

(論文)

# Uボルトをずれ止めに用いた低コスト型合成床版(U-Bolt床版)

## Low Cost Composite Slab with U-Shaped Bolt as Shear Connectors



山田岳史\*(工博)  
Dr. Takeshi Yamada



沼田 克\*\*  
Katsu Numata



岡本安弘\*\*  
Yasuhiro Okamoto



窪田 晃\*\*  
Akira Kubota

Conventional composite slabs have a bottom skin plate with some kind of stiffeners to increase stiffness. These composite slabs are characterized by high structural performance, but fabrication costs are much higher than those for RC slabs. A new composite slab with U-shaped bolt and checker plate was developed to reduce the overall cost. Static tests and elasto-plastic finite element analysis were carried out to study the usefulness of the slab and the role of the U-shaped bolt and checker plate played in the newly developed composite slab.

まえばき = 従来、道路橋の床版には、経済的で施工が比較的容易なRC床版が広く用いられてきた。しかし、RC床版は繰返し荷重による損傷発生<sup>1)</sup>や施工現場における熟練作業不足などの問題点が指摘されている。

このような背景より、RC床版に代わるものとして、鋼板・コンクリート合成床版(以下、合成床版)が各種開発されている<sup>2)</sup>。これら合成床版の特長は、型枠が工場製作時に取付けられるため現場作業を軽減できること、品質の管理、維持が比較的容易であること、高剛性のため床版厚を薄くできることなどである。

しかし、合成床版が現状のRC床版より高コストであることは否めず、低コスト化をめざすのが次なる課題と考えられる。そこで、コスト競争力を有する合成床版の開発を目指し、高コストの原因である工場製作の低コスト化を図れる構造とすることとした。この条件を満足するために、市場で調達し易い材料を用いること、溶

接加工はできる限り用いないこと、熟練作業でなくとも容易に組立てられることの3条件を設定した。

新合成床版(U-Bolt床版)の構造概念を図1に示す。本床版は鋼板、異形鉄筋、Uボルトという3つの要素のみから構成されている。さらに、この床版の工場における作業は鋼板にUボルトを締結するための孔あけ加工及び異形鉄筋とUボルトの溶接であり、Uボルトの鋼板への締結作業は熟練工でなくとも可能であることから、製作コストは従来の合成床版よりも大幅に縮減できると考えられる。また、孔あけ加工された鋼板のまま工場から出荷し、現場での組立ても容易であることから、輸送コストの縮減も期待できる。

本報では、このU-Bolt床版に関して、コンクリート打設時の構造特性の把握と静的押し抜きせん断特性の把握のために実験による検討を行った結果について報告する。

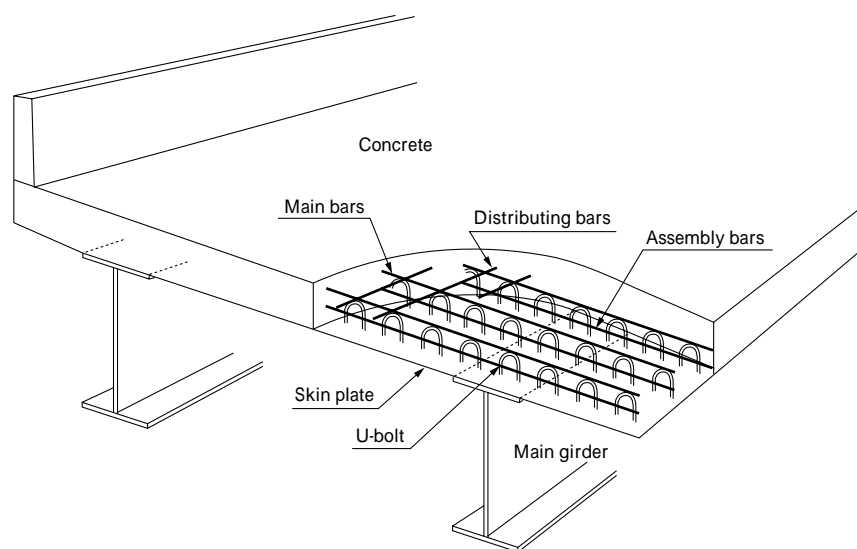


図1 U-Bolt床版の概念図  
Fig. 1 General view of U-Bolt slab

## 1. U-Bolt 床版の設計概念

これまでに多くの合成床版が開発され、その一部は実用に供されている。これらの合成床版のほとんどは現場打設でのコンクリート重量に抵抗するために、曲げ補剛リブなどを底鋼板に溶接しているもの、鋼板とコンクリートのずれ止めとして頭付きスタッドを使用しているものがほとんどである。頭付きスタッドに関しては、スタッド基部での疲労損傷の問題が指摘されている<sup>2)</sup>。その解決策の一つとして、ずれ止めに高力ボルトを用いて高耐久性を可能としたプレキャスト合成床版<sup>3)</sup>も開発されている。

そこで、以下の ~ に示す設計の基本概念を有する合成床版の開発を行うこととした。

架設系において、

コンクリート打設時には、主鉄筋と底鋼板ならびに U ボルトから構成されたいわゆるフィーレンデル構造で抵抗する。

完成系において、

使用状態において、U ボルトは底鋼板とコンクリートの剥離防止の役割を果たす。

底鋼板には縞鋼板を用い、底鋼板 - コンクリート間の水平せん断力に対しては、異形鉄筋とコンクリートとの関係同様に縞鋼板の突起による機械的ずれ止め効果を期待する。

## 2. コンクリート打設時の構造性能確認試験

### 2.1 供試体の概要

図 2 にコンクリート打設試験に用いたはり供試体の概要を示す。本供試体は、床版支間 2 500mm を想定し、2 800 mm (主鉄筋方向) × 500mm (配力鉄筋方向) のサイズで、コンクリート打設高さ 200mm である。底鋼板厚は 6mm、主鉄筋は D19、配力鉄筋は D16、U ボルトの軸径は 16 である。U ボルトの中段には D19 の組立鉄筋を配置した。主鉄筋と U ボルトの接合はビード長 20 mm の溶接であり、組立鉄筋と U ボルトは点溶接である。本

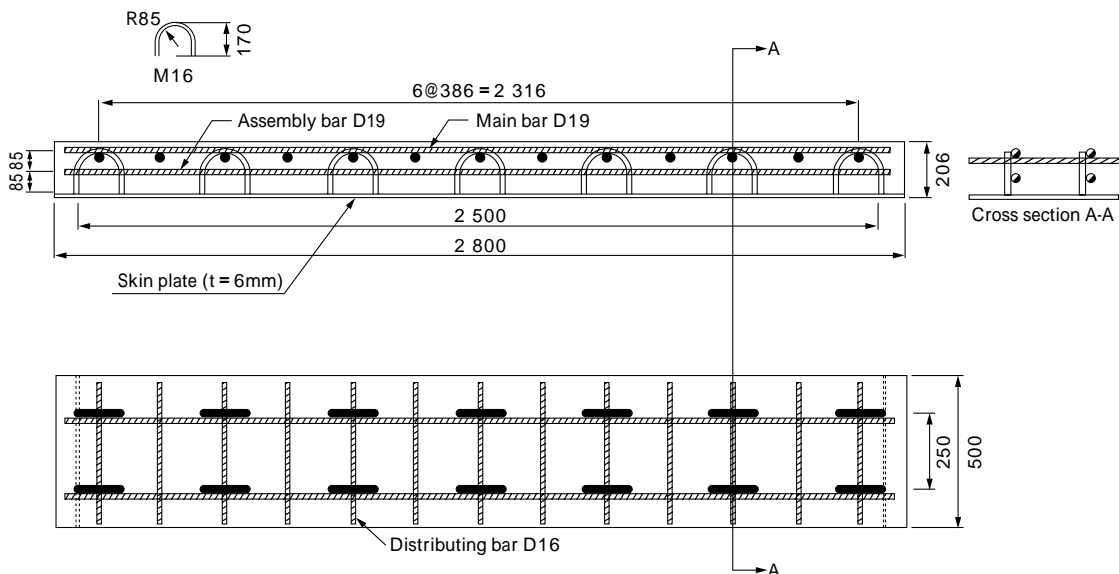


図 2 コンクリート打設試験用のはり供試体  
Fig. 2 Structural outline of beam specimen for casting test

供試体には、図 3 に示すとおり基部にテーパ加工した U ボルトを用いた。これは打設時の鋼製型枠が、鋼板の孔とボルト軸との隙間でのずれによって剛性低下しないことを期待したものである。

### 2.2 打設試験の結果

設計の基本概念の妥当性を把握するために、打設高さ 200mm のコンクリート打設試験を行い、主鉄筋、底鋼板のひずみ及び変位を計測した。図 4 に底鋼板の両面に発生した応力の主鉄筋方向分布を示す。底鋼板の両面で引張、圧縮応力が発生し、局部的に板曲げ挙動を起こしていることが確認できる。同様に、主鉄筋でも局部曲げの影響を確認しており、U ボルトと主鉄筋がビード長 20mm の溶接によって剛結合されていることが確認できた。また、図 5 に底鋼板の主鉄筋方向のたわみ分布を示す。U ボルト間でのせん断変形が大きく、特に等分布荷重下でせん断力が大きくなる支点近傍における U ボルト間でのせん断変形が最も大きく、支間中央では 4.8mm となった。ただし、U ボルト内でのせん断変形は比較的小さく、U ボルトによってせん断変形が小さく抑えられているのが確認できる。

計測結果が主鉄筋 - U ボルト、U ボルト - 底鋼板を剛結合と仮定した 3 次元有限要素解析の結果とほぼ一致したことから、底鋼板と U ボルトのずれは発生していない

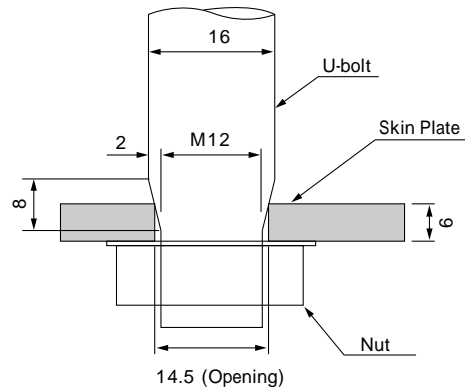


図 3 テーパ加工された U ボルト  
Fig. 3 Tapered U-bolt

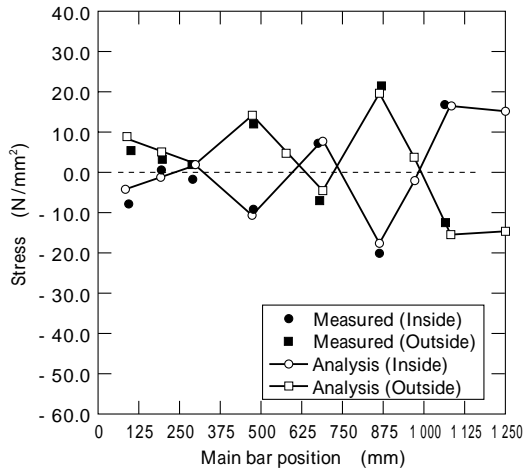


図4 底鋼板の主鉄筋方向応力分布  
Fig. 4 Stress distribution of skin plate along main bar arrangement

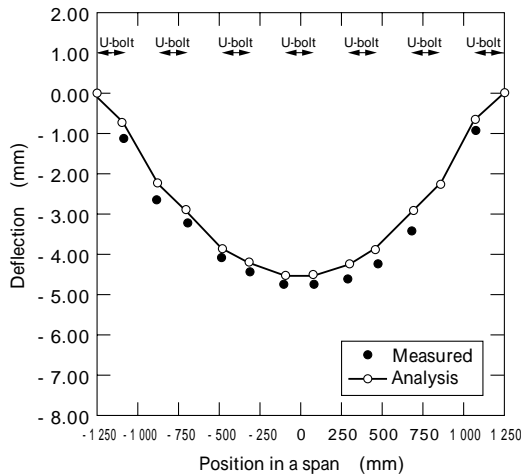


図5 底鋼板の主鉄筋方向変位分布  
Fig. 5 Deflection distribution of skin plate along main bar arrangement

ものと判断でき、さらに期待どおりフィーレンデル構造となっているものと考えられる。

### 3. U ボルト、縞鋼板のずれ止め性能確認試験

#### 3.1 供試体及び試験の概要

前述の設計基本概念，の有用性を把握するために，

静的曲げ破壊試験を図6，表1に示す3体のはり供試体に対して行った。

3体のはり供試体は，支間2500mm，全長2800mm，幅500mm，コンクリート高さ200mm，圧縮強度 $f'_c = 36\text{N/mm}^2$ ，底鋼板厚は6mm，主鉄筋はD19，配力鉄筋はD16，Uボルトの軸径は16である。B3供試体は図2の供試体のことであり，B1，B2についても図2とほぼ同一である。

表1に静的載荷試験（4点曲げ試験）を行った3種類の供試体の諸元を示す。載荷試験は，図6に示すとおり載荷支間（純曲げ区間）500mmの2点線載荷である。

#### 3.2 静的曲げ破壊試験の結果

図7に支間中央の荷重 - 変位関係を示す。図より，Uボルト基部にテーパ加工を施したB1供試体及び底鋼板に平鋼板を用いたB2供試体では，60kNまでは計算値とほぼ一致するものの，60kN以降は曲げ剛性の低下が著しいことが明らかとなった。すなわち，60kN以降は，底鋼板とコンクリートの付着力の喪失にともなうずれの発生によって，曲げ剛性が低下したものと考えられる。一方，底鋼板に縞鋼板を用いたB3供試体は，図7の荷重 - 変位曲線だけでなく，図8に示すとおり底鋼板のひずみがコンクリートの引張側を無視した（以下，RC断面）計算値とほぼ一致することも確認しており，設計で期待したとおり完全合成の挙動を呈したものと判断できる。

B3供試体は底鋼板が降伏し，B1，B2では降伏しなかったが，各供試体の終局はUボルトの円弧部分を迂回した斜引張破壊（写真1）であった。試験終了後各供試体の端部における鋼板 - コンクリートのずれを確認したところ，B1，B2供試体では目視にてずれを確認できたが，B3供試体ではずれを確認できなかった。

表1 はり供試体の諸元  
Table 1 Contents of beam specimens

Specimen	Contents		
	Skin plate	U-bolt	Nut size
B1	Normal	Tapered	M12
B2	Normal	Normal	M16
B3	Checker	Normal	M16

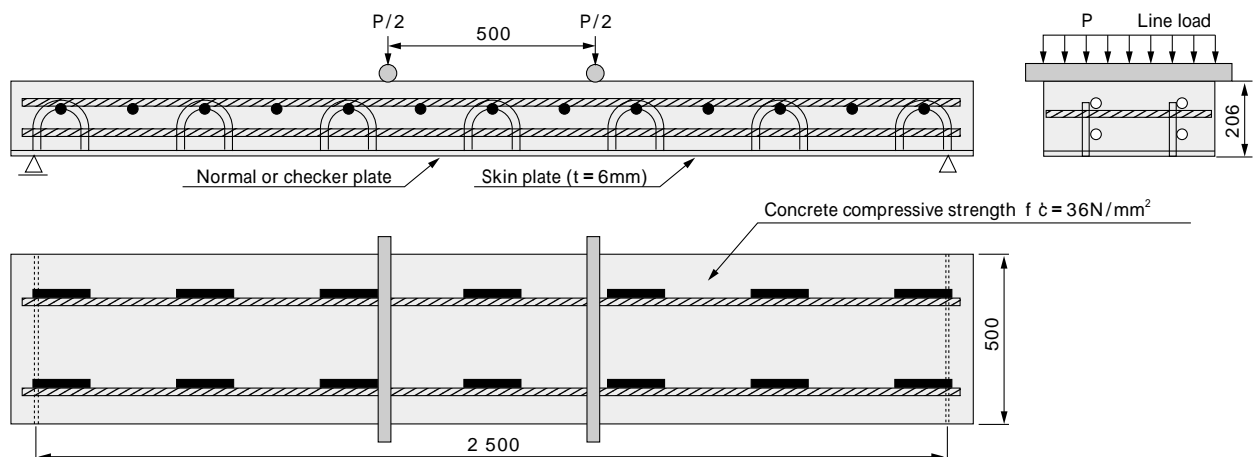


図6 静的曲げ試験用はり供試体  
Fig. 6 Structural outline of beam specimen for static bending test

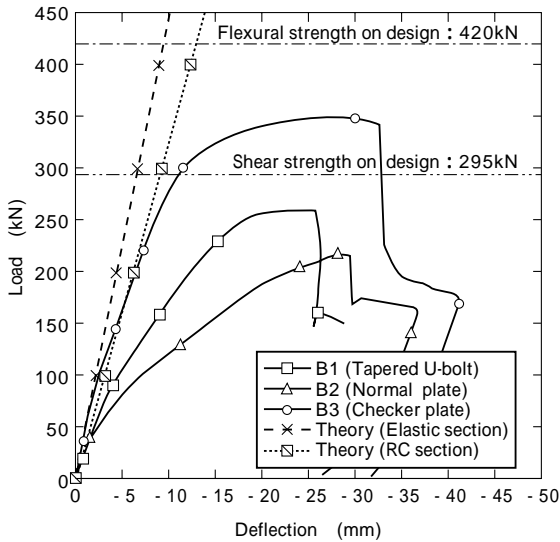


図7 支間中央の荷重 - 変位曲線  
Fig. 7 Relationship between deflection and load at center

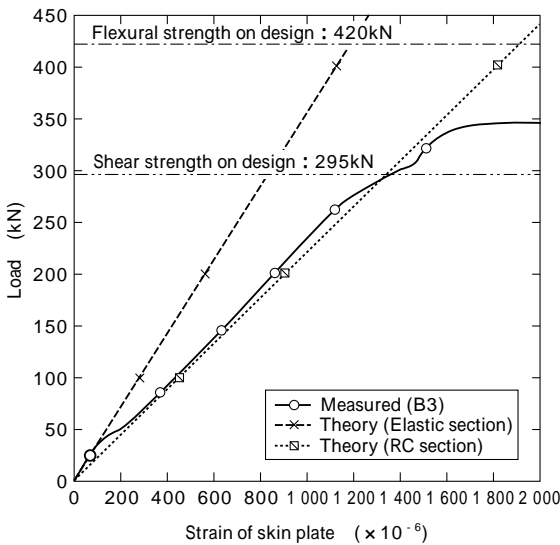


図8 B3 供試体底鋼板の荷重 - ひずみ曲線  
Fig. 8 Relationship between skin plate strain and load for B3 specimen

また、RC はりの慣用計算によれば、本はり供試体の曲げ耐力は 420kN であり、せん断補強鋼材を考慮しない場合のせん断耐力は 295kN である。供試体の設計時には、U ボルトのスターラップ効果を期待し、せん断耐力として 540kN を見込んでいたものの、試験結果から判断して、B3 供試体の終局耐力は、せん断耐力 295kN を上回

るものの、曲げ耐力の 420kN には及ばなかった。

これらのことから判断して、U ボルトによって鋼板とコンクリートの剥離を抑え、底鋼板に縞鋼板を用いることによって十分な合成状態となることが明らかになった。

また、U ボルトのせん断耐力向上への寄与は、ある程度は期待できると考えられるが、その効果を定量的に評価するためにはさらなる検討を要する。

#### 4 . U-Bolt 床版の静的構造性能確認試験

##### 4.1 供試体及び試験の概要

本床版の T 荷重作用時における構造特性と耐力を把握するため、載荷面積 200mm (橋軸方向) × 500mm (橋軸直角方向) を床版支間中央に載荷する押し抜きせん断試験を行った。試験では 0kN 150kN 300kN 450kN 600kN 750kN 900kN 0kN の順に載荷、除荷を繰返し、そのあと終局を迎えるまで載荷した。

図 9 に床版供試体の概要を示す。本供試体は実橋の床版支間 3 000mm の連続版を想定し、その中で正曲げ区間である 2 500mm を供試体の床版支間として 2 辺単純支持した。また、供試体のサイズは 2 800mm (主鉄筋方向) × 4 500mm (配力鉄筋方向) で、配力鉄筋方向継手を設け、高力ボルトによる一面摩擦接合を行っている。コンクリート厚  $h_c$  は 180mm、圧縮強度  $f_c = 45\text{N/mm}^2$  である。なお、底鋼板にははり供試体の曲げ試験の結果を反映させ、厚さ 6mm の縞鋼板を使用し、U ボルトの基部には図 3 と同様にテーパ加工を施した。

##### 4.2 静的押し抜きせん断試験の結果

図 10 に載荷点における荷重と変位の関係を示す。図中にはコンクリート断面を全断面有効 RC 断面とした場合の線形計算の結果と鋼板 - コンクリート間に完全合成を仮定した弾塑性有限要素解析<sup>4)</sup>の結果も示す。500kN までは、全断面有効の場合にほぼ一致しており、500kN 以降にひび割れの発生とともに剛性低下したことが明らかである。また、完全合成を仮定した弾塑性解析結果とも一致しており、本供試体の鋼板とコンクリートの間にずれの発生はほとんどなかったものと判断できる。また、試験終了後の目視によってもずれがなかったことを確認した。

さらに、本図中には、松井式<sup>5)</sup>及び角田式<sup>6)</sup>による押し抜きせん断耐力算定値を示した。試験後に本供試体を



写真1 破壊したはり供試体  
Photo 1 Failed beam specimens

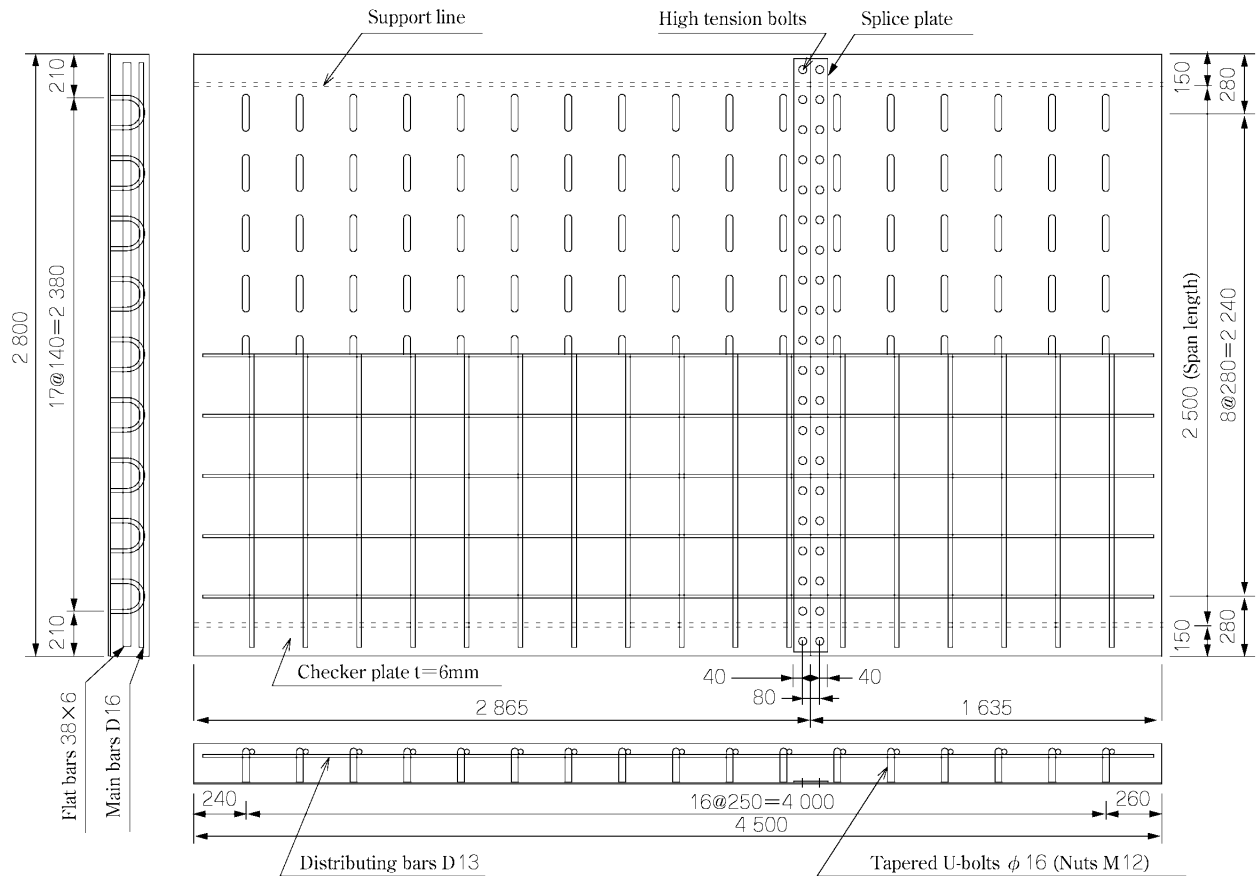


図9 床版供試体の概要  
Fig. 9 Structural outline of slab specimen

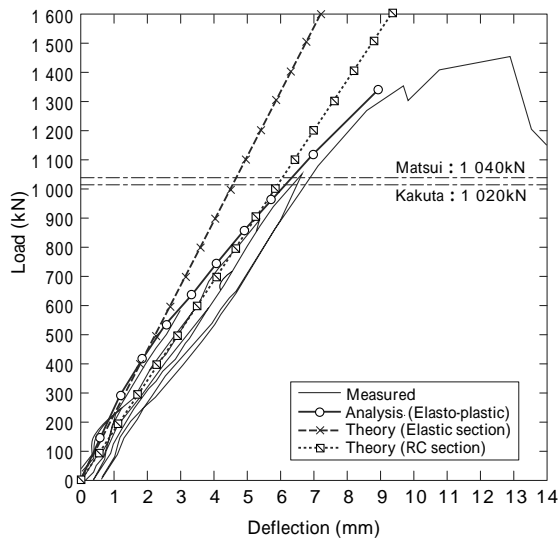


図10 載荷点の荷重 - 変位曲線  
Fig.10 Relationship between deflection and load at loading point

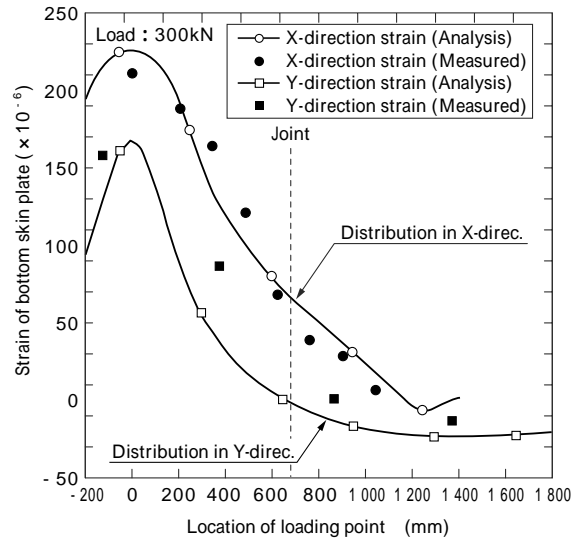


図11 300kN 時の底鋼板のひずみ分布  
Fig.11 Distribution of skin plate strain at 300kN

切断したところ、載荷点から底鋼板にせん断ひび割れが発生しており、両算定式が仮定した破壊モードに相当するものと考え、両算定式を用いたところ、試験結果は両算定値を4割程度上回った。このことは、はり供試体(B3)の試験結果と同様に、Uボルトのせん断補強効果も一因であると考えられる。

図11に載荷荷重300kN時における底鋼板のひずみ分布を示す。図中の解析値とは、コンクリート断面の全断面を有効とした曲げ剛性を用い、等方性版として計算した場合のひずみ分布である。また、X方向とは主鉄筋方

向のことであり、Y方向とは配力鉄筋方向のことである。解析結果と試験結果の比較より、ほぼ両者は一致しており、本床版を等方性版として取扱って問題はなく、道路橋示方書の設計曲げモーメント式を準用できるものと考えられる。

### 5. U-Bolt 床版のコスト試算

U-Bolt 床版を実橋に適用した場合の工事費を床版支間別に試算した。検討した床版支間は、実橋ではRC床版を採用した床版支間2mの橋梁とPC床版を採用した床

版支間 5m の橋梁である。試算項目は、材料費、製作費、架設費、一般管理費などを含んでいる。

その結果、以下ようになった。

床版支間 2m では、38 900 円 /m<sup>2</sup> であり、RC 床版の単価に比して、1 割程度高コストとなった。

床版支間 5m では、43 700 円 /m<sup>2</sup> であり、PC 床版に比べて、3 割程度安価となった。

なお、ここでの試算結果は、供試体製作時の実績に基づいており、実工事規模ではスケールメリットによって各種単価が抑えられるものと考えられ、さらなるコスト圧縮が可能であるものと判断している。

むすび = 従来の合成床版に比べて低コストの U-Bolt 床版を提案し、基礎的検討として架設系、完成系における構造特性の把握を行った。以上のことをまとめると以下のとおりである。

- 1) 主鉄筋と底鋼板ならびに U ボルトによって、設計どおりのいわゆるフィーレンデル構造が成立し、コンクリート打設時には、鋼製型枠として十分に機能することを把握した。
- 2) 底鋼板に縞鋼板を用いることで、優れた合成効果を

発揮し、U-Bolt 床版が従来の合成床版と静的構造特性において何ら遜色のないことが明らかとなった。

- 3) U-Bolt 床版の工事費を試算したところ、RC 床版(床版支間 2m) に対して 1 割程度割高となるものの、PC 床版(床版支間 5m) に対しては 3 割程度工事費を抑えられることが明らかとなった。

今後、独立法人土木研究所にて移動輪荷重走行試験機による疲労耐久性試験を行う予定である。この試験結果については別の機会に報告する予定である。

#### 参 考 文 献

- 1) 松井繁之ほか：構造工学論文集，Vol.39A (1993) p.1303.
- 2) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物 (1997)
- 3) 横山 広ほか：コンクリート工学論文集，Vol.22 (2000) p.1183.
- 4) DIANA/Nonlinear Analysis User's manual Release 7.
- 5) 前田幸雄ほか：土木学会論文集，第 348 号 (1984) p.133.
- 6) 角田与史雄ほか：土木学会論文報告集，第 229 号(1974) p.105.