平 26.都土木技術支援・人材育成センター年報 Annual Report C.E.S.T.C., TMG 2014

9. バックルプレート床版の疲労耐久性に関する実験的検討

Experimental Examination Concerning Fatigue Durability of Buckle Plate Slab

1. はじめに

隅田川の清洲橋(写真-1、昭和3年竣工)や永代 橋(大正15年竣工)などは帝都復興橋梁群の代表的 な著名橋であり、供用80年を超えて今なお健在であ る。中でも清洲橋と永代橋は重要文化財(他に勝鬨 橋)に指定されている貴重な橋梁である。帝都復興 橋梁群は、文献¹⁾によると、隅田川筋の長大橋梁の 中の6事業(相生橋、永代橋、清洲橋、蔵前橋、駒 形橋、言問橋)は、鉄道省が手掛けて形式の異なる 著名橋を設計したとされる。床版形式は、ヨーロッ パで実績があり国内では少数のバックルプレート床 版(以下、BP 床版と略記する)が採用されている。 BP 床版の特徴は、図-1に示すとおりバックルプレ ートは下に凹みがあり、その上に無筋のコンクリー ト床版が打設されている形式であり、プレートとコ ンクリート床版は、スタッドや形鋼などで合成構造 としていない点が特徴である。

清洲橋と永代橋は、供用約 60 年を経過した昭和 62 年に写真-2~3 のように BP 床版のプレートの腐 食が進行していることから、図-1 に示す補修前の コンクリート部分を撤去してショットブラストで研 掃し、錆び止め塗装後に人工軽量コンクリートに打 替えている。補修時の記録ではコンクリート撤去後 の BP は、写真-3に示すとおり全面で腐食しており、 約 2mm 減耗しているとの記述がある。また、一部の パネルでは、写真-2 に示すとおり水抜き穴が直径 20cm 程度欠損している箇所もあった。これら BP の 欠損箇所は、内側に当板などで補強を行ってコンク リートを施工したものと想定されるが、BP の補修方



技術支援課





写真-2 水抜き穴の欠損



写真-3 BP 腐食状態



図-1 補修前後の断面(昭和 62 年)

法に関する資料は存在しないため詳細は不明である。 補修後約30年経過している現状の健全性は、定期点 検の結果では、特に問題があるとは考えられないが、

関口幹夫、大石雅登

将来の維持管理計画を策定しておくこと が重要である。しかしながら、耐久性の 検討事例がなく破壊モードや疲労耐久性 も不明である。そこで、清洲橋の実物大 床版モデル試験体を製作して走行疲労実 験により疲労耐久性を検討する。

本論文では、表-1 に示す実験シリー ズⅡの現行モデルとシリーズⅢの長寿 命化モデルの疲労試験結果を取りまとめ 報告する。シリーズΙとⅡの一部は、既 報^{2),3),4),5),6)}を参照されたい。

2. 輪荷重走行実験の概要

(1) 実験シリーズ

実験シリーズの概要を表-1 に示す。シリーズ I の現行モデル(静的載荷実験)とシリーズⅡ現行モ デル(走行疲労実験)は、プレートの板厚を3タイ プに変化させている。板厚 8.0mmのタイプは設計時 7.9mm 相当であり、6.0mmのタイプは昭和 62 年床版 打替え時の腐食量 2mm を再現したものである。また、 4.5mm のタイプは、将来の補修限界を鋼板接着補強 工法と同等の板厚としたものである。

シリーズⅢの長寿命化モデルは、将来の長寿命化 の打替えを想定したモデルであり、プレートの板厚 は4.5mmである。BP-4.5D-Hは、高強度軽量コンク リートを使用したタイプである。BP-4.5D-Pは、写 真-2の腐食欠損部を当板で補強したタイプであり、 水抜き穴を直径20cm欠損させてプレートの内側に 板厚4.5mmの当板をエポキシ樹脂接着剤で接着した ものであり、接着の重ね部は約10cmである。

(2) 試験体

輪荷重走行疲労実験用試験体は、清洲橋をモデル 化したもので形状寸法を図-2 に示す。試験体の幅 1800mmは、幅員方向パネル最大寸法である。バック ルプレートの製作は、本来はプレス加工であるが、 プレスの型が存在しないため溶接構造とした。使用 した鋼材は、一般構造用鋼材 SS400 である。縦桁と バックルプレートの接合は、本来はリベットである が、ボルトの頭が半円形のトルシア型高力ボルトで

表-1 実験シリーズの概要

		論 試験法 体名	ΒP	最小 床版厚 (mm)	サグ	コンクリート		11 /m
夫映 シリーズ	_夫 帜 方法		板厚 (mm)		量 (mm)	種類	基準強度 (N/mm ²)	自己 射力 (mm)
T (1845	±4 44	BP-8.0S	8.0			1種		
I (現行 モデル)	伊 印 載荷	BP-6.0S	6.0			軽量		
- () / ()	単以1円	BP-4.5S	4.5			早強	01	Da
田 (田)(二)	十年	BP-8.0D	8.0	200	76		21	D6
11(現行 モデル)	走 行 症 学	BP-6.0D	6.0	200	10	2種		150へ150 かぶり50
·L / ///)	波力	BP-4.5D	4.5			軽量		13 232 9 00
Ⅲ(長寿命	走行	BP-4.5D-H	4.5			普通	36	
化モデル)	疲労	BP-4.5D-P	4.5				24*	

(注) *:膨張材使用

表-2 コンクリートの特性値

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤンク [*] 係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	見掛け密度 (kg/m ³)
Ⅱ(現行モデル)	25.4	15.7	0.177	1777
BP-4.5D-H	43.6	16.8	0.165	1800
BP-4.5D-P	25.3	14.9	0.159	1780



図-2 試験体の形状寸法

代用した。なお、縦桁上に本来はないスタッドジベ ルを配置して浮き上がりを防止している。

コンクリートの種類と設計基準強度は、表-1の とおりである。シリーズ I と II の設計基準強度は、 昭和 62 年床版打替え時仕様の 21N/mm²である。現行 モデル II は、実験期間が長期となることから強度増 進を考慮して普通セメントを使用した。材齢 28 日の コンクリートの特性値は、表-2 に示すとおりであ る。長寿命化モデルのコンクリート設計基準強度は、 36N/mm²の高強度タイプと 24N/mm²で膨張材仕様の当 板補強タイプである。



写真-4 輪荷重走行装置

(3) 輪荷重走行疲労実験方法

輪荷重走行疲労実験は、ゴムタイヤの自走式走行 載荷装置を使用した。シリーズIIの現行モデル試験 体は、写真-4に示すように載荷装置に3体連続(試 験体と試験体は接触しないように約5mmの隙間を開 けている)して配置し、床版支間中央をタイヤが走 行する方式である。シリーズIIの走行載荷は、階段 載荷方式で図-3に示す載荷プログラムである。走 行荷重は、設計輪荷重相当の100kNで10万回、衝撃 の割増を考慮した130kNで10万回、輪荷重の最大観 測値相当の160kNで10万回、設計輪荷重の2倍の 200kNで60万回、試験機の最大荷重240kN載荷を上 限とする。

なお、シリーズ II の BP-4.5D は、98 万回で破壊し たことから、98 万回以降の実験は、シリーズ II で未 破壊の PB-6.0D と BP-8.0D に加えてシリーズ III の長 寿命化モデルの試験体 2 体を追加して 4 体の組合せ で実験を実施した。

3. 疲労実験結果

(1) 走行回数と疲労耐久性

走行荷重と回数の実験結果を表-3 に示す。表-3 の最下段には、階段載荷の結果を比較しやすいよう に 100kN 換算走行回数を S-N 線図の傾きの逆数mを 松井式⁷⁾のm=12.76 と仮定して算定した。シリーズ Ⅱの BP-4.5D は、981,898 回 (100kN 換算 1.00E+10) で疲労破壊した。BP-6.0D および BP-8.0D は、累計 218 万回 (100 k N 換算で 5.41E+10) 時点で未破壊で あり継続実験中である。



表-3 走行回数の結果

荷重(kN)	BP-8.0D	BP-6.0D	BP-4.5D	BP-4.5D-H	BP-4.5D-P
100	100,000	100,000	100,000	-	-
130	100,000	100,000	100,000	-	-
160	100,000	100,000	100,000	-	-
200	600,000	600,000	600,000	-	-
240	81,898	81,898	81,898	-	-
100	100,000	100,000	-	100,000	100,000
160	100,000	100,000	-	100,000	100,000
200	100,000	100,000	-	100,000	100,000
240	600,000	600,000	-	136, 113	313,002
100	100,000	100,000	-	-	-
160	100,000	100,000	-	-	-
200	100,000	100,000	-	-	-
合計	2, 181, 898	2,181,898	981,898	436, 113	613,002
100 k N換算	5.41E+10	5.41E+10	1.00E+10	1.04E+10	2.30E+10

(注) :100kN換算は, m=12.76 (松井式)

表-4 比較データ1((独)土研RC8)⁸⁾

(独) 土研(RC8)						
荷重(kN)	走行回数	100kN換算回数				
157	40,000	12, 435, 856				
176	40,000	55, 896, 148				
196	40,000	214, 411, 197				
216	40,000	723, 465, 998				
235	40,000	2, 195, 837, 317				
255	40,000	6,097,680,112				
274	15,649	6, 141, 405, 821				
合計	255, 649	15, 441, 132, 450				
1 0 0 1 1 1 4 66	10 50					

100kN換算 m=12.76

表-5 比較データ2 (東京都 RC8)⁹⁾

都(21)						
荷重(kN)	走行回数	100kN換算回数				
157	500,000	157,997,265				
196	500,000	2,680,139,965				
235	838,179	45, 515, 854, 272				
合計	1,838,179	48, 353, 991, 502				
都(22)						
荷重(kN)	走行回数	100kN換算回数				
157	500,000	157,997,265				
196	500,000	2,680,139,965				
235	491,131	26,670,015,622				
合計	1,491,131	29, 508, 152, 853				

	厚さ (cm)	鉄筋方向	呼び径	有効高さ (cm)	間隔 (cm)	コンクリート強 度 (N/mm ²)	Psx (kN)
土研	25	主鉄筋	D19(D16)	21(4)	15(15)	27 0	692.3
RC8	20	配力鉄筋	D16(D13)	19 (5.6)	12.5(12.5)	27.0	
邦(91	25	主鉄筋	D19(D19)	21.5(4.8)	15(30)	<u> </u>	795 0
1日17日	20	配力鉄筋	D16(D16)	19.6(6.2)	12.5(25)	20.2	120.0
都22 25	主鉄筋	D19(D19)	21.2(4.3)	15(30)	97.0	719 4	
	25	配力鉄筋	D16(D16)	19.2(5.2)	12.5(25)	21.0	112.4

表-6 比較用 RC 床版の仕様

 (): 圧縮側 Psx:都21,22の載荷板幅は39cmで試算

一方、長寿命化モデルで高強度の BP-4.5D-H は、 436,113 回 (100kN 換算 1.04E+10) で BP-4.5D と同 程度である。また、当板補強タイプの BP-4.5D-P は 累計 613,302 回(100 k N 換算 2.30E+10)であり、 BP-4.5Dの100kN換算に対し約2.3倍で破壊した。

(2) RC床版との疲労耐久性の比較

現行 RC 床版の設計基準である道路橋示方書平成8 年版(道示 H8 と略記)仕様(設計寿命 100 年)の RC 床版(床版支間 2.5m、床版厚 25cm)と比較する。 表-4の比較データ1(独)土研 RC8 は、(独)土木 研究所のクランク式鉄輪方式の実験結果[®]である。 また、東京都のゴムタイヤ式の実験結果⁹⁾を表-5 の比較データ2(東京都 RC8)に示す。それぞれの 比較用データの床版の仕様を表-6 に示した。床版 のサイズは、いずれも幅 2.8m 長さ 4.5m 床版厚 25cm で同一寸法である。また、引張側の主鉄筋径と間隔 は同一であるが圧縮側の鉄筋径と間隔は異なってい る。床版の性能に影響を与えるコンクリート強度と Psx (押し抜きせん断耐荷力)⁷⁾ は、同程度でありほ ぼ同じ性能を持つ試験体とみなせる。

表-7 100kN 換算の比較

試験体	100kN換算 回数(回)	比率	備考
BP-8.0D	5.41E+10	3.50	未破壊
BP-6.0D	5.41E+10	3.50	未破壊
BP-4.5D	1.00E+10	0.65	破壞
BP-4.5D-H	1.04E+10	0.67	破壊
BP-4.5D-P	2.30E+10	1.49	破壞
土研RC8	1.54E+10	1.00	破壊
都(21)	4.88E+10	3.16	破壊
都(22)	2.95E+10	1.91	破壞

いずれの走行疲労実験は、階段載荷方式であるの で 100kN 換算回数で整理した結果を表-7 に示す。 道示 H8 基準の試験結果は、土研 RC8 の 1.54E+10 か ら都(21)の4.88E+10と約3倍の差が見られる。しか しながら、走行疲労実験ではデータの変動(バラツ キ)は通常10E+01位は起こり得るので、ここでは、 最小値の土研 RC8 を基準として比率を求め比較する。 破壊した板厚 4.5mm の BP-4.5D と BP-4.5D-H は、土 研RC8の65%から67%の疲労耐久性と評価できる。 また、当板補強のBP-4.5D-P(100kN換算2.30E+10) は、土研 RC8 の 1.49 倍の性能であり有効な補修方法 である。さらに板厚 6.0mm と 8.0mm は未破壊で 100kN 換算 5.41E+10 以上であり、土研 RC8 の約 3.5 倍以上 の疲労耐久性が期待できる。

なお、高強度タイプの BP-4.5D-H と普通タイプの BP-4.5D を比較すると、破壊回数は高強度タイプの 方がやや小さい。その要因は、後述するところの高 強度タイプおよび当板補強タイプの何れも早期にプ レートのはく離が生じていたので、バックルプレー ト製作時の溶接加工精度が劣っていたことによるプ レートの反りの影響が考えられる。



図-4 破壊時走行面のひび割れ図

(c) BP-4.5D-P



(b) BP-4. 5D-H

図-6 破壊床版のプレートはく離図

BP-4.5D の破壊時のコンクリート上面のひび割れ の状態を写真-5 に示す。床版中央は、押し抜きせ ん断破壊時に発生したと考えられる円形状のひび割 れが特徴的である。また、破壊した3体(BP-4.5D、 BP-4.5D-H、BP-4.5D-P)の走行面のひび割れ図を図 -4(a)~(c)に示す。 BP-4.5D の破壊直近でのひび 割れの増加は、80万回から急増した。タイヤ幅位置 の押し抜きせん断ひび割れの段差は、5mm~10mm 程 度であった。タイヤ走行面の一部は、破壊直前に砂 利化(骨材化)状態に粉砕されている。図-4(b)の BP-4.5D-Hは、BP-4.5Dとほぼ同様なひび割れパター ンである。図-4(c)の BP-4.5D-Pは、図の下側走行 端部でのひび割れは少ない。少ない理由は、試験機 の走行範囲の制限から床版全体を走行できていない ためである。

(a) BP-4.5D

(3) 走行面のひび割れ

未破壊の BP-8.0D および BP-6.0D の床版上面のひ び割れの状態を図-5 に示す。タイヤ走行面にひび 割れが相当量発生している。BP-8.0Dの方がひび割 れ幅の大きいものがやや多くみられる。また、両床 版ともに横支桁上で各1個所貫通ひび割れが確認で きるものの、それ以外では貫通ひび割れは生じてい ないと考えられる。

(c) BP-4.5D-P

(4) バックルプレートのはく離

🚃 40万回

破壊した 4.5mm のプレートのはく離の打音調査結 果を図-6に示す。図-6(a)のBP-4.5Dのはく離は、 横支桁取付け部の走行 1 万回から発生し、約45 万回 で面積の50%程度に進展し、90 万回でほぼ 100%は く離した。支持桁とプレートの接合ボルト部での滑 りや変形は確認できなかった。一方、図-6(b)の BP-4.5D-H は、走行前に周辺部にはく離が確認され 実験を開始している。1 万回で周辺部全体にはく離 が進展し、30 万回でほぼ 100%はく離した。図-6(c) の BP-4.5D-P についても走行前に当板補強部以外で はく離が確認され、1 万回でほぼ 100%はく離した。



(c) 切断状態 写真-6 BP-4.5D-P (当板補強タイプ)

このように長寿命化モデルで早期のはく離が発生した原因は、シリーズIIとは異なる工場でバックルプレートを製作したことから、溶接加工による反りの影響によるものと考えている。

未破壊の BP-8.0D と BP-6.0D のはく離図を図-7 に示す。周辺部でのはく離が進行しているとともに、 はく離領域は BP-8.0D の方がやや大きい。

(5) 切断面のひび割れ



写真-7 BP-4.5DとBP-4.5D-Hの切断面

疲労破壊した床版を4分割に切断してひび割れの 状態を調査した。写真-6 は当板補強タイプの BP-4.5D-P である。プレート中央に当板の一部が見 える。写真-6(c)の右半分は写真-6(a)の右半分と 同一である。同様に写真-6(c)の左半分と写真-6 (b)の左半分は同一である。写真-6(a)の橋軸直角 方向ではタイヤ幅のエッジから 30~45 度の押し抜 きせん断ひび割れが明瞭に確認できる。

一方、写真-6(b)の橋軸方向では、上面から約 10cmの深さに RC 床版で観察される水平ひび割れに 類似したひび割れが、それより深い位置ではブロッ ク化した状態が観察される。写真-7に BP-4.5D と BP-4.5D-H の切断面の写真を示した。写真-6と同様 なひび割れパターンの特徴を有している。これらか らひび割れや破壊パターンは、RC 床版でのひび割れ や破壊形式と大きく相違しないと考えられる。

(6) たわみの性状

床版中央の 100kN 換算活荷重たわみと 100kN 換算 走行回数(m=12.76 と仮定)の関係を図-8 に示す。 BP-4.5D は、1.0E+09 回以降にたわみが急増して破壊 後の最大値は 7.4mm (P=240kN 載荷時)である。 BP-4.5D-H と BP-4.5D-P は、プレートのはく離が走 行前から発生したこともあって、1.0E+06 から増加 傾向を示して、1.0E+09 あたりから急増して破壊し た。いずれも破壊時の最大たわみは、BP-4.5D と同 程度であった。

未破壊の BP-8.0D と BP-6.0D では、図-8 の 1.0E+10 以降で増加傾向を示し、プレートの厚い BP-8.0D の方が BP-6.0D より増加量が大きくなって いる。この変化の詳細をたわみ分布の図-9 で確認 すると、図-9(a) BP-8.0D と図-9(b) BP-6.0D の初期 値 1.0E+00 から 1.0E+10 まではほぼ同等であるが、 それ以降については BP-8.0D の方がたわみ量は増加 していることが確認できる。ただし、たわみ分布の 形状は、いずれも滑らかな放物線形状を維持してい るのでプレートとコンクリートは周辺部ではく離が





図-7 で示したように進行しているものの、ほぼ合 成断面としての変形を維持している。

一方、破壊した床版のたわみ分布を図-10に示す。 図-10(a)の BP-4.5D では 1.4E+09 以降、図-10(b) の BP-4.5D-H は 4.1E+06 からW型の分布形状に変化 している。この変化は押し抜きせん断ひび割れの先 端でプレートを局所的に押込んでいる状態を計測し ているためである。このW型の分布形状は、静的押 し抜き破壊^{2),5)}でも明瞭に確認できており、BP 床版 の押し抜きせん断破壊の代表的な特徴である。

一方、同じように破壊した図-10(c)の BP-4.5D-P



では、明確な押抜きせん断ひび割れによる押込みに よるW型の変形が計測されていない。この理由は、 当板補強部はプレートが2枚重ねであり剛性が大き く変形し難いことが考えられる。

(7) ひずみの性状

しないことがわかった。

BPの床版中央の活荷重ひずみと100kN換算走行回数の関係を図-11 に示す。図-11(a)は橋軸直角方向のひずみの推移であり、図-11(b)は橋軸方向のひずみの推移である。BP-4.5D は走行回数 1.0E+09 回以降に一旦減少し、その後急増して破壊するものの、活荷重ひずみの最大値は橋軸直角方向で450μ(240kN載荷時)であった。したがって、発生応力は100N/mm²以下であり破壊時でも降伏(390N/mm²)

BP-4.5D-H は図-11(a)と(b)いずれも約 1.0E+05 でひずみが0近くに減じ、その後増加する推移を示 した。この変化はプレートの反りによる影響と考え られる。また、図-11(a)の BP-4.5D-P の発生ひずみ





量は、他の床版の約 1/2 と小さいが、これは当板の 中央部での計測のためである。

一方、図-12には橋軸直角方向の100kN換算活荷 重ひずみ分布を示す。図-12(a)の BP-4.5D と図-12(b)の BP-4.5D-H は、たわみ分布の図-10(a)およ



(a) BP-4.5D



(b) BP-4.5D-H



図-12 橋軸直角方向の底鋼板ひずみ分布

び(b)同様に床版支間中央の両サイドに発生する押 し抜きせん断ひび割れ位置で局所的に変形する影響 を受けて、最終的には中央よりひずみの値が大きく なるW型の分布が特徴的である。また、図-12(c) の BP-4.5D-P は、当板部の剛性が大きいため、破壊 時にはW型に似た変形が見られるものの、破壊直前 までの分布形状が他の4.5mm 床版と異なっている。

未破壊の BP-8.0D と BP-6.0D のひずみ分布を図-13 に示す。BP-8.0D は、2.9E+10 以降にややW型に 近い分布形状に変化しつつあるように診ることがで きる。一方、図-13(b)の BP-6.0D は、5.0E+10 以降 に支間方向の距離 1200 近辺でひずみが大きくなっ ており、ややW型の前兆段階と考えられる。プレー ト 8mm と 6mm の未破壊床版については、プレートと コンクリート床版の付着切れの範囲は、周辺部に限 定されていることから、特に BP-6.0D は、損傷初期 の段階と想定される。BP-8.0D は BP-6.0D に比べて 損傷がある程度進行している段階と推察できる。



図-13 未破壊床版の活荷重ひずみ分布

(8) 横支桁(横桁)のひずみ性状

横支桁の支間中央下フランジの活荷重ひずみの推 移を図-14 に示す。走行開始から概ね 100kN 換算走 行回数 1.0E+09 回までは、40~55μの範囲にある。 BP-4.5D は 1.0E+09 回以降に急増して破壊した。破 壊時のひずみの値は、240kN 載荷時で約 250μであり、 許容応力度以下のレベルにある。破壊しない BP-8.0D は、BP-6.0D よりやや大きい値で推移し、 1.0E+10 回以降は増加傾向にある。

4. 重錘落下たわみ

(1) 測定方法

写真-8 に示す重錘落下たわみ測定機(IIS)の 100kgの重錘とたわみセンサー(速度計)とデータ 収録解析装置を組み合わせたシステムを使用した。 たわみセンサーは、床版中央点と両主桁上に配置し て3か所のたわみを同時に測定し、両主桁の基線か らの中央たわみを計測する。重錘の落下高さは 200mm 一定とし重錘の落下開始から約10秒間(サン プリング間隔は500/秒)計測した。また、載荷版(直



図-14 横支桁のひずみ



写真-8 重錘落下たわみ測定状況

径 35cm) のロードセルの荷重値で 100kN 換算し3回の平均値で求めた。

(2) 重錘落下たわみと静的載荷たわみの比較

重錘落下たわみ法と静的載荷たわみの100kN換算 たわみと100kN換算走行回数の関係を図-15に示す。 図-15 はいずれも破壊した床版であるが、重錘落下 たわみと静的載荷たわみは、押し抜きせん断ひび割 れが発生してたわみが急増する時点までほぼ一致し ていることが見て取れる。

未破壊の床版 BP-8.0D と BP-6.0D における両者の 関係を図-16 に示す。いずれも静的載荷たわみと重



図-15 重錘落下たわみと静的載荷たわみ

錘落下たわみはおおむね一致しており、1.0E+10 以
降でたわみは増加傾向を示した。破壊した床版の図
-15 では、破壊直前のたわみ量は、いずれの床版も
1.0mm を超えている。一方、図-16 の未破壊の
BP-8.0D は、0.8mm 以下であるが損傷が相当進行して
いると推察できる。なお、BP-6.0D は、たわみは増
加し始めた段階で 0.3mm 程度であることから、
BP-8.0D に比較して損傷は進行していないと推察さ
れる。

(3) たわみによる維持管理水準の検討

将来の維持管理を想定した場合には、管理水準の 項目には、打音検査によるはく離面積の把握と直接 測定可能なたわみ量が考えられる。バックルプレー ト床版は、鋼板接着補強床版と異なり、底鋼板は主 桁や横桁といった構造部材にリベットで結合されて いるので、はく離が進行しても底鋼板が剥落するこ とは考えられない。したがって、たわみによる管理 は有効である。実橋におけるたわみの測定は、橋梁 上の交通を全面的に止めて荷重車を使用した静的載 荷試験による計測法があるものの、通行止めは困難



図-16 静的載荷たわみと重錘落下たわみ

な場合が多く一般的とは言い難い。一方、重錘落下 たわみ(IIS)法は、車線規制の範囲で比較的短時間 にたわみを測定できることから、維持管理の一環と して実施可能である。

図-17は、厚板理論に基づく多層版解析^{10),11)}の 荷重 100kN 載荷計算値と 100kN 換算活荷重たわみ実 測値の関係を示す。BP-8.0Dの多層版解析条件を表 -8に示す。コンクリート床版厚は平均値とし2層 に分割して底鋼板との組合せで3層構造とする。コ ンクリート床版2層の剛性は、ひび割れ発生以降も 弾性係数を変化させて近似できると仮定する。また、 コンクリート床版の2層は完全合成版とし、コンク リート下層と底鋼板は、完全合成と付着切れ(はく 離状態)は非合成として取り扱う組合せで試算した。 ケース1はひび割れもはく離もない健全な状態の想 定であり、コンクリート床版の弾性係数は表-2の 現行モデルの値で、底鋼板の弾性係数比(n)=12.7相 当である。ケース2ははく離の無いひび割れ有りの 合成断面で n=35 相当の性能である。ケース3は、ケ ース2のはく離とひび割れの有る非合成の状態を想 定している。ケース4は、はく離が有り非合成で床 版内にひび割れが多数発生して一部砂利化(骨材化) した破壊直前の状態を想定している。

図-17(a)の BP-8.0D では、ケース1と走行回数1 回がほぼ一致しており、ケース2は100kN 換算走行 回数1.08E+10 回と一致し、ケース3は2.0E+10と 5.3E+10 の中間相当と推定される。ケース4は版の 中央では一致しないが両サイドは5.3E+10相当と考 えられる。図-17(b)の BP-4.5D は、ケース1と走行 回数1.00E+00 回、ケース2と1.08E+09 回はほぼ一 致している。ケース3は概ね1.43E+09 回と一致して いる。一方、図-17(c)の BP-4.5D-P は、当板補強モ デルであり、載荷点直下は当板があるため走行回数 1回とケース1 は一致していないが、ケース3 と 1.49E+10 回は概ね一致している。

これらの検討から、走行初期は健全な状態を想定 するケース1と一致する。ケース3の状態になると コンクリート内に曲げや押し抜きせん断ひび割れが 発生する。また、底鋼板もはく離が進行して剛性が 低下してたわみが急増する傾向と一致している。し

表-8 多層版解析条件

			ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
層構成	厚さ、	ポアソ	弾性係数	弾性係数	弹性係数	弹性係数
	(mm)	ン比	N/mm^2	N/mm^2	N/mm^2	N/mm^2
床版厚1/2上	119	0.20	15,700	5,700	5,700	4,440
床版厚1/2下	119	0.20	15,700	5,700	5,700	4,440
鋼板厚	8	0.30	200,000	200,000	200,000	200,000
境界条件		_	合成	合成	非合成	非合成





図-17 たわみの多層版解析値と実測値の比較

たがって、底鋼板とコンクリート床版がはく離し、 非合成となっている状態のたわみ量はケース3で推 定可能であり、この状態のたわみ量の管理水準は概 ね0.4mm 程度が妥当である。また、押し抜きせん断 破壊の安全側の管理限界は、ケース4に該当する概 ねたわみ量0.6mm程度が妥当と考えられる。

5. 結論

本実験の範囲で以下の知見が得られた。

- バックルプレート床版の疲労耐久性は、プレート板厚が腐食により 2mm 減耗したモデルの BP-6.0D は未破壊であり、道示平成8年 RC 床版 (設計寿命100年)の3.5倍以上と推定される。 一方、4.5mm に減耗した BP-4.5D、BP-4.5D-H は 同 RC 床版の65%程度と推定される。
- ② 当板補強 BP-4.5D-P の疲労耐久性は、道示平成 8年 RC 床版を上回る耐久性が期待できることか ら有効な補修方法である。
- ③ バックルプレート床版の疲労破壊の形態は、コンクリート床版のみが押し抜きせん断破壊して 骨材化(砂利化)する。破壊機構は、RC床版と 類似しているが、底鋼板は降伏しないことから 抜け落ちは生じない。また、橋軸直角方向のた わみとひずみ分布の形状は、押し抜きせん断ひ

び割れが発生すると、静的破壊実験同様にW型 に変化する特徴が確認された。

- ④ 重錘落下たわみ(IIS)法によるたわみ量と静的 載荷たわみ量は、いずれの床版でも走行初期から破壊近傍の全域で一致するので維持管理のモニタリングに活用できる。
- ⑤ 疲労損傷が進行して底鋼板とコンクリート床版 がはく離した状態(非合成)のたわみ量は、概 ねケース3の0.4mm程度であり、コンクリート の弾性係数を n=35 相当とする多層版解析結果 と概ね一致する。

6. あとがき

清洲橋バックルプレート床版は、走行疲労実験に より高耐久であることが確認できた。高耐久を維持 させるためには、腐食させない対策がきわめて重要 である。今後は、更に疲労実験を継続するとともに、 疲労解析に発展させていく予定である。

参考文献

- 中井祐:帝都復興事業における隅田川六大橋の設計方針と永代橋・清洲橋の設計経緯、土木史研究論文集 Vol. 23、 pp. 13-21、2004
- 2) 関口幹夫、大石雅登、内山博文:バックルプレート床版の耐荷性能について、土木学会第67回年次学術講演会、 I-580、pp.1159-1160、平成24年9月
- 3) 真部洋大、藤山知加子、関口幹夫、大石雅登:清洲橋バックルプレート床版の損傷機構の解明、土木学会第68回 年次学術講演会、I-409、pp.817-818、平成25年9月
- 4) 関ロ幹夫、大石雅登、藤山知加子:清洲橋バックルプレート床版の疲労耐久性に関する実験的検討、土木学会第
 68回年次学術講演会、I-408、pp.815-816、平成25年9月
- 5) 関口幹夫、大石雅登、内山博文、藤山知加子、真部洋大:バックルプレート床版の静的破壊機構と疲労耐久性に 関する実験的検討、平 25. 都土木技術支援・人材育成センター年報、pp. 121-136、平成 25 年 10 月
- 6) 真部洋大、藤山知加子、関口幹夫、大石雅登:清洲橋バックルプレート床版の損傷機構の解明、第10回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、(18)、pp.1-8、平成25年11月
- 7) 松井繁之:橋梁の寿命予測、安全工学、Vol. 30、No. 6、pp. 432-440、コロナ社、1991
- 8) 内田賢一、西川和廣:既設道路橋床版の疲労耐久性に関する検討、土木学会 第一回道路橋床版シンポジウム講 演論文集、pp. 37-42、1998
- 9) 東京都土木技術研究所: R C 床版走行疲労実験データ整理概要報告書、pp. 29、平成 16 年 3 月
- 10) 関口幹夫、佐々木俊平: IIS による各種床版の健全度の評価、平 19. 都土木技術センター年報、pp. 229-240、2007
- 11) 関ロ幹夫、横山広、堀川都志雄:リブ付多層版解析による各種補強床版の実測たわみの評価、土木学会構造工学 論文集、Vol.54A、pp.442-451、2008