鋼・コンクリート合成床版における接着接合継手の疲労耐久性評価

Fatigue durability evaluation of Adhesive Joint in Steel Plate-Concrete Composite Deck

吉田賢二*, 松井繁之**, 街道 浩*** Kenji Yoshida, Shigeyuki Matsui, Hiroshi Kaido

*川田工業株式会社 橋梁事業部大阪技術部(〒550-0014大阪府大阪市西区北堀江 1-22-19)
** 工博,大阪大学名誉教授,大阪工業大学教授(〒614-8289京都府八幡市美濃山一ノ谷4番地)
***博士(工学),川田工業株式会社 橋梁事業部大阪技術部(〒550-0014大阪府大阪市西区北堀江 1-22-19)

The authors have developed a steel-plate concrete composite deck for highway bridges. The composite deck consists of steel plate, upper re-bars and concrete. The steel plate has to have lateral direction joints with every 2 or 3 meters. In usually, as such joints have been fastened by high strength bolts at construction site, it is necessary to set scaffoldings under the steel plate. In order to decrease construction costs and to improve safety at site works for the composite deck, the authors propose an adhesive joint with epoxy resin for the steel plates, which can fasten up by only upper side works on the plates. In this paper, performance for the adhesive joint is investigated through static and fatigue coupontests, and wheel running test with slab speciments.

*Key Words: steel plate-concrete composite deck, adhesive Joint, wheel runnig test, fatigue durability キーワード:鋼・コンクリート合成床版,接着接合,輪荷重走行試驗,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,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,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,輪荷重走行試験および施工試験などの多岐 にわたる性能確認試験を実施し,合成床版の挙動の把握, 設計手法の確立および実橋への適用を実施してきた^{1),2),} 3,4,5).

合成床版の底鋼板の継手形式として従来から適用されている高力ボルト摩擦接合継手は、底鋼板の上面のみから高力ボルトを施工する工法であるが、底鋼板の外面が塗装仕様の場合ではボルトの頭周辺の塗装のために 足場が必要である.本論文では、このような従来の継手の課題を克服するために、底鋼板の上面のみから施工で きるとともに施工効率に優れた継手形式として接着接



写真-1 輪荷重走行試験の状況

合継手に着目し、写真-1 に示すように(独) 土木研究 所において実施した階段載荷を適用した輪荷重走行試 験(以下,走行試験と略す)により、疲労耐久性および 破壊形態に関する研究成果をまとめたものである.

2. 接着接合継手の構造概要

2.1 構造概要

接着接合継手の構造概要は、図-1 に示すように底鋼 板の上面に接着剤を塗布し、添接板設置後に高ナットを 締め付け、さらにボルトを高ナットにねじ込む構造であ る.高ナットの締め付けにより底鋼板の目違いを調整し, 接着剤の硬化までの固定を行い,ボルトは底鋼板のスタ ッドと同等高さであるコンクリート版厚の 70%程度ま で立ち上げることで,圧縮側コンクリートと一体化させ ている.これは,床版コンクリート部分にボルト頭を定 着させて,底鋼板の継手部と床版コンクリートを合成さ せるためである.この構造により,添接板が片面取付け のために発生する偏心曲げモーメントの対策を講じて いる.

2.2 接着剤の選定

接着剤の選定にあたっては、表-1に示す文献 6)によ り算定した試設計におけるせん断強度を満足し、施工現 場の環境条件に適応する必要がある.現場における底鋼 板の温度範囲での所定強度の確保、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た結果,上記の条件を満足する 写真-2 に示す二液性エポキシ系接着剤を採用した.この接着剤の物性は表-2 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徴である.

3. 部分模型による静的引張試験および引張疲労試験

3.1 静的引張試験

底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うものである.静的引張試験は,大 阪工業大学 八幡工学実験場構造実験センターおよび川 田工業(株) 技術研究所 構造物試験室の万能試験機 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-2 に示すとおりであり,底鋼板 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,1.0mm とした.なお,試験体の製作時にお 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齢は 43 日であった.

また,試験体に発生する偏心曲げモーメントの対策として,試験体の伸びを妨げないように試験体の両面に写 真-3 に示すガイドローラーを取付け,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.

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



図-1 接着接合継手の構造概要

表-1 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



写真-2 二液性エポキシ系接着剤

	₩2	控差剂	の物性
1	X	〕女⁄目月!	10/10/1エ

使用温度範囲	-60~100°C	
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	$10\sim 26 \text{N/mm}^2$	



図-2 部分模型の詳細図



写真-3 偏心曲げモーメント対策の状況

表-3 試験体の破壊荷重

計驗体No	破壊荷重	平均せん断強度	必要せん断強度
此动火中41 10 .	kN	N/mm ²	N/mm ²
AP-409-1	52	14.4	
AP-409-2	48	13.3	11.7
AP-409-3	44	12.2	11./
平 均	48	13.3	

度を表-3に示す. 試験体の平均せん断強度の平均値は, 試設計における必要せん断強度を14%程度上回っている.

3.2 引張疲労試験

継手部の部分模型の静的引張試験の結果をふまえて, 引張疲労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 時の接着剤の材齢は31~69日であった.

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. 各試験体の荷重振幅と破壊までの繰返し回数は表-4 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 高い値で与えている.

これらの試験結果を対数グラフにプロットすると図 -3 のようにほぼ一直線にプロットできる.参考のため に、部分模型による引張疲労試験と類似した方法で行わ れた文献7)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-3 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、おおむねこのS-N曲線の近傍にプ ロットできる.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程度の下限値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、本研究の継手構造および各種材料の場合に 限定し、本継手部は高い疲労強度を有することを確認で きた.

4. 輪荷重走行試験による疲労耐久性評価

4.1 試験体の設計および構造諸元

試験体は、荷重条件を道路橋示方書⁸に規定されるB 活荷重とし、1 方向当たりの大型車の計画交通量を 2,000 台/日以上とする床版支間 3.0m の連続版として設計さ れたものとした.

試験体の形状寸法は図-4 および表-5 に示すように, 幅 2.8m,長さ 4.5m,床版支間 2.5m,コンクリート版厚 200mm,底鋼板厚 9mm であり,横リブ寸法は 100mm×

表-4 各試験体の荷重振幅と破壊までの繰返し回数

計 融 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	
时间火中190.	kN	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







(b)底鋼板・アンカーボルトのひずみゲージの配置 図-4 試験体詳細図および測定位置図

16mm,横リブ間隔は 650mm,スタッド寸法は φ 16mm ×120mmとしている.継手構造は、図-1と同様であり, 添接板の板厚,長さおよび接着剤の厚みは前述した部分 模型と同様である.また、コンクリートには、設計基準 強度が $\sigma_{ck}=27N/mm^2$ の普通コンクリートを採用している. ここで、 $\sigma_{ck}=30N/mm^2$ の普通コンクリートを採用している. ここで、 $\sigma_{ck}=30N/mm^2$ の普通コンクリートを採用しなか った理由は、これまでの試験練りの実績により、 $\sigma_{ck}=$ 27N/mm²の普通コンクリートにおける材料試験結果が 30N/mm²程度あることを考慮し、後述する3次元FEM 解析と測定結果の比較において、材料物性による誤差を 小さくするためにコンクリートの設計基準強度を下げ ることにした.さらに、接着剤については前述した二液 性エポキシ系接着剤を使用している.また、底鋼板の継 手部は輪荷重走行範囲内において、輪荷重による曲げモ ーメントが最大となる試験体中央部に設けた.

4.2 載荷方法・支持条件および測定項目

走行試験における載荷方法は、図-5 に示すように初 期荷重を157kNとし、4 万回ごとに19.6kN ずつ荷重を増 加させる階段載荷とした. 階段載荷の最終段階は、載荷 荷重 392kNで、合計 52 万回を走行させる. なお、輪荷 重の走行範囲は試験体の中央から±1.5mである. ここで、 試験体の橋軸方向の支持条件に関しては、写真-1 に示 す支持架台で単純支持し、試験体の橋軸直角方向の支持 条件に関しては、横ばりにより試験体の端部を支持し、 一方向版の性状を再現できるように配慮している.

また,走行試験における測定項目は,図-4 に示すように試験体の変位,底鋼板継手部の開閉量,底鋼板下面のひずみ,継手部アンカーボルトのひずみである.なお,床版上面のコンクリートのひびわれ状況については走行試験終了後に確認しており,コンクリート内部のひびわれ状況については走行試験終了後に試験体を切断して確認した.

表-5 構造諸元

					単位	構造諸元
コンノカル	_	版		厚	mm	200
	ľ	設計基	準 強	度	N/mm^2	27
底 鋼	板	板		厚	mm	9
地 11	ー	断		国	mm	100×16
1頃 ジ		橋 軸 方	向 間	隔	11	650
		寸		法	mm	ϕ 16×120
スタッ	ド	橋軸方	向 間	隔	"	250
		橋軸直角	方向間	隔	11	250
主 鉄	筋	呼		び	-	D19
(橋軸直角力	前向)	間		隔	mm	250
配 力 鉄	筋	呼		び	_	D16
(橋軸方	向)	間		隔	mm	250



図-5 走行回数と載荷荷重の関係

表-6 コンクリートの配合 (a)配合の設計条件

コンクリー の種類	- ト	呼び強度	スランプ	粗骨材の 最大寸法	水セメン ト比	細骨材率
普	通	$27 \mathrm{N/mm}^2$	8cm	25mm	52.4%	43.0%

(b)配合表					
単位量 kg/m ³					
セメント	メント 水 細骨材		粗骨材	AE減水剤	
285	149	798	1065	2.850	

表-7 コンクリートの材料試験結果

番号	圧縮強度	度 静弾性係数 ポアソンド		引張強度
	N/mm^2	$ imes 10^4 \mathrm{N/mm}^2$	ホテノン比	N/mm^2
平均值	32.5	2.95	0.195	2.77



(a)試験体モデル図(1/2 モデル)

(b)荷重載荷モデル(1/2 モデル)

図-6 3次元FEM解析モデル

4.3 材料試験結果

試験体には設計基準強度が $\sigma_{ck}=27N/mm^2$ の普通コンク リートを採用しており、コンクリートの配合は表-6 に 示すとおりである.

試験体と同一の条件のもとで養生を行ったコンクリート供試体の材料試験の結果を表-7 に示す.材料試験結果によれば、圧縮強度は設計基準強度の 1.2 倍の値を示している.これは材料試験の実施日が走行試験開始日の材齢 120 日であることから、目標設定した設計基準強度におおむね近い圧縮強度を確保することができたものと考えられる.なお、静弾性係数については、道路橋示方書⁸に規定されている設計基準強度が σ_{ck}=30N/mm²の場合の静弾性係数 2.8×10⁴N/mm² との差が平均で 5%程度であり、試験体に用いたコンクリートと道路橋示方書の規格値との差は小さい.

以上の結果から、試験体に用いたコンクリートが所定 の材料特性を有していることが確認できた.

4.4 3次元FEM解析

走行試験の測定結果との比較を目的として,試験体の 継手部などを細部にまで忠実に再現した3次元モデル を用いたFEM解析を行った.以下に示す解析は線形解 析で行っており,各部位のモデル化や解析手法について 述べる.

3次元FEM解析の基本となるモデル(以下,基本モ デルと略す)は図-6に示すとおりである.合成床版の コンクリート,継手部のアンカーボルト,接着剤はソリ ッド要素,底鋼板,添接板,横リブおよび側鋼板型枠は シェル要素,スタッドおよび鉄筋ははり要素としている.

なお、FEM解析における底鋼板、添接板、横リブお よび側鋼板型枠とコンクリートとの界面については、両 者のせん断力による付着を無視し、部材に垂直な方向に ついての接触・非接触条件を考慮している.また、底鋼 板と接着剤および添接板と接着剤との界面については、 両者のせん断力による付着を考慮している.

さらに、コンクリート版厚および底鋼板厚、横リブ、 スタッド、鉄筋などの形状寸法については表-5 に示す 値を採用した.また、コンクリートの材料定数は、表-7 に示す材料試験結果により、ヤング率を E=2.95× 10^{4} N/mm²、ポアソン比をv=0.195とした.一方、鋼材の 材料定数については、ヤング率を E=2.0× 10^{5} N/mm²、ポ アソン比をv=0.3とし、接着剤のヤング係数を E=2.1× 10^{3} N/mm²、ポアソン比をv=0.3とした.

基本モデルに加えて、コンクリートの引張領域におけ る橋軸方向および橋軸直角方向にひびわれが発生した 状態を近似的に解析するために、引張領域の抵抗断面を 有効に働かないひびわれモデルを作成した.床版断面に おける力のつり合いから求めたコンクリートの下端か











図-9 試験体中央点のたわみ(D5)



ら 80mm の引張領域に位置するソリッド要素に関して, 隣接するソリッド要素の節点をお互いに共有しないよ うに設定し,隣接するソリッド要素に節点力を伝達しな いモデルとした.

スタッドについては、コンクリートの圧縮領域に位置 するソリッド要素のみに結合するものとした.また、底 鋼板、添接板、横リブおよび側鋼板型枠とコンクリート との接触・非接触については、基本モデルと同様とした.

5. 測定結果および解析結果との比較

走行試験の測定結果のうち,試験体のたわみ分布,た わみの変化,底鋼板下面およびアンカーボルトのひずみ の変化を以下に示す.図中には、3次元FEM解析によ り求めた基本モデル(コンクリート全断面有効)および ひびわれモデル(コンクリート引張領域無視)の解析値 を同時に示す.なお,床版が破壊に至る手前では,各計 測時において荷重とたわみがほぼ線形関係にあること から,階段載荷における劣化の進行状況を把握するため に,便宜的に図中の測定値は荷重 98kN に換算した値を 示している.

さらに、試験体のたわみの測定値および解析値から劣 化度を求め、本試験体の疲労耐久性についても検討する.

5.1 試験体のたわみ分布

試験体中央部における橋軸直角方向の活荷重たわみ 分布の測定値および解析値を図-7 に示す.載荷初期に おける測定値は基本モデルの解析値の95%程度のたわみ であるが分布形状はほぼ等しい.走行回数 48 万回にお ける測定値は、ひびわれモデルの解析値の分布形状と一 致している.走行回数 50 万回における測定値は、ひび われモデルの解析値の 106%程度であり、使用限界の目 安を上回っている.

一方,試験体中央部における橋軸方向の活荷重たわみ 分布の測定値と解析値を図-8 に示す.載荷初期におけ る測定値は橋軸直角方向と同様に基本モデルの解析値 の分布形状とほぼ等しい.また,走行回数 48 万回にお ける測定値とひびわれモデルの解析値は比較的近い分 布形状を示すが,両者を比較すると測定値は端部におい て小さく中央部において大きい傾向を示す.これは,輪 荷重の走行範囲に位置する中央部のひびわれの発生が 端部と比較して多いためと考えられる.さらに,走行回 数 50 万回以降の測定値は中央部において増大している.

5.2 試験体のたわみの変化および劣化度

図-4(a)に示す試験体中央点の変位計D5における活



図-11 継手部アンカーボルトのひずみの変化(A4-1・3)







(a)基本モデル



(b)ひびわれモデル

図-13 継手部アンカーボルトの曲げ応力(A4-1・3)

荷重たわみの変化を図-9 に示す.活荷重たわみの測定 値は、載荷初期における基本モデルの解析値の95%程度 であり、走行回数の増加とともにたわみは推移し、走行 回数 48 万回において使用限界の目安であるひびわれモ デルの解析値とほぼ一致している.しかし、50 万回以降 の測定値はひびわれモデルの解析値を上回っている.

次に、文献9)において提案されている床版の活荷重た わみによる劣化度評価の方法を式(1)に示す.本走行試験 において提案式を適用するにあたり、活荷重たわみの測 定値としてW、コンクリート全断面有効とした基本モ デルの理論たわみおよびコンクリート引張領域無視の 状態としたひびわれモデルの理論たわみとして、それぞ れ W_0 、 W_c の解析値を代入した.

$$D_{\delta} = \frac{W - W_0}{W_c - W_0} \tag{1}$$

ここに、 D_{δ} : 劣化度 W : 活荷重たわみの測定値 (mm) W_{0} : 基本モデルの解析値 (mm) W_{c} : ひびわれモデルの解析値 (mm)

本走行試験は,設計荷重を大きく上回る比較的大きな 荷重を載荷し,さらに載荷板幅が500mmと大きいため, 等分布載荷ではなく載荷板の縁端からの卓越したせん 断力を受ける非常に厳しい試験である.走行回数48万 回における劣化度は D_{δ} =1.08であり,上記の評価方法で は使用限界と定義される1.0を8%上回る程度の劣化度と 算定される.さらに,走行回数が50万回においては D_{δ} =1.60と1.0を大きく上回る結果となっており,この 段階においては床版としての性能が損なわれたと判断 される.

5.3 底鋼板継手部の開閉量の変化

図-4(a)に示す試験体中央点のπゲージP2おける底 鋼板継手部の活荷重による開閉量の変化を図-10に示 す.開閉量の測定値は、載荷初期より走行回数46万回 までは走行回数の増加とともに推移するが、急激な変化 はなく、走行回数48万回を超えたところで開閉量が急 激に大きくなっている.これは、活荷重たわみが使用限 界を超えたときとほぼ近いことから、継手部の接着接合 面のずれあるいは床版コンクリートの押し抜きせん断 破壊が近いことを示している.

5.4 継手部アンカーボルトのひずみの変化

図-4(b)に示す試験体の載荷ブロック直下における継 手部アンカーボルトのひずみゲージA4-1・3の活荷



(a)基本モデル



(b)ひびわれモデル





図-15 押し抜きせん断破壊による底鋼板の局部変形



写真-4 試験終了後の床版上面ひびわれ状況



図-16 床版上面のひびわれ図

重によるひずみの変化を図-11 に示す.また,活荷重に よるアンカーボルトの曲げ応力状態の解析値を図-13 に示す.

図-11 に示すように、載荷初期の測定値は基本モデル の解析値とほぼ一致しており、走行回数 44 万回までは 走行回数の増加とともに推移するが、急激な変化はない、 走行回数 46 万回以降において活荷重によるひずみの変 化が急激に大きくなっており、前述の活荷重たわみが使 用限界を超えたときとほぼ近い.また、図-13(b)に示す ようにアンカーボルトに発生するひびわれモデルの曲 げ応力の解析値は、引張側 14.81N/mm²、圧縮側 -17.74N/mm²である.ここで、アンカーボルト軸部中央 点に発生する平均値±16.28 N/mm²の曲げ応力より算定 されるアンカーボルト基部の水平せん断力応力は 0.5N/mm²であり、文献 10) に示す疲労強度以下である ことを確認している.

5.5 スタッド周辺部底鋼板下面のひずみの変化

図-4(b)に示す試験体の載荷ブロック直下におけるス タッド周辺部の底鋼板下面のひずみゲージL5-5T 1・2の活荷重によるひずみの変化を図-12に示す.ま た,図-14に活荷重による底鋼板下面の曲げ応力状態の 解析値を示す.



写真-5 試験終了後の床版側面ひびわれ状況(A-A①)



写真-6 試験終了後の床版側面ひびわれ状況(D-D①)



図-17 床版切断面のひびわれ図

図-12に示すように、載荷初期の測定値は基本モデル の解析値とほぼ一致しており、走行回数 44 万回までは 走行回数の増加とともに推移するが、急激な変化はない、 走行回数 46 万回以降において活荷重によるひずみの変 化が急激に大きくなっており、前述の活荷重たわみが使 用限界を超えたときとほぼ近い.また、図-14(b)のひび われモデルの解析値に示すように、底鋼板下面の曲げ応 力は正曲げモーメントによる引張状態を示しているが、 48 万回における測定値は、正曲げモーメントおよび負曲 げモーメントによる正負のひずみが発生している.恐ら く、走行回数 48 万回を超えてから、図-15 に示すよう に床版コンクリートが押し抜きせん断破壊し、底鋼板に 局部的な変形が発生したものと考えられる.

6. 試験体のひびわれ性状

走行試験終了時の試験体のひびわれ性状について検 討する.床版コンクリート上面および切断面のひびわれ 状況や、コンクリートを除去した後の鋼部材の状況を以 下に示す.

6.1 床版コンクリート上面のひびわれ状況

走行試験終了時における床版コンクリート上面のひ びわれ状況を写真-4および図-16示す. コンクリート



図-18 床版コンクリートの除去範囲



写真-7 床版コンクリート除去後の スタッド・横リブの状況

上面のひびわれは 300mm~500mm 程度の間隔で発生し ており、載荷板の縁端におけるひび割れの発生量は、他 の部位より多い. そのうち橋軸直角方向に発生したひび われが比較的長い. また、試験体中央の床版支持架台上 付近において橋軸直角方向に比較的短いひびわれが 10 箇所程度発生している.

6.2 床版切断面のひびわれ状況

走行試験終了後において試験体内部のひびわれ状況 を調べるために、図-17 および図-18 に示す切断線A -A, B-B, C-C, D-Dに沿って縦横に試験体を 切断した. これらの切断面のひびわれ状況を図-17 に、 切断面A-A①およびD-D①の状況をそれぞれ写真 -5 および写真-6 に示す. なお, 写真中のひびわれに ついては着色を施している. 橋軸方向の切断面A-A① を観察すると、横リブの頂部にひびわれが発生し、アー チ状に進展しており, 隣接する横リブから発生したひび われが連続している. これらのひびわれは、上側鉄筋付 近においてほぼ水平に発生しているが、床版上面にまで は到達していない. また、これらのひびわれは上側鉄筋 位置において床版を上下に分離することが予想され、ス タッドを上側鉄筋位置まで高くし、コンクリートの圧縮 領域に十分に定着させることで本合成床版の耐久性を さらに向上させている.

一方,橋軸直角方向の切断面D-D①を観察すると, 試験体の中央付近にひび割れが発生しており,載荷板の 縁端より比較的急な傾きで斜め下方に進展し,コンクリ ートと底鋼板の境界付近に沿って支持架台方向に伸び ている.

なお、切断面のコンクリート版厚を実測したところ、 ひびわれなどの影響が少なく測定が可能であった箇所 のコンクリート版厚は 190~211mm であり、設計値の 200mm との差は-5%~+5%程度であった.

6.3 床版コンクリート除去後の状況

試験体の切断後,スタッド,横リブ,底鋼板継手部の 添接板,アンカーボルトおよび接着部の状態を確認する ために,コンクリートの除去を実施した範囲および状況 を図-18および写真-7から写真-9に示す.



写真-8 床版コンクリート除去後の継手部の状況



写真-9 接着部の状況(写真-8 矢視 A)

表—8	最終載荷荷重に対す	る換算走行回数

載荷荷重Pi	走行回数	換算走行回数
kN	n _i	Ni
157	40,000	0
177	40,000	0
196	40,000	0
216	40,000	1
235	40,000	3
255	40,000	15
275	40,000	60
294	40,000	204
314	40,000	682
334	40,000	2,119
353	40,000	5,848
373	40,000	16,075
392	20,000	20,000
合計	500,000	45,007

表-9 最大せん断応力度

コンクリート強度	ヤング率	ヤング係数比	最大せん断応力度
σ_{ck}	Ec	n	τ_{smax}
N/mm ²	$\times 10^4$ N/mm ²		N/mm ²
32.5	2.95	6.780	5.43

	床版厚	最終載荷荷重	換算走行回数	最大せん断応力度	圧縮領域	載荷版幅	有効高さ	有効幅	せん断強度		
試験体名称	(底鋼板含む)	Р	Ν	$\tau_{ m smax}$	x _m	b	d _d	В	P _{sx}	$P/P_{\rm sx}$	
	mm	kN		N/mm ²	mm	mm	mm	mm	kN		
土研	209	392	45,007	5.43	106	200	200	600	691	0.568	
AJ-1	160	216	1,213,249	5.42	89	120	151	422	407	0.530	
AJ-2	160	216	2,058,357	5.32	89	120	151	422	400	0.540	

表-10 各試験体の押し抜きせん断強度

写真-7 に示すように試験体中央部におけるスタッド には、曲がりなどの変形や溶接部近傍で損傷を受けてい ないことを確認した.さらに、写真-8 に示すように輪 荷重走行位置直下における底鋼板継手部の添接板およ びアンカーボルトには移動した形跡は認められなかっ た.また、写真-8 の底鋼板継手部を橋軸方向から観察 した写真-9 に示すように底鋼板と添接板の接着部にお いても破断および剥離した形跡がなく、損傷は認められ なかった.

7. 疲労耐久性の評価

文献3)より,合成床版の押抜きせん断強度は,底鋼板のせん断抵抗を無視しコンクリートの圧縮領域のせん断抵抗のみを考慮した式(2)により評価ができる.

$$P_{sx} = 2 \cdot \tau_{s\max} \cdot x_m \cdot B \tag{2}$$

ここに,

- P_{sx}
 : 貫通ひびわれ発生後の押抜きせん断 強度(kN)
- au_{smax} : コンクリートの最大せん断応力度 (N/mm²)
- x_m
 : コンクリートの引張領域を無視した 場合の主鉄筋断面の中立軸位置(mm)
- B : 疲労に対する床版の有効幅(mm)

 $B = b + 2 \cdot d_d$

b : 橋軸方向の載荷板の辺長(mm)

 d_d : コンクリート版厚(mm)

上記の考えにもとづいて試験体の押し抜きせん断強 度を算出し、走行試験における最終載荷荷重をせん断強 度により除した無次元量 *P*/*P*_{sx} が求められる. 階段的に 載荷した全荷重に対する走行回数については、マイナー 則を用いて最終載荷荷重で換算した換算走行回数を求 める.ここで,換算走行回数を求める式を式(3)に示す.

$$N_{eq} = \sum (P_i / P)^m \times n_i \tag{3}$$

- N_{eq}:最終載荷荷重の換算走行回数(回)
 - :載荷荷重(kN)

 P_i

- *P* : 最終載荷荷重 (kN)
- *m* : S-N曲線の傾きの逆数
- n_i :載荷荷重 P_i の走行回数(回)

表-8および表-9に、換算走行回数、コンクリートの



図-19 押し抜きせん断強度の評価式と RC 床版の疲労寿命曲線の比較(補正前)

最大せん断応力度を示し、表-10に、無次元量 P/P_{sx} を 算定した結果を大阪大学の試験結果と併記して示す. そして、この無次元量と換算走行回数をS-N曲線とし てプロットした結果を図-19に示す.

本走行試験のプロットした点は、押し抜きせん断破壊 が発生したと推定した走行回数50万回までとした. さら に、本走行試験より先行して実施した大阪大学の2体 (AJ-1, AJ-2)の走行試験の試験結果を併記し、試験体 サイズおよび試験機の違いによる既往のS-N曲線を 比較することを試みた.大阪大学の2体の試験体は本試 験体を縮小したタイプである. 主な構造諸元は床版厚 160mm (底鋼板9mm含む),床版支間2.0mであり,継手 構造は本試験体と同様である.また,最終載荷荷重は 216kNであり、総走行回数はAJ-1が240万回、AJ-2が274 万回である.大阪大学の試験結果では、阪大式の既往のS -N曲線上にプロットされることを確認しているが、本 走行試験の結果は、土研式の既往のS-N曲線より若干 上回っており,大阪大学の試験結果と傾向が異なること が確認された. この原因としては、試験機の違いの影響 および床版の施工精度の影響を受けていることが想定 される. 文献11)より、その影響を考慮した検討が行われ ており、ここでは、試験機の影響を除く、下記の3項目 の誤差による補正を行うこととする.

表-11 最大せん断応力度(補正後)

コンクリート強度	ヤング率	ヤング係数比	最大せん断応力度
σ_{ck}	E _c	n	τ_{smax}
N/mm ²	$\times 10^4$ N/mm ²		N/mm ²
32.5	2.34	8.558	5.43

表-12 本試験体の押し抜きせん断強度(補正後)

床版厚	最終載荷荷重	換算走行回数	最大せん断応力度	圧縮領域	載荷版幅	有効高さ	有効幅	せん断強度	
(底鋼板含む)	Р	Ν	τ_{smax}	x _m	b	d _d	В	P _{sx}	$P/P_{\rm sx}$
mm	kN		N/mm ²	mm	mm	mm	mm	kN	
216	392	45,007	5.43	116	200	200	600	756	0.519

7.1 合成床版厚による補正

設計段階で設定した合成床版厚と実際の合成床版厚 の差に着目し、補正を実施することにした.実際の合成 床版厚は走行試験終了後、試験体を切断して直接計測を 行った。コンクリートの押し抜きせん断強度 P_{sx} の算出 には、計測した断面内におけるすべての測定値の平均値 207mmで補正を行うことにした.

7.2 圧縮強度による補正

コンクリートの圧縮強度を設計基準強度から材料試 験により得られた表-7 に示す実験データに置き換え, コンクリートのせん断強度を求め, P_{sx} の補正を行うこ とにした.

7.3 ヤング率による補正

ヤング率に対する補正については、材料試験により得られた表-7 に示す実験データを用いるのではなく、以下の式(4)により与えられるヤング率を用いることにした.

$$E_c = 900 \cdot (\sigma_{\rm ck} - 29.4) + 20580 \tag{4}$$

ここに、 E_c : コンクリートのヤング率 (N/mm²) σ_{ck} : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

この式は多数ある既往の研究の内,大阪大学でなされ た試験結果の整理に使用されているものである.

そこで、式(2)から(4)を用いて、コンクリートの引張領 域を無視した場合の主鉄筋断面の中立軸位置 x_m を補正 し、コンクリートの押抜きせん断強度 P_{sx} を求め、本走 行試験の既往のS-N曲線にプロットした.

7.4 補正後の試験結果

以上の3項目の補正による実験データの変動状況を 反映した結果を図-20に示すが、結果として、合成床版 の疲労寿命は式(2)を用いることによって大阪大学で得 られた試験結果が阪大式の既往のS-N曲線上にプロ ットできるのと同様に、土研式の既往のS-N曲線によ り近くプロットできるようになった.よって、本走行試験 の既往のS-N曲線を用いることにより、合成床版の疲 労寿命が推定できると結論づけられる.

よって、本走行試験による接着接合継手は、最終載荷 荷重 392kN,総走行回数 50 万回に耐えられる疲労耐久性 を確認できた.

8. まとめ

本研究において得られた結果は以下のとおりである.





- 走行回数が 52 万回に達する前に床版が押し抜きせん 断破壊し、平成 10 年度に実施した(独) 土木研究所 との共同研究の結果よりも疲労耐久性が下がったが、 これは設計基準強度を通常の 30N/mm²から 27N/mm² に下げたためである。
- 2) 輪荷重走行試験の押し抜きせん断強度については、合成床版厚、圧縮強度、ヤング率の補正を行うことにより、実験データは既往のS-N曲線付近にプロットでき、合成床版の疲労寿命予測が可能となった.
- 3)本合成床版の接着接合継手は、最終走行回数で疲労載 荷に耐えることから、十分な疲労耐久性があり、実用 性があると言える.ただし、適用する床版支間につい ては今後の課題としたい.

謝辞

本研究を実施するにあたり,(独)土木研究所ならび に関係各位の方々に多大なるご助力を得たことをここ に記し,感謝を表する次第である.

参考文献

- 建設省土木研究所、(財) 土木研究センター、民間企業17社15グループ:道路橋床版の輪荷重走行試験機における疲労耐久性評価手法の開発に関する共同研究報告書(その1)、pp.79-103, 1999.
- 2) 国土交通省土木研究所、(財) 土木研究センター、民間企業21社17グループ:道路橋床版の輪荷重走行試験における疲労耐久性評価手法の開発に関する共同研究報告書(その5) -評価編-, pp.141-167, 2001.
- 3) 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.
- 4)街道浩,渡辺滉,橘吉宏,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.

- 5) 街道 浩,渡辺 滉,橘 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説, II 鋼橋編, 丸 善, 2002.

- 8) 松井繁之,前田幸雄:道路橋RC床版の劣化度判定法の一提案,土木学会論文集第374号/I-6,pp.419-426, 1986.
- 10)日本道路協会:鋼道路橋の疲労設計指針,丸善, 2002.
- 大西弘志,松井繁之,渡邉裕一:分割型載荷板を用いた輪荷重走行試験による RC 床版の S-N 曲線の検討, 第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.223-228, 2003.

(2009年9月24日受付)