

接着接合を用いた鋼・コンクリート合成床版の継手形式の開発

Development of Adhesive Joint for Steel Plate-Concrete Composite Deck

吉田 賢二
Kenji YOSHIDA

川田工業(株)橋梁事業部技術本部
大阪技術部設計二課

高田 嘉秀
Yoshihide TAKATA

川田工業(株)橋梁事業部営業本部
事業推進部部長

原 考志
Takashi HARA

川田工業(株)橋梁事業部技術本部
大阪技術部設計一課

橋 吉宏
Yoshihiro TACHIBANA

川田工業(株)橋梁事業部営業本部
東京営業部複合構造課次長

街道 浩
Hiroshi KAIDO

川田工業(株)橋梁事業部技術本部
大阪技術部設計二課課長

渡辺 滉
Hiroshi WATANABE

川田工業(株)常務取締役

鋼・コンクリート合成床版の下鋼板の継手には、高力ボルト接合を用いた形式が用いられており、下鋼板の上面のみから高力ボルトを施工する種々の工法が提案されているが、下鋼板が塗装仕様の場合ではボルトの頭周辺の塗装のために足場が必要となる。本研究は、従来の下鋼板の継手形式の課題に着目して、下鋼板の上面のみから十全に施工ができ、しかも施工性および経済性に優れた継手形式の開発について報告するものである。具体的には、樹脂により下鋼板と添接板を接着接合する形式であり、実橋における施工に配慮して下鋼板の目違いの矯正や樹脂の厚さを管理する方法を提案した。また、この継手形式の部分模型を用いた静的試験および疲労試験を実施し、継手部の引張強度や疲労耐久性が実橋の合成床版に要求される性能を十分に満足することを確認した。

キーワード：鋼・コンクリート合成床版、下鋼板、接着接合、引張強度、疲労耐久性

1. はじめに

鋼・コンクリート合成床版（以下、合成床版と略す）は、鋼製型枠としてのけた下空間の安全性の確保、プレファブ化による現場工期の短縮、床版厚の低減による死荷重の軽減、高い耐荷力および疲労耐久性などの特徴を有する床版形式である。近年、実橋への適用や長支間化に関する種々の研究が行われ、鋼2主げた橋、鋼少数主げた橋、鋼開断面箱げた橋などに合成床版が積極的に採用されるに至っている。著者らは、このような合成床版のうち、写真1に示すロビンソン型の合成床版を対象として、各種の静的載荷試験、輪荷重走行試験、施工試験などの多岐にわたる性能確認試験を実施し、合成床版の疲労耐久性の把握、設計手法の確立、実橋への適用を実施してきた^{1)~3)}。

合成床版の下鋼板の継手には、表1に示すような高力ボルト摩擦接合を用いた形式や床版の下側にも鉄筋を配置してRC構造とした形式が用いられている。このうち、前者は下鋼板の上面のみから高力ボルトを施工する工法が提案されているが、下鋼板が塗装仕様の場合ではボルトの頭周辺の塗装のために足場が必要となる。一方、後者は継手部がRC構造となることから合成床版としての構造の連続性が確保できないとともに、鉄筋量の増加や鉄筋を貫通させるための横リブの孔明けが必要となる。

本研究は、このような従来の下鋼板の継手の課題に着目して、下鋼板の上面のみから作業ができるとともに、施工効率に優れた継手形式の開発について報告するものである。具体的には、接着剤により下鋼板と添接板を

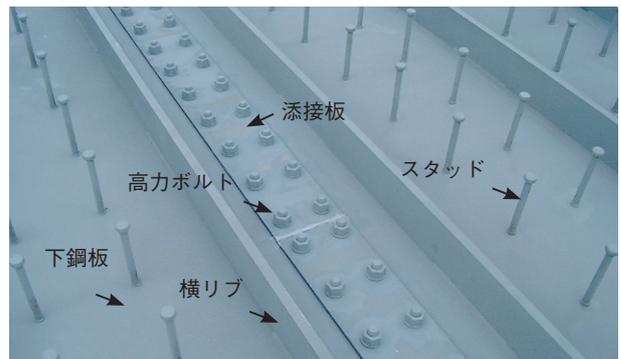


写真1 ロビンソン型合成床版の下鋼板の構造

表1 従来の継手部の構造

名称	高力ボルト摩擦接合	RC構造
構造図		
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 下鋼板上面から高力ボルトを施工する工法が一般化 鋼板が塗装仕様の場合はボルトの頭周辺の塗装のために足場が必要 	<ul style="list-style-type: none"> ねじスタッドには応力伝達機能を期待せず継手部がRC構造化 鉄筋量の増加や鉄筋を貫通させるための横リブの孔明けが必要

接着接合する形式を提案し、実橋への適用に配慮した施工の手順や接着剤の厚さを管理する方法について検討する。また、この継手形式の部分模型を用いた静的引張試験および疲労強度試験を実施し、継手部の引張強度や疲労強度が実橋の合成床版に要求される性能を満足することを確認するものである。

2. 継手部の試設計および接着剤の選定

(1) 継手部の試設計

まず、接着接合の実橋の床版への適用の可能性を確認するために、合成床版の下鋼板の継手部の試設計を行った。試設計は床版作用に着目し、文献⁴⁾に規定されている橋軸方向の設計曲げモーメントにより下鋼板に発生する垂直応力を算出し、その応力を伝達するために必要な下鋼板と添接板の接触面のせん断応力を算出した。試設計の範囲は合成床版が適用されることの多い床版支間3.0～8.0mとし、コンクリート版厚は文献⁴⁾に規定されている最小厚、鋼板厚は9mmとした。

試設計の結果は表2に示すとおりであり、接着剤には最大で3.9N/mm²のせん断応力が作用し、文献⁵⁾を参考にして安全率を3.0とすると、接着剤に必要なせん断強度は11.7N/mm²となる。

(2) 接着剤の選定

接着剤の選定にあたっては、上記の試設計におけるせん断強度を満足するとともに、施工現場の環境条件に適應する必要がある。具体的には、夏季には60℃以上に上昇し冬季には0℃程度に降下する下鋼板の温度への対応、施工が容易であるとともにけた下空間への垂れ落ちを防止できる粘度の設定、施工速度を遅延させないための硬化時間の確保などの条件を満足しなければならない。

各種の接着剤を調査し、上記の条件を満足する二液性エポキシ系接着剤（商品名：デナタイト）を採用した。この接着剤の物性は表3に示すとおりであり、使用温度範囲が広いことやせん断強度が高いことが特長である。

3. 施工方法の検討

(1) 施工手順の検討

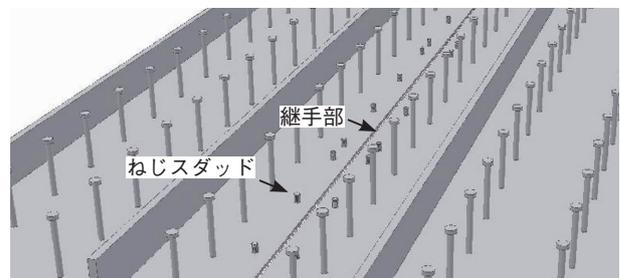
図1に接着接合を用いた下鋼板の継手部の施工手順を示す。まず、図1 a)のように接合する下鋼板を主げた上に設置する。下鋼板の継手部には、後述するように母材と添接板を密着させるためのねじスタッドを工場において溶接しておく。次に、図1 b)のように接着剤が主げたやけた下空間に垂れ落ちないように鋼板の継目部にテープなどでシーリングを施し、その上に接着剤を塗布する。さらに、図1 c)のように接着剤の上に添接板を設置する。添接板にはねじスタッド用孔を設けておき、ワッシャを取付けて高ナットを締付けることにより下鋼

表2 継手部の試設計結果

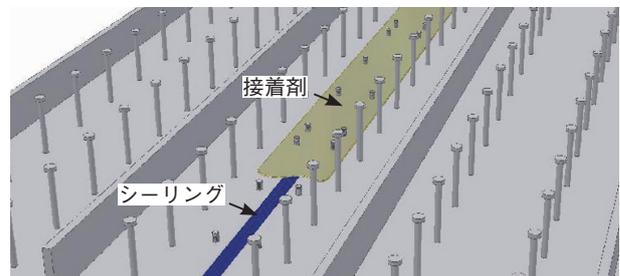
床版支間	床版厚	活荷重による下鋼板の配力鉄筋方向応力度	接着剤のせん断応力度	安全率	接着剤の必要せん断強度
m	mm	N/mm ²	N/mm ²	—	N/mm ²
3.0	190	30.6	3.1	3.0	9.2
4.0	210	34.0	3.4	3.0	10.2
5.0	240	34.9	3.5	3.0	10.5
6.0	260	37.1	3.7	3.0	11.1
7.0	290	37.4	3.7	3.0	11.2
8.0	310	39.0	3.9	3.0	11.7

表3 接着剤の物性

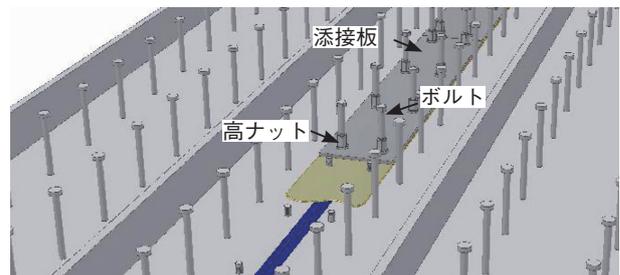
使用温度範囲	-60～100℃
可使時間	約60min.
混合物粘度(25℃の値)	10 000mPa·s
最低硬化時間(23℃の値)	24hr.
せん断強度	10～26N/mm ²



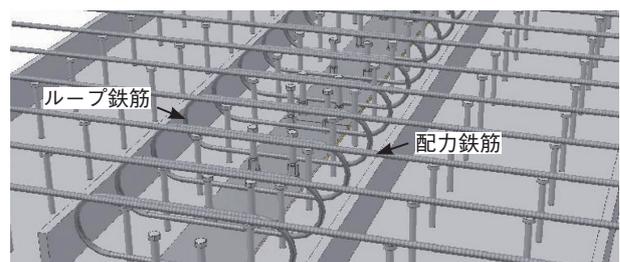
a) 下鋼板の設置



b) シーリングと接着剤の塗布



c) 添接板の設置



d) 鉄筋の配筋

図1 継手部の施工手順

板と添接板を密着させる。また、高ナットの上側にボルトを取付けることにより、継手部をコンクリートと一体化する。なお、接着剤を塗布する鋼板面の処理は、原板プライマのままとしており、後述する各種試験においても同様の処理を施した試験体を用いている。最後に、**図 1 d**) のように継手部の補強用にループ鉄筋を配置したうえに、配力鉄筋および主鉄筋を配置し、コンクリートを打設する。なお、**図 1 d**) は煩雑になることを避けるためにループ鉄筋と配力鉄筋のみを描画した。

(2) 接着剤の厚さの検討

接着剤のせん断応力の伝達性能の最適化を図るために、接着剤の厚さをパラメータとした有限要素解析を実施した。解析対象は後述する静的引張試験の部分模型とし、鋼板および接着剤をソリッド要素によりモデル化した。接着剤の厚さについては0.2mm、0.6mm、1.0mmの3ケースとし、母材の継目部にはシーリング部として接着していない部分を設けた。境界条件は、母材の一方の端部を固定とし、もう一方の端部に10kNの軸方向引張力を作用させた。

接着剤の部材軸方向のせん断応力の分布は**図 2**に示すとおりである。この分布は、部材幅方向の縁端に沿った値をプロットしたものである。参考のために併記した引張力を接着面積で除した平均せん断応力度は2.8N/mm²である。接着剤のせん断応力は、添接板の縁端や母材の継目などの接着剤の端部において大きく発生しており、中央部においてはその値は小さい。これは、接着剤端部においては、鋼板を剥離させようとする力が大きく、せん断応力が共役であることから部材軸方向に大きなせん断応力が発生しているものと考えられる。

各解析値を比較すると、接着剤の厚さが大きいほどせん断応力は低減し、厚さが1.0mmの場合のせん断応

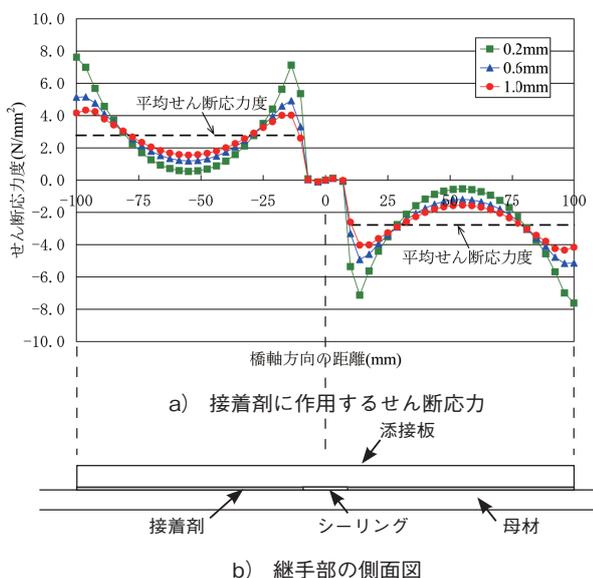


図 2 接着剤の厚さのせん断応力への影響

力の最大値は0.2mmの場合の50%程度である。また、厚さが1.0mmの場合と0.6mmの場合の差は比較的小さく、厚さを1.0mmよりさらに大きくしても効果は向上しないことが予想される。以上の結果から、接着剤の厚さはせん断応力の伝達効率が最も優れる1.0mmとした。

現場施工における厚さの確保の方法は、**写真 2**に示すように硬化前の接着剤に上限粒度が1.0mmのプラスト用のスチールショットをスペーサとして散布するか、あらかじめ接着剤に練混ぜて鋼板に塗布することにより所定の厚さを確保することにした。



写真 2 接着剤の厚さの確保

4. 施工の効率化の検討

次に、施工の効率化に関して検討を行う。**表 1**に示す従来の工法である高力ボルト摩擦接合と提案する接着接合の工場製作および現場施工の工種の比較を**表 4**に示す。ただし、両者に共通する継手部に関連しない項目については省略した。

工場製作に関しては、接着接合とすることにより、下鋼板の孔明け、添接部のプラスト、添接部のプライマ塗布、高力ボルトの材料が省略できるが、ねじスタッドの

表 4 工場製作および現場架設における工種比較

	高力ボルト摩擦接合	接着接合
工場製作	下鋼板孔明け	—
	添接板材料	添接板材料
	添接板孔明け	添接板孔明け
	添接部プラスト	—
	添接部プライマ塗布	—
	高力ボルト材料	ねじスタッド材料
現場架設	—	ねじスタッド溶植
	添接用足場	—
	—	シーリング・接着剤材料
	—	シーリング・接着剤施工
	添接板設置	添接板設置
	高力ボルト締付け	ねじスタッド締付け
	—	ループ鉄筋材料
—	ループ鉄筋設置	

材料と溶植が必要となる。一方、現場架設に関しては、接着接合とすることにより、下鋼板の添接用の足場と高力ボルトの締付けが省略できるが、シーリングおよび接着剤の材料と施工、ねじスタッドの締付け、ループ鉄筋の材料と設置が必要となる。

施工全般から判断すると、工場製作は工種が減少することによって省力化が図られ、現場架設は工種が増えるものの添接用の足場が不要になることから、合成床版の施工の効率化が図られるものと判断した。

5. 部分模型による静的引張試験

(1) 試験体の構造および試験方法

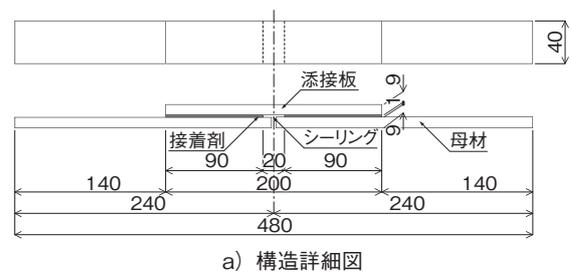
ここでは、下鋼板の継手部のみを抽出した部分模型による静的引張強度の確認を行った結果を示す。静的引張試験は、構造物試験室の300kNサーボ式疲労試験機により実施した。

試験体の詳細図は図3に示すとおりであり、下鋼板の母材は幅40mm×厚さ9mm×長さ240mm、添接板は幅40mm×厚さ9mm×長さ200mmである。鋼材の材質は母材および添接板ともにSS400とした。母材の継目部には20mmのシーリング部を設けているため、接着剤を塗布した範囲は90mmずつである。また、接着剤の厚さについては、前述の検討結果から1.0mmとした。なお、試験体の製作における接着剤の塗布時の温度はおおむね25℃であり、引張試験実施時の接着剤の材令は43日であった。

試験体は、上面のみに添接板を設置しているため、試験体の両端に引張力を作用させた場合には継手部に偏心曲げモーメントが作用し、添接板と反対側の方向に変形する挙動を示す。しかしながら、この継手を実橋に適用する場合の構造は、図1に示すようにねじスタッド、高ナット、ボルトを組み合わせてコンクリートと一体化していることから、鋼部材単体の場合に作用するような大きな偏心曲げモーメントは発生しない。このため、引張試験に際しては、偏心曲げモーメントが発生しないよう



写真4 ガイドローラの構造



a) 構造詳細図



b) 全体写真

図3 部分模型の詳細図



a) 全体写真



b) 拡大写真

写真3 静的引張試験の状況

に配慮する必要がある。

具体的には、写真3に示す静的引張試験の状況のように、試験体に偏心曲げモーメントを発生させないための対策を施した。試験体の伸びを妨げないように試験体の両面に写真4に示すガイドローラを取付け、その外側から等辺山形鋼を添え、山形鋼の全長にわたり5個のC型クランプで挟み込んで対処した。なお、使用した等辺山形鋼の断面はコンクリート版の剛性を考慮して幅40mm×幅40mm×板厚5mmとした。

(2) 試験結果

静的引張試験を実施した3体の試験体の破壊荷重および破壊荷重を接着面積で除した接着剤の平均せん断強度を表5に示す。試験体の平均せん断強度の平均値は、試験設計における必要せん断強度を14%程度上回っている。

試験体の破壊面の状況を写真5に示す。すべての試験体の破壊は添接板の地金とプライマの間において発生しており、母材側に接着剤およびプライマが付着していた。以上の結果から、原板プライマに直接接着剤を塗布しても、接着剤のせん断強度は必要せん断強度を満足することが確認できた。

表5 各試験体の破壊荷重

試験体 No.	破壊荷重	平均せん断強度	必要せん断強度
	kN	N/mm ²	N/mm ²
AP-409-1	52	14.4	11.7
AP-409-2	48	13.3	
AP-409-3	44	12.2	
平均	48	13.3	

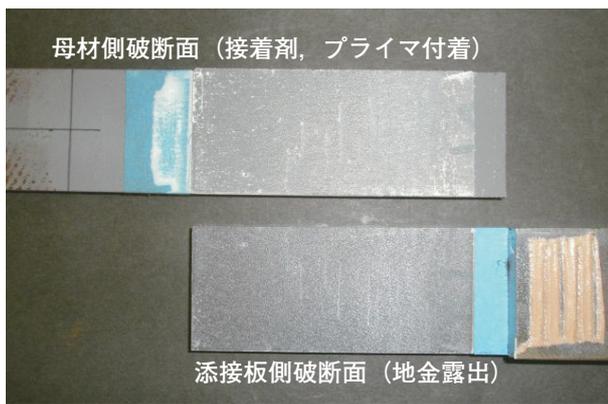


写真5 試験体の破壊状況

6. 部分模型およびはり模型による疲労強度試験

(1) 部分模型による疲労強度試験

継手部の部分模型の静的引張試験の結果をふまえて、疲労強度試験を行った結果を示す。この試験も静的引張試験と同じ試験機により実施した。試験体は静的引張試験の試験体と同時に製作したものであり、疲労試験実施時の接着剤の材令は31～69日であった。

試験体の構造および固定方法は前述した静的引張試験と同様とした。荷重の振幅は静的引張試験における破壊荷重の平均値の75%、80%、85%とし、10Hzの周期で作用させた。

試験体の破壊形態はすべて写真5と同様であった。各試験体の荷重振幅と破壊までの繰返し回数は表6に示すとおりである。荷重振幅を接着面積で除した接着部の平均せん断応力振幅は、すべての試験体で10N/mm²を上回っており、静的せん断強度の平均値の75%以上の高い

値を示している。

これらの試験結果を対数グラフにプロットすると図4のようにほぼ一直線に位置することがわかる。参考のために、文献⁶⁾に示される接着接合の疲労試験から得られたせん断応力振幅と繰返し回数の関係を示すS-N曲線を図4に実線で併記した。この実線と各試験体の試験結果を比較すると、おおむねS-N曲線の近傍に試験結果がプロットできることが分かる。しかしながら、S-N曲線の勾配が非常に小さいことから、接着接合の疲労強度としては10N/mm²程度の下限值を用いてよいと考えられる。疲労強度が静的引張強度を大きく下回らない値を示していることから、本継手部は十分な疲労耐久性を有することが確認できた。

表6 各試験体の荷重振幅と破壊までの繰返し回数

試験体 No.	荷重振幅	平均せん断応力振幅	繰返し回数	接着剤の材令	
	kN	N/mm ²		開始時	終了時
AP-409-5-2	38.4	10.7	74 294	31	32
AP-409-6-2	38.4	10.7	1 023 856	49	50
AP-409-7	40.8	11.3	889 375	66	69
AP-409-8-1	36.0	10.0	4 691 482	52	58
AP-409-9-1	40.8	11.3	1 223 541	62	64

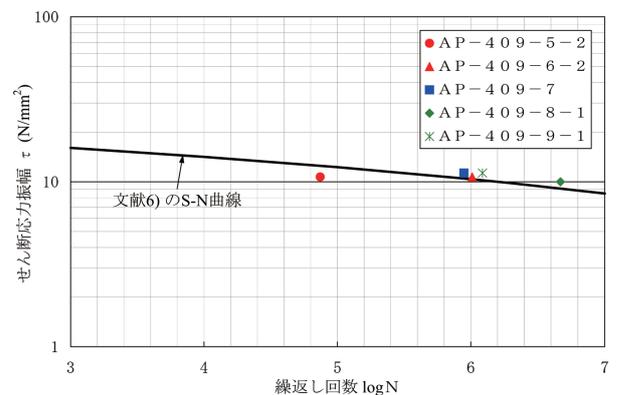


図4 各試験体の疲労強度試験結果

(2) はり模型による疲労強度試験

次に、下鋼板に接着接合の継手部を有するはり模型を用いた疲労強度試験について述べる。この試験は現在大阪工業大学 八幡工学実験場 構造実験センターの300kNサーボ式疲労試験機により実施中であるため、ここではその速報について報告する。

試験体の詳細図は図5に示すとおりであり、下鋼板の中央に接着接合を施した継手部を設け、その上に鉄筋を配筋してコンクリートを打設したものである。試験体は床版支間4.0m程度の合成床版の挙動やひずみを再現できる実物大模型であり、幅400mm×床版厚210mm×支間1000mm、鋼材の板厚や材質、接着剤の塗布範囲などは上述の部分模型と同様とした。なお、試験体の製作における接着剤の塗布時の温度は、おおむね15℃

であり、疲労試験開始時の接着剤の材令は50日であった。荷重については、高さ400mm×幅400mm×支間400mmの鋼製ばりを介して載荷しており、道路橋示方書⁷⁾に示されるT荷重の1.5倍である1輪150kN 1組の活荷重に相当する荷重振幅を4Hzの周期で作用させている。

試験結果のうち試験体中央の下鋼板下面の配力鉄筋方向の弾性ひずみおよび π ゲージの弾性開き量の経時変化を、それぞれ図6、図7に示す。弾性ひずみは図5に示す東西のひずみゲージの測定値であり、コンクリートを全断面有効としたはり理論による計算値よりやや小さい値となっている。一方、弾性開き量は図5に示す南北の π ゲージの測定値であり、載荷初期において0.07mm程度、載荷の進展に伴って0.1mmをやや下回る値となっている。繰返し回数が230万回の時点において、測定値に大きな変動がないことから、試験体は健全な状態にあるものと推察できる。

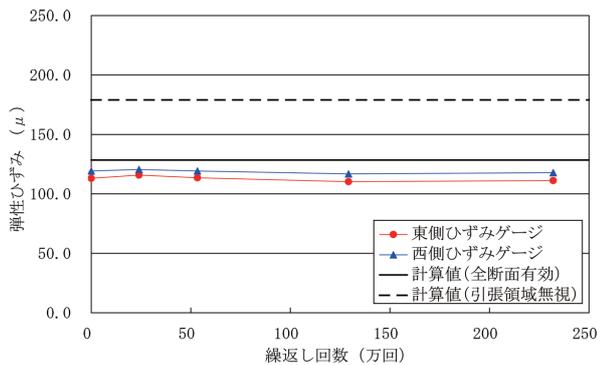


図6 下鋼板の弾性ひずみの変化(配力筋方向)

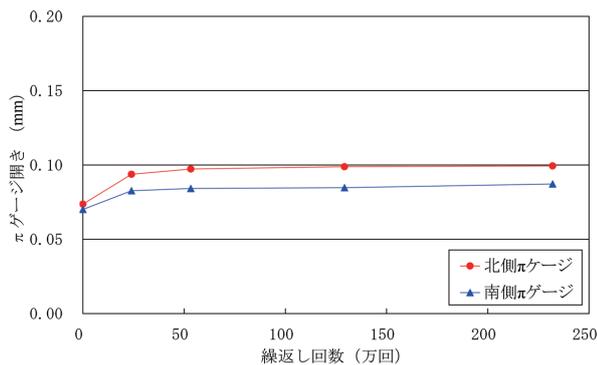


図7 π ゲージの弾性開き量の変化(配力筋方向)

7. まとめ

本研究は、ロビンソン型の合成床版を対象として、従来の下鋼板の継手形式の問題点に着目し、エポキシ系接着剤を使用した接着接合の開発を実施したものである。本研究において、得られた結果は以下の通りである。

接着接合の試設計や施工方法の検討などにより、提案する工法が実橋の合成床版に適用可能であることを確認した。

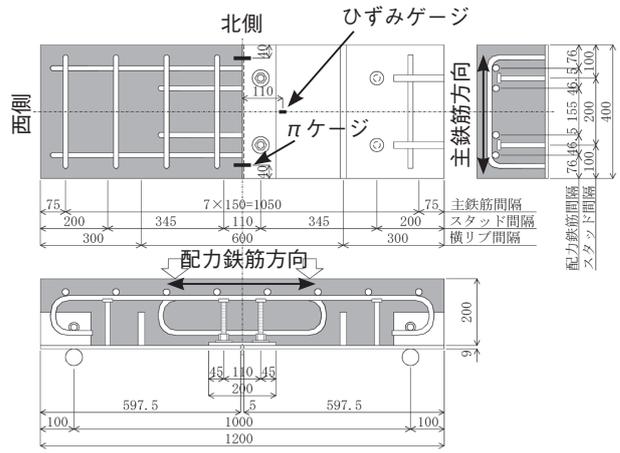


図5 はり模型の詳細図

静的引張試験により、継手部の静的せん断強度が12N/mm²以上であり必要強度を上回ることを確認した。設計における安全率3.0を確保できることを確認した。

疲労強度試験により、継手部の疲労強度が静的せん断強度の75%である10N/mm²程度であり、実用に耐える高い疲労耐久性を有することを確認した。

現在、はり模型の疲労強度試験を継続するとともに、輪荷重走行試験を実施している。

最後に、本研究には大阪工業大学の松井教授に多大なご指導をいただきました。紙面を借りて厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 街道 浩, 松井繁之: 鋼・コンクリート合成床版の支間部および張出し部のせん断疲労強度評価, 土木学会論文集 A, Vol. 64, No. 1, pp.60-70, 2008.
- 2) 街道 浩, 渡辺 滉, 橋 吉宏, 松井繁之, 堀川都志雄: 鋼・コンクリート合成床版の輪荷重走行試験および3次元有限要素解析による疲労耐久性評価, 構造工学論文集 Vol.50A, 土木学会, pp.1119-1130, 2004.
- 3) 街道 浩, 渡辺 滉, 橋 吉宏, 松井繁之, 栗田章光: 鋼・コンクリート合成床版を適用したプレストレスしない連続合成げたの中間支点部の静的載荷試験, 構造工学論文集, Vol.49A, 土木学会, pp.1115-1126, 2003.
- 4) 土木学会: 鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物, 平成9年版, 丸善, 1997.
- 5) 強化プラスチック協会: FRP 構造設計便覧, 技報堂, 1994.
- 6) 有原隆雄, 田中一實: 接着剤の鋼構造物への適用に関する実験的研究, 横河橋梁技報, Vol.11, No.10, pp.33-40, 1980.
- 7) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, II 鋼橋編, 丸善, 2002.