

縞鋼板とUボルトをずれ止めに用いた鋼板・コンクリート合成床版の構造特性

Structural Characteristics of Composite Slab with Checker Plate and U shaped bolt as Dowel

山田岳史*, 沼田 克**, 岡本安弘**, 窪田 晃**, 松井繁之***

Takeshi YAMADA, Katsu NUMATA, Yasuhiro OKAMOTO, Akira KUBOTA and Shigeyuki MATSUI

*博(工) (株)神戸製鋼所 機械研究所 構造・加工研究室 (〒651-2271 神戸市西区高塚台 1-5-5)

** (株)神戸製鋼所 都市環境・エンジニアリングカンパニー 鋼構造センター 構造技術部 (657-0845 神戸市灘区岩屋中町 4-2-15)

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

Steel plate-concrete composite slabs have been attracting attention due to their many advantages. Such advantages include high structural performance, work-ability, and a much shorter construction period. General composite slabs have a bottom skin plate with some kind of stiffeners to increase stiffness. A new composite slab with U shaped bolt and checker plate was developed to reduce the overall cost. Static tests were carried out to study the usefulness of the slab and role the U shaped bolt and checker plate played in this newly developed composite slab. Fatigue test results clearly proved durability by using Wheel Running Machine.

Keywords: U shaped bolt, checker plate, wheel running machine

1. まえがき

従来の道路橋床版には、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床版には、繰り返し荷重による損傷発生¹⁾や施工現場における熟練作業者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²⁾(以下、合成床版)が各種開発され、その一部は実用に供されている。これら合成床版の特長は、①型枠が工場製作のため現場作業を軽減できること、②品質の管理、維持が比較的容易であること、③曲げ剛性が高くなるため床版厚を薄くできること、④重交通に対する疲労耐久性に富むことなどである。

しかし、鋼板とコンクリートのずれ止めとして、一般的な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³⁾。その解決策の一つとして、ずれ止めに高力ボルトを用い、高耐久性を可能としたプレキャスト合成床版が開発されている⁴⁾。そこで、底鋼板(縞鋼板⁵⁾)、異形鉄筋、Uボルトという3つの要素から構成されている図-1に示す合成床版を考案した。本床版の特長は、①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ィール構造によって打設時のコンクリート重量に抵抗すること、②鋼板-コンクリート間の荷重伝達として、鋼板とコンクリートの剥離防止にはUボルトを用い、境界面の水平せん断力の伝達には縞鋼板の突起を利用するという役割分担をさせたことである。

本稿では、このU-Bolt 床版に関して、コンクリート打設時の鋼製型枠としての構造特性、はり供試体の静的曲げ試験および床版供試体の静的押し抜きせん断試験に

よるUボルトと縞鋼板の有用性を把握したので報告する。さらに、本床版の使用状態における構造特性の把握のために実施した輪荷重走行試験の結果についても言及する。

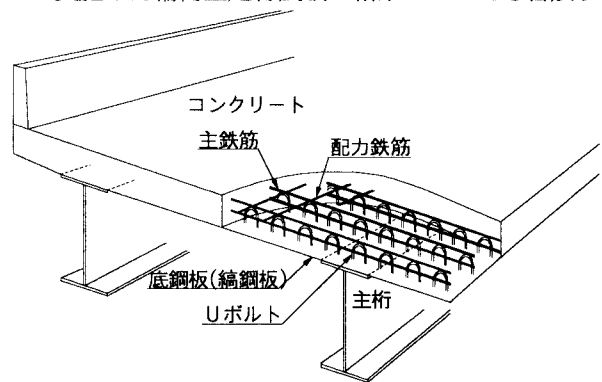


図-1 U-Bolt 床版の概念図

2. コンクリート打設時の挙動

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2500mmを想定し、2800mm(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φ16である。Uボルトの中段にはD19の組み立て鉄筋を配置した。主鉄筋とUボルトの接合はビード長20mmの溶接であり、組み立て鉄筋とUボルトは点溶接である。本供試体には、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。

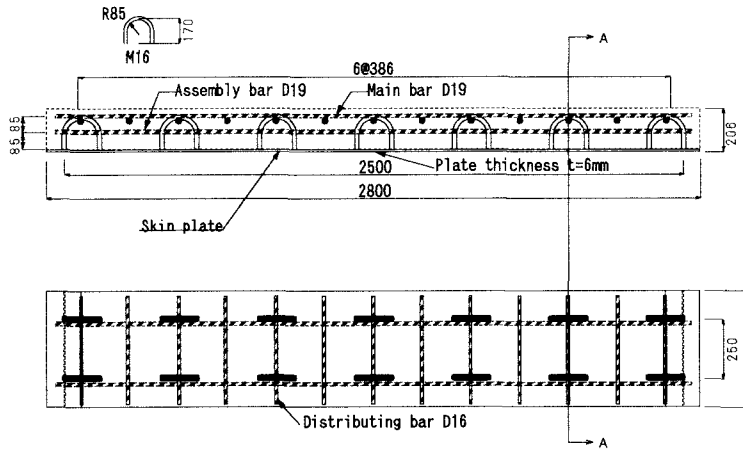


図-2 コンクリート打設試験用のはり供試体

2.2 打設試験の結果

打設高さ 200mm のコンクリート打設試験を行い、主鉄筋、底鋼板のひずみおよび変位を計測した。図-4 に底鋼板の両面に発生したひずみの主鉄筋方向分布を示す。底鋼板の両面で引張、圧縮ひずみが発生し、Uボルトからの曲げモーメントの伝達が認められる。同様に、主鉄筋でも曲げの伝達を確認しており、Uボルトと主鉄筋が剛結合されていることが確認できた。一方、組み立て鉄筋には曲げの影響はほとんどなかった。また、図-5 に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。

主鉄筋-Uボルト、Uボルト-底鋼板を剛結合、Uボルト-組み立て鉄筋をピン結合と仮定した 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せず、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 供試体および試験の概要

Uボルトと縞鋼板の機能、有用性を把握するために、静的曲げ試験を図-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ボルト軸の直径は $\phi 16$ である。

表-1 に静的 4点曲げ試験を行った 3種類の供試体の諸元を示す。B1 供試体については、テーパ加工されたUボルトを用いているが、B2、B3については通常のUボルトを使用した。载荷試験は、図-6 に示すとおり、载荷支間（純曲げ区間）500mm の 2点線载荷である。

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 供試体および底鋼

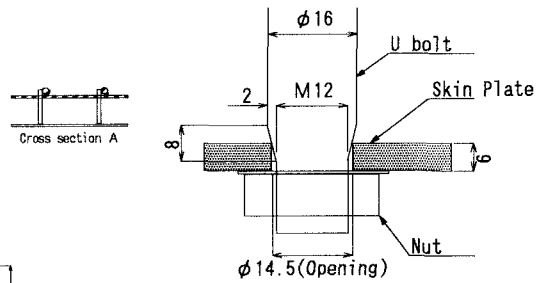


図-3 テーパ加工されたUボルトの基部

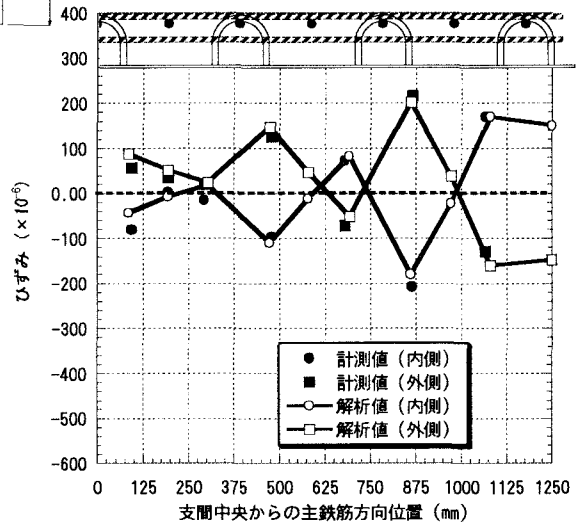


図-4 底鋼板の主鉄筋方向ひずみ分布

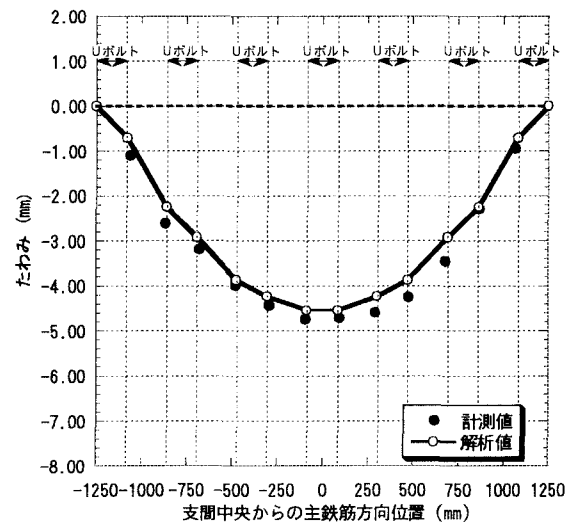


図-5 主鉄筋方向の変位分布

板に普通鋼板を用いた 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、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。

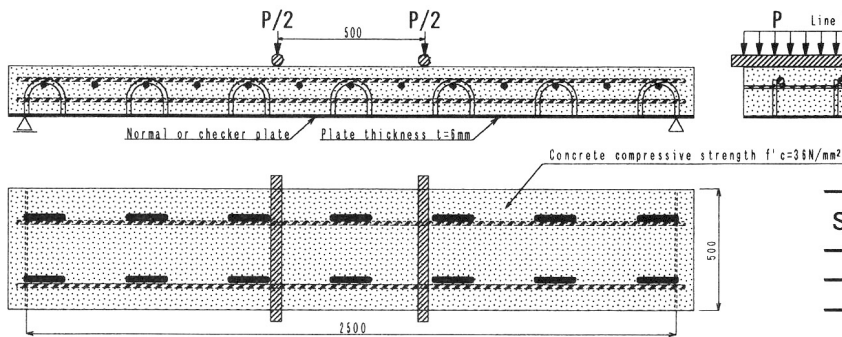


図-6 静的曲げ試験用はり供試体

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。

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 床版の構造特性把握

4.1 供試体の概要

本床版のT荷重作用時における静的構造特性と疲労耐久性を把握するために、2体の床版供試体を製作し、それぞれ静的押し抜きせん断試験、輪荷重走行試験を実施した。

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3000mmの連続版を想定し、その中で正曲げ区間である2500mm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2800mm(主鉄筋方向)×4500mm(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 は鋼構造物設計指針PartB(合成構造物)式に準拠し、180mmとした。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、縞鋼板(厚さ6mm)を使用し、Uボルトの基部には図-3

表-1 はり供試体の諸元

Specimen	Contents		
	Skin plate	U bolt	Nut size
B-1	Normal	Tapered	M12
B-2	Normal	Normal	M16
B-3	Checker	Normal	M16

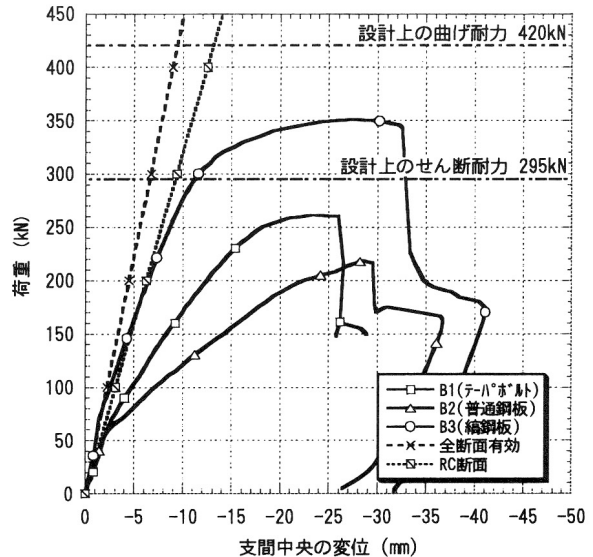


図-7 支間中央の荷重-変位曲線

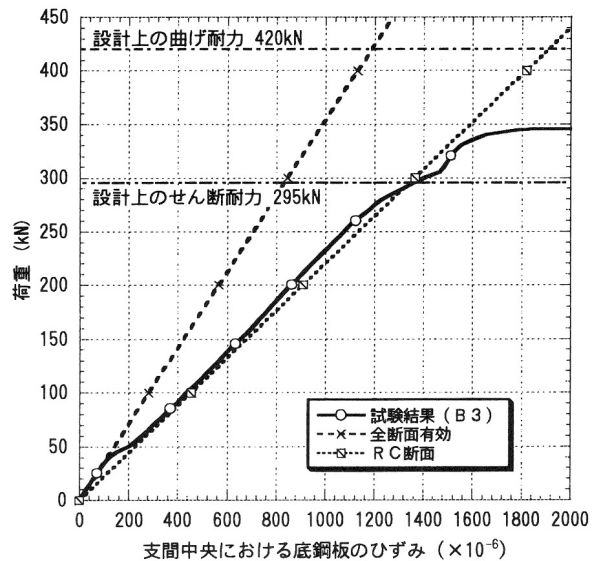


図-8 B3供試体底鋼板の荷重-ひずみ曲線



写真-1 破壊したはり供試体

と同様にテーパ加工を施した。コンクリートの圧縮強度は、静的押し抜きせん断試験用供試体では $f_c=45.0\text{N/mm}^2$ 、輪荷重走行試験用供試体では $f_c=35.2\text{N/mm}^2$ である。

4.2 静的押し抜きせん断試験

T 荷重の載荷面積 $200\text{mm} \times 500\text{mm}$ 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、 $0\text{kN} \rightarrow 150\text{kN} \rightarrow 0\text{kN} \rightarrow 300\text{kN} \rightarrow 0\text{kN} \rightarrow 450\text{kN} \rightarrow \dots \rightarrow 900\text{kN} \rightarrow 0\text{kN}$ の順に載荷、除荷を繰り返し、その後終局を迎えるまで載荷した。

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⁶⁾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⁷⁾および角田式⁸⁾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。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り扱って問題ないものと考えられる。

4.3 輪荷重走行試験機による階段状荷重漸増載荷試験

本床版とRC床版の疲労耐久性を比較検討するために、(独)土木研究所が所有する輪荷重走行試験機を用いた。支間長 3.0m の連続版として設計した供試体(図-9)に対して、等価な曲げモーメントが作用することとなる床版支間 2.5m の単純支持とした。輪荷重は供試体上に並べた $500\text{mm} \times 200\text{mm}$ の鋼ブロック上を $\pm 1.5\text{m}$ の範囲で移動し、157kN から 4 万回ごとに 19.6kN 増加させる階段状荷重漸増載荷⁹⁾である。

図-12 に載荷荷重と走行回数との関係を示す。図中の RC39、RC8 はそれぞれ昭和 39 年、平成 8 年の道路橋示方書(以下、道示)に準じて製作されたRC床版であり、PRC50 とは平成 8 年道示にてフルプレストレスで設計

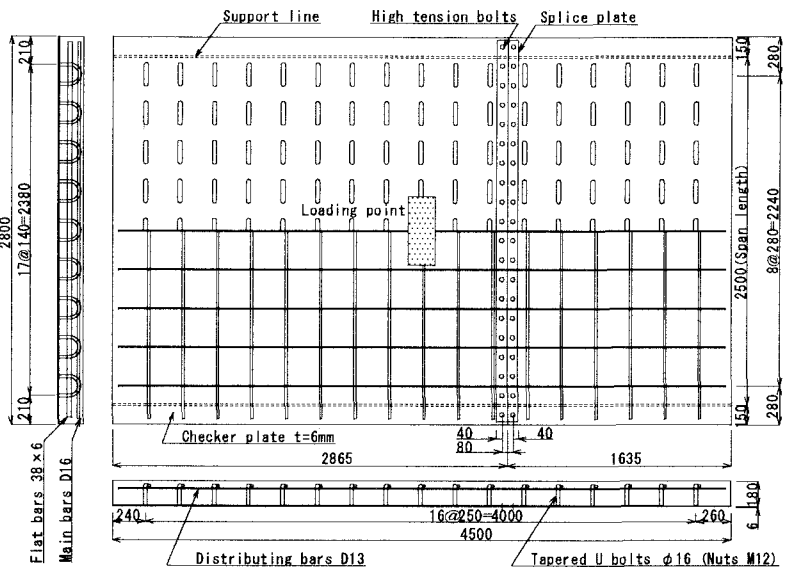


図-9 床版供試体の概要

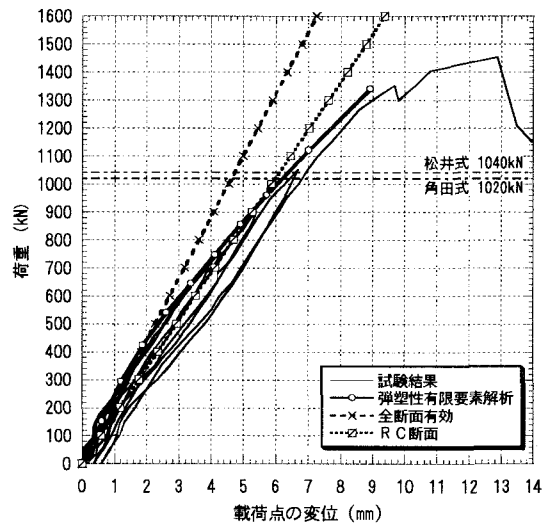


図-10 載荷点の荷重-変位曲線

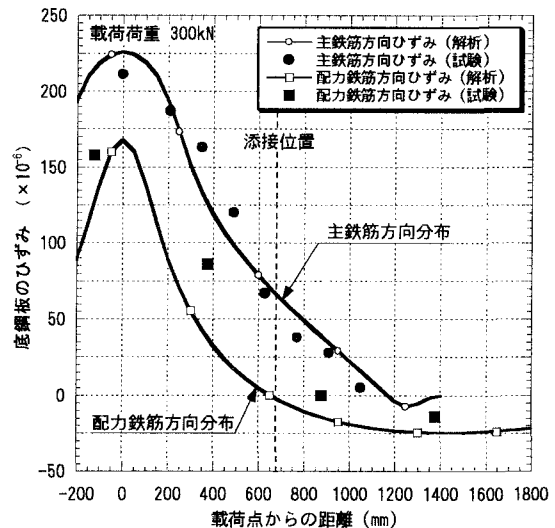


図-11 300kN 時の底鋼板のひずみ分布

したPC鋼材量を50%減じたPRC床版である。本床版は、上面に押し抜きせん断ひび割れの発生を確認した372kN、47.3万回で試験を終了した。本床版がRC8と比較して、極めて高耐久性であることを確認した。

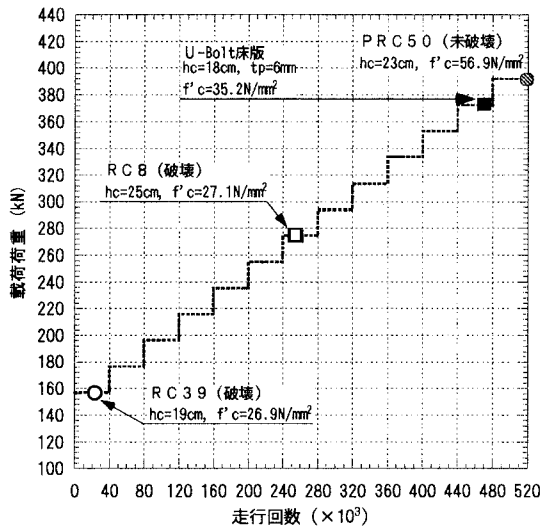


図-12 載荷荷重と走行回数の関係

図-13 に供試体中央のたわみと載荷荷重の関係を示す。本床版は荷重と走行回数の増加とともにたわみが増加し、47.3万回で押し抜きせん断破壊に至ったものと判断した。なお、392kN、48.3万回まで試験を継続し、最終的な活荷重たわみは6.24mmとなった。

図-14 に載荷荷重を98kNとした場合の換算たわみと走行回数との関係を示す。図中のコンクリート全断面有効、RC断面とは載荷荷重98kNに対するたわみの計算値である。本図より、走行回数12万回までに曲げひび割れの発生とともに中立軸が移動し、曲げ剛性が低下したものと判断できる。その後、36万回までは換算たわみに大きな変化はなく、曲げ剛性が安定した状態であったものと判断できる。その後、徐々にせん断ひび割れの発生が進展し、44万回以降は上側主鉄筋位置でのコンクリートの剥離によって曲げ剛性が低下し、たわみが増大したものと考えられる。

図-15 に試験終了後の床版上面と各切断面におけるひび割れ分布を示す。床版上面のひび割れ分布より、典型的な押し抜きせん断破壊であることが分かる。また、切断面B、Cから本供試体の破壊形式は、コンクリートの純せん断ひび割れの発達の後に、上側主鉄筋のせん断抵抗(ダウエル作用)によって剥離面

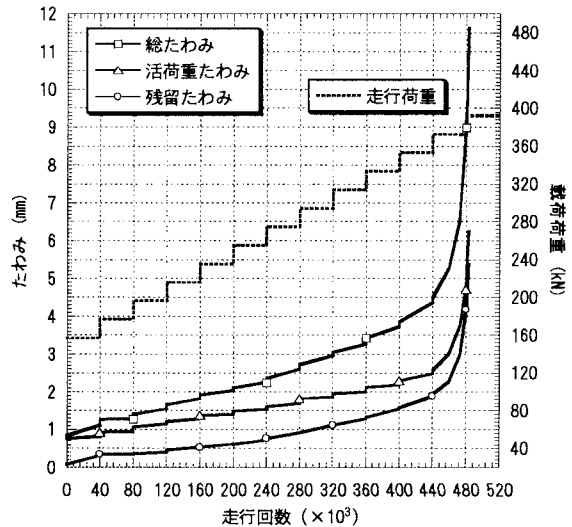


図-13 供試体中央位置のたわみと走行回数との関係

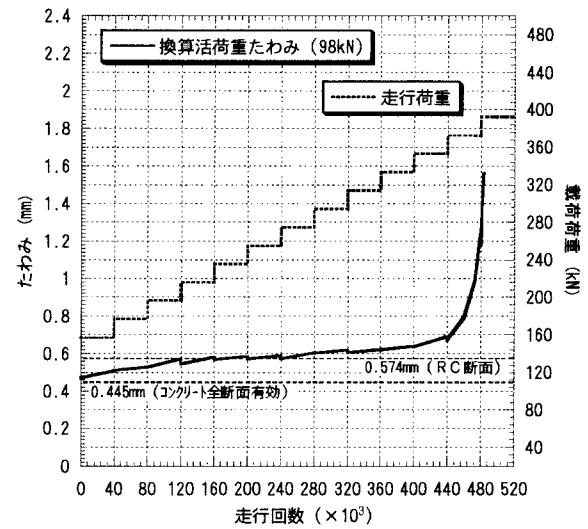


図-14 供試体中央位置の換算たわみと走行回数との関係

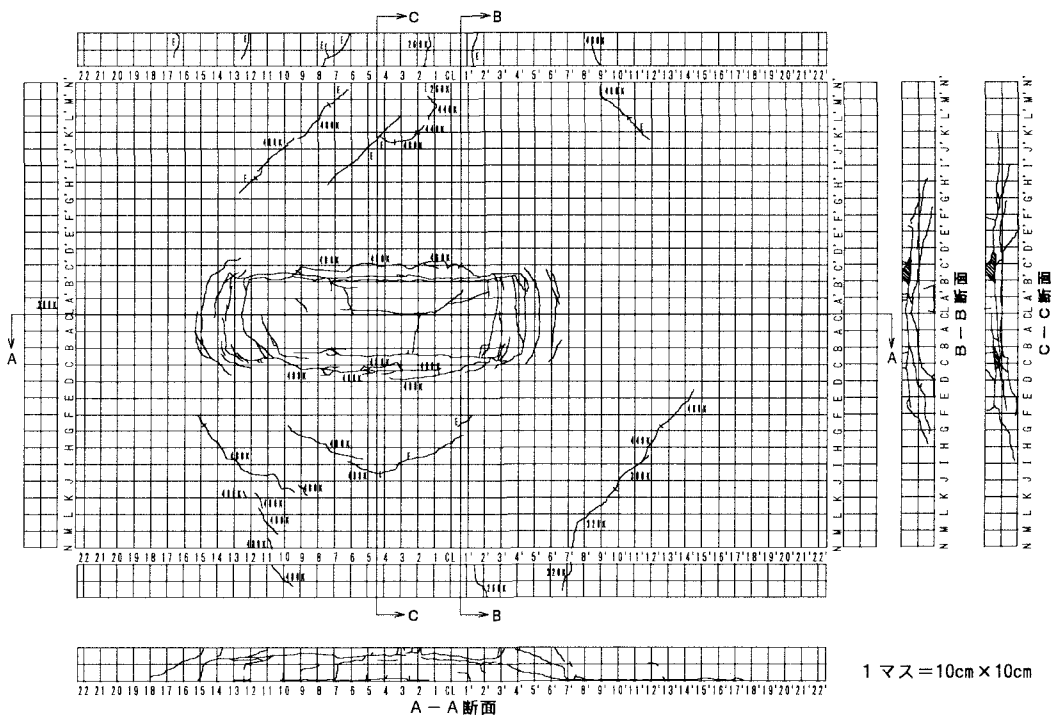


図-15 床版上面と各切断面におけるひび割れ分布

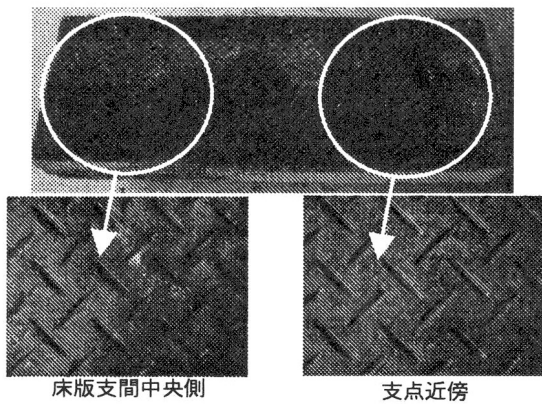


写真-2 縞鋼板の突起痕

が形成されたものと推測できる。さらに、切断面Aの2～10と7'～17'にかけて、底鋼板との境界面より5～10mm程度上に水平ひび割れが発生していた。このことは、繰り返し荷重下においては、コンクリートのせん断強度よりも縞鋼板の突起による付着力が高い強度を有することを示唆するものと考えられる。

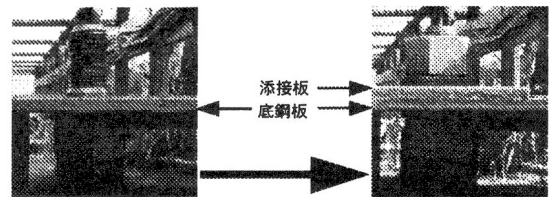
写真-2に図-15の切断面B-C間ブロックの底鋼板を剥がした状況を示す。床版支間中央側ではコンクリートが粉を吹いた状態であったものの、支点近傍では突起痕が鋭利に残ったままであった。さらに、本床版ではUボルトと縞鋼板をナット（ゆるみ止めナット）によって締結している。輪荷重走行試験中、4万回ごとにナットのゆるみを確認したが、試験終了までナットがゆるむことがなかったことを付記しておく。

4.4 底鋼板の継ぎ手について

輪荷重走行試験に用いた供試体の継ぎ手には、足場省略のための片面施工を目指し、写真-3に示す節付き両ねじHTBを用いた。すなわち、両ねじHTBを底鋼板の孔に挿入し、節によって落下防止となる。下側のナットによって仮留めをし、拡大孔添接板のセット後に、上側のナットを本締めするものである。このボルトを用いた添接部の開口量と走行回数を図-16に示す。この結果、破壊時には0.1mm以上の開口量であるが、試験中の最大開口量は載荷荷重にかかわらず、0.055mm程度であり、本接合部が弱点とはならなかった。

5. まとめ

- (1)底鋼板、Uボルト、鉄筋とでフィーレンデル構造を形成し、十分にコンクリート打設荷重を負担できた。
- (2)Uボルトは鋼板とコンクリートの剥離防止、縞鋼板は境界面の水平せん断力の伝達の役割を十分に果たす。
- (3)はり供試体の曲げ試験、床版供試体の静的押し抜きせん断試験より、Uボルトにはせん断補強効果が期待できる。しかし、その程度を定量的に言及するにはさらなる検討が必要である。
- (4)輪荷重走行試験より、平成8年道示によって設計されるRC床版と比較して、本床版は高耐久性であることが判明した。
- (5)節付き両ねじHTBによって、容易に底鋼板を片面施



節付き両ねじHTBのセットと 添接板のセットと上側ナットの
下側ナットの仮留め 本締め

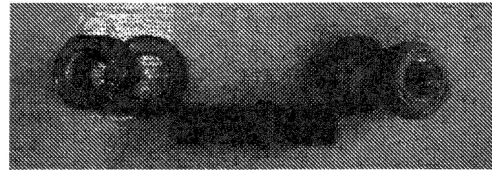


写真-3 節付き両ねじHTB

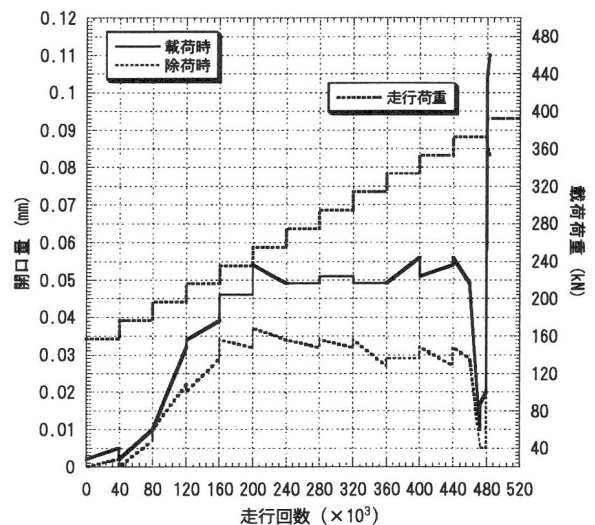


図-16 添接部の開口量と走行回数の関係

工によって接合することができ、さらに、接合部として弱点になることもなかった。

参考文献

- 1)松井繁之, 西川和廣, 大田孝二: R/C床版とその損傷, 橋梁と基礎, 1998.5~6.
- 2)土木学会: 鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物, 1997.
- 3)松井繁之, 文 兌景, 福本嘸士: 鋼板・コンクリート合成床版中のスタッドの疲労性状について, 土木学会, 構造工学論文集, Vol.39A, 1993.3.
- 4)横山広, 佐藤政勝, 辻本和敬, 相川収: 高力ボルトをずれ止めに用いたプレキャスト合成床版の耐荷性能について, コンクリート工学論文集, Vol.22, No.3, 2000.
- 5)関口幹夫, 穴戸 薫, 川島 力: 縞鋼板を用いた鋼板合成床版の実験的研究, 土木学会, 第40回年次学術講演会概要集, V-210, 1985.
- 6)Diana/Nonlinear Analysis User's manual Release 7.
- 7)前田幸雄, 松井繁之: 鉄筋コンクリート床版の押し抜きせん断耐力の評価式, 土木学会論文集, 第348号, 1984.8.
- 8)角田与史雄, 井藤昭夫, 藤田嘉夫: 鉄筋コンクリートスラブの押し抜きせん断耐力に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第229号, 1974.9.
- 9)(社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 2002.3.