

## 6. 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

Experimental Examination concerning Fatigue Durability of Buckle Plate Slab in Kiyosu Bridge

技術支援課 関口幹夫

第五建設事務所 工事課 大石雅登

### 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、関東大震災後の帝都復興橋梁群の代表的な著名橋であり、供用87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、中井<sup>1)</sup>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の特徴である。

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（清洲橋）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、BPの交換や内側に当板な

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、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、BP床版に関する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ものである。



写真-1 清洲橋全景



写真-2 水抜き穴の欠損 写真-3 BP腐食状態

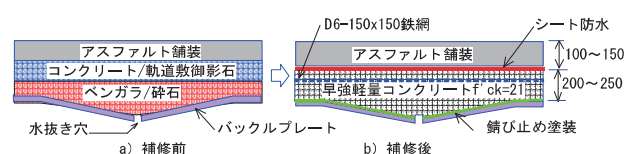


図-1 清洲橋補修前後の断面（昭和62年）

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 および III 2 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 I と II の一部は、既報<sup>2),3),4),5)</sup>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、バックルプレートの板厚を 3 タイプに変化させている。BP 板厚 8.0mm は、設計時 7.9mm 相当である。BP 板厚 6.0mm 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り、BP 板厚 4.5mm 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、BP 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、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 の鋼板（400×533mm）をエポキシ樹脂接着剤で接着したものであり、接着部の重ねは約 10cm である。なお、長寿命化モデル III 2 の BP-4.5D-H2 および P2 は、同モデルの-H および-P 試験体の製作において、BP に溶接ひずみが存在したことで早期にはく離が生じたことから再試験として実施したものである。

### (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代用した。なお、縦桁上に本来はないスタッドジベ

表-1 実験シリーズの概要

実験シリーズ	実験方法	試験体名	BP 板厚 (mm)	最小床版厚 (mm)	サグ量 (mm)	コンクリート		配筋 (mm)
						種類	基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
I (現行モデル)	静的載荷	BP-8.0S	8.0	200	76	1 種 軽量 早強	21	D6 150×150 かぶり50
		BP-6.0S	6.0					
		BP-4.5S	4.5					
II (現行モデル)	走行疲労	BP-8.0D	8.0					
		BP-6.0D	6.0					
		BP-4.5D	4.5					
III (長寿命化モデル)	走行疲労	BP-4.5D-H	4.5					
		BP-4.5D-P	4.5					
III 2 (長寿命化モデル)	走行疲労	BP-4.5D-H2	4.5					
		BP-4.5D-P2	4.5					

(注) \*: 膨張材使用

表-2 コンクリートの特性値

供試体	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	見掛け密度 (kg/m <sup>3</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
現行モデル I	25.5	16.6	-	1,953	-
現行モデル II	25.4	15.7	0.177	1,777	-
BP-4.5D-P	25.3	14.9	0.159	1,780	-
BP-4.5D-H	43.6	16.8	0.165	1,800	-
BP-4.5D-P2	24.9	15.1	0.182	1,773	2.16
BP-4.5D-H2	47.5	17.0	0.184	1,787	2.74

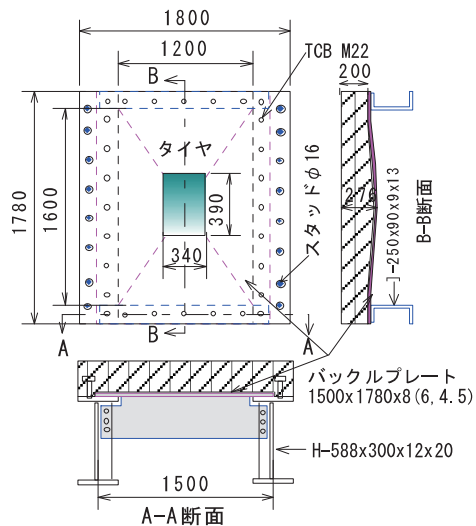


図-2 試験体の形状寸法

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/mm<sup>2</sup> である。なお、シリーズ I の細骨材は人工軽量細骨材の入手難から山砂使用の一種軽量コンクリートである。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 7 日又は 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/mm<sup>2</sup> の高強度タイプと 24N/mm<sup>2</sup> で膨張材仕



写真-4 輪荷重走行装置

様の当板補強タイプである。

### (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BP-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(BP-4.5D-H、BP-4.5D-P)

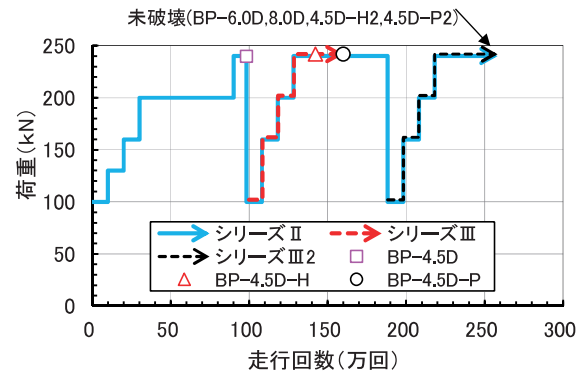


図-3 載荷プログラム

を追加して4体の組合せで実験を実施し、長寿命モデル2体が破壊した後の累積218万回以降に荷重を100kNに下げ、シリーズⅢ2長寿命化モデルの再試験用試験体(BP-4.5D-H2、BP-4.5D-P2)を追加して実験を再開した。再試験の載荷プログラムは、シリーズⅢと同一とした。なお、シリーズⅢ2の45万から50万回では、試験装置の故障で約90日間実験が中断し、50万から55万回ではタイヤ交換のため約20日間実験が中断して70万回(シリーズⅡの累積258万回)で走行を終了した。

## 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<sup>6)</sup>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258万回(100kN換算 $8.25E+10$ )時点で未破壊のまま走行を終了し、静的破壊で残存耐荷力を求めた。

シリーズⅢ(長寿命化モデル)の高強度タイプBP-4.5D-Hは、436,113回(100kN換算 $1.04E+10$ )で疲労破壊し、100kN換算ではBP-4.5Dと同程度である。

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	BP-4.5D-H2	BP-4.5D-P2
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	-	-	-	100,000	100,000
160	100,000	100,000	-	-	-	100,000	100,000
200	100,000	100,000	-	-	-	100,000	100,000
240	400,000	400,000	-	-	-	400,000	400,000
合計	2,581,898	2,581,898	981,898	436,113	613,002	700,000	700,000
100kN換算	$8.25E+10$	$8.25E+10$	$1.00E+10$	$1.04E+10$	$2.30E+10$	$2.91E+10$	$2.91E+10$

(注) : 100kN換算は、 $m=12.76$ (松井式)

また、当板補強タイプ BP-4.5D-P は、613,302 回 (100 kN 換算 2.30E+10) で疲労破壊し、BP-4.5D の 100kN 換算に対し約 2.3 倍であった。一方、シリーズⅢ2 の BP-4.5D-H2 および P2 は、いずれも累計 70 万回 (100kN 換算 2.91E+10) で未破壊の状態を終了した。したがってシリーズⅢ2 は、シリーズⅢの BP-4.5D-P と BP-4.5D-H より高耐久であり、BP-4.5D に対し 2.91 倍以上となった。

## (2) 現行 RC 床版との疲労耐久性の比較

現行 RC 床版の最新の設計基準は、道路橋示方書平成 24 年版であり、設計寿命 100 年を想定している。ただし、床版に関する規定は平成 8 年度版と同等であり、ここでは道示 H8 と略記する。現行基準で造られた標準的な RC 床版の支間 2.5m、床版厚 25cm の輪荷重走行疲労試験結果を表-4 に示す。表-4 の(独)土研 H8RC は、(独)土木研究所のクランク式鉄輪方式の H8 道示実験結果<sup>7)</sup>である。

土研 H8RC の 100kN 換算走行回数は 1.54E+10 であり、この値を基準に比較検討する。いずれの走行疲労実験は、階段载荷方式であり 100kN 換算走行回数で整理した結果を図-4 に示す。疲労破壊した板厚 4.5mm の BP-4.5D と BP-4.5D-H は、土研 H8RC 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 (100 kN 換算 2.30E+10) は、土研 H8RC 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 8.25E+10 以上であり、土研 H8RC の約 5.34 倍以上の疲労耐久性が期待できる結果となった。

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、シリーズⅢ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。再試験した BP-4.5D-H2 と P2 は 70 万回未破壊で終了しているものの、100kN 換算は 2.91E+10 以上であり、土研 H8RC の 1.89 倍以上の疲労耐久性が期待できる結果となった。

表-4 比較データ ((独)土研 H8RC)<sup>7)</sup>

(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

100kN換算 m=12.76

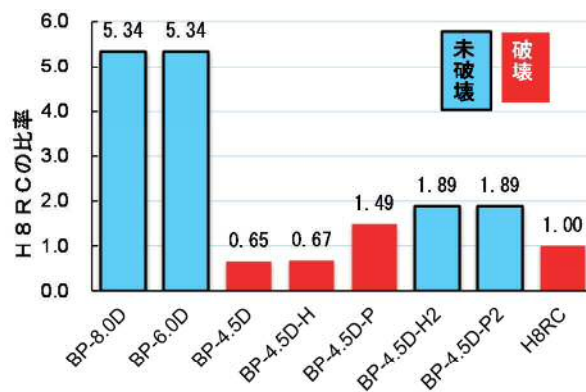


図-4 100kN 換算の比較

表-5 残存耐荷力

試験体	100kN換算 走行回数	押抜きせん断耐荷力 (kN)		
		疲労後 (D)	静的 (S)	D/S
BP-8.0D	8.25E+10	785.6	650	1.21
BP-6.0D	8.25E+10	499.9	550	0.91
BP-4.5D	1.00E+10	疲労破壊	400	—
BP-4.5D-H2	2.91E+10	548.4		1.37
BP-4.5D-P2	2.91E+10	499.2		1.25
試験体	100kN換算 走行回数	最大耐荷力 (kN)		
		疲労後 (D')	静的 (S')	D'/S'
BP-8.0D	8.25E+10	796.3	850	0.94
BP-6.0D	8.25E+10	649.9	800	0.81
BP-4.5D	1.00E+10	疲労破壊	750	—
BP-4.5D-H2	2.91E+10	897.7		1.20
BP-4.5D-P2	2.91E+10	747.8		1.00

## (3) 未破壊試験体の静的残存耐荷力

未破壊の試験体 (シリーズⅡの BP-8.0D、BP-6.0D およびシリーズⅢ2 の BP-4.5D-H2、BP-4.5D-P2) の静的残存押し抜きせん断耐荷力および最大耐荷力は、シリーズⅠと同様に道示の輪荷重分布 (500×200mm) の载荷板使用では、表-5 の結果が得られた。ここでは、静的破壊試験 (シリーズⅠの BP-8.0S、BP-6.0S、BP-4.5S)<sup>5)</sup>の結果を表-5 の静的 (S) 欄に記載し、疲労後 (D) 欄との比率 (D/S) で検討する。

押し抜きせん断耐荷力の (D/S) は、BP-8.0D では 1.21 であり疲労のダメージによる低下がなく 2 割強い結果であり、BP-6.0D は 0.91 であり疲労による低

下が1割ある結果となった。一方、表-5 下段の最大耐荷力の(D'/S')は、BP-8.0Dでは0.94、BP-6.0Dでは0.81であり、いずれも疲労のダメージによる低下は1割および2割程度ある結果となった。

シリーズⅢ2の高強度(36MPa)のBP-4.5D-H2は、押し抜きせん断耐荷力の(D/S)は1.37、最大耐荷力の(D'/S')は1.20であり、高強度化の効果が認められる。一方、BP-4.5D-P2の押し抜きせん断耐荷力の(D/S)は1.25、最大耐荷力の(D'/S')は1.00であり疲労の影響がない結果となった。これは、コンクリート強度が表-2に示すとおり同程度であり、当て板補強と膨張材の効果が発揮されたことによる耐久性向上効果と考えられる。したがって、高強度化と当て板補強は、疲労耐久性向上に寄与していると評価できる。

#### (4) 走行面のひび割れ

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-5(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-5(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-5(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



(a) BP-4.5D

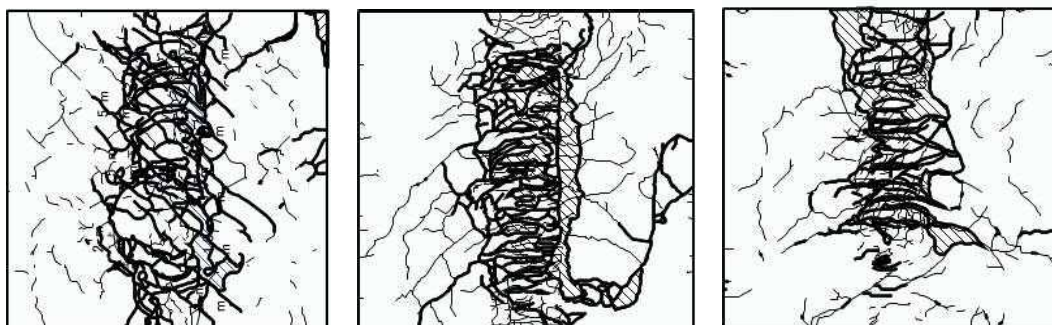
#### 写真-5 破壊時走行面のひび割れ図

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。

未破壊のBP-8.0DおよびBP-6.0Dの258万回後の静的破壊時の床版上面のひび割れの状態を図-6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箇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。静的破壊によるひび割れは、載荷板外縁部に集中し、その他での発生はごく少量である。載荷板の押し込みは、5mm程度であった。

一方、70万回で未破壊の図-6(c)高強度タイプのBP-4.5D-H2では、床版全面に収縮ひび割れと考えられる微細なひび割れが多数発生している。走行面と非走行面の比較では、走行面の方がひび割れの発生量が多いが、角欠けなどに進展しているものはない。

当て板補強タイプ図-6(d)のBP-4.5D-P2は、膨張材の効果で乾燥収縮ひび割れはほとんどない状態で実験をスタートしている。表面に発生しているひび割



(a) BP-4.5D

(b) BP-4.5D-H

(c) BP-4.5D-P

図-5 破壊時走行面のひび割れ図

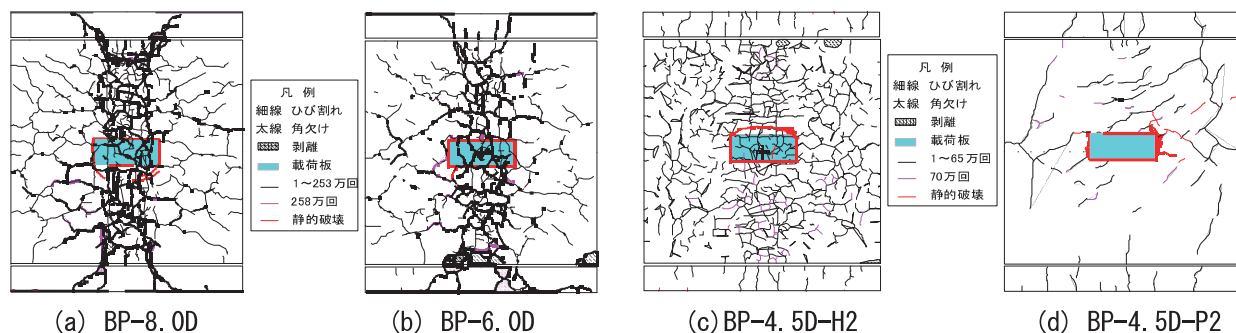


図-6 破壊時走行面ひび割れ

これは、疲労によるひび割れであるがその発生量は少ない。したがって、ひび割れが少ない理由は、膨張材の効果によるもので、疲労耐久性の改善に寄与していると推察できる。

### (5) バックルプレートのはく離

疲労破壊した4.5mmのプレートのはく離の打音調査結果を図-7に示す。図-7(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%程度に進展して、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。

図-7(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-7(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。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とは異なる工場で作成したことから、溶接加工による反りの影響によるものと考えている。

疲労未破壊のBP-8.0DとBP-6.0Dのはく離図を図-8(a)と(b)に示す。走行を中止した258万回での

く離は、周辺部ではなく離が中心に向かって進行しているとともに、はく離領域はBP-8.0Dは50%以上、BP-6.0Dは20%程度であった。しかし、静的破壊後は、BP-8.0Dは70%程度、BP-6.0Dは90%程度にはく離は増加した。プレートの厚いBP-8.0Dでは、静的破壊後もはく離しない部分が30%程度残った。

一方、未破壊のシリーズIII2のはく離図を図-8(c)と(d)に示す。高強度タイプBP-4.5D-H2は、走行前にはく離は無かったが、1万回で外周部にはく離が生じ、20万回後には80%以上に進展し、50万回でほぼ100%にはく離は進展した。当板補強タイプBP-4.5D-P2は、走行前に外縁部から中心へ半分程度(約50%)はく離が発生していた。走行20万回で約95%程度まではく離が進展し、40万回でほぼ100%に達した。

### (6) 切断面のひび割れ

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

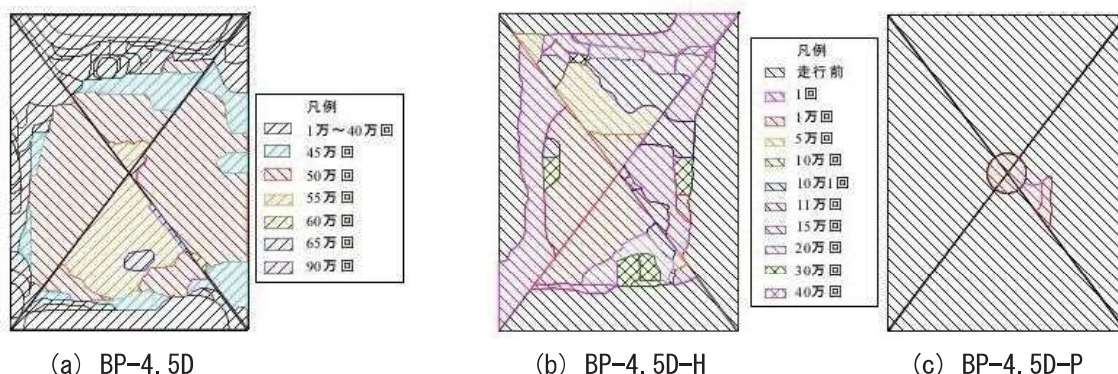


図-7 疲労破壊後のプレートはく離図

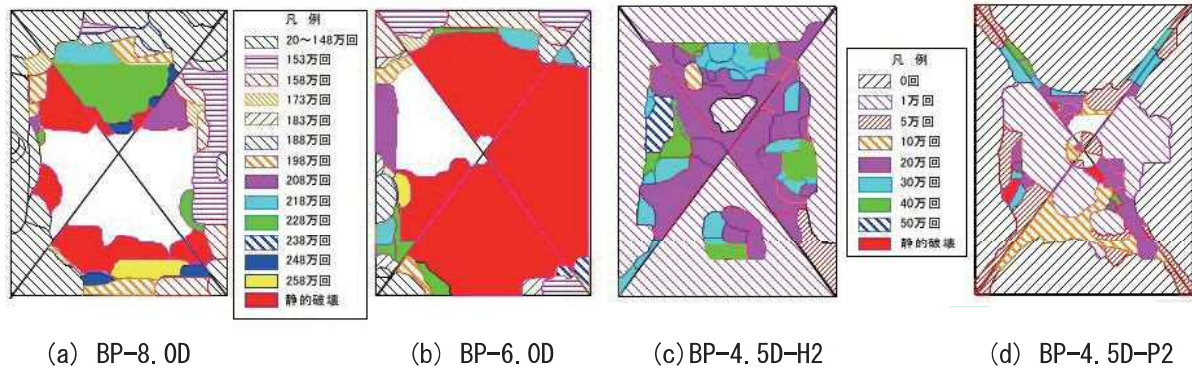


図-8 静的破壊時プレートはく離図

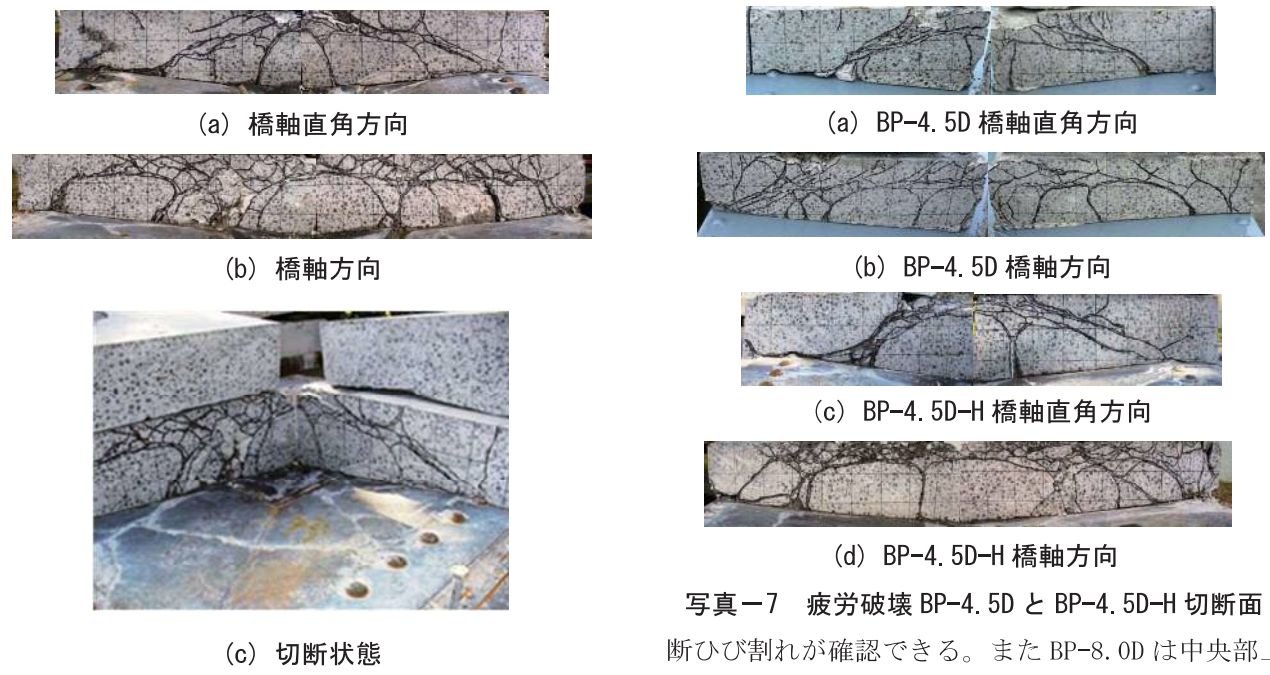


写真-7 疲労破壊 BP-4.5D と BP-4.5D-H 切断面  
断ひび割れが確認できる。また BP-8.0D は中央部上面から約 10cm の深さに疲労のダメージで発生したと考えられる水平ひび割れが発生している。一方、BP-6.0D には水平ひび割れは発生していない。これらの関係とプレートのはく離領域との関係には関連性があると考えられる。

写真-6 疲労破壊 BP-4.5D-P (当板補強タイプ) 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。

走行 258 万回後に静的破壊させたシリーズ II の BP-8.0D と BP-6.0D の切断面の写真を写真-8(a)~(d)に示す。BP-8.0D および BP-6.0D 何れも橋軸直角方向および橋軸方向ともに載荷板外縁から下面バックルプレートの曲げ下げ位置 (縦桁フランジ端) に向う (円錐形状に相当する)、破壊時の押し抜きせん

70 万回で静的破壊させたシリーズ III 2 の BP-4.5D-H2 と BP-4.5D-P2 の切断面の写真-8(e)~(h)では、橋軸直角方向および橋軸方向何れにおいても載荷板外縁からプレート曲げ下げ位置に向かう静的破壊時の押し抜きせん断破壊ひび割れが確認できる。一方、明瞭な水平ひび割れの発生は、両試験体ともないが、BP-4.5D-H2 では不明瞭な水平ひび割れの初期段階と考えられるひび割れが存在する。

(7) 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-9 に示す。

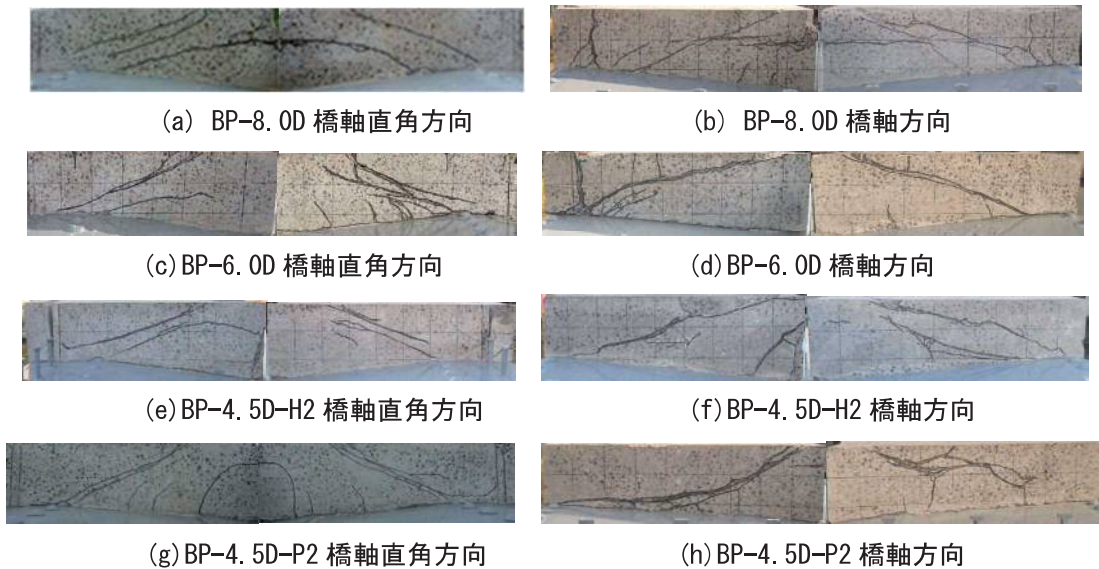


写真-8 走行後静的破壊の切断面

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  $7.4\text{mm}$  ( $P=240\text{kN}$  荷重時) 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、 $1.0E+06$  からたわみは増加傾向を示して、 $1.0E+09$  あたりから急増して疲労破壊した。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-9 の  $1.0E+10$  以降でたわみは増加傾向を示し、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-10 で確認すると、図-10(a)BP-8.0D と図-10(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支持桁近傍ではく離が図-8(a)で示したように進

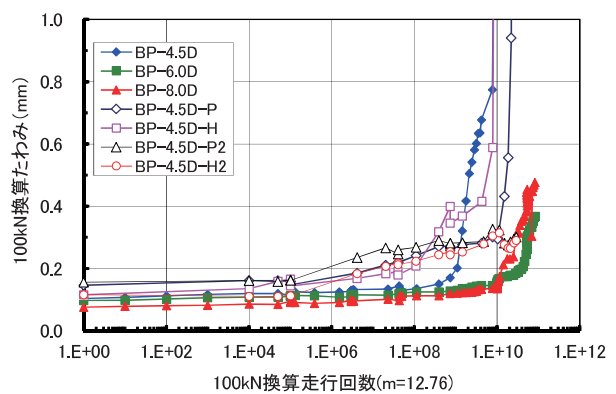


図-9 100kN 換算活荷重たわみの推移

行しているものの、ほぼ合成断面としてのたわみ分布形状を維持している。一方、疲労破壊した床版のたわみ分布を図-10(c)と図-11(a)および(c)に示す。図-10(c)の BP-4.5D では  $1.43E+09$  以降、図-11(a)の BP-4.5D-H は  $5.00E+04$  から、また再試験した図-11(b)の BP-4.5D-H2 は  $7.34E+08$  からW型の分布形状に変化している。このW型へ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部的に押し込んでい

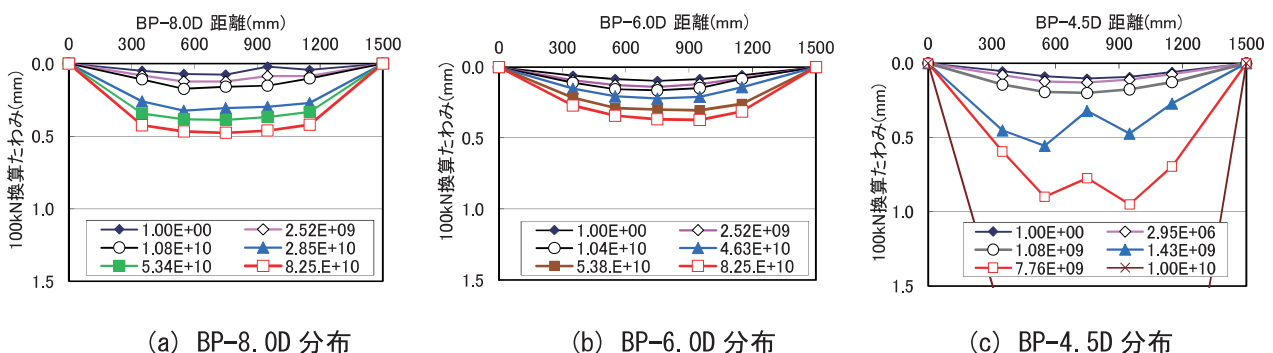


図-10 シリーズIIの橋軸直角方向たわみ分布



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<sup>2),5)</sup>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。

同じように破壊した図-11(c)のBP-4.5D-P および未破壊の図-11(d)のBP-4.5D-P2では、明確な押し抜きせん断ひび割れの押込みによる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。

図-12は、未破壊試験体の静的破壊時の荷重と床版中央たわみの関係である。BP-8.0Dのたわみ曲線の立ち上りが他の試験体に比べて全体にやや右に膨らんでいる。これは疲労によりプレート外縁部における付着切れの影響によるものと推察される。最初の荷重ピーク値は、押し抜きせん断破壊耐荷力である。シリーズIIに比べ走行回数の少ないシリーズIII2の方が押し抜きせん断耐荷力大きい。これはシリーズIIの方が疲労によるダメージが進行していた結果を反映していると推察できる。

### (8) ひずみの性状

BPの床版中央の100kN換算活荷重ひずみと100kN換算走行回数の関係を図-13に示す。図-13(a)は橋軸直角方向のひずみの推移であり、図-13(b)は橋軸方向のひずみの推移である。BP-4.5Dは走行回数

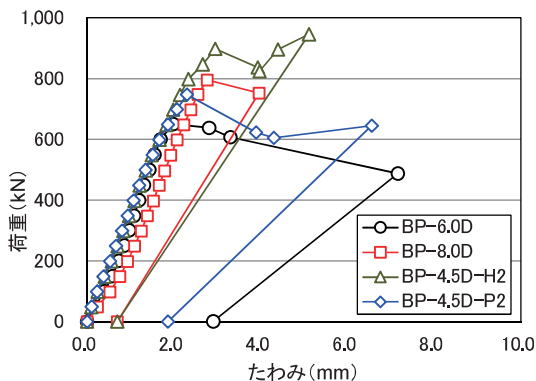


図-12 静的破壊時の荷重-たわみの関係

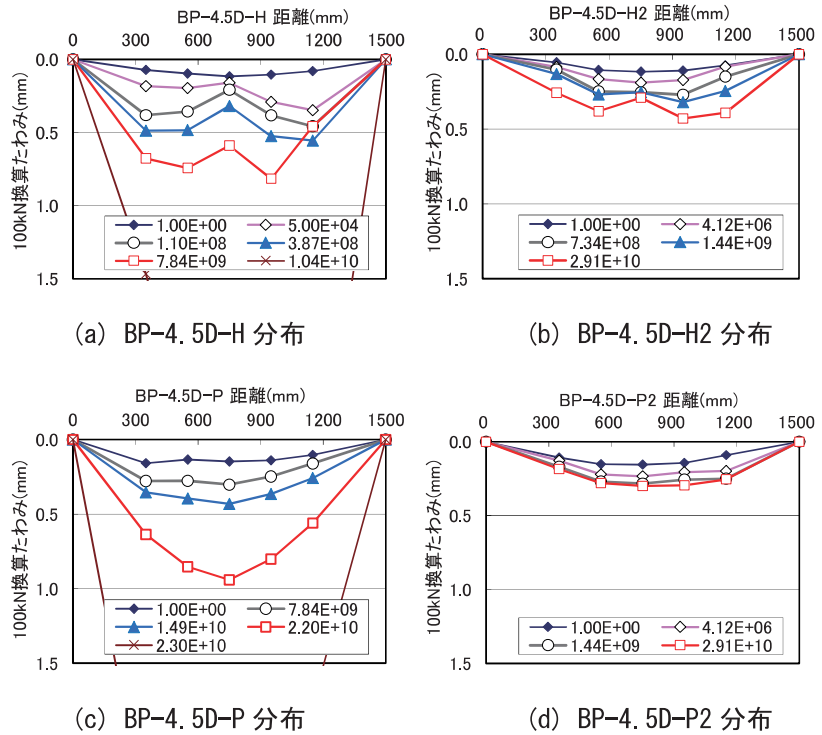
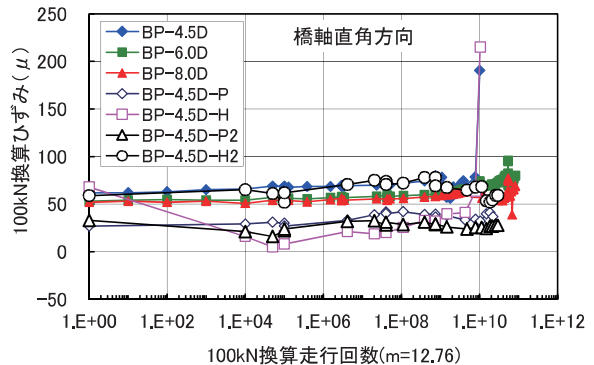
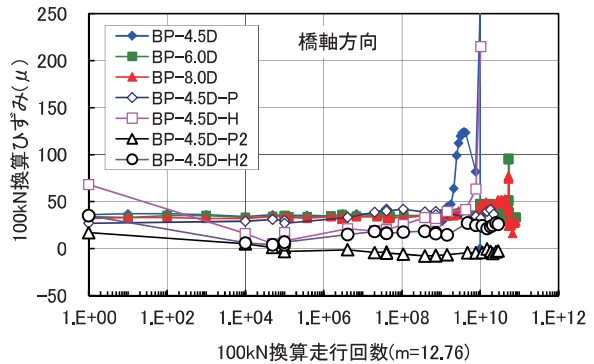


図-11 シリーズⅢ及びⅢ2の橋軸直角方向のたわみ分布

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約450 $\mu$  (240kN 載荷時)であった。したがって、発生応力は100N/mm<sup>2</sup>以下であり、破壊時でも降伏



(a) 橋軸直角方向ひずみの推移



(b) 橋軸方向のひずみの推移

図-13 底鋼板の活荷重ひずみの推移

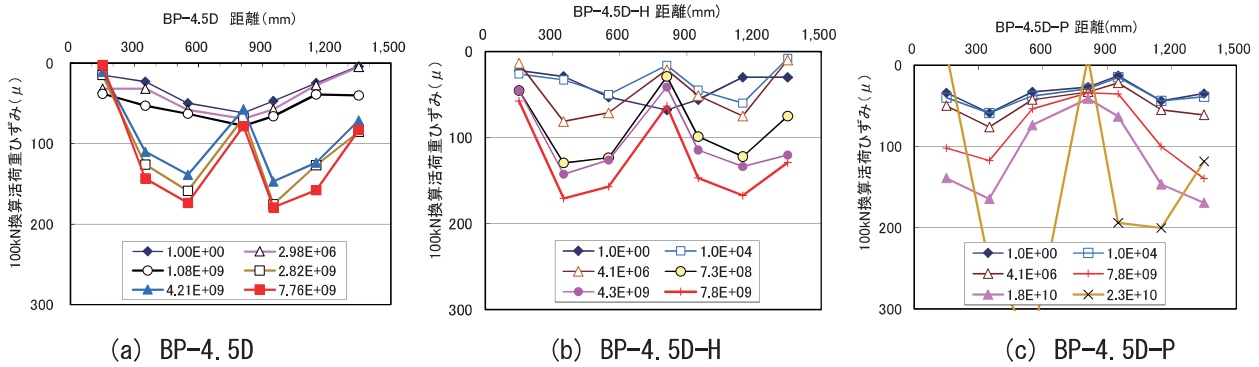


図-14 底鋼板の橋軸直角方向ひずみ分布

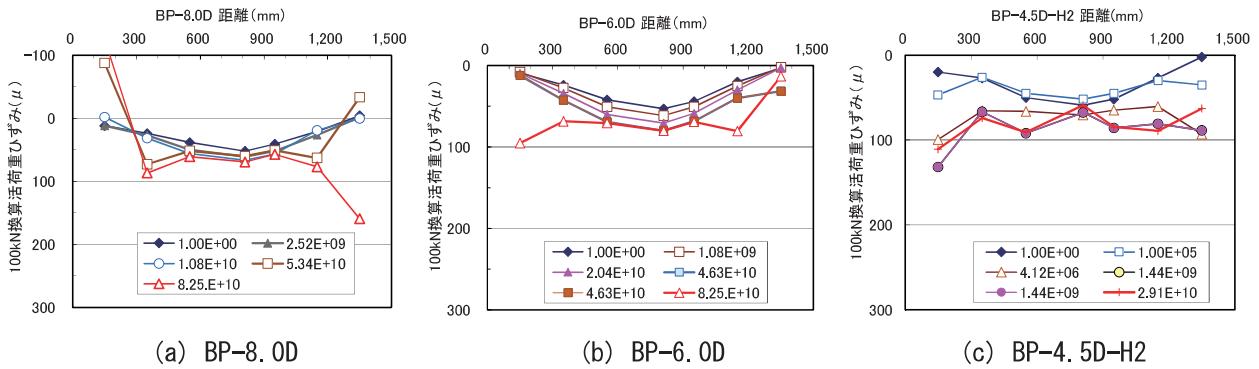


図-15 未破壊床版の底鋼板活荷重ひずみ分布

(390N/mm<sup>2</sup>) しないことがわかった。

BP-4.5D-H は図-13 (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-13 (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-14 には橋軸直角方向の 100kN 換算活荷重ひずみ分布を示す。図-14 (a) の BP-4.5D と図-14 (b) の BP-4.5D-H は、たわみ分布の図-10 (c) および図-11 (a) 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-14 (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 床版と異なる。

未破壊のひずみ分布を図-15 (a) ~ (d) に示す。図-15 (a) の BP-8.0D は、1.08E+10 までは合成断面の分布形状であったが、以降から W 型に近い分布形状に変化しつつある。一方、図-15 (b) の BP-6.0D は、4.63E+10 までは、合成断面の分布形状であったが、

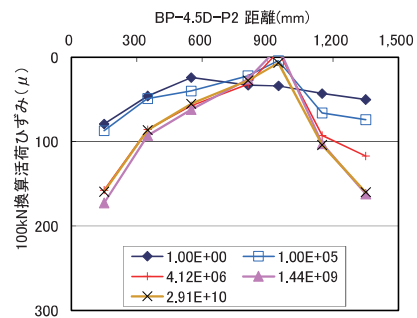


図-15 (d) BP-4.5D-P2

8.25E+10 では支間方向の距離 1200 近辺でひずみが大きくなっており、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おり、両者ともにある程度損傷が進行している段階と推察できる。一方、図-15 (c) の高強度タイプは、W 型に変化して疲労が進行している。当て板補強の図-15 (d) は、破壊した図-14 (c) に比べ進行度合いが少なく、疲労の進行が少ないと想定される。

### (9) 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代表的な推移を図-16 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、40~55 μ 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 荷重時で約  $250\mu$  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。

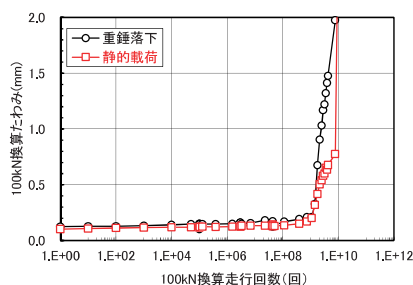
#### 4. 重錘落下たわみ

##### (1) 測定方法

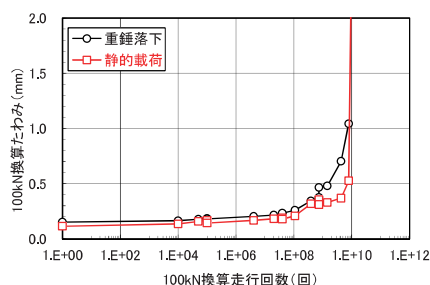
写真-9 に示す重錘落下たわみ測定機 (IIS) の 100kg の重錘とたわみセンサー (速度計) とデータ収録解析装置を組み合わせたシステムを使用した。たわみセンサーは、床版中央点と両主桁上に配置して 3 か所のたわみを同時に測定し、両主桁の基線からの中央たわみを計測する。重錘の落下高さは 200mm 一定とし重錘の落下開始から約 10 秒間 (サンプリング間隔は 500/秒) 計測した。また、載荷板 (直径 35cm) のロードセルの荷重値で 100kN 換算し 3 回の平均値で求めた。

##### (2) 重錘落下たわみと静的荷重たわみの比較

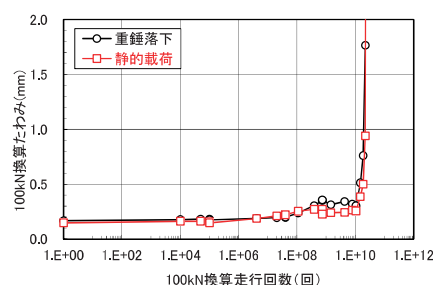
重錘落下たわみ法と静的荷重たわみの 100kN 換算たわみと 100kN 換算走行回数(回)の関係を図-17 と図-18 に示す。図-17 はいずれも破壊した床版であるが、重錘落下たわみと静的荷重たわみは、押し抜きせん断ひび割れが発生してたわみが急増する時点までほぼ一致していることが見て取れる。未破壊の床版 BP-8.0D と BP-6.0D における両者の関係を図-18(a) と (b) に示す。いずれも静的荷重たわみと重錘落下たわみはおおむね一致しており、 $1.0E+10$  以降でたわみは増加傾向を示した。破壊した床版の図-17 では、破壊直前のたわみ量は、いずれの床版においても測定方法にかかわらず 1.0mm を超えて急増している。一



(a) BP-4.5D



(b) BP-4.5D-H



(c) BP-4.5D-P

図-17 静的荷重たわみと重錘落下たわみの関係

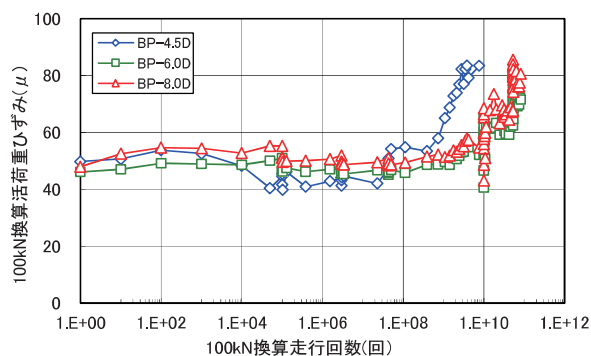


図-16 横支桁のひずみ



写真-9 重錘落下たわみ測定状況

方、図-18 の未破壊の BP-8.0D は、重錘落下たわみは 1.1mm まで大きくなっているが静的荷重たわみは 0.5mm であり、損傷はある程度進行しているものの破壊までにはまだ余裕があると推察できる。また、BP-4.5D-H2 および BP-4.5D-P2 は、いずれの測定方法においても 0.3mm 程度であり急増までに至っていない。

##### (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-19 は、厚板理論に基づく多層版解析<sup>8),9)</sup>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-6 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

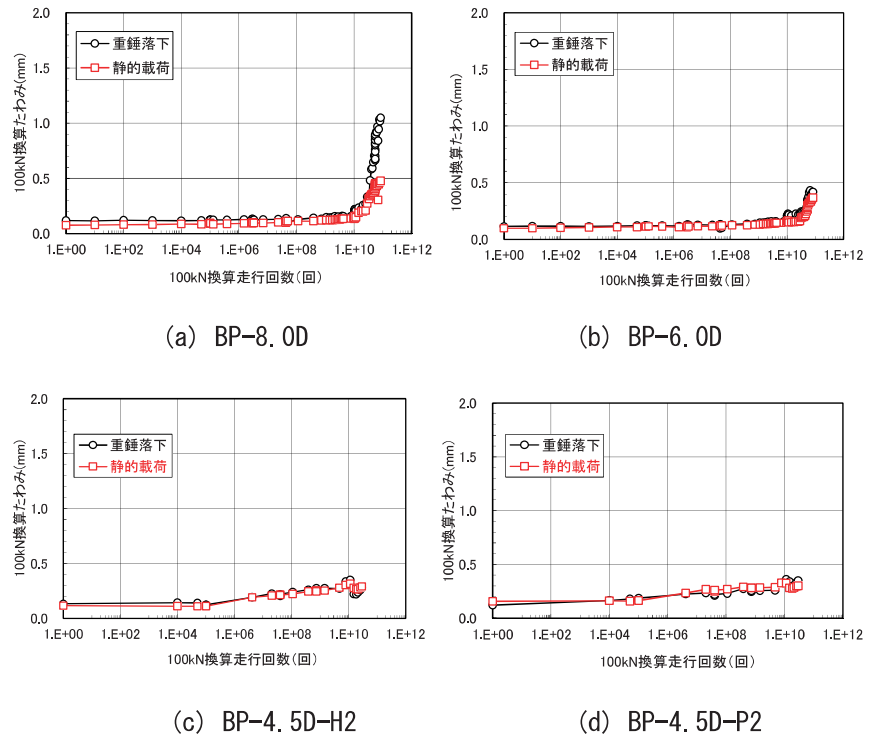


図-18 静的載荷たわみと重錘落下たわみの関係

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-19(a)の BP-8.0D では、ケース 1 と走行回数 1.00E+00 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 2.04E+10 と 5.34E+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

表-6 多層版解析条件

層構成	厚さ (mm)	ポアソン比	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
			弾性係数 N/mm <sup>2</sup>	弾性係数 N/mm <sup>2</sup>	弾性係数 N/mm <sup>2</sup>	弾性係数 N/mm <sup>2</sup>
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

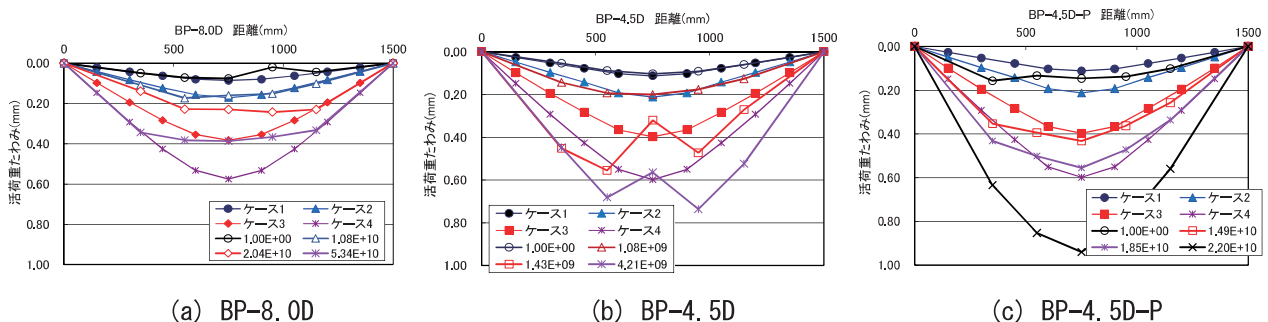


図-19 たわみの多層版解析値と実測値の比較

5.34E+10 相当と考えられる。図-19(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-19(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 1.00E+00 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. リベットの腐食が継手強度に与える影響

清洲橋ほかの BP 床版のリベットの腐食状態は、観察できる裏面では全損はない。昨年床版の打替えを行った蔵前橋の BP 床版上面の腐食状態は、写真-10 のとおりであり、リベットの頭は全面欠損状態にないが、半分程度腐食しているものもある。

リベットの腐食が継手強度に与える影響は、古い橋梁から試験片を採取しての試験結果がいくつか報告されているので、文献により検討する。例えば、木村らは約80年経過した鉄道橋の二面せん断継手強度は、頭部が腐食欠損したリベットであっても継手



写真-10 蔵前橋 BP 上面リベット腐食状態

強度は低下しない結果となり、従来言われているとおり、リベットは弛みが生じない限り継手強度は低下しないことを裏付ける結果となったと報告している<sup>10)</sup>。橋本らは、55年間供用された鋼ランガ道路橋の一面せん断継手と二面せん断継手試験から、薄板(板厚9.5mm)一面せん断継手強度は、リベットの頭が全損では50%に低下する。ただし、厚板(19mm)の一面せん断継手強度は低下しない。二面せん断では、薄板と厚板いずれも強度低下しないと報告している<sup>11)</sup>。また、佐竹らは、100年供用された旧余部橋梁および穴内川橋梁の一面せん断継手強度は、リベット頭部が高さ方向に75%減肉しても継手強度は低下しない。しかし、リベット頭部がない場合は、母材と添接板からリベットが抜け出すことによって、継手強度が20%程度低下した。また、二面せん断継手強度試験では、リベット頭部が腐食しても残存強度は、低下しないと報告している<sup>12)</sup>。

BP床版の継手は、一面せん断継手であり、板厚は8mm以下の薄板であることを考慮すると、リベットの頭が完全に腐食欠損している場合は、文献11)の試験では50%低下する。文献12)の試験では20%低下すると評価は異なる。安全側の50%程度低下すると考えて置く必要はあるが、リベット本数が非常に多いBP床版では、余り神経質になる必要性はない。

## 6. 結論

本実験の範囲で以下の知見が得られた。

- ① 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 減耗した現行モデルの BP-6.0D は 258 万回 (100kN 換算 8.25E+10) 未破壊であり、道示平成 8 年 RC 床版 (設計寿命 100 年) の 5.34 倍以上と推定される。一方、4.5mm に減耗したモデル BP-4.5D は同 RC 床版の 65% 程度と推定される。
- ② 当板補強モデル BP-4.5D-P2 および高強度モデルの BP-4.5D-H2 の疲労耐久性は、道示平成 8 年 RC 床版を 1.89 倍上回る耐久性が期待できることから、将来の長寿命化にあたっての有効な補修方法であり、コスト削減に大きく寄与する。
- 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ので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 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、腐食させないことが重要であり、適切な塗装の塗替えと床版防水層の維持管理に尽きると言える。

## 7. あとがき

バックルプレート床版を持つ都道の橋は、重要文化財の清洲橋、永代橋をはじめとする隅田川筋の著名橋である蔵前橋、駒形橋などが現存している。また、我が国では大正から昭和一桁の時期にバックルプレート床版形式が採用されており、国内で現存する橋梁は著名橋が多いと考えられるので、本検討結果が将来の維持管理計画作成にあたって、参考資料として活用されることを期待するものである。

## 参考文献

- 1) 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、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
- 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、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、pp. 18-1-8、平成 25 年 11 月
- 4) 関口幹夫、大石雅登：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、平 26. 都土木技術支援・人材育成センター年報、pp. 121-136、平成 26 年 10 月
- 5) 関口幹夫、大石雅登：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、第八回道路橋床版シンポジウム論文報告集、pp. 121-136、平成 26 年 10 月
- 6) 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
- 7) 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、第一回道路橋床版シンポジウム講演論文集、pp. 37-42、1998
- 8) 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
- 9) 関口幹夫、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、構造工学論文集 Vol. 54A、pp. 442-451、2008
- 10) 木村元哉、中山太士、松井繁之：腐食桁におけるリベットの継手強度と高力ボルト置換に関する基礎的研究、構造工学論文集 Vol. 55A、PP. 880-888、2009 年 3 月
- 11) 橋本国太郎、山口隆司、三ツ木幸子、杉浦邦征：腐食損傷を受けたリベット継手の力学的挙動に関する検討、構造工学論文集 Vol. 56A、PP. 756-765、2010 年 3 月
- 12) 佐竹亮一、藤井堅、小迫伸聡、山下泰勲、海田辰将：約 100 年間供用された橋梁のリベット継手の残存強度試験、構造工学論文集 Vol. 59A、PP. 702-710、2013 年 3 月