

論文 鋼・コンクリート合成床版の橋軸方向継手に関する基礎的研究

徐聖卓*¹・日野伸一*²・太田俊昭*³・清水功雄*⁴

要旨：本論文では、いわゆるロビンソン型合成床版を対象として、コンクリート打設前の、架設現場での底鋼板の橋軸方向継手構造を数種類提案し、これら継手部のはり供試体による曲げ疲労試験を行った。その結果、溶接継手、高力ボルト (HTB) 摩擦接合継手に関しては、母材の底鋼板が、また HTB 引張接合継手に関しては HTB がそれぞれ疲労破断により破壊した。これらの抵抗メカニズムを FEM 解析によって考察するとともに HTB 引張接合継手の改良構造を提案した。

キーワード：合成床版、継手構造、溶接継手、高力ボルト摩擦接合、高力ボルト引張接合

1. はじめに

コンクリート用型枠と引張補強材を兼務した底鋼板上に、ジベルを介してコンクリートを一体化した鋼板・コンクリート合成床版が近年、道路橋床版として広く適用されている¹⁾。これらの床版を施工する際、現場でのコンクリート打設に先行して橋軸直角方向には全幅一体で、橋軸方向にはブロック化された底鋼板を、接合一体化する必要がある。

そこで、本研究は図-1のようなロビンソン型合成床版を対象に、数種類の底鋼板の橋軸方向継手構造を提案し、スパン中央部に設けた単純梁供試体による曲げ疲労試験を行った²⁾。その疲労性状を検討するとともに、3次元弾塑性 FEM を用いて、各継手構造の抵抗メカニズムを検討した。さらに、その結果に基づいて継手構造の改良案を提案した。

2. 実験・解析概要

2.1 継手構造

橋軸 (床版配力鉄筋) 方向に分割された底鋼板相互の支間中央部の継手構造としては、図-

2 に示すような 5 種類の供試体 (タイプ B ~ F) を提案し、比較用の継手無し供試体 (タイプ A) を含めた 6 種類について実験を行った。

静的繰返し載荷試験と曲げ疲労試験に用いた供試体は図-3 に示すスタッド付きの合成はり供試体であり、支間中央部の継手構造を除いて、すべて同一の断面諸元である。なお、使用材料は表-1 に示すとおりである。

2.2 載荷試験方法

載荷方法としては、疲労試験、静的繰返し載

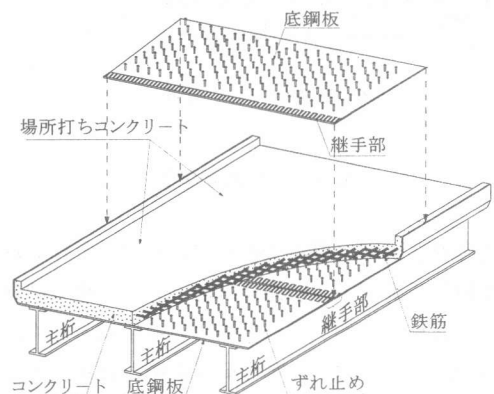
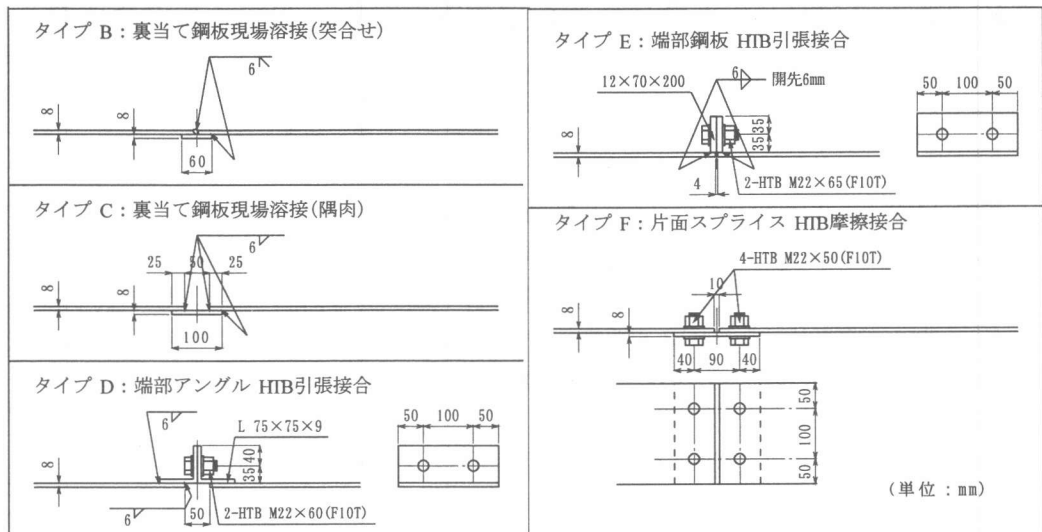


図-1 合成床版概念図

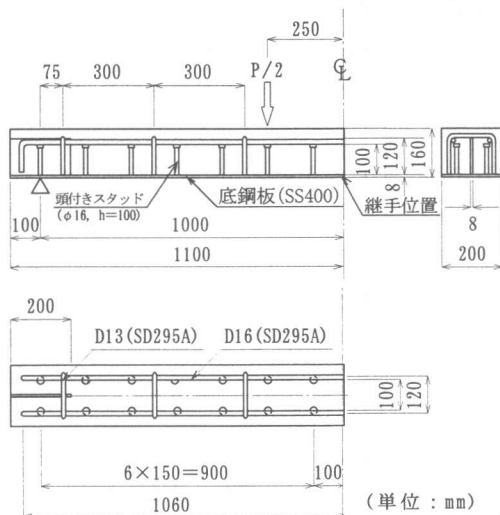
*1 九州大学 大学院工学研究科 都市システム工学専攻 (正会員)
 *2 九州大学助教授 大学院工学研究科 都市環境システム工学専攻 工博 (正会員)
 *3 九州大学教授 大学院工学研究科 都市環境システム工学専攻 工博 (正会員)
 *4 (株) 宮地鐵工所技術開発部次長 (正会員)



図－2 継手構造

表－1 使用材料

基本材料	寸法および材質
底部鋼板	t=8mm(SS400)
支点部補剛材	t=8mm(SS400)
鉄筋	D13, D16(SD295A)
スタッドジベル	φ16(SS400, h=100)
高力ボルト(タイプD, E, F)	M22(F10T)
コンクリートの圧縮強度	$f'c$ (N/mm ²)
タイプ A, B	45.9
タイプ C	44.1
タイプ D (No. 1, No. 2)	41.6
タイプ D (No. 3, No. 4)	44.7
タイプ E (No. 1)	41.6
タイプ E (No. 2)	43.4
タイプ E (No. 3, No. 4)	44.7
タイプ F	44.1



図－3 供試体諸元

荷試験ともに、単純支持条件の下での中央2点線載荷による1方向曲げ試験とした。疲労試験は、底鋼板に作用する引張応力振幅に対して、表-2のような3段階の荷重振幅を設定して、ステップ1からステップ3まで順次、各々100万回の繰返し載荷を経て破壊に到達するまで実施した。また、静的繰返し載荷試験は、タイプD, E供試体について行なった。載荷は、疲労試験における各ステップの載荷、除荷を各3回行なった後、破壊に至るまで荷重増分4.9kNの漸増載荷を行ない、疲労試験と同様、たわみ、ひず

表－2 繰返し載荷試験荷重

上限荷重	荷重 (下限荷重は4.9kN)
ステップ1	20.5kN 道路橋示方書 ³⁾ による配力鉄筋方向曲げモーメントに相当する荷重
ステップ2	36.2kN ステップ1の2倍の曲げモーメントに相当する荷重
ステップ3	58.8kN 鋼板に発生する直応力範囲が疲労設計指針に定めるスタッド溶接継手の疲労強度に相当する荷重

みデータの計測およびひび割れの観測を行なった。

2.3 解析方法

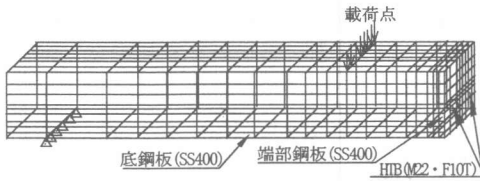


図-4 要素分割図

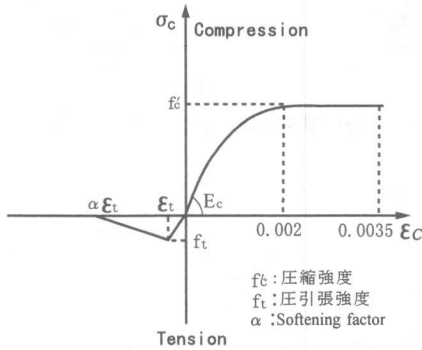


図-5 コンクリートの材料特性

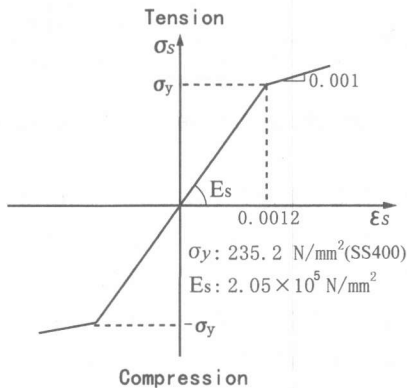


図-6 鋼材の材料特性

載荷試験にあわせて、汎用解析プログラム LUSAS VER 12.⁴⁾ を用いて、弾塑性 FEM 解析を行った。解析方法は微小変位理論と材料の非線形性を考慮した。継手部の幅方向の非均質性を考慮するため、3次元弾塑性解析で接合板の挙動、すなわち継手の剛性および変形を検討した。

図-4 は 1/2 部分の要素分割図、支持条件、荷重条件を示す。なお、それぞれのモデル化については、鋼板、コンクリートおよびボルトには 1 つの節点で 3 つの自由度を持つ 3 次元 8 節点ソリッド要素を用い、鉄筋には軸力のみが伝わる 2 節点棒要素を用いた。引張継手において

表-3 実験結果

供試体 タイプ No.	破壊荷重 ステップ	上限 荷重	繰返回 数(万回)	破壊形式
A	1 3	58.8kN	95.5	底鋼板破壊
	2 3	58.8kN	60.0	
B	1 3	58.8kN	3.6	溶接部破壊
	2 3	58.8kN	21.4	
C	1 3	58.8kN	2.8	溶接部破壊
D	1 静的載荷	破壊: 73.8kN	73.8kN	コンクリート 圧壊
	2 2	36.2kN	10.1	ボルト破断
	3 2	36.2kN	13	
	4 2	36.2kN	24.2	
E	1 静的載荷	破壊: 82.9kN	82.9kN	コンクリート 圧壊
	2 2	36.2kN	54.8	底鋼板破壊
	3 2	36.2kN	55.9	ボルト破断
	4 2	36.2kN	94.2	底鋼板破壊
F	1 3	58.8kN	95	底鋼板破壊

は、ボルトの頭部はコンクリート及び端部鋼板と剛結とし、摩擦継手においても、ボルトの頭部と添接板とを剛結とした。また、コンクリートと鋼材の付着は完全と仮定した。コンクリートおよび鋼材の材料特性を図-5、6 に示す。コンクリートの圧縮域は圧縮側の終局ひずみを 0.0035 とし、鋼材は Euler Von and Hill⁵⁾ によるバイリニアモデルを使用した。また、ボルトには 220N/mm² の初期応力を導入した。

3. 結果および考察

3.1 実験結果の概要

疲労試験および静的繰返し載荷試験の結果の一覧を表-3 に示す。今回、疲労試験に関しては、いずれの供試体も底鋼板または HTB の疲労破断により破壊した。したがって、この時の繰返し回数をもって疲労寿命とした。以下に各タイプの破壊形式を示す。継手のないタイプ A および HTB 摩擦接合継手のタイプ F は、ステップ 3 の中盤から終盤において底鋼板が疲労破断したが、設計曲げモーメント（上限荷重 20.5kN のステップ 1）に対しては十分な耐力を有することがわかった。破断位置はいずれも供試体中央から 40cm ~ 75cm のスタッド溶接部であり、これは曲げとせん断の複合応力による

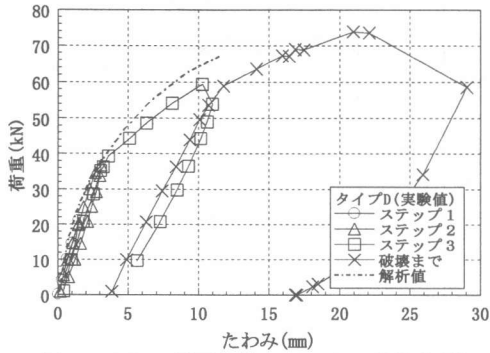


図-7 たわみ履歴曲線(タイプD・静的載荷)

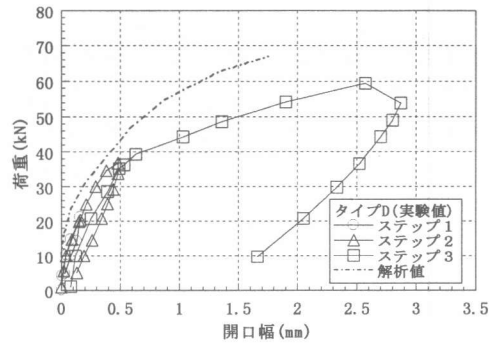


図-9 開口幅履歴曲線(タイプD・静的載荷)

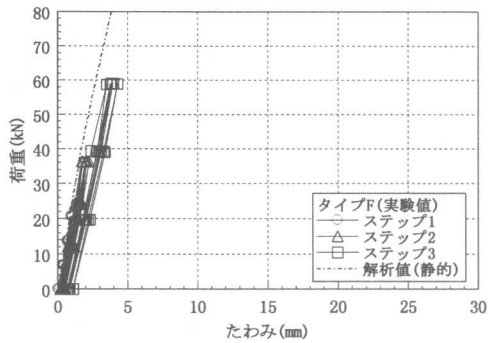


図-8 たわみ履歴曲線(タイプF・繰返し)

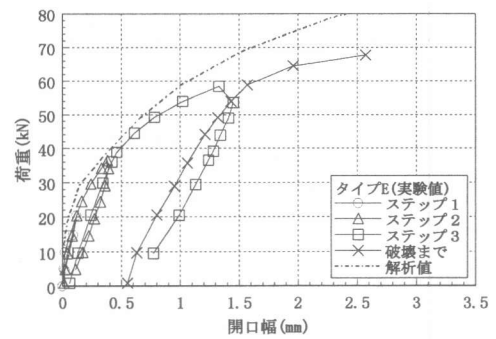


図-10 開口幅履歴曲線(タイプE・静的載荷)

ものと思われる。

溶接継手のタイプ B, C は、ステップ 3 の序盤において継手溶接部が疲労破断した。破断はいずれも底鋼板の母材側で、応力集中の起こる溶接線沿いに生じた。これらも耐力的には十分である。

これに対し、HTB 引張接合継手のタイプ D はステップ 2 の序盤において、継手部 HTB が疲労破断した。これは継手部の開口に伴う HTB の引張疲労によるものと思われる。また、タイプ E はステップ 2 の中盤から終盤において、供試体 No.2, No.4 は端部鋼板溶接部の底鋼板側が溶接線沿いに疲労破断し、また、供試体 No.3 は継手部 HTB が疲労破断した。これはタイプ D と同様の理由によるものと思われ、鋼板溶接部および HTB の疲労耐力が、同程度であった可能性を示唆するものである。

3.2 変形状

疲労試験および静的繰返し載荷試験より得ら

れた、荷重と支間中央部のたわみ関係の一例として、タイプ D および F の場合を図-7, 8 に示す。実験値に対し、FEM 解析値は、曲げ剛性をやや大きく示す傾向が見られるものの、全体的には両者は比較的良く一致しているといえる。また、静的繰返し載荷試験より得られた、タイプ D およびタイプ E の荷重と支間中央部の開口幅履歴曲線を図-9, 10 に示す。開口幅については、タイプ D の解析値は、荷重の増加とともに実験値より小さくなる傾向を示しているが、タイプ E の解析値は実験値と比較的良く一致していることがわかる。また、継手部の開口幅履歴曲線はたわみ曲線と同様の挙動を示している。また、解析値はボルトの初期軸力の影響により、初期の継手部の開口幅はみられず、初期軸力に到達後は同じ挙動をしていることがわかる。

4. HTB 引張接合継手の改良構造

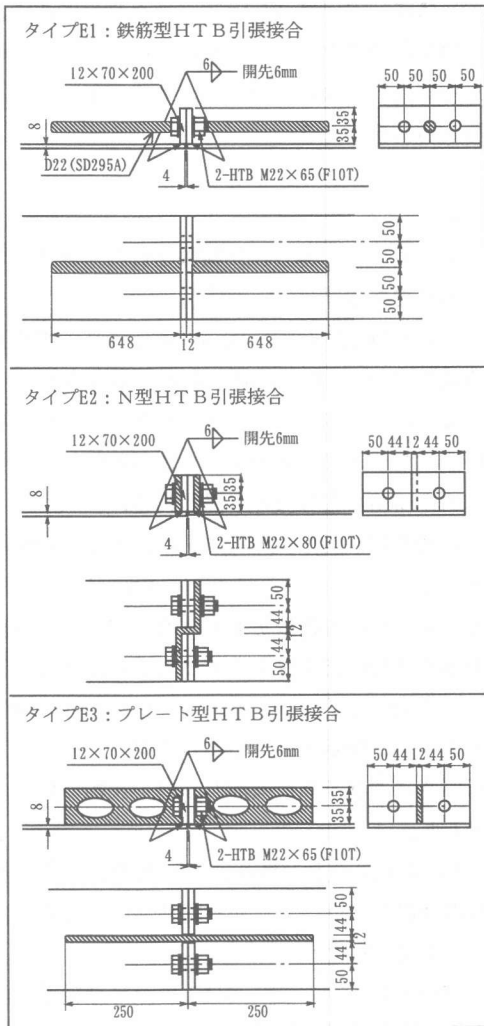


図-11 改良案継手構造

4.1 改良継手構造案

実験結果から、HTB 摩擦接合継手および溶接継手は、疲労試験の下でも設計曲げモーメントに対し、2 倍以上の耐力を有することが認められた。しかし、引張接合継手タイプ D, E は、接合部のてこ反力および接合部プレートの曲げ変形により継手性能の低下を引き起こした。その結果をもとに、改良継手構造を考案し、解析による検討を行った。

改良継手構造は図-11 に示すように既存のタイプ E に鋼板、または鉄筋を追加して補強したものである。各々の特徴は次のとおりであ

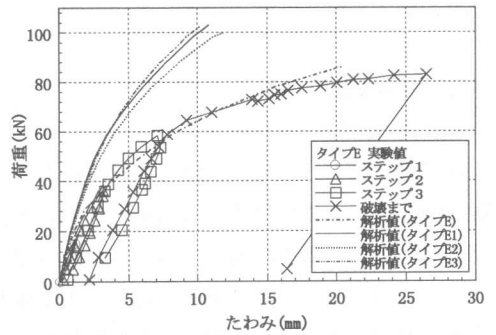


図-12 たわみ履歴曲線(改良案・静的載荷)

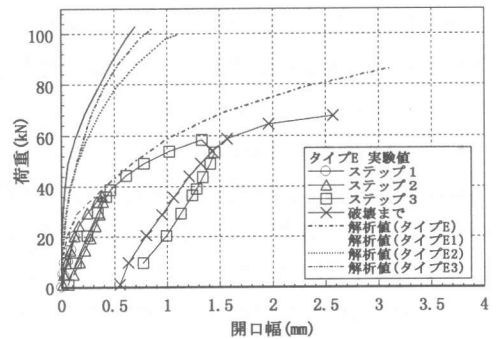


図-13 開口幅曲線(改良案・静的載荷)

る。(1)タイプ E1：継手部に異形鉄筋を貫通させて配置。(2)タイプ E2：継手端部プレートに添接用補強プレートを取付け。(3)タイプ E3：継手端部プレートに孔あきプレートを取付け。

4.2 解析方法

用いた解析方法は 2.3 節と同様である。ただし、タイプ E1 の補強鉄筋、タイプ E2 およびタイプ E3 の補強プレートはボルトと同じような 8 節点ソリッド要素でモデル化した。

4.3 解析結果

静的荷重と支間中央部のたわみおよび開口幅履歴曲線を図-12, 13 に示す。参考までに改良前のタイプ E の実験値および解析値も併せて図中に示す。改良継手構造のタイプ E1, E2 および E3 の静的破壊荷重はそれぞれ 103.1kN, 99.6kN および 102.1kN で、いずれもコンクリート上面が圧壊した。解析結果を比較すると、改良継手タイプ E1, E2 および E3 は、ともにタイプ E よりも継手部の開口幅およびはり曲げ

剛性が著しく改善されていることがわかる。

5. 継手性能の評価

5.1 溶接継手

溶接継手においては、余盛と母材表面の境界線(止端)に応力集中が生じるため、疲労破断は止端から発生するのが普通である。今回の疲労試験においても、タイプ B, C ともに止端部の疲労破断により破壊しており、破壊状況としては妥当であったといえる。しかし、板の溶接継手は現場施工時の目違いなどの管理が難しく、実験と同様な強度を期待するためには、現場での十分な精度管理が要求される。

5.2 HTB 摩擦接合継手

HTB 摩擦接合の継手性能は、HTB(M22・F10T) 1 本当当たりの一面摩擦強度を、摩擦係数を 0.4 として求めると、88.6kN となる。一方、タイプ F を RC 断面として計算し、各載荷ステップにおける HTB 1 本当当たりの作用力を求めると、ステップ 1 で 30.4kN、ステップ 2 で 52.9kN、ステップ 3 で 86.3kN となる。したがって、スタッド溶接部でせん断破壊を起こした今回の疲労試験の結果は妥当であり、タイプ F は継手として十分な性能を有しているといえる。

5.3 HTB 引張接合継手

疲労試験の場合には、タイプ D, E ともに HTB または底鋼板の疲労破断によって破断した。HTB 1 本当当たりの引張強度は 220kN に対して、各載荷ステップにおける HTB 1 本当当たりの作用力を求めると、ステップ 1 で 36.2kN、ステップ 2 で 63.7kN、ステップ 3 で 111.7kN となり、継手としては十分な強度を有するはずである。しかし実際には、疲労試験ではステップ 2 で破壊しており、上述の継手部の変形および開口幅の増加に伴い、継手性能の低下を引き起こしたと考えられる。

これに対して、継手部を鋼板または鉄筋を用いて補強した改良継手構造は、解析結果の範囲ではあるが、接合部下面の開口を抑え、タイプ E より優れた継手性能を有していることがわか

る。特に、タイプ E1 は施工性が良好であり、実用的な構造と考えられる。しかし、これら改良構造の有用性については、今後実験により検証する必要がある。

6. まとめ

本研究により得られた結果を要約すれば次のとおりである。

(1)溶接継手タイプ B, C(裏当て鋼板現場溶接継手)については、高い継手性能を有していることが確認された。実用化にあたっては、現場での溶接施工の管理が十分に行われれば、構造的に問題は生じないと思われる。

(2)HTB 摩擦継手タイプ F は、継手のないタイプ A と同様にせん断スパン内のスタッド溶接位置における鋼板が疲労破壊しており、強度上は十分な性能を保有することが確認された。

(3)HTB 引張接合タイプ D, E は、疲労試験の場合に、継手下面での開口により、設計より低い荷重で継手部が破壊し、継手性能の低下を示した。

(4)継手部の変形性状については、3 次元非線形 FEM 解析によって実験結果と比較的良好な一致がえられた。

(5)FEM 解析により、HTB 引張接合継手の改良構造の有用性を検討し、継手性能の向上が得られることを確認した。今後、実験による検証が必要である。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼・コンクリート合成構造のガイドライン，1989.3.
- 2) 清水・日野・太田・松井・文：道路橋合成床版の橋軸方向継手の疲労性状に関する実験的研究，土木学会第 51 回年講，1996.9
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1990
- 4) LUSAS User Manual Ver.12, FEA Ltd.
- 5) W.F.Chen: Plasticity in Reinforced Concrete, McGraw-Hill Book Company, 1982