

(7) 軽量充填材を用いた連続合成床版橋に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON CONTINUOUS COMPOSITE SLAB BRIDGE WITH LIGHT-WEIGHT FILLER

日野伸一\* 太田俊昭\*\* 山田岳史\*\*\* 太田貞次\*\*\*\* 上山孝徳\*\*\*\*\*

By Sin-ichi HINO, Toshiaki OHTA, Takeshi YAMADA, Teiji OHTA and Takanori UEYAMA

A new type of steel-concrete composite slab bridge has been developed for light-weight simple bridges, where the hard urethan foam plays the roll of a light-weight filler in tensile zone of the cross section and corrosion-proof material for steel, because of its gravity of 0.04, high bonding strength and water permeability.

This study aims at a further application of this composite slab system to continuous bridges. As is well known in the design of the bridges, the crack control in concrete of the intermediate support is an important matter to be considered. In order to clear the above mentioned problem, static and fatigue bending tests on two-span continuous composite slab-type girders have been carried out. In addition, the effect of the partial composition on the reduction of negative moment is discussed by using elasto-plastic analysis of the girders.

1. まえがき

近年、比較的中小スパンの橋梁を対象として開発が進められ、実用にも供されている鋼・コンクリート合成床版橋は、底鋼板に引張材と型枠を兼務させたものである。中でも、断面内引張域を軽量で非透水性の高い発泡性硬質ウレタンで置換した軽量合成床版橋<sup>1) 2)</sup>は、死荷重の軽減と底鋼板の防錆に優れた合理的橋梁形式である。一方、道路橋の連続化は、車両の走行性、騒音・振動の低減、耐震性、維持管理の省力化などの点より注目され、先の兵庫県南部地震以降、その連続化志向がさらに強まりつつある。これらのことより、鋼・コンクリート合成床版橋においても連続橋への適用拡大が望まれることとなった。

ところで、連続形式のコンクリート橋の問題点は、負曲げに伴い発生する中間支点部上面でのひび割れであり、それによる耐久性の低下である。特に、合成床版橋は底鋼板内面での腐食劣化が危惧され、中間支点部でのひび割れの制御が連続橋への最大の課題と考えられる。

そこで、著者らは、今後の合成床版橋の連続化を

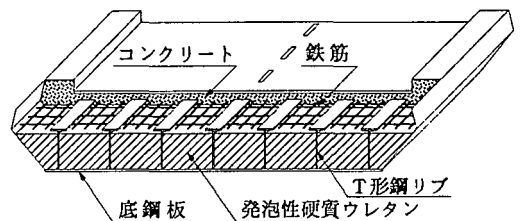


図-1 軽量充填材を用いた合成床版橋概念図

\* 工博 九州大学助教授 工学部建設都市工学科

\*\* 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科

\*\*\* 工修 九州大学大学院

\*\*\*\* 工修 (株)宮地鐵工所 技術開発部

\*\*\*\*\* (株)佐藤組 技術部

見据えた上で、注目すべき構造形式である軽量合成床版橋を連続橋へ適用することでこれらの問題に対処することとし、この新しい橋梁形式の2径間連続模型桁を作製し、負曲げ試験を行った。

本研究は、負曲げに伴う橋軸方向引張力をT形鋼リブ上フランジと補強鉄筋で負担することの妥当性と、防錆効果を期待した発泡性硬質ウレタンを中間支点部の圧縮域の鋼板・コンクリート接合面に吹付けることによっても、力学的影響が特に生じないことを検証することである。

## 2. 軽量合成床版橋とその連続化対策

### 2.1 軽量充填材を用いた単純合成床版橋の構造特性

軽量合成床版橋は断面引張域のコンクリートを発泡性硬質ウレタン(比重約0.04)で置換するため、支間が大きくなる程死荷重の軽減効果を発揮し、桁高を低く抑えることが可能な橋梁形式である。図-2に、太田らが行った単純模型桁の曲げ実験結果の一例<sup>1)</sup>を示す。図中の3種類の断面は、タイプIが硬質ウレタンを充填したものであり、タイプII、IIIは比較用の供試体で、それぞれ全断面がコンクリート、硬質ウレタン部分を中空にしたものである。これら3種類の実験結果より、

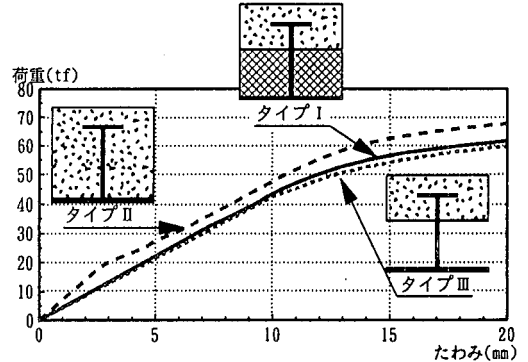


図-2 単純模型桁の荷重-たわみ曲線

①硬質ウレタンは終局耐力や曲げ剛性には寄与しないが、コンクリート打設時の型枠効果とともに、応力伝播をスムーズに行う充填材としての作用がある。②硬質ウレタンを充填することにより、残りの2タイプの2倍以上の振動減衰効果をもたらすことなどが実証されている。

### 2.2 合成床版橋の連続化の実施例

合成床版橋の単純橋としての施工例は数多く報告されているが、連続橋として施工され、公表されたものは、著者らの知る限りこれまでに名古屋高速道路・堀田ランプ桁の低桁高連続合成床版橋<sup>3)</sup>のみである。本橋の中間支点上の負曲げモーメントに対しては、橋軸方向補強鉄筋を配置し、その応力度を $1000\text{kg}/\text{cm}^2$ 以下に抑える設計上の配慮がなされている。また、単純合成床版橋の隣接隙間において、RC床版の一部を連続化させたジョイントレス工法を採用することで合成床版橋の連続化を図る研究<sup>4)</sup>も報告されている。

## 3. 2径間連続模型桁による載荷実験

### 3.1 実験概要

本実験では、中間支点部の負曲げ対策として、橋軸方向引張力をT形鋼リブの上フランジと補強鉄筋で負担させることとし、補強鉄筋量を上フランジと合わせてコンクリート有効断面積の3%とした。また、中間支点部圧縮域の鋼板・コンクリート接合面に底鋼板の防錆を期待した硬質ウレタン層を設けることによる力学的影響についても検討した。すなわち、中間支点部の全断面にコンクリートを充填したタイプAと圧縮域の鋼板・コンクリート接合面に10mmのウレタン層を吹き付けたタイプBの2種類の供試体を製作し、静的試験を各タイプ2体、200万回の繰返し載荷試験およびその後の静的試験を各タイプ1体について行った。

図-3(a),(b)にそれぞれ供試体の一般図と断面図を示す。概要は支間長200cmの連続形式で、全長420cm、高さ23cm、幅30cmである。橋軸方向圧縮力の作用する底鋼板の座屈防止に補剛縦リブを配した。また、T形鋼リブのウェブにずれ止め鉄筋(SD295A, D13)を15cm間隔でスパン直角方向に貫通させて溶接することで、T形鋼リブとコンクリートのずれ止めとした。

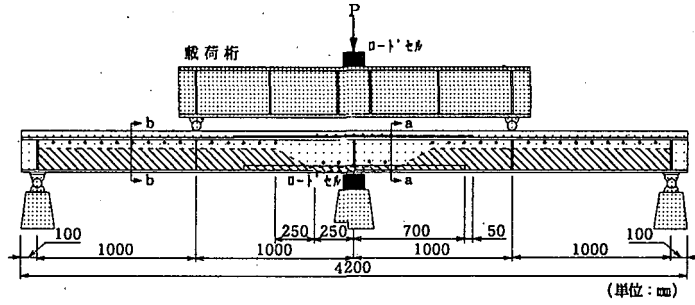


図-3(a) 載荷方法と供試体の一般図

### 3.2 静的試験の結果および考察

同一タイプの2体については、ほぼ同一の挙動を示したため、以下には各タイプの一例を示す。

図-4に、静的試験から得られた荷重と載荷点のたわみ関係を示す。実験値と計算値がほぼ一致することから、実験桁が2径間連続桁としての挙動を示しているものと考えられる。また、タイプA, B間に有意差は認められないことから、中間支点部の圧縮域接合面に硬質ウレタン薄層を設けることによる力学的影響はないものと考えられる。なお、図中の無印の実線は引張域コンクリートを無視した断面剛性を用いた弾性計算値であり、●印の実線は材料の非線形性ととも曲げおよびせん断の影響を考慮した断面分割法に基づく弾塑性解析の結果である。ただし、両解析とも供試体全長にわたり、鋼材とコンクリートの完全合成を仮定している。

表-1に示す繰返し試験後の静的試験の結果も含めた全供試体の終局耐力の一覧よりタイプA, Bに差はほとんどなく、計算値ともよく一致している。ここで、計算値①とは、破壊抵抗モーメントに到達した断面に塑性ヒンジの形成を仮定した極限解析による計算値であり、計算値②とは、前述の断面分割法を用いた弾塑性解析値である。

図-5に静的試験終了後のひび割れ分布を示す。ひび割れの進展は、荷重10tf付近で中間支点部の上面より発生し、その後中間支点部から載荷点間の上面でひび割れの発生が認められた。また、中間支点部のひび割れがほぼ下面に到達する荷重60tf以降は、桁の変形が支間側に移行した。最終的には、載荷点位置の底鋼板が降伏するとともに、コンクリート版厚の変化点から載荷点にかけてコンクリートの斜引張破壊をもって終局状態を迎えた。

図-6に中間支点部の断面内ひずみ分布を示す。この図では補強鉄筋の位置が不連続点となって、平面保持則が成立しないものの、補強鉄筋を除けば概ね平面保持則が成立する結果となった。この原因としては、

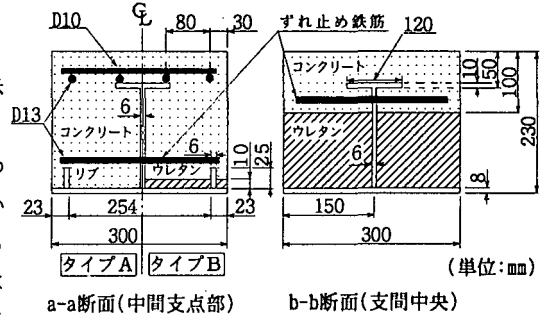


図-3(b) 供試体の断面図

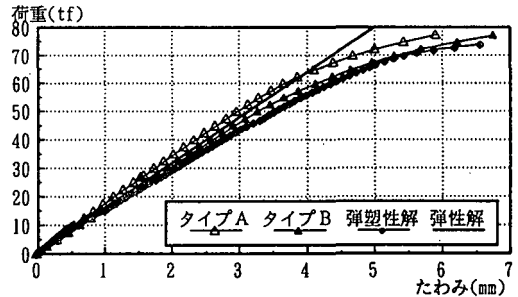


図-4 荷重-たわみ曲線

表-1 終局耐力一覧

供試体		実験値(tf)	計算値①(tf)	計算値②(tf)
タイプA	静的No.1	79.46	1.02*	1.07*
	静的No.2	79.32	78.0	74.3
	疲労後	81.33	1.04*	1.09*
タイプB	静的No.1	78.54	1.03*	1.06*
	静的No.2	78.65	76.6	74.3
	疲労後	79.76	1.04*	1.07*

\*印は計算値に対する実験値の比率を表す

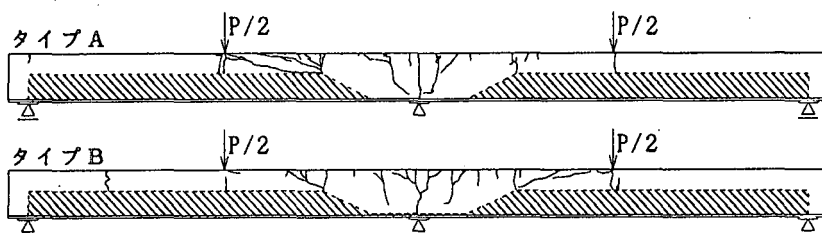


図-5 静的試験終了後のひび割れ分布

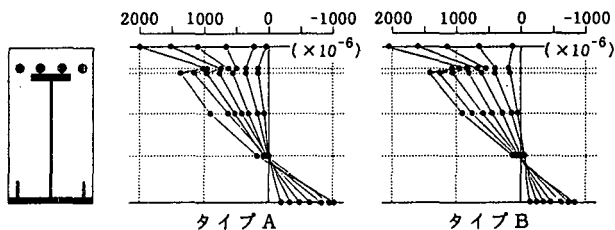


図-6 中間支点部の断面内ひずみ分布

補強鉄筋の定着が不十分であったためと推測される。ただし、その程度は顕著ではなく、全体としては完全合成として取り扱っても問題のない範囲のものであると考えられる。

### 3.3 繰返し試験後の結果および考察

タイプA, Bの2種類、各1体について振幅速度2Hzで200万回まで繰返し試験を行った。荷重条件は設計荷重相当の27.0tf(補強鉄筋の応力度:1400kgf/cm<sup>2</sup>)を最大荷重、8.0tf(同:400kgf/cm<sup>2</sup>)を最小荷重とした。

図-7に各繰返し回数時点での最大荷重載荷時における載荷点のたわみ-繰返し回数曲線を示す。これらの図より、設計荷重を最大荷重とした繰返し荷重に対して良好な変形能を有することが明らかになった。

図-8に中間支点部の各繰返し回数ごとの最大および残留ひび割れ幅-繰返し回数曲線を示し、図-9に繰返し試験終了後の静的試験による中間支点部コンクリートの荷重-ひび割れ幅曲線を静的試験結果とともに示す。図-8のタイプAにおいて、載荷回数の増加とともにひび割れ幅が大きくなり、200万回の繰返し後には0.24mmと許容ひび割れ幅を超過した。また、図-9においては、繰返し試験において過大なひび割れ幅を示した前出のタイプAを除いては許容ひび割れ幅を満足している。これらのことより、圧縮域接合面のウレタン層がひび割れを含む変形挙動に影響しないことが明らかとなった。さらに、一部供試体において許容ひび割れ幅を超過したのは、補強鉄筋の繰返し荷重による付着力の低下が原因ではないかと考えられる。

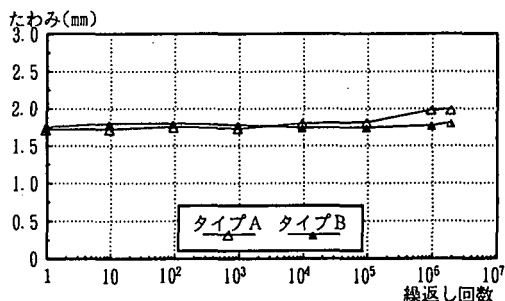


図-7 たわみ-繰返し回数曲線

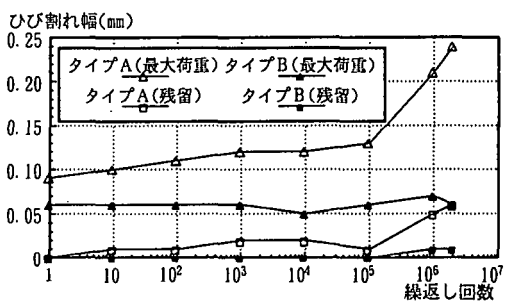


図-8 ひび割れ幅-繰返し回数曲線

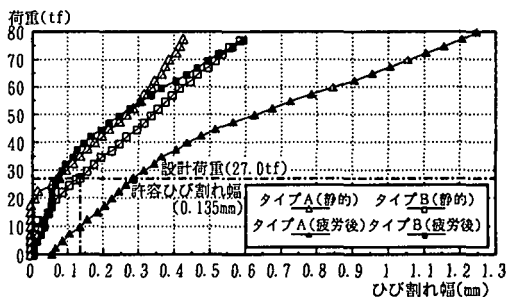


図-9 荷重-ひび割れ幅曲線

### 3.4 中間支点部の断続合成に対する考察

前述の2径間連続模型桁の試験結果では、図-9に示したとおり一部供試体において、許容ひび割れ幅を満足しないものが見られた。これに対処するには、補強鉄筋を多量に配置する方法と断続合成により中間支点部の負の曲げモーメントを低減する方法が挙げられる。ここでは、前述の供試体の負曲げ区間を非合成にすることで、中間支点部断面内のひずみ分布を弾塑性解析により明らかにし、考察を加えた。

解析モデルは、図-10に示すとおり全区間を完全合成としたタイプ1、正曲げ区間を完全合成、負曲げ区間を非合成としたタイプ2、合成区間はタイプ2と同様で非合成区間内のコンクリート床版に不連続面を設け、上部のRC床版を非合成、下部のコンクリートと鋼桁を完全合成としたタイプ3、そして中間支点部のコンクリート床版厚を支間部と同厚にし、タイプ2と同様の断続合成としたタイプ4である。

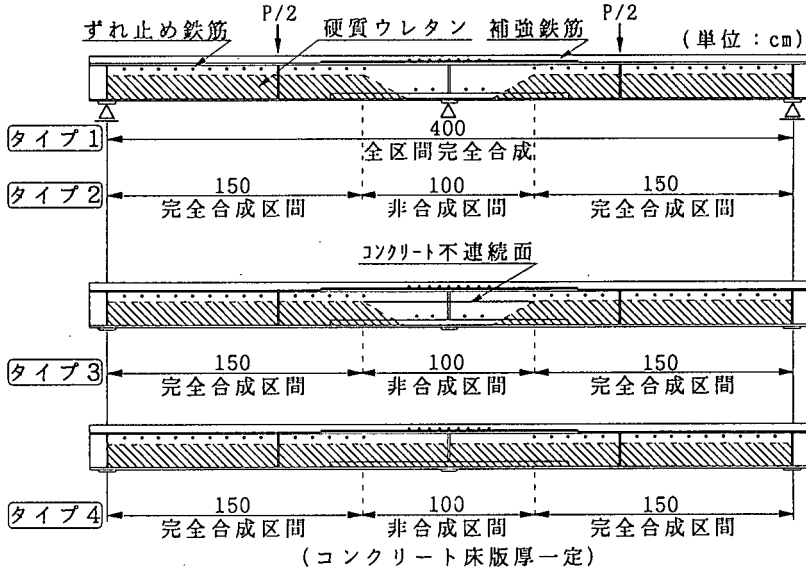


図-10 断続合成の解析モデル

図-11, 12は上述の解析モデルを対象に行った弾塑性解析の結果である。なお、両図中の( )内の数値は、タイプ1の曲げモーメントおよび曲げ剛性E Iに対する比である。以上の結果より次のことが明らかになった。

①合成床版橋では、負曲げ区間を完全合成(タイプ1)もしくは非合成(タイプ2)とすることで、断面内のひずみ分布にほとんど差異は見られない。これは非合成断面としての鋼断面とRC断面の曲げ剛性の和が、完全合成断面としての曲げ剛性とほぼ同等であり、曲げモーメント分布に両者の差がほとんど生じないためである。

②これに対して、負曲げ区間のコンクリート版厚を正曲げ区間と同様にしたタイプ4の場合には、負曲げ区間の曲げ剛性がタイプ1, 2のそれに比べて7割程度に低減され、桁橋の断続合成による効果と同様に、負の曲げモーメントとそれに伴うRC断面の引張ひずみの低減に寄与する結果となった。ただし、この場合に

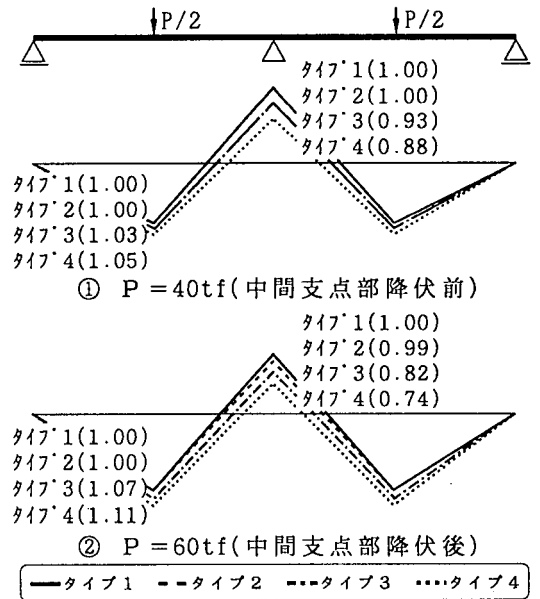


図-11 曲げモーメント分布

は圧縮応力を受ける底鋼板の局部座屈に対する配慮が必要である。また、タイプ4の中空部にコンクリートを充填し、鋼桁と合成したタイプ3では、タイプ4のひずみ分布とほとんど差異がない。さらに、タイプ1、2と同様に全断面にコンクリートを充填した合成床版橋の形式でありながら、桁橋と同様の断続合成の効果認められる。ただし、タイプ3の場合は施工性についての問題が残る。

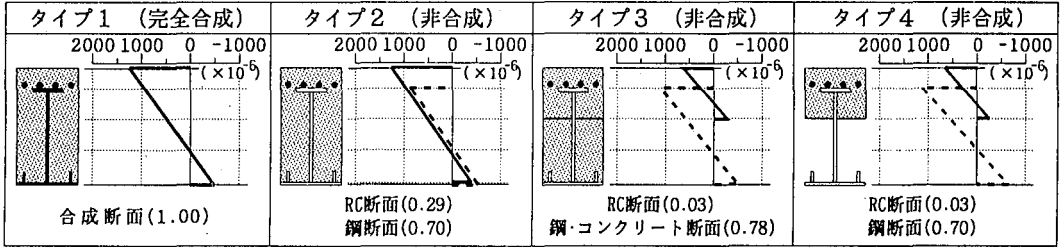


図-12 荷重40tf時の中間支点部断面内ひずみ分布

#### 4. まとめ

本研究では、まず、断面引張域の充填材として発泡性硬質ウレタンを用いた軽量合成床版橋の連続橋形式への適用拡大を目的として、2径間連続模型桁による静的・繰返し試験を行った。次に、負曲げ区間を非合成とする断続合成の概念を考慮することで、中間支点部に作用する橋軸方向引張力の低減効果について解析的検討を行った。

得られた主な結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 静的、繰返し載荷の別を問わず、2径間連続合成床版橋としての耐力および変形の挙動を示し、解析結果ともよい一致が見られた。
- (2) 中間支点部の圧縮域となる底鋼板・コンクリート接合面に硬質ウレタン薄層を設けることによる力学的影響は認められず、その有用性が示された。
- (3) 中間支点部のコンクリート上面のひび割れ幅については、繰返し試験供試体の一部に許容値を超えたものがあったが、補強鉄筋の配置に不備もあったため、ひび割れ制御に対する定量的効果についてはさらなる検討が必要である。
- (4) 断続合成の概念を適用することにより、その曲げモーメントおよび橋軸方向引張力を低減することの可能性が解析的に示されたが、施工性などについての問題が残る。

#### 【謝辞】

本実験は、九州共立大学土木工学科の試験装置を用いて行われたものである。また、本研究に際し、同松下博通教授には多数の有益な御助言を賜った。さらに、実験に対しては、九州大学建設都市工学科の手島義純技官および同大学院堂蘭信博君にご協力をいただいた。ここに、深甚なる感謝の意を表します。

#### 【参考文献】

- 1) 太田貞次, 深沢泰晴, 檜貝勇: 硬質ウレタンを充填した合成型枠橋の開発研究, 構造工学論文集, Vol. 39A, pp. 1279-1288, 1993.
- 2) 太田貞次, 高橋秀幸, 吉川薫, 深沢泰晴, 檜貝勇: 軽量充填材を使用した合成型枠橋の概要と特徴, 鋼構造年次論文報告集, 第1巻, pp. 821-828, 1993.
- 3) 深田清明, 森山正敏, 加納勇, 綿引透: 低桁高連続合成床版橋, 第2回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp. 353-358, 1989.
- 4) 田中祐人, 佐藤政勝: ジョイントレス2径間単純合成床版橋の特性, 土木学会第49回年次学術講演会(共通セッション), pp. 176-177, 1994.