

硬質ウレタンを充填した軽量合成床版橋の連続化に対する実験的検討

AN EXPERIMENTAL APPROACH FOR CONTINUITY OF
LIGHT-WEIGHT COMPOSITE SLAB BRIDGES FILLED WITH HARD URETHANE

日野伸一*、山田岳史**、太田俊昭***、太田貞次****、財津公明*****

Shin-ichi HINO, Takeshi YAMADA, Toshiaki OHTA,

Teiji OHTA and Kimiaki ZAITSU

- *工博 九州大学助教授 工学部建設都市工学科 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)
 ** 九州大学大学院 工学研究科修士課程 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)
 ***工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)
 ****工修 (株)宮地鐵工所 技術開発部 (〒103 東京都中央区日本橋小伝馬町15-18)
 ***** (株)佐藤組 技術部 (〒870 大分市舞鶴町1-7-1)

The simple supported steel-concrete composite slab bridge with hard urethane has many advantages such as light weight, high structural performance and time reduction at site. The present study aims at an application of this composite slab bridge concept to the continuous bridge. The most important problem in such a continuous composite bridge must be crack control in concrete at intermediate support, where negative bending moment applies. In this paper, we have carried out static bending test as well as fatigue test on two-span continuous composite slab girders, in order to verify effects of additional reinforcement and incomplete composition in tensile zone as well as thin urethane layer on the steel-concrete contact surface at the intermediate support.

Key Words: composite slab bridge, continuous bridge, hard urethane, negative moment

1. まえがき

近年、比較的中小スパンの単純橋を対象とした、鋼・コンクリート合成床版橋の開発が進められ、数多く実用に供せられている。図-1に示すような、断面引張域コンクリートを、軽量で非透水性に優れた発泡性硬質ウレタンで置換した軽量合成床版橋もその一種で、これまで室内実験による力学特性の解明や実橋への適用実績も報告されている^{1) 2)}。一般に、この種の合成床版橋はいずれも底鋼板が型枠と引張鋼材の役割を兼務するという構造的特徴を有する構造形式であることから、負の曲げに対しては、特に有利性を見いだせない構造となっている。しかしながら、最近の車両走行性の向上をめざした橋梁の連続化志向の中、この種の合成床版橋に対しても、その連続化への適用拡大が望まれている。

一般に、連続形式のコンクリート橋の問題点は、中間支点部で負曲げに伴い発生するコンクリート上面でのひび割れ制御である。特に、合成床版橋は、雨水などの浸入による底鋼板内面の腐食劣化が危惧される。すなわち、底鋼板の防錆とひび割れ制御が、合成床版橋を連続橋へ適用する際の最大の課題と考えられる。

そこで著者らは、硬質ウレタンを充填した軽量合成床版橋の死荷重の軽減、底鋼板への防錆効果に着目し、この新しい橋梁形式の連続橋への適用を目的とした、2径間連続模型桁による負曲げ試験を行った³⁾。

すなわち、本研究の目的は、中間支点部における負曲げに伴う橋軸方向引張力を、T形鋼の上フランジと補強鉄筋で負担することの妥当性と、さらには圧縮域となる中間支点部下面の鋼板・コンクリート接合面にも、防錆効果を期待した発泡性硬質ウレタンを吹き付けることによって、力学的問題の生じないことを検証することである。

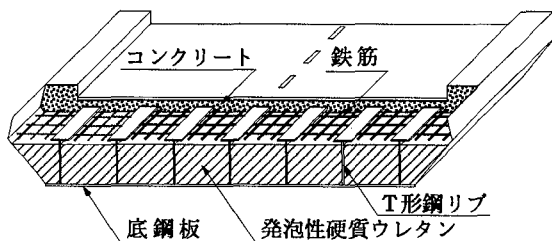


図-1 硬質ウレタンを充填した軽量合成床版橋概念図

2. 実験概要

2.1 供試体

本実験では、鋼板・コンクリート接合面に、防錆効果を期待して、硬質ウレタンを吹き付けることによる力学的影響を検討するため、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(図-2(b).左側)と、圧縮域の鋼板・コンクリート接合面に厚さ10mmのウレタン層を吹き付けたタイプB(図-2(b).右側)の2種類の供試体を製作した。静的破壊試験用に各タイプ2体、疲労試験および疲労試験後の静的破壊試験用に各タイプ1体準備した。

図-2(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200cmの2径間連続形式で、全長420cm、コンクリート版厚10cm、全高23cm、幅30cmである。

使用材料は、表-1に示すとおりである。中間支点部での底鋼板の座屈防止に、補剛縦リブ(25×6mm)を配し、さらに、載荷点および各支点位置でのウェブの座屈防止に、補剛材を溶接した。負曲げに伴う橋軸方向引張力を、T形鋼リブの上フランジと補強鉄筋で負担させるため、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。

T形鋼リブとコンクリートのずれ止めとして、接合面における付着抵抗を考慮するとともに、ずれ止め鉄筋SD295, D13を15cm間隔で圧縮域のウェブに、スパン直角方向に貫通させて溶接した。また、中間支点部では、圧縮域は支間中央部と同様のウェブに溶接したずれ止め鉄筋によって、底鋼板とコンクリートを合成し、引張域はずれ止め鉄筋を配置せず、鋼材とコンクリートの付着抵抗のみの不完全合成状態とした。

2.2 静的破壊試験

タイプA、Bの2種類の供試体について、各2体を、支間200cmの2径間連続形式でセットした。載荷方法は、図-2(a)に示すとおり、各支間中央1点線載荷とし、2.5tfの荷重増分で静的に漸増載荷した。荷重の制御は、載荷桁上のロードセルによって行い、それとともに、中間支点にもロードセルを設置し、中間支点反力の計測を行った。各荷重段階で、桁のたわみ、中間支点部のひび割れ幅、各部のひずみを計測した。なお、各測定にはそれぞれ、CDP型高感度変位計、クラックメーター、および鋼材、コンクリートの表面に貼付したワイヤストレーンゲージを使用した。

2.3 繰返し載荷試験

静的破壊試験で用いたものと同一諸元のタイプA、Bの2種類の供試体について、各1体を、図-2(a)と同様に、2径間連続形式で疲労試験を行った。試験は、設計荷重相当の27.0tfを最大荷重、8.0tfを最小荷重として、疲労性状を調べつつ、振幅速度2Hzで200万回まで繰返し載荷した。なお、最大・最小荷重は、設計計算上の中間支点部での補強鉄筋の応力度が、それぞれ許容応力度1400kgf/cm²、および死荷重載荷時の発生応力度400kgf/cm²となるように設定した。

さらに、疲労試験(200万回繰返し)終了後、桁供試体が破壊に至るまで、再度静的漸増載荷し、2.2の静的漸増破壊試験の結果と比較することにより疲労劣化の有無を検討した。

表-1 使用材料

材料	寸法および材質
底鋼板	t=8mm, (SS400)
T形鋼リブ	
上フランジ	t=10mm, (SS400)
ウェブ	t=6mm, (SS400)
中間支点部補剛縦リブ	t=6mm, (SS400)
載荷点・支点補剛材	t=6mm, (SS400)
中間支点部補強鉄筋	D13, (SD295)
配力鉄筋	D10, (SD295)
ずれ止め鉄筋	D13, (SD295)
コンクリート	f _c '=430kgf/cm ²
発泡性硬質ウレタン	f _c '=4~5kgf/cm ² (比重=0.04)

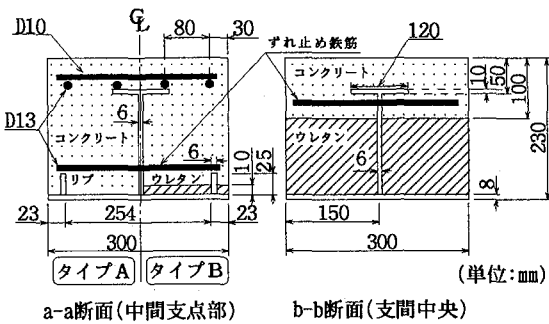


図-2(b) 供試体の断面図

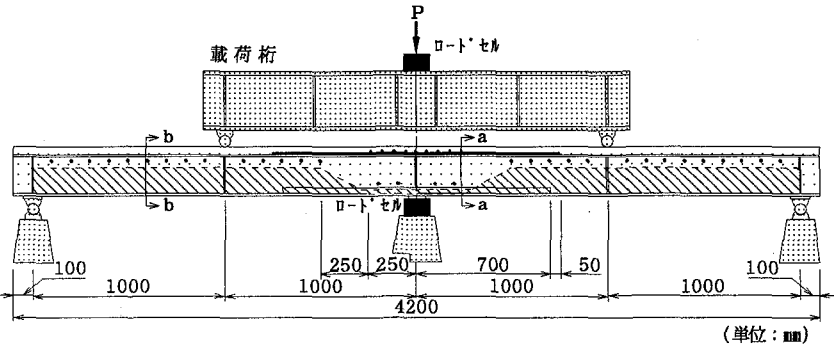


図-2(a) 供試体および載荷試験の一般図

3. 静的破壊試験

3.1 連続桁の全体挙動

タイプA、Bともに試験は各2体行ったが、同一タイプの2体については、ほぼ同一挙動を示したため、以下には、各タイプの一例を示した。

図-3および図-4に、静的漸増載荷試験から得られた荷重と中間支点反力および載荷点のたわみの関係を示す。図中、無印の実線はコンクリートの引張抵抗無視による断面剛性を用いた弾性解析値である。また、●印付きの実線は、材料非線形性とともに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。なお、両解析では、ともに中間支点部を含めて全域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。

図より、実験値と計算値が良く一致することから、実験桁がともに、全体挙動としてはほぼ完全な2径間連続桁としての挙動を示していると判断される。また、タイプA、B間の有意差は認められず、このことより、中間支点部の圧縮域接合面に硬質ウレタンの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。

図-5に、静的破壊試験後のひび割れ分布を示す。ひび割れの進展と破壊にいたる経過を示すと、以下のとおりである。目視観察によれば、荷重10tf付近で中間支点部上面よりひび割れが発生し、その後中間支点から両側の載荷点にかけて順次ひび割れが進展した。荷重60tf付近で、中間支点部のひび割れがほぼ下面まで到達する頃から次第に桁の変形は支間側に移行し、最終的には載荷点位置が曲げ降伏するとともに、コンクリート版厚の変化点から載荷点にかけて、コンクリートが斜引張破壊して、終局状態を迎えた。

表-2に、疲労試験後の静的破壊試験の結果も含めて、全供試体の終局耐力の一覧を示す。表より、タイプAと、タイプBの実験値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^{4) 5)}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。この実験値と解析値の一致は、解析に用いた仮定およびその手法の妥当性を実証するものと考えられる。

以上のことより、本実験桁の全体挙動は、桁の全域にわたる鋼・コンクリートの完全合成と、中間支点の塑性

ヒンジ形成後の曲げ破壊を仮定した解析法によって、精度よく評価できるものと考えられる。

3.2 中間支点部の変形挙動

図-6に、中間支点部の荷重-ひび割れ幅曲線を示す。この図のデータは、各供試体の最大ひび割れ幅を抽出したものである。両タイプともに、設計荷重27tf時には、コンクリート標準示方書⁴⁾より算出した許容ひび割れ幅0.135mmをほぼ満足している。また、後に示す疲労試験後の結果を合わせて考察すると、タイプA、B間の差、すなわち硬質ウレタンによる影響は特に認められない。

図-7に、底鋼板の荷重-ひずみ曲線を示す。その挙動に、タイプA、B間の有意差は認められず、中間支点部の圧縮側接合面にウレタン層を設けることによる力学的影響は特にないこと、また、底鋼板の座屈が最後まで認められず、十分なコンクリートとの合成効果が発揮されたことがわかる。

図-8に、中間支点部の補強鉄筋の荷重-ひずみ曲線を示す。実験データは、両タイプともに中間支点より6cm離れた断面における4本の補強鉄筋ひずみの内、最大ものをプロットした。先に示した耐力、各部の変形などの比較においては、実験値と解析値がよく一致していたのに対し、本図に示した補強鉄筋ひずみについては、実験値が計算値の70~80%とやや過小な結果を示した。また、定性的にも高荷重域においては、ひずみ(応力)の増加率が減少する傾向がみられた。また、図-9に示す中間支点部の断面内ひずみ分布においても、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結果を示している。

以上の原因として、中間支点部においては、ひび割れの発生位置とひずみの測定位置との関連による影響も否定できないが、主として、引張域にずれ止めを設けなかったこと、あるいは補強鉄筋の定着が不十分であったために、特に高荷重になるほど局部的な不完全合成状態を呈したものと考えられる。ただし、その程度は顕著でなく、設計上は完全合成桁として取り扱っても特に問題のない範囲のものである。なお、本実験では、中間支点部の補強鉄筋の有効性は肯定できるものの、その最適鋼材比と配筋、ならびに部分的に不完全合成とすることの有有用性については、さらに今後の検討が必要である。

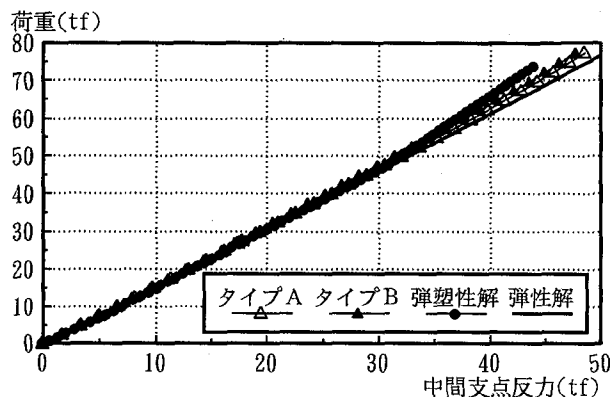


図-3 荷重-中間支点反力曲線

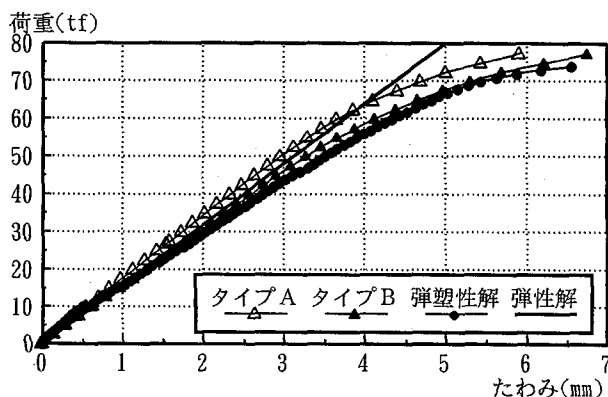


図-4 載荷点の荷重-たわみ曲線

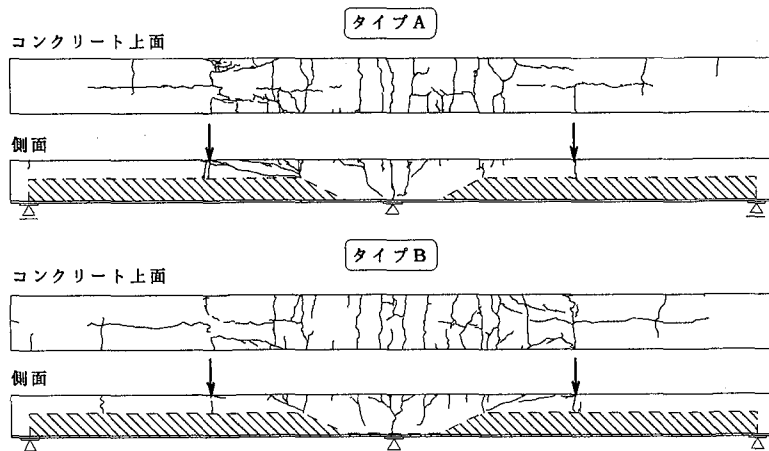


図-5 破壊後のひび割れ分布

表-2 終局耐力の一覧

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	78.0	1.02*	1.07*
	静的No.2	79.32		1.02*	1.07*
	疲労後	81.33		1.04*	1.09*
タイプB	静的No.1	78.54	76.6	1.03*	1.06*
	静的No.2	78.65		1.03*	1.06*
	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
 計算値①: 破壊抵抗曲げモーメントを導入した
 極限解析(塑性ヒンジ法)値
 計算値②: 断面分割法に基づく弾塑性はり理論による解析値

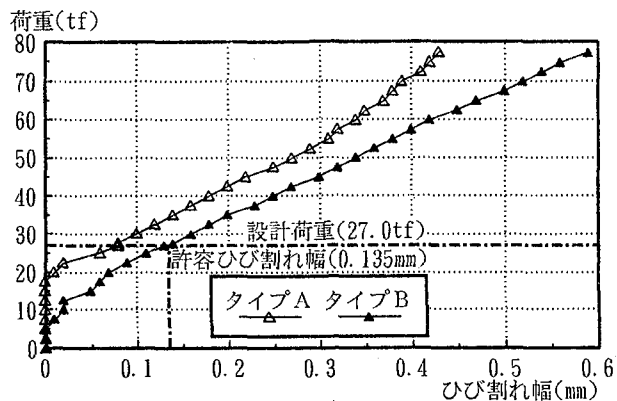


図-6 荷重-ひび割れ幅曲線

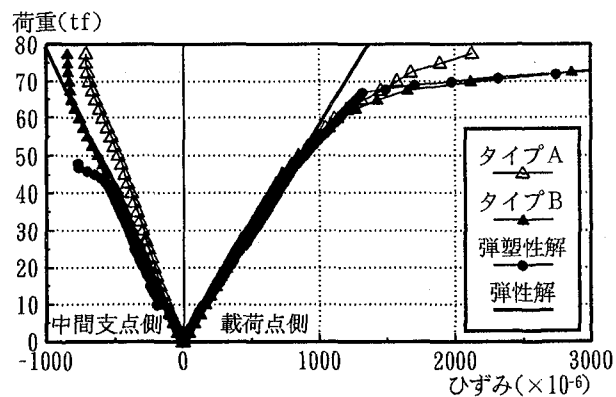


図-7 底鋼板の荷重-ひずみ曲線

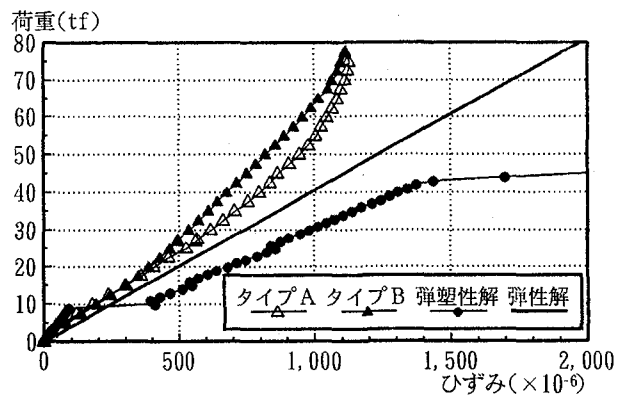


図-8 補強鉄筋の荷重-ひずみ曲線

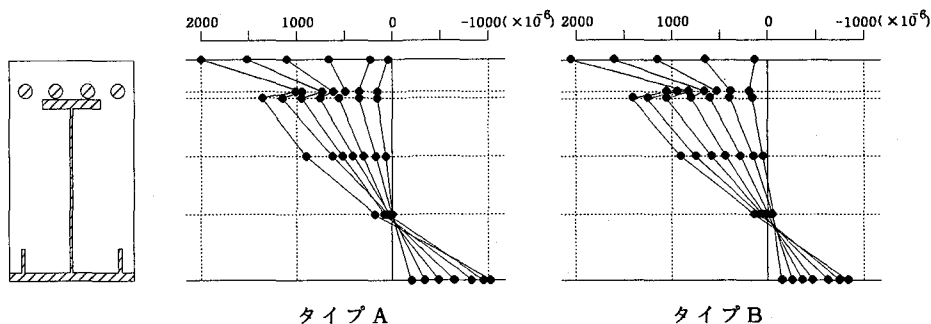


図-9 中間支点部のひずみ分布図

4. 繰返し载荷試験

4.1 疲労性状

図-10, 11に、各繰返し回数時点での最大荷重载荷時における、载荷点のたわみ、底鋼板のひずみ－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する疲労試験では全体構造としての繰返し荷重に対する変形性能の劣化は認められないことがわかる。

図-12に、中間支点部コンクリート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す。タイプAでは、疲労回数の増加とともにひび割れ幅が大きくなり、特に100万回以降は急増し、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。タイプBでは、繰返し回数にともなうひび割れ幅の増加傾向は認められない。これについては、ウレタン層の有無による影響とは考えられず、前述の中間支点部引張域における部分的なひび割れ集中、補強鉄筋やT形鋼リブとコンクリートの繰返し载荷による付着力低下、すなわち合成度の低下に起因した結果ではないかと考えられる。

4.2 疲労試験後の静的破壊試験

図-13に、疲労試験を終えた供試体の静的破壊試験から得られた結果と、3章で示した静的漸増破壊試験の結果とを比較した载荷点の荷重－たわみ曲線を示す。この図より、たわみ性状に関して、疲労試験の影響は全く認

められない。また、表-2に示す終局耐力の比較からも同様のことがいえる。

このことは、図-14に示す载荷点の底鋼板のひずみについても同様で、疲労試験の影響は認められない。これに対して、中間支点部の底鋼板には、疲労試験の影響が認められる。これは、ずれ止めの配置されていない引張域で、繰返し载荷によってT形鋼リブのフランジとコンクリートの付着切れによる合成度の低下が原因であると考えられる。

図-15に、中間支点部コンクリートの荷重－ひび割れ幅曲線を静的漸増载荷試験結果とともに示す。なお、これは各供試体に生じたひび割れのうち、最大ひび割れ幅を示したものについてプロットしたものである。図より、前述したとおり疲労試験において過大なひび割れ幅を示したタイプAを除いては許容ひび割れ幅を満足している。

以上の結果より、中間支点部の鋼板・コンクリート接合面への硬質ウレタン層の配置は、全体挙動および中間支点部の応力、変形性状に対する影響は認められないこと、また、中間支点部引張域コンクリートで、一部の供試体において許容ひび割れ幅を超過する結果を示し、その原因と考えられる補強鉄筋やT形鋼リブとコンクリートの付着力の低下を含む不完全合成度が、繰返し载荷に対してさらに低下する兆候がみられること、などが判明した。

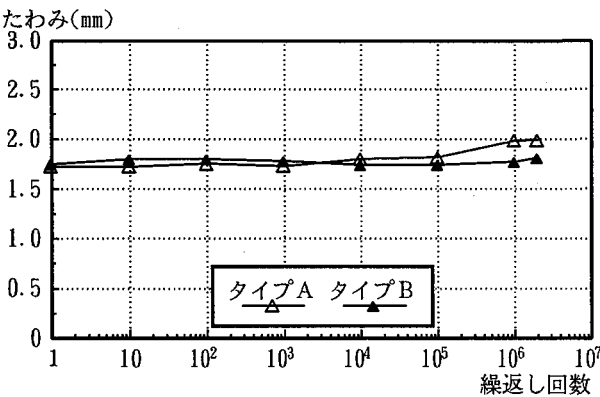


図-10 载荷点のたわみ－繰返し回数曲線

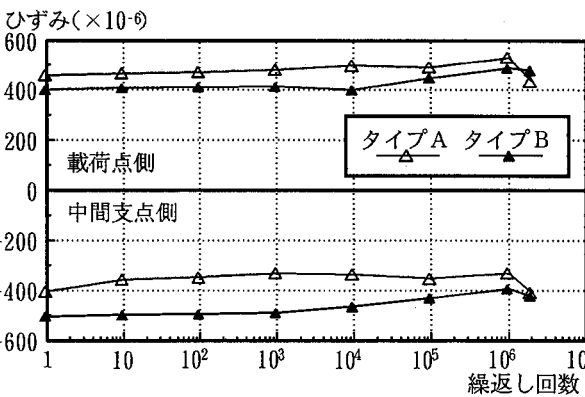


図-11 底鋼板のひずみ－繰返し回数曲線

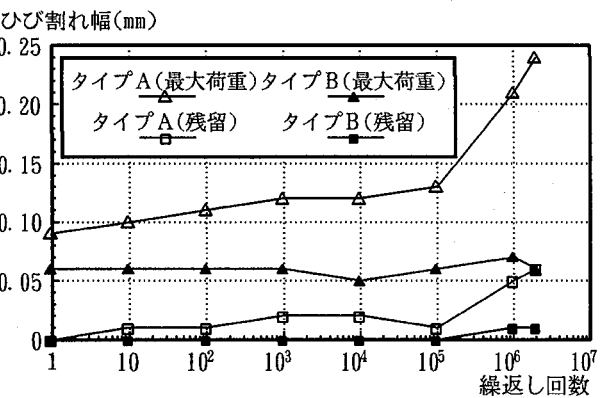


図-12 ひび割れ幅－繰返し回数曲線

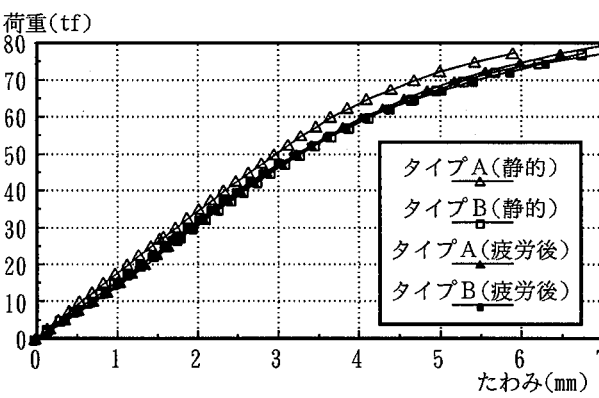


図-13 载荷点の荷重－たわみ曲線

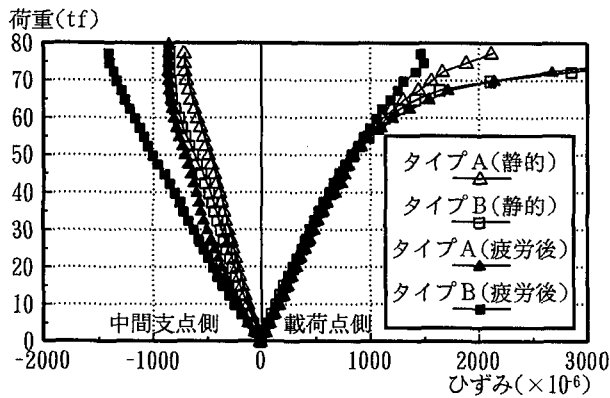


図-14 底鋼板の荷重-ひずみ曲線

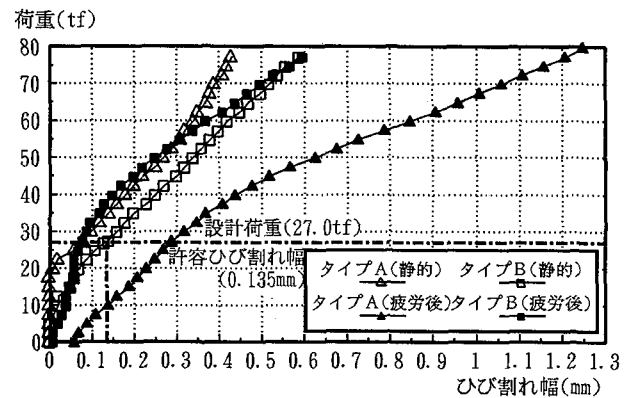


図-15 荷重-ひび割れ幅曲線

5. まとめ

本研究は、発泡性硬質ウレタンを断面引張域に充填した軽量合成床版橋の連続橋への適用を目的として、2径間連続模型桁による静的・繰返し曲げ試験を行ったものである。実験では、中間支点部の負の曲げモーメント対策として、支点部の断面全体にコンクリートを充填し、①T形鋼の上フランジと合わせてコンクリート有効断面積の3%の補強鉄筋を配置して引張力に抵抗させること、②ただし、引張域には鋼材・コンクリートの付着抵抗以外のずれ止めは設けず、不完全合成とすること、③圧縮域となる底鋼板とコンクリートの接合面にも、防錆を目的とした厚さ10mmの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検討した。得られた結果を要約すれば、次のとおりである。

- (1) 繰返し載荷の有無を問わず、本実験桁の全体挙動は、完全合成を仮定した解析値とも精度よい一致が見られるなど、2径間連続完全合成床版橋としての性状を示した。
- (2) 中間支点部では、静的漸増載荷に対しては設計荷重時における許容曲げひび割れ幅(0.135mm)を満足した。しかし、200万回疲労試験では、100万回以上の繰返し載荷に対して、一部許容値を超過した。また、断面内ひずみの平面保持則不成立の結果からも、それらの原因と考えられる中間支点部引張域における補強鉄筋やT形鋼リブとコンクリートとの付着力の低下を含む不完全合成度が、繰返し載荷に対してさらに低下したものと考えられる。
- (3) 防錆対策上、中間支点部で圧縮域となる底鋼板とコンクリート接合面に硬質ウレタンの薄層を設けても、全断面コンクリート充填の場合と比べて力学的影響はない。

以上のことから、本合成床版橋の連続橋への適用の可能性がほぼ実証された。しかし、中間支点部における最適補強鋼材比および合成度については、今後さらに検討が必要である。

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、多数の有益なご助言を賜った。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多大の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、高橋秀幸ほか：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) 山田岳史、太田俊昭ほか：軽量充填材を用いた鋼・コンクリート合成床版橋の連続化への適用に関する研究、土木学会第49回年次学術講演概要集(共通セッション)、pp. 174-175、1994。
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書(設計編)、pp. 50-55、1991。
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説(Ⅲコンクリート橋編)、1994。

(1994年9月14日受付)