

(13) 波型デッキプレート合成床版の載荷実験

Loading Tests of Composite slabs with Profiled Sheeting

紫桃 孝一郎※、上東 泰※、長谷 俊彦※、小西 拓洋※※、西土 隆幸※※

※ 日本道路公団試験研究所 橋梁研究室 (〒194 東京都町田市忠生 1-4-1)

※※ 日本橋梁建設協会床版開発 WG (〒104 東京都中央区銀座 2-2-18 鉄骨橋梁会館)

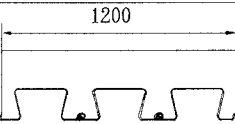
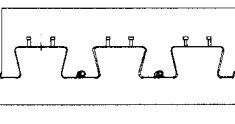
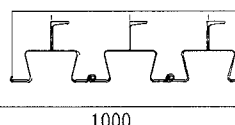
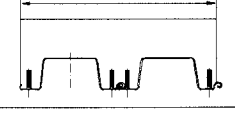
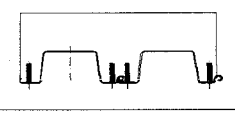
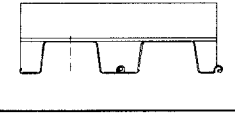
A series of static loading tests were carried out to investigate the loading capacities of composite slabs with profiled sheeting. 5 types of full-scale specimens were prepared to search the preferable shear stud detail and shape of the profiled sheeting. Composite slab with dove-tail profile sheet shows excellent loading capacity and ductile behavior with large deformation. It is found that stud is inevitable to keep the composite action until the beam reaches to the maximum capacity without sudden drop of stiffness caused by slip between steel and concrete. Full-scale static loading tests of slab specimen with the dove-tail profiled sheet were conducted.

Key Words: profiled sheeting, composite slab, full-scale loading test, slip

1. はじめに

適用が拡大する鋼2主桁橋の床版には一般的に横締めされた P C 床版が組み合わされている。P C 床版の高い耐荷力は各種実験で確認されており2主桁橋の標準的な床版として認識されつつある。しかし、現場状況によっては移動型枠等による P C 床版施工が不適当と考えられる場合もあり、P C 床版に代わる高い剛性を持った合成床版に対する需要が高まりつつある。本床版は波型形状をした鋼デッキプレートとコンクリートを合成させ高い剛性を持つとともに、コストダウン、省力化が可能な合成床版として、日本道路公団、日本橋梁建設協会共同で開発を昨年度より開始したものである。その一部として合成床版の実橋適用を目的とした実物大載荷実験を実施したので概要を報告する。

表-1 供試体一覧

	断面	スタッド ピッチ	実験状況	耐荷力
1a		なし	死荷重たわみ 14.5 mm, ひび 割れは微細、間 隔小さい	初期ひびわれ 15.5 t 剥離31 t Pmax=63.7t
1b		スタッド 3@500	ボルト溶接のため 載荷前に大部分 が剥離、終局 まで荷重落込み なし	初期ひびわれ-- 剥離--- Pmax=74.7t
1c		Cut-CH @400	負曲げのみ	
2a		Bolt @500	ひび割れはボルト 位置に集中して発 生した。剥離発生 後剛性が低下した がその後もちなお した。	初期ひび割れ5 t 剥離23tで大き な剥離音 Pmax=51t
2b		Bolt @250	2aとほぼ同 じ挙動を示 す。	初期ひび割れ7 t 剥離24tで大き な剥離音 Pmax=50t
2c		鉄筋 @500	18~24tで中 央を除き剥離 完了、終局時 水平ひび割れ が生じた、コ ンクリートの 圧壊なし	剥離18t Pmax=41.5t

2. 波型鋼合成床版の特徴

波型鋼合成床版は以下の性能、コストを目標としている。

1.6 mm 鋼板を用いた場合の
適用スパンは6~8 m 程
度とする。

- 2.波型の鋼板を断面に参入した合成床版とする。
- 3.桁上にデッキを並べ、これを足場、コンクリート型枠に利用することで現場省力化、構造の簡素化を可能とする。
- 4.ロール型鋼材を使用し、溶接等の加工を無くすことにより R C 床版に匹敵する低コスト化を実現する。

本床版は建築分野で広く採用されているデッキプレートと類似の構造をもつが、6 m 以上のスパンを持つ 1 級道路橋への適用を考えた場合、荷重の大きさ、繰返し数が建築用スラブと比較すると格段に大きく断面性能、耐力力から見て異質のものと考えられる。従って、その性能を検証するとともに道路橋適用を前提とした設計法を確立する必要がある。

3. 実験概要

表-1 に示す断面形状、定着方法の異なる波型デッキプレート梁の供試体を準備し、正曲げ静載荷試験をまず行った。タイプ 1 は逆台形、タイプ 2 は台形形状のデッキプレートを使用し、鋼板とコンクリートの定着方法をスタッド、ボルト、鉄筋と変えている。全ての供試体は支点上にボルトを用いた定着装置を設けている。供試体はデッキ鋼板を鉄筋として断面に算入し、ひび割れ防止用鉄筋、配力筋を配置した。正曲げ梁載荷試験により推奨断面を決定し、この断面に対して、



図-1 正曲げ静載荷実験

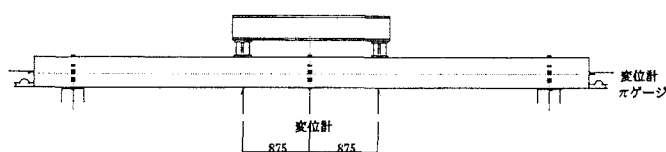


図-3 正曲げ供試体

負曲げ断面、正曲げ繰返し載荷実験、鋼桁と接合された版供試体の載荷実験を実施した。更に今年度、移動輪荷重走行実験を実施する。これらのうち正曲げ梁載荷試験と版供試体静載荷実験について概要を報告する。

4. 正曲げ静載荷実験

タイプ 1 c を除く 5 つの供試体について図-1 に示す 2 点曲げ載荷を行った。載荷は床版支間 6 m の単純支持状態で行った。逆台形タイプ 1 b の供試体を図-3 に示す。載荷試験の結果得られた荷重変位曲線を図 2 に示す。載荷試験の結果タイプ 1 a とタイプ 2 全てが設計耐力力近辺の 200 ~ 300kN で鋼板とコンクリートが大きな音とともに剥離した。剥離の発生はデッキ上面にスタッドを打ったタイプ 2 b を除いてデッキプレート上側の面に発生し、剥離荷重は鉄筋定着タイプが最も小さく 180kN 程度、ボルト定着タイプ 2 a, 2 b は 230kN, タイプ 1 a は 260kN であった。剥離荷重に達すると梁の 1/4 点近辺から剥離が一気に拡がり、剥離荷重 + 30 ~ 50kN でほぼ全域に拡がった。但し、支点位置のボルト定着装置により、端部において剥離がかなり少なくなっている。タイプ 1 a、タイプ 2 の供試体は剥離発生後に合成効果が減少、消滅し重ね梁的な挙動を示すようになった。この後、荷重変位曲線の傾きは緩くなり終局耐力は 400 ~ 500kN 程

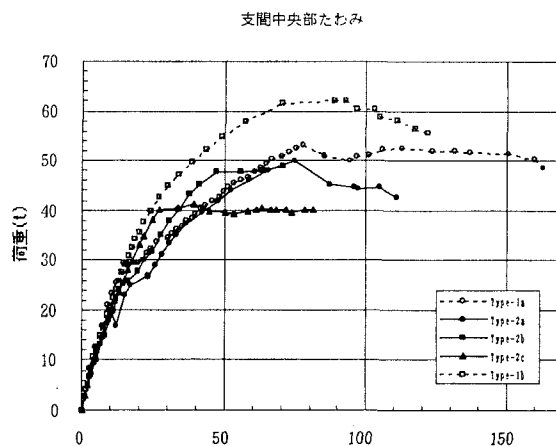
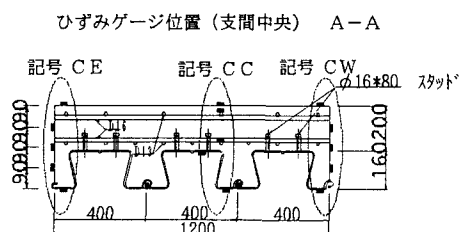


図-2 正曲げ荷重変位曲線 (中央撓み)



度で頭打ちとなった。剥離後の剛性は剥離荷重の大小とは逆にボルト定着タイプ 2 a、2b より鉄筋定着 2 c の方が高かった。これはタイプ 2 c のデッキ上面の鉄筋の方がデッキ下面側のボルトよりもずれ止めとしての効果が高かったためと考えられる。タイプ 1 a、タイプ 2 全てで、端部定着装置のボルトは終局時に切断されており、最終的には剪断定着破壊形式の破壊が観測された。。又、タイプ 1 は終局に至った後の変形量がタイプ 2 に比べかなり大きかった。

スタッドをデッキ上側に打ったタイプ 1 b は剥離は発生したが終局状態まで合成が切れず最終的には鋼材の引張降伏で終局に達した。図 4 にタイプ 1 a とタイプ 1 b の支間中央の断面のひずみ分布を示す。これを見るとタイプ 1 b では終局荷重まで鋼板とコンクリートがほぼ完全に合成していることがわかる。これに対し、タイプ 2、タイプ 1 a の構造では、断面の抵抗曲げモーメント相当の曲げで剥離が発生し、この後も耐

荷力は上昇するが、構造系、剛性の変化が著しく剥離発生＝使用限界と判断した。

次にひずみ分布より $M - \phi$ 関係を調べ、梁の $E I$ 計算した。荷重が大きく剥離が生じた場合には平面保持が成立せず ϕ は定義できないため剥離前の状態に限って $M - \phi$ 関係を調べた。 ϕ は次式で求めた。

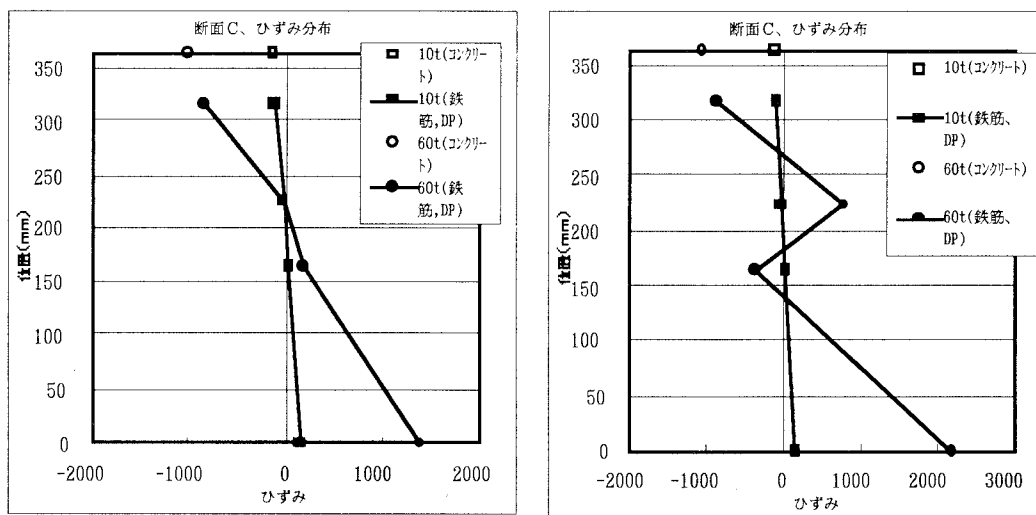
$$\phi = \frac{\varepsilon_5 - \varepsilon_1}{d} \quad \text{又は} \quad \phi = \frac{\varepsilon_5 - \varepsilon_2}{d_{5-2}} \quad (\text{式 1})$$

但し

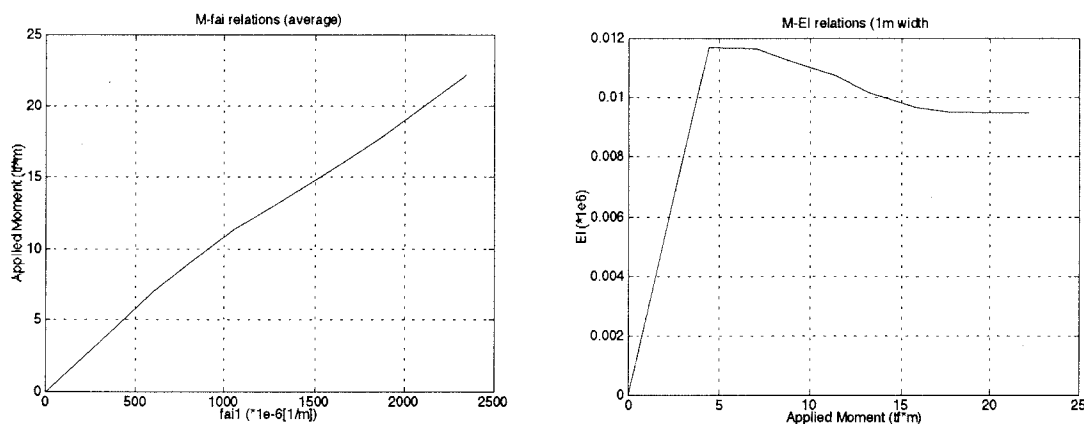
ε_5 : デッキプレート下縁ひずみ、 ε_2 : 上側主鉄筋ひずみ、 ε_1 : コンクリート上縁ひずみ、又、断面の剛性 $E I$ は次式により計算する。

$$E I = \frac{M}{\phi} \quad (\text{式 2})$$

以上により計算された T1b の中央断面の ϕ 及び $E I$ の計算結果を図 5 に示す。曲げモーメント 200kNm 時



図－4 梁中央断面ひずみ分布（左 T1b、右 T1a）



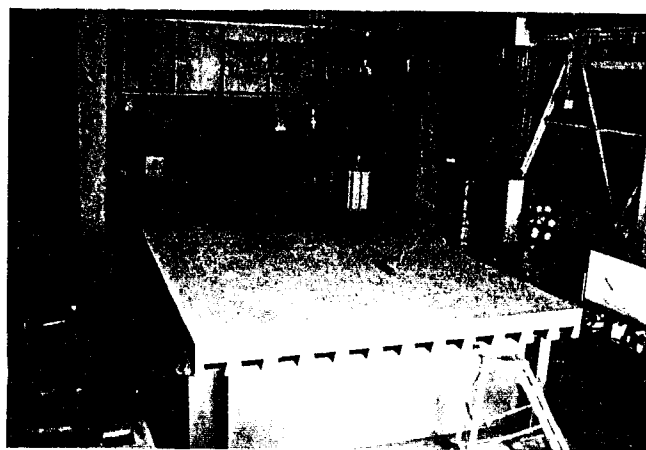
図－5 T1b 供試体歪み分布より計算した $M - \phi$ 曲線と $E I$ （1 m 幅あたり）

の EI はひび割れ等の影響により初期の EI より多少低下し、95000 kNm² 程度と推測される。ちなみに設計に用いる引張り域コンクリート、鉄筋を無視した EI の計算値は 80000 kNm² 程度である。

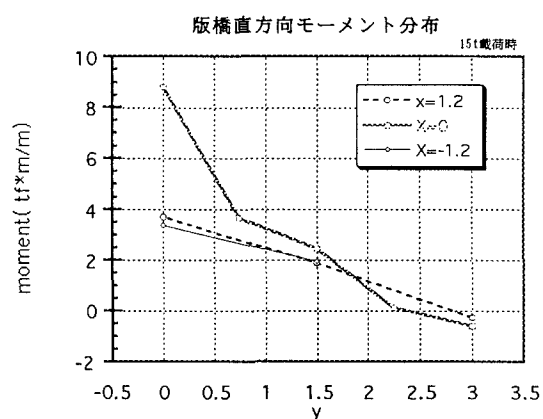
5. 版 載 荷 実 験

5.1 実験概要

梁供試体実験により合成断面の基本性能を把握し、実橋に適用する構造を絞り込んだ。しかし本床版の大きな特徴として橋軸方向と橋直方向の剛性の違い＝異方性があり、実橋への適用に先立ち異方性版の耐荷性能を確認する必要がある。通常、建設用デッキスラブでは設計は 1 方向性版として行われているが、橋梁床版では変動荷重が格段に大きくかつ集中荷重として作用することから床版のある範囲が共同してこれに抵抗する効果：分配効果が重要となる。このような理由から桁付き版供試体を作成し以下の特性を把握する目的で図 6 に示すような版の静的載荷実験を行った。実験供試体は幅 40cm のデッキを 12 枚橋軸方向に並べ桁高 1.4 m の支持桁に結合している。静載荷試験ではひずみを橋軸、橋直方向あわせて版 90 点、鋼桁 6 点で計測した。又、スタッドの水平剪断力を計測する目的で 8 本のスタッドに各 8 枚のゲージを貼付した。本供試体は平成 11 年度に移動輪荷重試験に使用される予定であり、供試体の載荷は弾性範囲を大きく超えない範囲で行った。



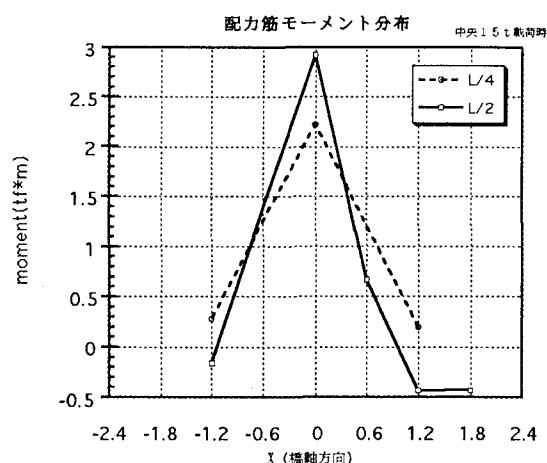
図－6 版供試体静的載荷実験



図－7 ひずみ分布より計算された M 分布

5.2 モーメント分布

版供試体中央に荷重載荷した場合のたわみは同一荷重を 1.2m 幅の梁供試体にかけた場合と比較して 1/3.7 の大きさであった。このことから版の有効幅は中央載荷に対して橋軸方向で $1.2 \times 3.7 = 4.44\text{m}$ 程度となると予測できる。一方、20 t 載荷時の版の主鉄筋方向歪み分布より ϕ 分布を求め、梁実験で得られた EI を用いて曲げモーメントの分布を計算したのが図 7 である。梁モデルでの発生モーメント 300 kN*m に対して版では最大発生モーメントが載荷点直下で 90 kN*m と $1/3.3$ に減少する。曲げに関する版の有効幅は支間中央において 3.3 m 程度と推定できる。一方、橋軸方向のモーメント分布については曲率の分布に設計計算で用いたデッキ波上側の RC の EI を乗じて求めたものを図 8 示す。



図－8 配力筋モーメント

5.3 桁との合成度合い

床版断面を見る限りでは波板合成床版が橋軸方向合成桁となるか否かは疑問である。そこで版供試体の桁直上 L/4 点に 15 t の荷重を載荷し、鋼桁のひず

み分布を調べた。(図 9 左) ひずみのレベルが非常に小さく断定は出来ないが、図 9 右側に鋼桁により保持されている曲げモーメントと実際に載荷により供試体にかかる付与モーメントを示すが、前者は後者の半分以下

であり、床版が両者の差にあたる剛性に寄与していると考えられる。

版供試体実験と並行して FEM 解析（図 10 参照）を行っており、実験結果、設計値、FEM 結果を比較し、異方性合成床版の設計データを整理している。成果は追って報告するとともに、出来れば設計手法のマニュアル化を図る考えである。

6. 設 計

異方性の強い本形式床版の設計においては、輪荷重による断面力の決定が問題となるが、その方法として例えば表 2 に示す手法が考えられ、それぞれ一長一短がある。今のところ格子解析により設計断面力を算出している。これはモデル化は多少面倒ではあるが、影響線載荷などが利用でき、設計データが比較的容易に得られるためである。しかし、モデルの格点数、載荷パターンの制約の中で実構造を再現した格子モデルを作成することは難しく、この点では FEM に劣ると考えられる。一方 FEM は実構造を反映したモデル化に適するが、断面力への換算等、設計への適用を考えると簡易なモデルにより実挙動を反映した解析が望まれる。このような問題点も踏まえ、設計に適したモデル化を行うために解析と実験結果とのキャリブレーションを実施している。現状では設計は以下の方針で進めている。1) 橋軸方向、橋軸直角方向の設計断面力を格子解析により求める。解析値の妥当性を実験結果と比較し検証する。2) 死荷重は鋼板のみに作用する前死荷重と合成断面にかかる後死荷重に分け、架設ステップ毎の応力を重ね合わせ照査を行う。3) 設計照査位置は、橋軸方向には支間中央と中間支点上、床版支間方向については支間中央と主桁直上とする。4) 主桁との結合はスタッドを採用し、スタッド本数は現行基準により決定するが、合成床版の引き抜き実験を行い耐力を確認する。(既に終了) 5) 床版の鋼コンクリート合成構造の設計は土木学会基準、ユーロコードなどを参考し、各種パラメータについて実験確認を行う。6) 疲労耐力については移動輪荷重載荷試験にて確認する。(既に終了)

表 .-2 設計活荷重曲げモーメント算出方法

		異方性	有効幅	問題点
1	道示照査モーメント	×	不要	主鉄筋方向過小評価
2	道示照査モーメント*補正	△	不要	補正係数の算出
3	1 方向性梁として計算	○	必要	橋直方向のみ

表 .-2 設計活荷重曲げモーメント算出方法

		異方性	有効幅	問題点
4	格子解析	○	必要	橋軸方向の設計、モデルの妥当性
5	FEM	○	不要	モデルの妥当性

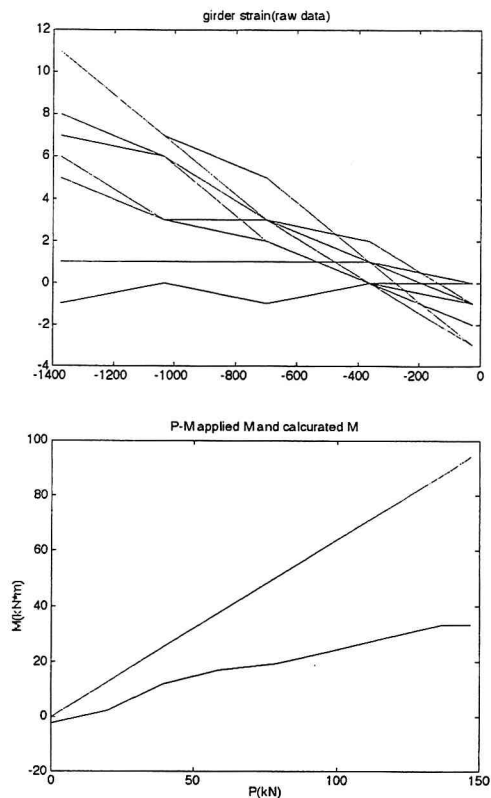
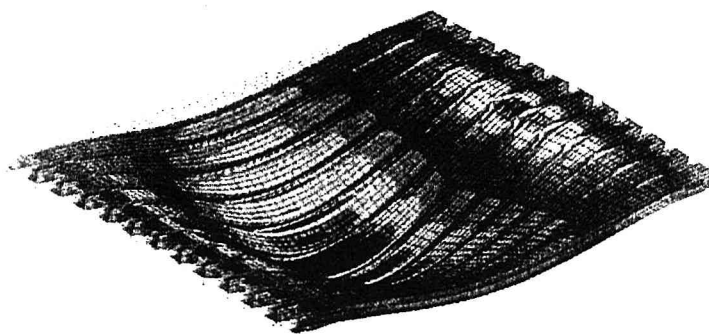


図-9 鋼桁ひずみ分布と曲げモーメント



波型合成床版 FEM モデル

7. 実 橋 適 用

本形式床版は JH 北海道高島川橋にて試験採用されることが決定され、現地工事が進められている。同橋は橋長 189 m の鋼 4 径間連続非合成桁橋で支間長は 50.9 m + 2 @ 51.7 m + 33.3 m、幅員

は10.5 mの直橋である。床版支間は5.7 mで張出が2.85 mと大きく、死荷重により全断面に負曲げが発生する。当初設計では横締めPC床版の採用が計画されていたが、波形鋼合成床版を採用し、壁高欄、鋼桁との取り合いなど細部詳細を変更した。例えば鋼桁フランジは床版横断勾配にあわせ傾斜をつけ製作している。又、床版下面が鋼板に覆われていることから雨水が滞留しないよう、床版上面には防水工を使用した。デッキ自体は本体にあわせ耐候性材を使用し促進処理を施しているが波型鋼板と鋼桁接触面は防錆を考慮して塗装を施している。デッキの設置は工場での前準備はあるものの、現場では約1週間で終了しており、型枠、支保工の省略による現場省力化が確認されている。

8. まとめ

正曲げ載荷実験の結果タイプ1 b が合成挙動に優れた高い耐力を持ち、設計荷重に対しても十分な余裕を持つことが確認できた。このタイプの合成形式床版について張出し部の負曲げに対する実験、定点繰返し載荷を行い、十分な性能を検証することができた。実験は波形鋼デッキプレート合成の実橋適用を目的としたため広範にわたり、全てをここで報告することが出来ないが、実験データの解析は現在実施中で、平成11年度実施の移動輪荷重による実験、合成床版主桁スタッド引き抜き実験の結果もこれに加えられる予定である。これらのデータを元に異方性波型デッキプレート合成床版の設計を進めており、これらの結果を機会があれば報告したいと考えている。最後に本研究は日本道路公団試験研究所と日本橋梁建設協会共同で実施されている。実験は建設機械化研究所で行われており約1年間親身に協力してくれた関係者アドバイスをいただいた各位にお礼を申し上げたい。

9. 参考文献

- (1) 道路橋示方書共通編、鋼橋編、コンクリート橋編 H8年
- (2) AASOTO LRFD Bridge design Specification SI Unit Second Edition 1998
- (3) BS5400 Part2,3 1982
- (4) 鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン、土木学会 構造工学シリーズ3
- (5) 複合構造物設計施行指針(案)、土木学会コンクリートライブラリ90
- (6) Recent Developments in Steel/Concrete Composite slabs, M.Crisinel et al/Structural Engineering International 1/96
- (7) Plastic Design of Continuous Composite Slabs, J.W.B. Stark et al/Structural Engineering International 1/96
- (8) Specifications for the Design and Construction of Composite Slabs and Commentary on Specifications for the Design and Construction of Composite Slabs, Oct1984/ASCE
- (9) Composite Slab Behavior and Strength Analysis. Part 1: Comparisons with Test Results and Parametric Analysis/B.J.Daniels and M.Crisinel
- (10) Partial-Interaction Analysis of Composite Beams with Profiled Sheetting and Non-Welded Shear Connectors, Michel Crisinel/J. Construct. Steel Reserch 15 (1990) 65-98
- (11) JSSC: JSSC 01「床鋼板構造設計施工基準」(1972年)
- (12) 日本建築学会「各種合成構造設計指針」—第編デッキプレートとコンクリートとの合成スラブ構造設計指針」(1985年)
- (13) 鋼材倶楽部：デッキプレート床構造設計・施工基準 (1987年)