup><br>(cm) | 空気量<br>(%) | 膨張材<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 水セメント比 |
|------------------------------|---------------------|---------------------------|------------|-----------------------------|--------|
| 30                           | 20                  | 12                        | 4.5        | 20                          | 50     |

今回の実験は、前項で示した仮定の設計で想定される主部材間隔の最大値（高さの約 3 倍=300mm）で固定し、表面の摩擦の違い（底鋼板および主部材すべての表面をテフロン貼付するか、文献 3 に従い無機ジクリッチペ

イント 30 $\mu$  塗布), 孔あきジベルの有無との違いなどを考え, 表-2 に示す供試体とした。

なお, 試験体のコンクリート物性値は, 表-3 のような状態であり, 著しい強度差はなかった。

また, 反転して裏面からリブに沿って線荷重を与えて, 連続桁中間支点を想定し, かつ付着を切った状態を想定した供試体も実験した (供試体 I-300-04)。

なお, 供試体 I-300-04 で裏面から荷重して付着除去の要領は, 図-6 に示すように裏面から主部材に沿って線荷重し図-5 に示す供試体の主部材直角方向の鉄筋の引張りずみが大きくなる (鋼殻にまでひび割れが達する) のを確認することで, 主部材に沿ったひび割れを入れた。

表-2 供試体一覧

| 供試体名     | 界面の状態                  |
|----------|------------------------|
| I-300-01 | 孔あきジベル (φ 50@150mm)    |
| I-300-02 | 無機ジンク 30 $\mu$ m (標準版) |
| I-300-03 | テフロンシート貼付              |
| I-300-04 | 標準版で裏面から荷重して付着除去       |

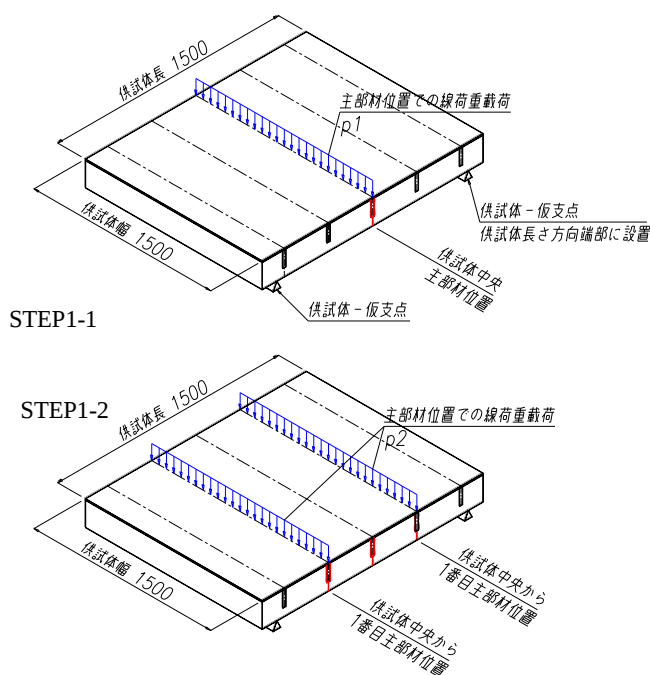


図-6 反転荷重要領図

## 2.3 荷重方法および荷重荷重

荷重の荷重は, ある一定期間の供用を再現するため, 荷重点を移動しながら少なくない繰返し数の定点荷重を行い, その後, 版中央で押抜き耐力試験を行う。

### (1) 定点繰返し荷重

全供試体において, 供試体中心隣接主部材位置 (STEP2-1), 主部材間隔中心位置 (STEP2-2) および供試体中心主部材位置 (STEP2-3) に各 10 万回程度の定点繰返し荷重を行うものとした (図-7)。繰返し荷重の荷重値は, 道路橋示方書 (以下, 道示)<sup>4)</sup> I 2.2.2 ならびに鋼道路橋の疲労設計指針<sup>5)</sup> 2.4.2(2) に拠る衝撃係数を 1/2 考慮し,  $P=100\text{kN} \times (1+10/(50+L))=120\text{kN}/\text{箇所}$ ,  $L$  (床版支間): 1.2m を基本とした。

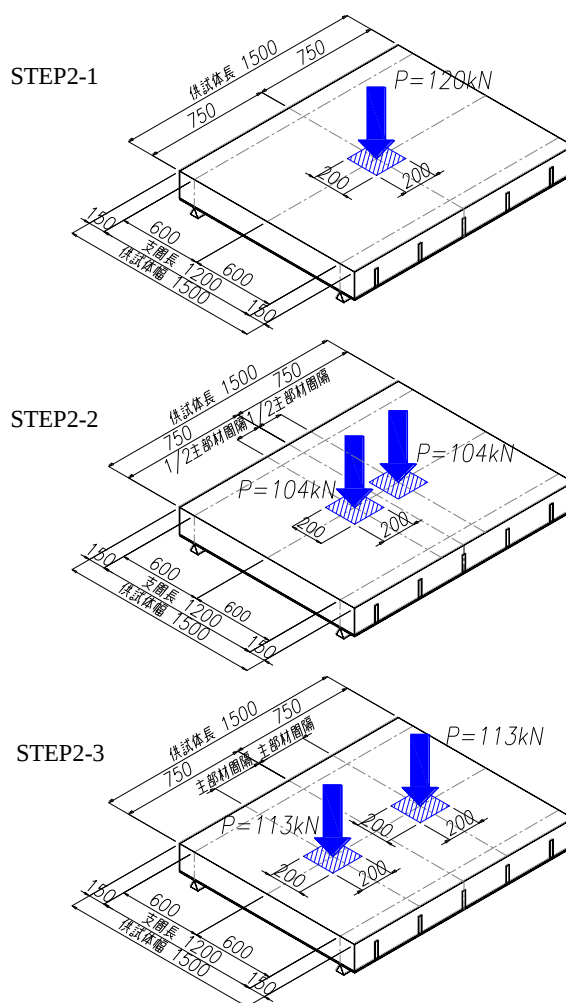


図-7 STEP2 荷重要領

表-3 コンクリート物性値

| 供試体名                            | 共通   | 共通   | I -300-03 | I -300-02 | I -300-01 | I -300-04 |
|---------------------------------|------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 材齢 (日)                          | 7    | 28   | 58        | 98        | 121       | 141       |
| 圧縮強度 $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 28.2 | 35.6 | 39.3      | 43.7      | 44.4      | 41.3      |
| 割裂強度 $f_t$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 2.4  | 2.8  | 3.0       | 2.8       | 3.3       | 3.2       |
| 静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )     | 28.6 | 31.8 | 29.8      | 33.9      | 34.6      | 29.9      |

STEP2-2, STEP2-3においては、基本荷重（120kN）荷重時と同程度の主部材方向断面のせん断力が供試体中央の主部材に作用する荷重を等方性版として FEM 線形解析により算出し、載荷した。また、テフロン貼付けした I-300-03 供試体を除く 4 体については、STEP2-3 終了後、STEP2-1 の載荷位置に戻して、設計荷重の 2.5～5 倍の荷重を 1 万回～100 回程度繰返し載荷した。

## (2) 耐力確認試験

STEP2 の載荷終了後、STEP2-1 の荷重載荷位置において、設計荷重 120kN、その 1.5 倍、3 倍などと漸増載荷を繰り返して、押抜きせん断破壊するまで載荷した (STEP3)。

## 2.4 計測項目

計測項目としては、図-8 に示す版中央付近の変位 (図中の▲印)、断面内ひずみ分布 (図中の●印の主部材上端、主部材のウェブ、底鋼板下面)、ひび割れ性状とした。また、実験終了後、図中に示す位置で切断し、内部の破壊状況を確認した。

## 3. 実験結果

### 3.1 荷重－変位関係

各供試体の荷重－変位関係を図-9 に、設計荷重の 5 倍まで (600kN) の動的載荷時の変位の小さい範囲の拡大した荷重－変位関係を図-10 に示す。

テフロンシートを貼付け、付着および摩擦をほとんどなくした供試体 (I-300-03) は、載荷初回から引張側のコンクリートの剛性を考慮せずに断面剛性値を計算する、いわゆる RC 計算した曲げ剛性 (図-9, 10 の破線) より低く、鋼材のみの曲げ剛性 (同、2 点鎖線) に近い状態であり、重ね版の挙動をした。押抜きせん断耐力は 650kN 程度で他の供試体と比較して大幅に低下した。コンクリート標準示方書【設計編】<sup>6)</sup>9.2.2.3 に従って算定するはりのせん断耐力算定式と同様に算出した 16cm の鉄筋コンクリート版の設計押抜きせん断耐力 681kN にも達しなかった。

孔あきジベルの有無 (I-300-01 と I-300-02) については、孔あきジベルがあることで若干剛性が上がり、押抜きせん断耐力も孔あきジベル版の方が 6% 程大きいものの除荷勾配は、RC 計算の勾配通り (設計通り) で設計荷重の 5 倍程度の 600kN 程度までは線形であった。その後両者とも剛性が落ちながら、最大耐力付近で押抜きせん断に伴って荷重が下がる。その後、変形とともに再び耐力は大きくなり、最大耐力よりやや小さい荷重値まで上昇した後、徐々に低下して 850kN 程度で一定値となり変位のみが増加する傾向になるのは両者とも同じであった。変形が 20mm を超えた時点で終了した。

初期ひび割れ導入供試体 (I-300-04) は、予想と異な

り最大荷重は最も大きかったが、先行して発生させたひび割れの効果で斜めひび割れの進展が阻害されたこと<sup>7)</sup>により、その後の耐力の降下は緩やかであった。

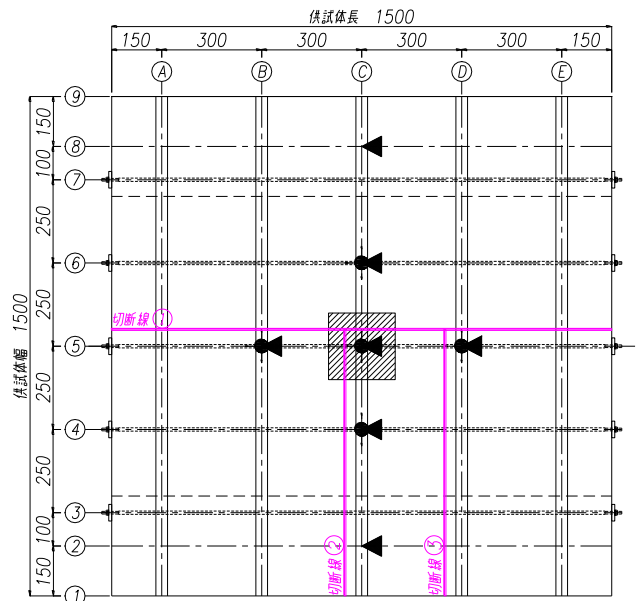


図-8 変位計、ひずみゲージ配置、切断位置

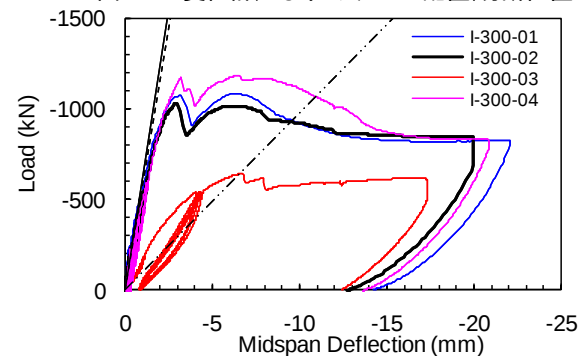


図-9 荷重－変位関係

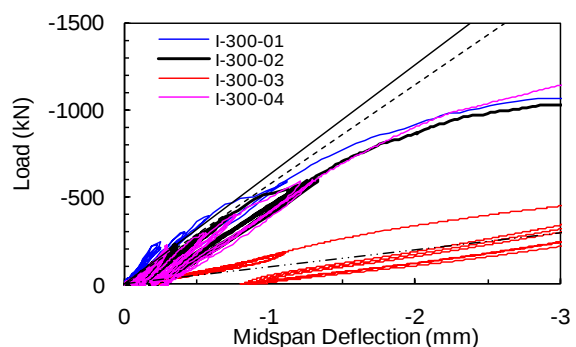


図-10 荷重－変位関係 (低荷重域)

鋼材とコンクリートのすべりを確認するために、供試体端部の主部材端面に変位計を取付け、荷重載荷に対してコンクリート端面との相対変位を計測した (図-11)。

その結果、最大荷重まではずれ量はほとんど 0 であるが、押抜きせん断が起きて、I-300-01, 02 の供試体は荷重が一度抜けて再び上昇したところからずれ始めているのが、確認できる。一方、I-300-04 は押抜きせん断後徐々にずれ始めている。

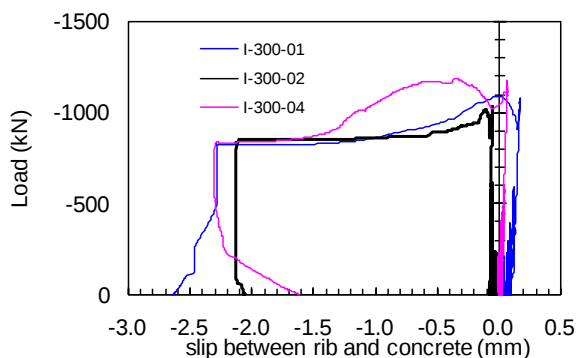


図-11 鋼・コンクリートの相対変位

### 3.2 荷重－ひずみ関係

#### (1) 動的載荷試験時の挙動

各供試体の動的載荷試験（設計荷重～600kN まで）の断面内ひずみ分布（C4 位置）を図-12～15 に示す。

テフロンシートを貼付けた供試体（I-300-03, 図-14）は、載荷初回から中立軸位置は低く、重ね版の挙動となっている。そのため、版中央の主部材上フランジの圧縮ひずみが大きく、鋼パネルのみで抵抗している。

I-300-01, 02 の供試体は、中立軸位置は設計上（RC 計算）の位置にあつて、30 万回の荷重の繰返し後も変化はしない。また、その後荷重の増加に伴って、各部のひずみは大きくなるが、中立軸位置は変化しない。なお、I-300-01 では孔あきジベルの存在でウェブ中央のひずみが大きくなったりしているのので、ここではコンクリート上面と底鋼板下面のひずみを結んだ線でひずみが 0 になる箇所を評価していることを付記する。

I-300-04 の供試体は、主部材ウェブ位置で大きな引張ひずみがみられるが、その対称な位置である C5 位置では、同程度の圧縮ひずみが生じるなどバラツキが大きかった。

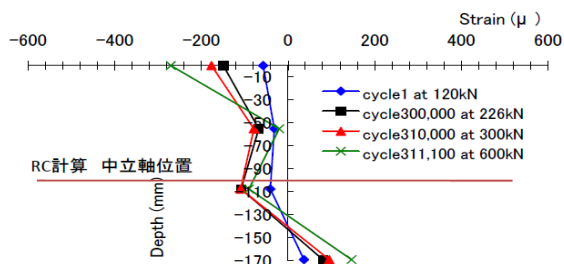


図-12 断面内ひずみ分布 (I-300-01)

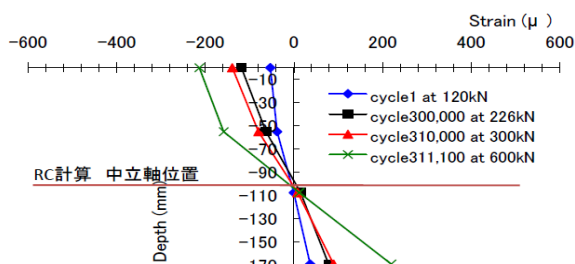


図-13 断面内ひずみ分布 (I-300-02)

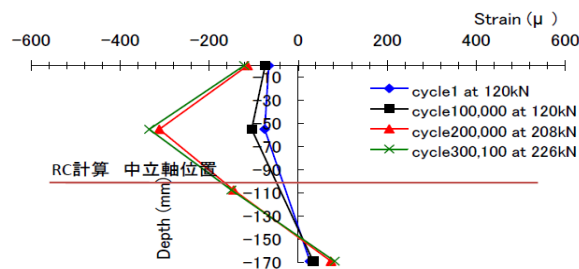


図-14 断面内ひずみ分布 (I-300-03)

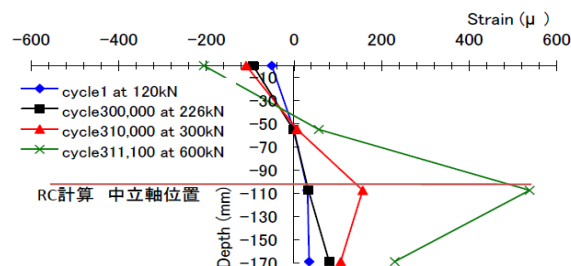


図-15 断面内ひずみ分布 (I-300-04)

#### (2) 最大荷重以降の挙動

最大荷重以降の平面保持状況について、I-300-01～03 の供試体の断面内ひずみ分布を図-16～18 に示す。これらの図で最大荷重を 1st peak, 押抜きせん断破壊して荷重が一度下がって変位が 1mm 程度出た箇所を drop, それからもう一度荷重が上がった箇所を 2nd peak とし、それ以降は変位の同じ量の位置でひずみ分布を比較している。

その結果として、テフロンで縁を切った I-300-03 は低荷重の時と同様に重ね版として挙動していることがわかる。

孔あきジベルを有する I-300-01 は最大荷重までは平面保持しており、押抜きせん断破壊後は主部材上フランジの圧縮ひずみが大きくなり、変位が 20mm に達するところでウェブ位置も大きくなる。これは、押抜きせん断破壊とともに主部材への支圧力が減少し、その結果付着が切れ、静止摩擦力を上回ってすべる。その後、孔に詰まっていたコンクリートがずれてウェブを押す状態になったと推定される。

標準版 I-300-02 は、最大荷重位置でも若干主部材上フランジの圧縮応力が大きく、孔あきジベルよりも早くすべり始めるようだが、その後抵抗機構はあまり変化せず、ウェブの断面欠損がないので主部材ウェブ位置の圧縮ひずみが主部材上フランジの圧縮ひずみを上回ることにはなかった。これは、孔あきジベルと異なり、主部材表面全体にわたって水平せん断力に抵抗していることに起因していると思われる。

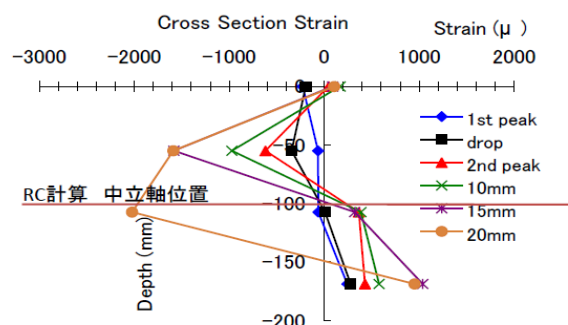


図-16 断面内ひずみ分布 (I-300-01)

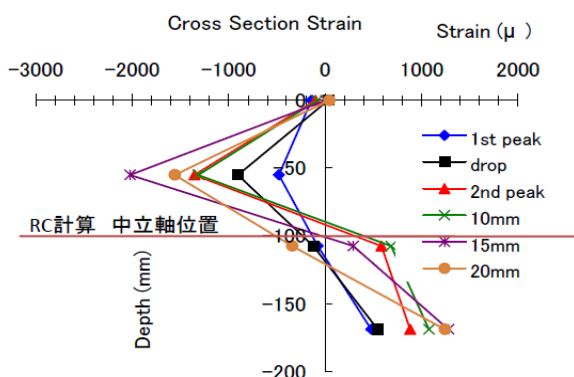


図-17 断面内ひずみ分布 (I-300-02)

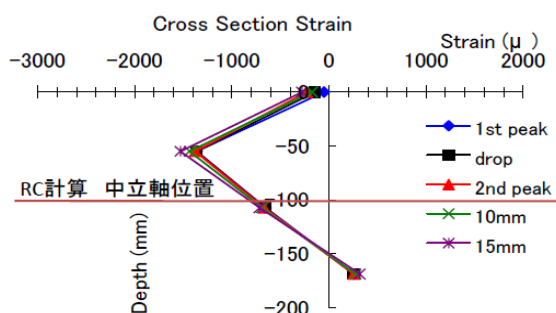


図-18 断面内ひずみ分布 (I-300-03)



図-19 供試体切断状況 (上から 01,02,03,04)

### 3.3 破壊状況

実験終了後の供試体を切断した(図-19)。押抜きせん断クラックは、全ての供試体共通で載荷面から隣接主部材の上フランジを経由して、最外部の主部材の根本に達する破壊面であった。この破壊面の形状から破壊を押抜きせん断破壊とした。

I-300-01, 02, 04 の供試体には、荷重載荷点直下か

ら45° 方向に2本の疲労クラックのようなものが見られるが、これはI-300-03では実施しなかった設計荷重の2.5倍(300kN)～5倍(600kN)までの荷重で1万回～100回繰返し載荷した影響と思われる。

この内側クラックは、リブとコンクリートの接合が強いほど疲労劣化が顕著であり、孔あきジベルを有するI-300-01が最も砂利化していた。

### 4. まとめ

本研究では、鋼とコンクリートの界面の状態を変えた動的試験および押抜きせん断耐力試験を行った。得られた知見は、以下の通りである。

- (1) 設計荷重の5倍程度までの動的載荷試験では、孔あき加工の有無にかかわらず、断面内ひずみ分布は直線に近く、中立軸位置は計算上の位置にあるといつてよい。また、最大荷重時(前述、1st peak位置)では孔あき加工がないI-300-02は、主部材上端のひずみが大きくなり若干中立軸位置が下がるが、静止摩擦を超えてすべり始める2nd peak以降の差異はほとんどなく、孔あきジベルがなくても摩擦伝達により版の一体性は確保される。
- (2) 孔あきジベル(I-300-01)は、中央主部材周辺がもっとも砂利化しており、主部材周辺への応力集中が大きく、破壊形態を見ると高荷重で疲労の影響がやすい。

I形鋼のフランジの存在がどう耐荷機構に寄与しているか、本実験だけでは観察された高サイクル疲労などが未解明であり、今後、平鋼主部材の実験や主部材間隔をパラメータとした実験などの研究を継続する予定である。

### 参考文献

- 1) 櫻井, 藤川, 水上, 松井, 長井: 形鋼橋梁の構造合理化に関する研究, 土木学会論文集 No.794, I-72, pp.67～86, 2005.7
- 2) 猪股, 中島, 齊木, 大江: 支圧力作用下における鋼・コンクリート接触面の静的・疲労付着特性, 構造工学論文集 Vol.52A, pp.1083～1090, 2006.3
- 3) 日本橋梁建設協会: 合成床版設計・施工の手引き, 2008.10
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 2002.3
- 5) 日本道路協会: 鋼道路橋の疲労設計指針, 2004.3
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書【設計編】, 2007年制定
- 7) 例えば, 田中, 岸, 前川: 曲げせん断力を受けるRC部材の人工亀裂装置とせん断補強筋の併用効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, 2005