

突起付き T 形鋼ジベル合成床版の連続合成桁への適用性検証

Applicability of composite slab using “deformed flange T-shapes” to continuous composite steel girder bridges

高須賀丈広*, 末田明**, 田中祐人***, 上村明弘****, 長井正嗣*****

Takehiro TAKASUKA ,Akira SUEDA ,Sachito TANAKA ,Akihiro UEMURA, Masatsugu NAGAI

- * 工修 川崎製鉄 (株) 橋梁・鉄構事業部 橋梁・鋼構造技術部 (〒260-0835 千葉市中央区川崎町 1 番地)
- ** 川崎製鉄 (株) 橋梁・鉄構事業部 橋梁・鋼構造技術部 (〒260-0835 千葉市中央区川崎町 1 番地)
- *** 工博 川崎製鉄 (株) 橋梁・鉄構事業部 橋梁・鋼構造技術部 (〒260-0835 千葉市中央区川崎町 1 番地)
- **** 川崎製鉄 (株) 橋梁・鉄構事業部 橋梁・鋼構造技術部 (〒111-0051 東京都台東区蔵前 2-17-4)
- ***** 工博 長岡技術科学大学 工学部環境・建設系 (〒940-2188 長岡市上富岡町 1603-1)

In order to provide more economical and durable slab for bridges, we developed new type composite slab. It consists of concrete and steel members, such as bottom plate, deformed bar and” deformed flange T-shapes (DFT)“. The DFT ,which is installed on the bottom plate in the transverse direction at a distance of 500 millimeters ,has lateral protrusions on the outer surface of flange for the purpose of increasing bond strength between steel and concrete.

The newly developed composite slab has two joint types. One is high strength bolt joint, and the other is reinforcing joint. We used these joints for connecting the steel bottom plate in the composite slab, and examined the applicability to continuous composite steel girder bridges. The specimen for the examination was a scale model of an intermediate support in continuous composite girder bridge, which was subjected to the hogging bending moment. The experimental result shows that this composite slab has better performance under the hogging bending moment compared to that of conventional reinforced concrete slab and prestressed concrete slab. Furthermore, it is found, with this system, that the crack width can be controlled.

Key words: composite slab, deformed flange T-shapes, applicability to composite steel girder bridge, crack width control

1. はじめに

突起付き T 形鋼ジベル合成床版は、圧延段階においてフランジに突起をつけた H 形鋼より切断した T 形鋼 (以下 DFT と称す) をずれ止め機能のある応力部材として使用する合成床版であり、図-1 に示すように、底鋼板、側鋼板、DFT よりなるプレファブ部材と、鉄筋および現場打ちコンクリートより構成される極めてシンプルな構造となっている。また、本合成床版は、施工性に優れるとともにたわみ剛性が大きく、少数主桁橋、開断面箱桁橋等の合理化

橋梁用床版として長支間化対応とともに軽量化が可能であるという特長を有する。本合成床版の実用化へ向け、現在までに静的載荷による版曲げ試験で設計法の妥当性および終局状態の確認を行い、さらに底鋼板パネル同士を高力ボルト (以下 HTB と称す) で連結した試験体の輪荷重走行試験により PC 床版と同等以上の疲労耐久性を有することを確認してきた^{1)~4)}。

本合成床版の実用化にあたっては、上記性能確認以外に負の曲げモーメントが発生する部分において、コンクリートのひび割れ制御が可能な構造であることを検証する必要がある。そこで本論文では、連続合成桁の中間支点に生ずる負の曲げモーメントに対して、中立軸の移動や床版のひび割れなど、本合成床版の構造特性を明らかにするため実施した負曲げ実験結果について報告する。

2. 突起付き T 形鋼ジベル合成床版の構造概要

本合成床版は図-1 に示すとおり、主要部材である DFT、底鋼板、側鋼板、鉄筋からなる鋼部材とコンクリートより

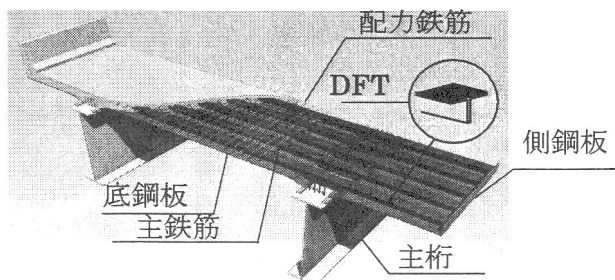


図-1 突起付 T 形鋼ジベル合成床版

構成され、鉄筋を除く鋼部材をあらかじめ工場においてパネル製作し、パネルの現地架設及び連結、鉄筋の配筋及びコンクリート打設を経て床版が形成される。

本合成床版は下記の特長を有する。

- ①DFT ジベルによりコンクリートと一体化し、合成断面を構成する。
- ②現場施工性に優れる。
- ③たわみ剛性が大きく、床版支間 6m 以上の長支間への対応が容易である。

合成構造用鋼材である DFT を用いることによりこれまで合成床版で必要であった主部材ウェブの穴あけ加工や底鋼板へのスタッドジベルの溶接等が不要となることから、床版としての構造をより単純化できるとともに、工場での製作工数の削減が可能となる。また、主部材方向の鉄筋量の大幅な削減及びこれに伴う現場の省力化も図れること、さらに高剛性な DFT によってパネル単体でも十分な曲げ剛性を有するためコンクリート打設前でも重機の走行が可能であるなど、製作・施工の両面にわたり経済性の向上が期待できる構造形式である。

3. 連続合成桁への適用性検証

突起付き T 形鋼ジベル合成床版の連続合成桁への適用可能性を探るべく、中間支点部の負曲げを静的曲げ試験により再現し、鋼桁部・床版部の挙動を把握するとともに床

版コンクリートのひび割れ分散性を検証した。

なお、本試験は(社)日本橋梁建設協会の共同研究として実施された試験方法に準じて行った⁵⁾。

3.1 試験概要

3.1.1 試験体概要

本試験は連続合成桁における合成床版の負曲げ域での挙動把握を目的としているため、試験は図-2 a)に示す3 径間連続開断面箱桁の中間支点近傍 11m を対象とした⁵⁾。試験体の床版厚は最小床版厚規定から、また床版幅については全幅が有効となるよう床版厚 260mm、床版幅 1200mm とし、主桁と床版はスタッドジベルを用いて合成した。本合成床版パネルは、突起付き T 形鋼ジベル(DFT-100×204×8×12)を橋軸直角方向に 500mm 間隔で配置し、板厚 8mm の底鋼板に隅肉溶接することで形成される。パネル寸法は橋軸方向 2500mm であり、各パネル間は後述の継手方式で接続される。試験体は、まず床版パネルを桁上に配置後パネル同士を各継手方式で接続し、主鉄筋 D22 を DFT 間中央部に 500mm 間隔、橋軸方向の配筋筋 D22 を 100mm 間隔で配筋した後、表-1 の配合表に示す呼び強度 30N/mm² の膨張コンクリート(膨張材: 30kg/m³)を打設し、製作した。また、上側配筋筋の鉄筋量は、ひび割れ幅の制御を目的に、鉄筋比として 1.0%以上を確保するように計画した。

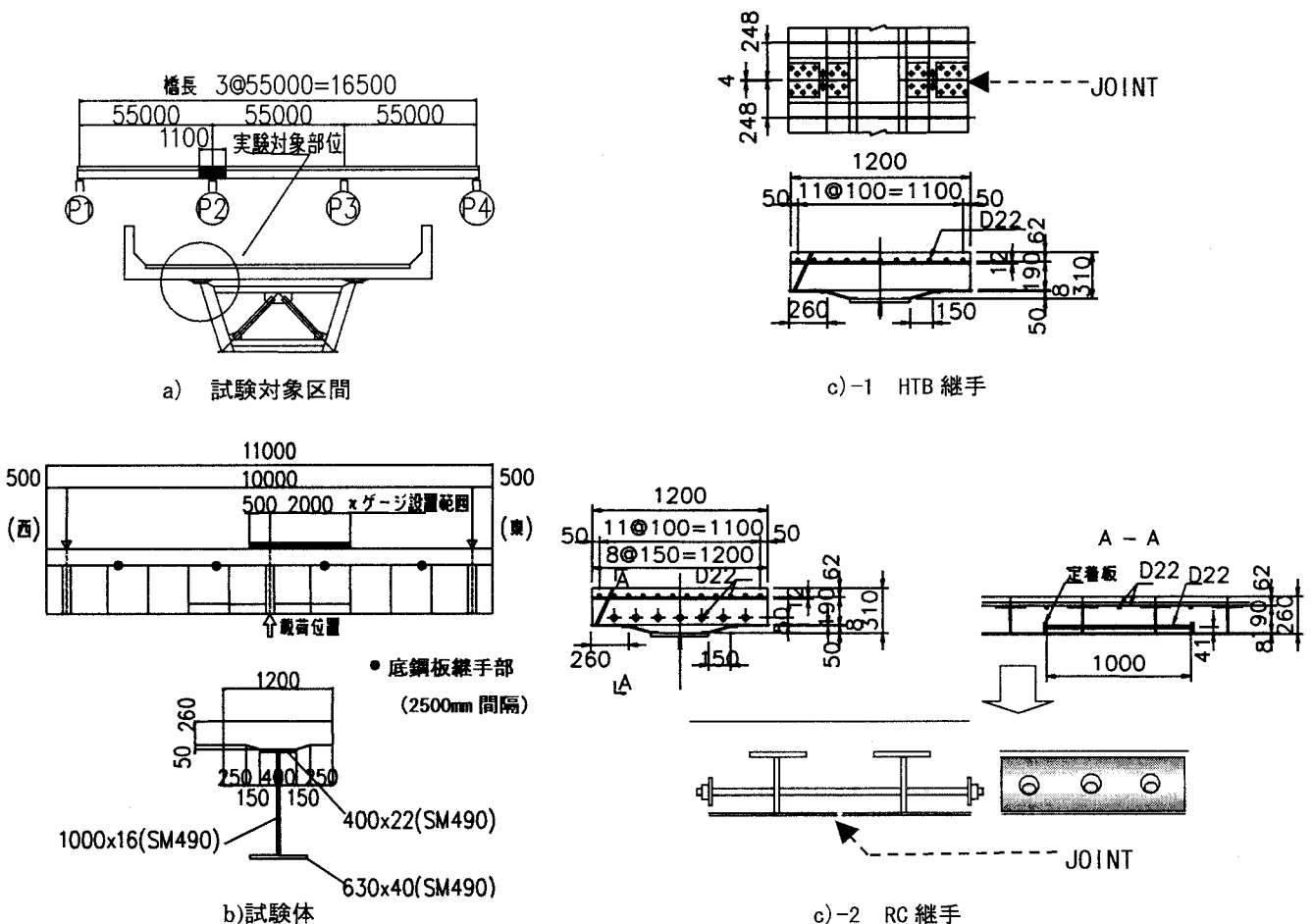


図-2 試験対象と試験体詳細

表-1 示方配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメ ント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	混和材
20	8±2.5	50	4.5±1.0	44.4	165	300	790	1021	1.073	30

本試験体で採用した鋼パネル間継手方式について以下詳細に述べる。(図-2 c) -1 ~ c) -2 参照)

(1) HTB 継手試験体

HTB 継手方式は、底鋼板に橋軸方向に作用する断面力を1面摩擦接合により確実に伝達する継手方式である。この方式は、設計上、底鋼板を橋軸方向の設計断面として考慮できる信頼性の高い方式であるが、一般的には現場での施工性に劣る。

(2) RC 継手試験体

RC 継手方式は底鋼板の橋軸方向に作用する断面力を継手鉄筋に定着された定着板により機械的に伝達する継手方式である。継手鉄筋の定着長は日本道路公団基準では鉄筋径の30倍必要である。しかし、DFT ウェブ間隔が500mmであることを考慮するとその定着長を確保するためには、継手位置から片側最低2本のDFTウェブに孔明けし、継手筋を貫通させる必要があり、製作製・施工性を損なう構造となってしまう。そこで、DFTの孔明け数を最小化し、さらに現場配筋の簡略化を図るため、継手鉄筋長を1000mm(継手位置から片側500mm)とし、定着長不足は、継手鉄筋の端部に定着板を設け、補うこととした。

なお、本継手方式は底鋼板が連続していないため、底鋼板を設計断面として考慮することは出来ない。そこで、設計上は底鋼板を断面として算定せず、継手鉄筋が橋軸方向全長に渡って連続していると仮定し、その本数は底鋼板の橋軸方向に作用する断面力により算出する。定着板の寸法および板厚は、配力筋降伏時(343N/mm²)のコンクリートと定着板の支圧力およびナットを固定端と考えた場合のナットの外側にある定着板の片持ち曲げモーメントにより決定することとした。今回のRC継手試験体では、継手鉄筋D22を150mm間隔で7本配置し、定着板は50mm×16mm×50mm(SM400A)を採用した。

3.1.2 試験方法と計測項目

試験は、中間支点部の負曲げ状態を再現できるように、図-3 および写真-1 に示すように反転させた試験体を支間10mで単純支持し、支間中央の鋼桁下フランジに静的に載荷することにより実施した。載荷荷重は、図-4の模式図に示すように床版ひび割れ発生荷重(Aの状態:配力筋応力15N/mm²)、配力筋の発生応力が設計荷重である98N/mm²になる荷重(Bの状態)までそれぞれ1回づつ載荷し、配力筋応力が許容応力度137N/mm²に達する荷重(Cの状態)を3回繰り返した後、配力筋降伏(Dの状態)、鋼桁降伏(Eの状態)を経て破壊まで単調に増加した。主な計測項目は表-2に示すとおりであり、ひび割れ幅

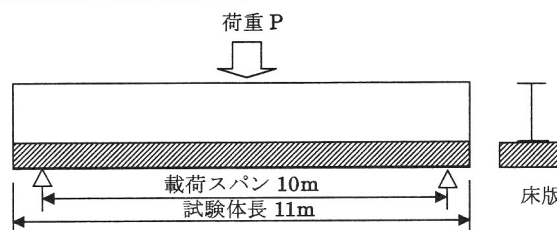


図-3 試験概要

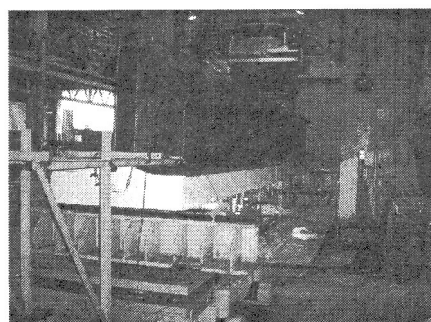
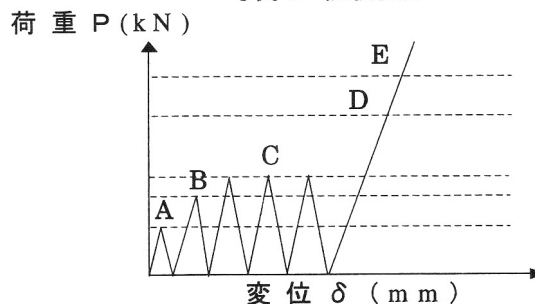


写真-1 試験状況



	A:ひび割れ荷重	B:設計荷重	C:鉄筋許容応力度荷重	D:配力筋降伏荷重	E:鋼桁降伏荷重
HTB継手	300	661	925	2314	3648
RC継手	300	650	910	2270	3000

図-4 載荷ステップ

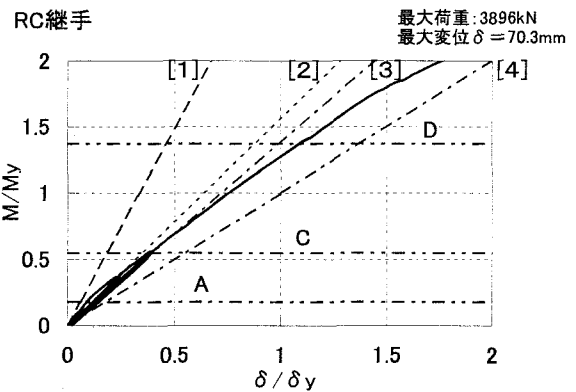
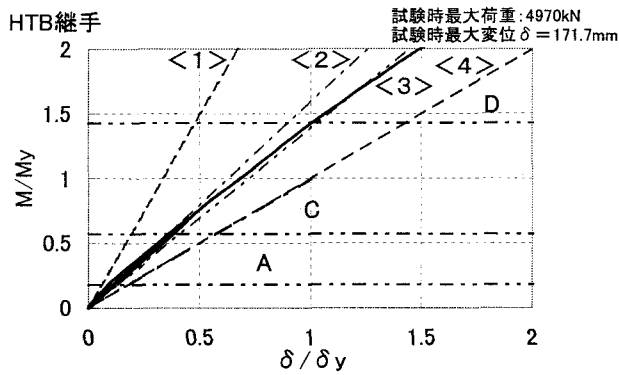
表-2 計測項目

荷重	変位	ひずみ	その他
載荷荷重	・鉛直変位	・主桁ひずみ	・床版ひび割れ幅
	・継手開閉量	・底鋼板ひずみ	・床版ひび割れ分布
		・配力筋ひずみ	
		・DFTひずみ	
		・添接板ひずみ	
		・継手筋ひずみ	

については、標点距離100mmのπゲージにより計測した。πゲージは、図-2 b)に示す2.5mの範囲に設置することとし、試験体中央から片側500mmの範囲に5個、反対側2mの範囲に20個の合計25個を取り付け、2.5mの計測範囲内に発生したひび割れを全て検出できるようにした。

3.2 試験結果

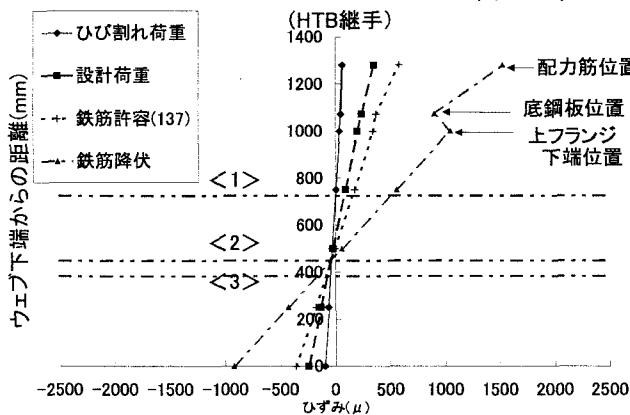
HTB継手方式、RC継手方式を採用した場合の突起付きT形鋼ジベル合成床版の載荷位置におけるモーメント-変位



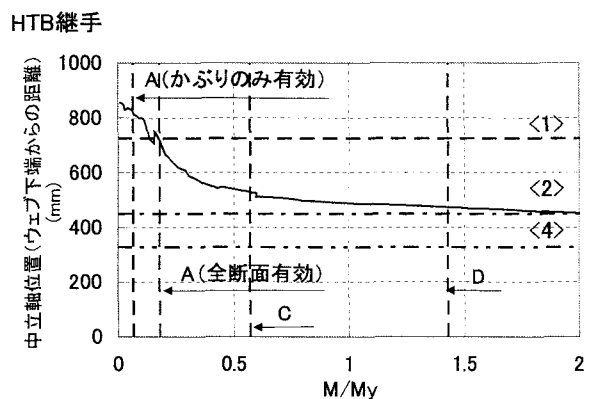
- <1>鋼桁+コンクリート
- <2>鋼桁+配力筋+底鋼板
- <3>鋼桁+配力筋
- <4>鋼桁

- [1]鋼桁+コンクリート
- [2]鋼桁+配力筋+継手筋
- [3]鋼桁+配力筋
- [4]鋼桁

図-5 たわみとモーメントの関係

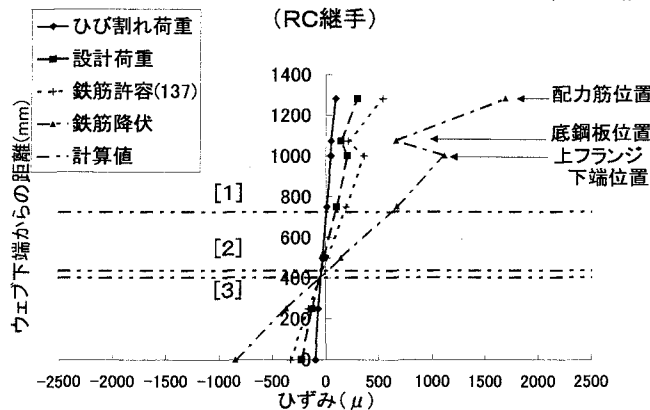


a) ひずみ分布

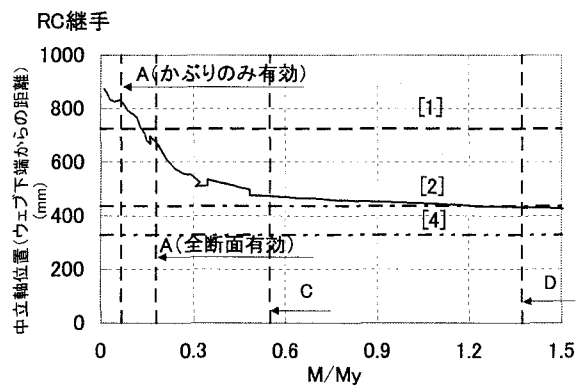


b) 中立軸の移動

A) HTB 継手方式



a) ひずみ分布



b) 中立軸の移動

B) RC 継手方式

図-6 各継手における中立軸の移動

関係を図-5に示す。同図中、縦軸は荷重位置（支間中央）の曲げモーメント比 M/My を、横軸はその際の荷重点位置のたわみ比 δ/δ_y を表す。なお、 My 、 δ_y はそれぞれ鋼桁断面のみを考えた場合の鋼桁上フランジ降伏モーメントと降伏変位を表し、 M 、 δ は試験体の荷重位置での曲げモーメント及び変位を表す。また、仮定断面の妥当性を検証するため、荷重荷重点近傍（荷重点から700mm離れた位置）における断面内のひずみ分布（配力筋、底鋼板、鋼桁のひずみ分布）および中立軸位置の変化を図-6に示す。図-5、

図-6中の記号<1>~<4>および[1]~[4]は、図-5では各仮定断面におけるモーメント-変位関係を表し、図-6では各仮定断面の中立軸位置を表す。A~Eは図-4に示した各荷重段階を表す。図-5から、HTB継手試験体およびRC継手試験体ともひび割れが発生する荷重までは鋼桁+コンクリート断面のモーメント-変位曲線に漸近し、その後ひび割れによる剛度低下により、次第にモーメント-変位曲線の勾配が緩やかとなることが分かる。また、図-6のb)から両試験体とも配力筋降伏時の荷重（状態D）までは、設

計で仮定した断面以上の曲げ剛性を有していることが確認でき、設計で仮定した断面は安全側となることが分かる。

底鋼板のひずみについては図-6 に示すように、HTB 継手では配力筋降伏時、RC 継手では鉄筋応力 98N/mm² 以上で平面保持則より小さな値をとることが分かる。この結果から、HTB 継手では、設計荷重レベルでは底鋼板も断面として仮定できることを検証できた。一方、RC 継手では、底鋼板の継手部を設計上連続させていないため、荷重初期段階から底鋼板ひずみが平面保持理論より小さな値をとるものと推察される。

初期ひび割れ荷重は通常、全断面有効と考えた場合の床版上縁の応力度がコンクリートの引張強度となる時の荷重として算定されるが、本合成床版は DFT が橋軸直角方向に配置されているため、コンクリートの橋軸方向引張抵抗断面積が DFT 高さ分だけ減少するとも考えられる。そこで、かぶりコンクリートのみ有効と考えた場合と全断面有効とした場合を図-6 の中立軸の移動図中で比較した。その結果、中立軸が下降し、断面剛度が低下し始める位置は両試験体ともかぶりコンクリートのみ有効の場合と全断面有効の場合の間である。よって本合成床版は、かぶりコンクリートのみ有効と考えた断面により、ひび割れ発生荷重を安全側に推定できることが判明した。

各継手試験体の合成桁としての曲げ剛性は、載荷点位置から 700mm 離れた位置での中立軸位置の変化を示した図-7 により、前述の C(配力筋許容応力度)の荷重条件では、

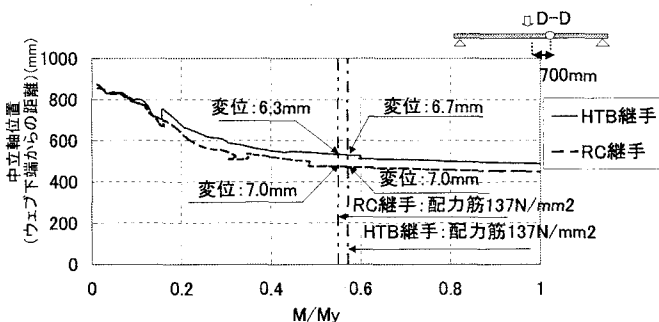


図-7 HTB 継手と RC 継手の剛性比較

表-3 中立軸位置の比較 (配力筋応力 137N/mm²)

配力筋応力 (137N/mm ²)	ウェブ下端から中立軸までの距離(実験値)	ウェブ下端から中立軸までの距離(設計値)
RC床版	474mm	426mm
KCSD HTB継手	511mm	449mm
RC継手	474mm	437mm

底鋼板を断面として仮定できる HTB 継手方式の方が RC 継手方式より約 5%程度高い剛性を有している。また、中立軸の設計値と実験値を比較した結果 (表-3 参照)、実験値の中立軸は全試験体において設計値より床版側にあり、床版コンクリートが剛性に寄与していることが分かる。さらに表-3 から、両継手方式とも C の荷重状態において、中立軸は RC 床版試験体と同等もしくは床版に近い位置にあり、RC 床版を有する合成桁と同等以上の性能を有することが確認できる。

なお、両試験体とも鋼桁の降伏時においても破壊には至

らなかった。

3.2.2 ひび割れ幅とひび割れ間隔

図-8 に配力筋応力が許容応力度時の鉄筋比と平均ひび割れ間隔・平均ひび割れ幅の関係を示す。本図中の他の合成床版試験結果および RC 床版試験結果は、(社)日本橋梁建設協会の共同研究によって得られた結果⁵⁾である。図中△、□は本合成床版を、◆印は共同研究合成床版を、●印は RC 床版を示す。平均ひび割れ間隔はπゲージを設置した 2500mm をその範囲に発生したひび割れ本数で除した値で評価している。ひび割れ幅は、各πゲージ位置における発生モーメントが等価な状態で評価する必要がある。そこで、πゲージ 5 個を 1 グループとして、各グループの中心の配力筋応力が設計上許容応力度になるときの荷重に対するひび割れ幅を示す。また本床版の鉄筋比はひび割れに影響を及ぼす上側配力筋断面積に対して算定した。

平均ひび割れ間隔は、HTB 継手方式が 210mm、RC 継手方式が 180mm であったことから、RC 継手方式のひび割れ分散性が 15%程度優れていることが分かった。これは、HTB 継手方式ではほぼ DFT フランジ端位置ごと (DFT フランジ幅=204mm) にひび割れが発生しているのに対し、RC 継手方式では DFT フランジ端に加え主鉄筋位置にもひび割れが発生しているためである。このことから本合成床版におけるひび割れ間隔は、鉄筋比に拠らず、形鋼配置の影響が支配的であることが明らかになった。

平均ひび割れ幅は、HTB 継手方式が 0.22mm、RC 継手方式が 0.12mm であった。RC 床版試験体の試験結果と比較すると、鉄筋比が 1.4%の HTB 継手試験体と鉄筋比 2.2%の RC 床版試験体の平均ひび割れ幅がほぼ等しくなっている。これは、RC 床版試験体と HTB 継手試験体のひび割れ間隔がほぼ等しく、かつ上側配力筋の鉄筋量がほぼ等しいからであると考えられる。RC 継手試験体は、RC 床版試験

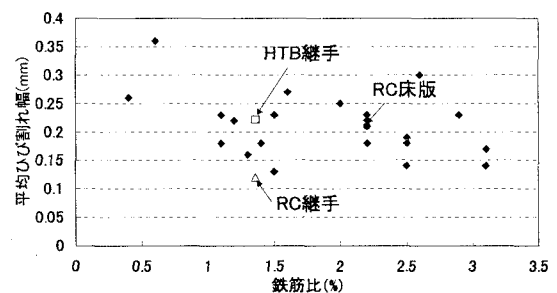
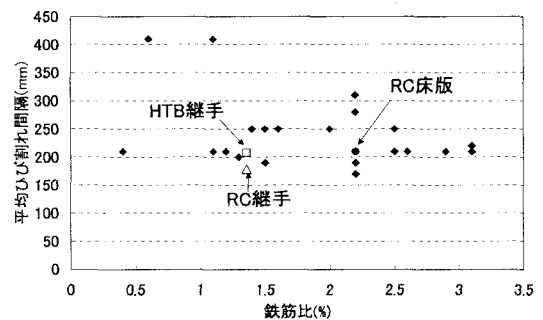


図-8 鉄筋比とひび割れ間隔/ひび割れ幅

体より鉄筋比が小さいが、ひび割れ幅は小さくなっている。これは RC 継手方式が形鋼位置及び主鉄筋位置からひび割れを発生させることが可能であること、つまり、優れたひび割れ分散性を有することに起因する。以上から、本床版は上側配力鉄筋量でひび割れ制御が可能であると言える。

次に、ひび割れ幅の試験結果を土木学会式⁶⁾および Hanswille の提案するひび割れ幅の理論式^{7),8)}と比較した。その結果を図-9 に示す。なお、本合成床版は膨張コンクリートを使用しているため乾燥収縮ひずみは見込まないこととした。また、図中の■印は平均ひび割れ幅を、▲印は最大ひび割れ幅を表す。土木学会式はコンクリート構造物全般の適用を考慮しており、ひび割れ発生後は新たなひび割れは発生せず、ひび割れ幅のみ進展すると仮定している。また tension stiffening 効果を考慮せず、一般的にひび割れ幅の最大値を示す。Hanswille 式はコンクリートのひび割れによる剛性の低下を考慮した上で作用する負曲げモーメントを鋼桁とコンクリートに分担させる分担断面力法である。ひび割れ幅を比較した結果、両継手とも最大ひび割れ幅は Hanswille 式から算定される理論値の 1.5 倍とほぼ一致し、土木学会式から求められるひび割れ幅の許容値よりも大きな値になった。ここで、最大ひび割れ幅を Hanswille 式から算定される理論値の 1.5 倍と比較したのは Hanswille 式から算定されるひび割れ幅は平均値を示し、ひび割れ幅の最小値及び最大値はこの 0.5~1.5 倍に収まることによる^{7),8)}。

一方、平均ひび割れ幅については HTB 継手方式での実験値は Hanswille の理論値にほぼ漸近し、RC 継手方式での実験値は Hanswille の理論値より小さな値となった。RC 継手方式の平均ひび割れ幅が理論値以下となった理由は、RC 継手のひび割れ分散性が HTB 継手より優れているためと推察される。今後、本合成床版におけるひび割れ幅について、ひび割れ間隔の影響及び、継手方式による応力伝達機構の差異などに着目し、検証する必要があると考える。

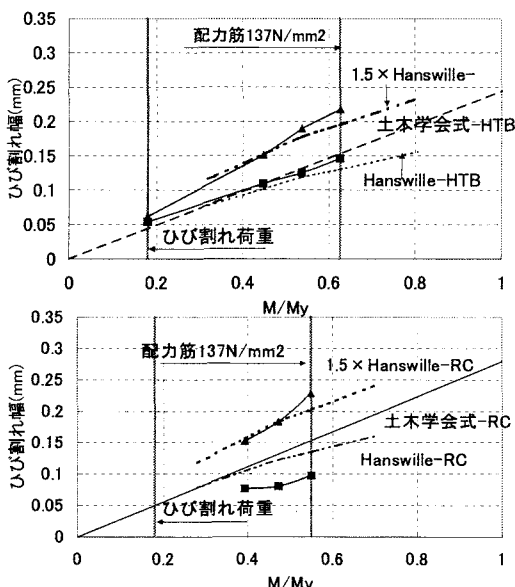


図-9 ひび割れ幅の検証

以上の結果から、本合成床版は継手方式によらず良好なひび割れ制御性能を有しており、そのひび割れ間隔は形鋼配置に拠り、ひび割れ幅は形鋼配置によるひび割れ間隔を考慮した上で、上側配力筋鉄筋量を調整することによって制御することが可能であることが確認できた。

4. まとめ

突起付き T 形鋼ジベル合成床版の負曲げ載荷試験から得られた知見を以下にまとめる。

- ① 本合成床版は、配力筋降伏時まで設計仮定断面 (HTB : 鋼桁+底鋼板+配力筋, RC : 鋼桁+継手鉄筋+配力筋) を保持しており、設計法の妥当性を確認した。
- ② 本合成床版の設計荷重時におけるひび割れ幅は 0.2mm 程度であり、RC 床版と同等の良好なひび割れ制御性能を有していることを確認した。またひび割れ間隔は形鋼配置に拠ること、ひび割れ幅はひび割れ間隔と上側配力鉄筋量により制御可能であることを確認した。
- ③ HTB 継手方式では、最大・平均ひび割れ幅はそれぞれ Hanswille 式の 1.5 倍、Hanswille 式とほぼ良い一致を示した。一方、RC 継手の最大ひび割れ幅は Hanswille 式の 1.5 倍とほぼ良い一致を示し、平均ひび割れ幅は Hanswille の理論値以下となった。
- ④ 本合成床版は連続合成桁の床版としての要求性能を満足し、その適用が可能であることを確認した。

【参考文献】

- 1) 末田明, 田中祐人, 上村明弘 : 突起付き T 形鋼ジベル合成床版の構造特性と疲労耐久性, 鋼構造年次論文集, 第 10 巻, pp.157-164, 2002 年 11 月
- 2) 田中祐人, 末田明, 上村明弘 : 突起付き T 形鋼ジベルを用いた合成床版の輪荷重走行, 土木学会第 57 回年次学術講演会, pp.217-218, 2002 年 9 月
- 3) 田中祐人, 末田明, 上村明弘 : 突起付き T 形鋼ジベルを用いた合成床版の静的載荷実験, 土木学会代 56 回年次学術講演会, pp.398-399, 2001 年 10 月
- 4) 石原謙治, 中村聖三, 田中祐人, 上村明弘 : 突起付き T 形鋼ジベルを用いた合成床版の設計, 第 2 回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.243-250, 2000 年 10 月
- 5) 村山, 吉崎, 西川, 八部, 橋, 大垣賀, 済藤 : 合成床版を有する合成桁の中間支点部負曲げ実験, 土木学会第 56 回年次講演会, CS7-043, pp.466~467, 2001 年 10 月
- 6) 社団法人土木学会 : 平成 8 年制定 コンクリート標準示方書[設計編], pp.90~pp.92, 1996
- 7) G.Hanswille : Zur Risbreitenbeschränkung bei verbundtragern, Technisch-weissenschaftliche Mitteilungen, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau Ruhruniversität Bochum, Mitteilung Nr.86-1, 1986
- 8) 長井正嗣, 奥井義昭, 岩崎英治 : 連続合成桁の各種ひび割れ幅算定法とその相違に関する一考察, 土木学会論文集 No.710/I-60, pp.427-437, 2002 年 7 月