

高井戸陸橋 RC 床版の残存疲労耐久性の評価

Evaluation of survival fatigue durability of reinforced concrete decks on Takaido viaduct

関口幹夫*・ 宍戸 薫*・ 森 俊介*

Sekiguchi Mikio, Shishido Kaoru, Mori Shunsuke

*正会員 東京都土木技術研究所 技術部 (〒136-0075 東京都江東区新砂 1-9-15)

The decks of "Takaido viaduct" in the No.8 loop line in Tokyo are model decks that have done the follow-up survey for 30 years to make the clarification of the fatigue damage mechanism by the wheel load and the life cycle model.

This report of the research does the wheel load running fatigue testing of the model decks of the same to specimen cut out from the damaged decks specification to evaluate the survival durability of the damaged decks used for 30 years without repaired, and is the result of the examination of the survival fatigue durability.

Key words : RC decks, for 30 years, wheel running test, survival fatigue durability.

1. はじめに

東京都の環状 8 号線に架かる「高井戸陸橋」の鉄筋コンクリート床版 (以下, RC 床版) は, 輪荷重による疲労損傷メカニズムの解明とライフサイクルモデル作成を目的に, 供用開始直後から疲労損傷が進んで使用限界に達した 30 年間にわたり, 追跡調査を行ってきた^{1,2,3)}.

本報文は, 無補強の状態 で 30 年間供用した損傷床版の残存耐久性を評価するため, 損傷床版から切り出した供試体と同一仕様のモデル床版について, 輪荷重走行疲労実験を実施した結果と残存疲労耐久性について取りまとめたものである。

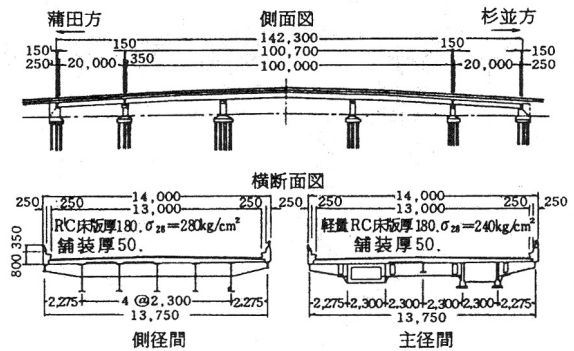


図-1 高井戸陸橋一般図

2. 高井戸陸橋の概要

2.1 橋梁諸元

高井戸陸橋は, 昭和 45 年に供用開始した都内でもっとも過酷な交通条件下の環状 8 号線に架かる橋梁である. 調査対象は, 図-1 に示す蒲田方側径間 (単純活荷重合成鋼板桁) 橋長 20m の床版である. 床版の諸元は支間 2.3m, 厚さ 18 cm, 主鉄筋は $A_s=D16@120$, $A_s'=D16@240$, 配力筋は $A_s=D16@150$, $A_s'=D16@300$, コンクリートの設計基準強度は 27.4MPa である. なお, 床版の設計は, 昭和 48 年度版鋼道路橋示方書 (道示) に準じ, T-20 の曲げモーメントの 20% 割増しが行なわれている。

2.2 実橋床版の損傷状況

床版下面のひび割れは, 供用後 3 年に確認し, 供用 4 年目の第一回調査時点のひび割れ密度は $1.7m^2$ である. その後, ひび割れは経年とともに増加して供用 30 年では, ひび割れ密度は最小 13.55, 最大 18.73, 平均 $15.76m^2$ となっている. 30 年経過した時点のひび割れパターンは,

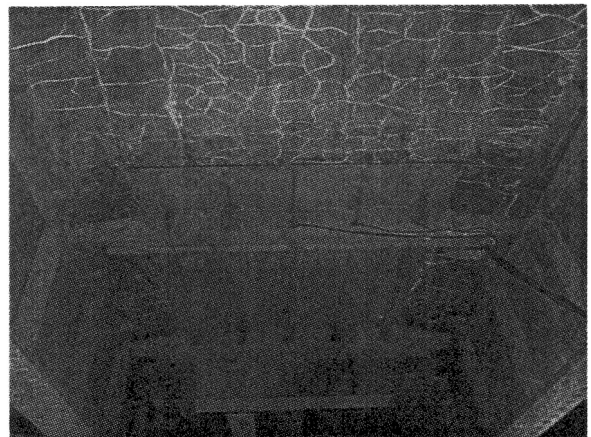


写真-1 床版下面の状況 (アンダーデッキ H10 補強部)

基本的に写真-1 に示すように格子状に発達している. 橋軸方向のひび割れでは, ハンチ上縁に沿う連続した大きなひび割れがある. なお, 写真-1 は供用 27 年にアンダーデ

ツキ工法により抜け落ち防止対策を行っている。また、張り出し床版の桁端部コーナーでは、斜め方向のひび割れが特徴的である。ひび割れの“角欠け現象”は、供用 10 年の時点ではほとんど確認できなかったが、供用 24 年で顕著に観察された。全ひび割れに占める“角欠け率”（角欠けの割合）は、65%に急増し、供用 27 年では 78%、供用 30 年では 83%まで増加している。疲労損傷のダメージは、供用 24 年以降ひび割れ密度の増加から既存のひび割れ部への応力集中による角欠けへと移行し、貫通ひび割れ後の“擦り磨き現象”が顕著になったことを示した。

また、供用 24 年の調査では、一部のパネルで少量の遊離石灰が見られる程度であったが、供用 27 年の調査では、8 箇所で漏水と黒く変色したパネルを確認した。さらに、舗装面にもひび割れが確認され、貫通ひび割れとなっている。また、一箇所であるがハンチ上縁で押し抜きせん断ひび割れにより 5 mm 程度の段差が確認されているほか、舗装下のかぶり部コンクリートは“砂利化現象”に損傷が進行していた。

3. 実験概要

3.1 床版供試体

床版の切り出しは図-2 に示す 9 ヶ所の位置から、約 2×2 m の大きさに切断し搬出した。なお、疲労実験に使用した切り出し床版は、写真-2 に示す No2~4, No7~9 の各 3 枚を一組とした。切り出し床版 No2~4 は、実橋ではセンターより（追い越し車線）の床版である。また、No3 は損傷初期の昭和 49 年に鋼板接着工法で補強されている。一方、No7~9 は走行車線であり、No7, 8 は平成 10 年に損傷が著しく抜落ち防止のアンダーデッキ工法で補強されてい

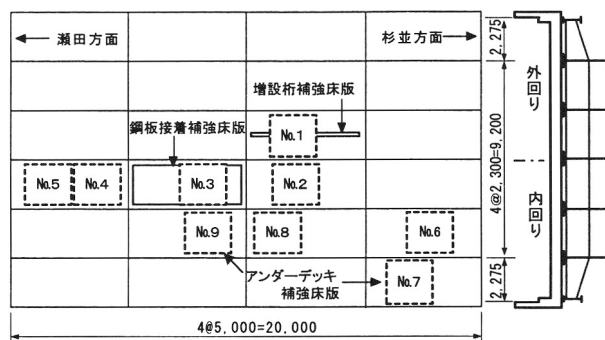


図-2 R C床版切り出し位置図（見下げ図）

る。また、No7 は、剛性の小さいブラケットで支持されている張り出し床版である。

切り出した床版には、ハンチの一部が付いていることから、支持桁の支点到当たる部分を水平になるようモルタルで加工した。また、切断面に見える鉄筋は、抜け出し防止を図るため鉄筋を溶接した。未補強の床版下面中央部は、直径 20 cm ほどはつり出して鉄筋にひずみゲージを貼付した。鋼板接着補強床版は、支持桁が接する部分の鋼板を切断し、支持桁に接しないように加工した。また、床版中央の鋼板を 20×20 cm ほど切断し、鉄筋をはつり出しひずみゲージを貼付した。はつり出し部は無収縮モルタルで断面修復し、25×25 cm の鋼板をエポキシ樹脂で接着補強して供試体とした。

また、切り出し床版と同一仕様のモデル床版の形状寸法、配筋、コンクリートのコア強度等については、表-1 のとおりである。床版厚と配筋は、概ね設計値を満足していたが、コンクリートコア圧縮強度は 16.6~29.0MPa とばら

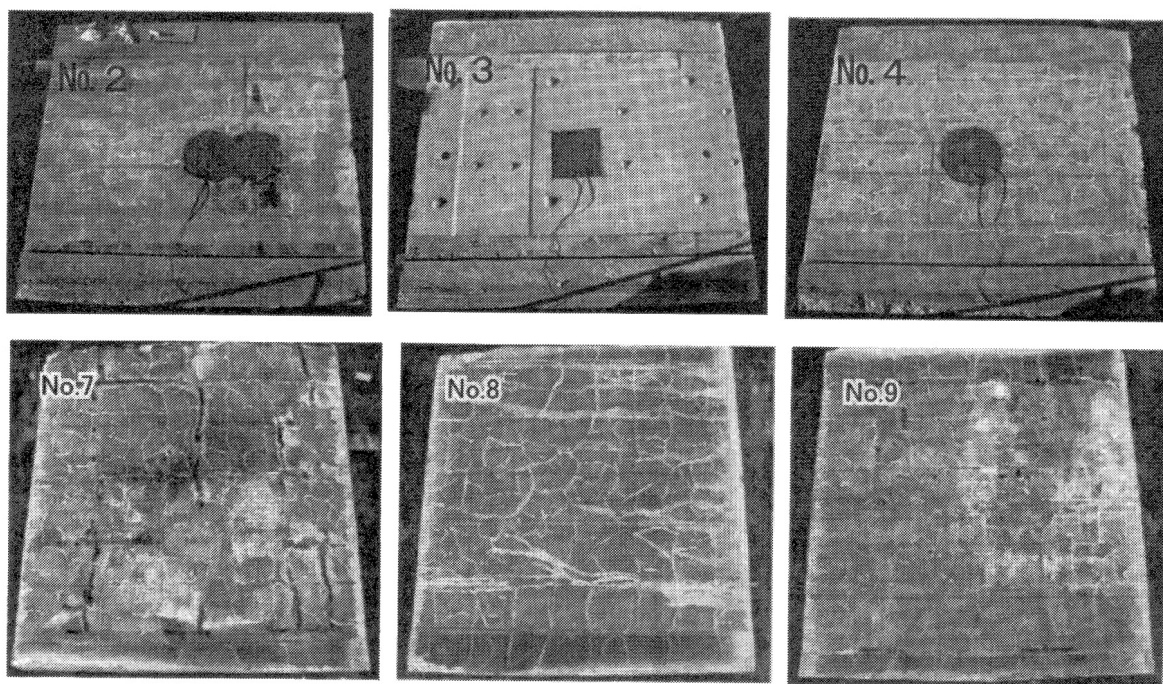


写真-2 切り出し床版下面状況

つき、平均値は22.2MPaであり設計値を下回っていた。

3.2 輪荷重走行疲労実験方法

耐久性の評価に使用した疲労試験機は、写真-3に示す250kN輪荷重走行疲労試験機を使用した。切り出した床版の主鉄筋が支持桁によって単純支持されるように3体を同時にセットした。橋軸方向の版の支持は、横桁で弾性支持とした。床版支間は2.3mの実橋

から切り出した床版幅約2mに対して1.5mとした。横桁間隔は2mである。走行範囲は、試験体を完全に往復走行できる範囲の約6.7mとし、走行スピードは2~3km/hである。なお、タイヤの空気圧は1.8~2.0MPaを標準とし、走行荷重157kN時のタイヤ接地面積は約1,200cm²（幅32×走行長さ43cm）である。

走行荷重は、切り出し床版No2~4については、1,000回走行まで157kN、1,001回以上196kNとした。切り出し床版No7~9およびモデル床版No1,2は、157kN一定載荷とした。

床版中央の鉄筋およびコンクリートのひずみ、たわみ、ひび割れ密度を計測した。一部の床版は、ひび割れの「開閉、ずれ、段差」を3方向変位計で計測した。

ひび割れ密度の計測は、あらかじめ125×125mm格子線を墨書きし、ひび割れが格子線を通過する交点数を計測し格子密度法で求めた。併せてひび割れの進展状況をスケッチした。スケッチでは、角掛けのひび割れを判別した。

4. 実験結果

4.1 モデル床版の静的押し抜き破壊実験

モデル床版2体を用いて走行疲労実験と同一の支持条件下で静的押し抜き破壊実験を行った。載荷板の大きさは道路橋示方書の輪荷重載荷条件と同一の幅50cm×20cmとし、載荷板と床版の間には暑さ5mmのゴム板を挿入した。

床版中央のたわみの挙動は、荷重100kNあたりまで弾性域を示し、その後たわみ量が5mmを超えたあたりから塑性域が現れ、たわみ量8mm以上で押し抜きせん断破壊した。破壊荷重はNo3が725kN、No4が705kNである。押し抜きせん断破壊強度(Po)の計算値は、表-2に併記のとおりであり、実験値は計算値の約73~78%となった。

表-1 床版供試体の諸元

床版No.	形状寸法(mm)	床版厚(mm)	舗装厚(mm)	主筋		配力筋		コア強度(MPa)	弾性係数(MPa)	ポアソン比	中性化深さ(mm)	ひびわれ密度(m/m ²)	備考	
				圧縮引張	有効高(mm)	圧縮引張	有効高(mm)							
切り出し床版	2	1995×1885	181	61	D16@208	37	D16@219	73	22.4	14100	0.21	34.4	14.72	未補強
					D16@113	133	D16@173	115						
	3	1990×1895	187	71	D16@213	23	D16@218	63	18.3	17100	0.17	28.0	-	S49鋼板接着
					D16@114	120	D16@150	113						
	4	1975×1895	169	68	D16@209	25	D16@219	51	24.1	22700	0.23	36.5	14.12	未補強
					D16@112	112	D16@151	98						
	7	2005×2000	172	55	D16@193	52	D16@224	58	29.0	-	-	17.9	14.72	H107ソングデック補強
					D16@113	129	D16@146	109						
8	2020×1980	172	50	D16@213	30	D16@224	60	22.8	17000	0.17	28.9	14.27	未補強	
				D16@110	123	D16@152	119							
9	2020×2000	165	58	D16@214	30	D16@222	46	16.6	-	-	36.7	17.14	H107ソングデック補強	
				D16@113	125	D16@153	100							
モデル床版	1	2000×2000	190	なし	D16@210	45	D13@220	60	34.5	-	-	-	0.73	疲労実験
					D16@110	170	D13@160	148						
	2	2000×2000	187	なし	D16@210	40	D13@220	55	38.1	-	-	-	0.87	同上
					D16@110	158	D13@160	130						
	3	2000×2000	180	なし	D16@210	48	D13@220	65	39.2	25700	0.20	-	-	静的実験
					D16@110	155	D13@160	140						
	4	2000×2000	180	なし	D16@210	45	D13@220	59	36.8	25500	0.31	-	-	同上
					D16@110	150	D13@160	136						

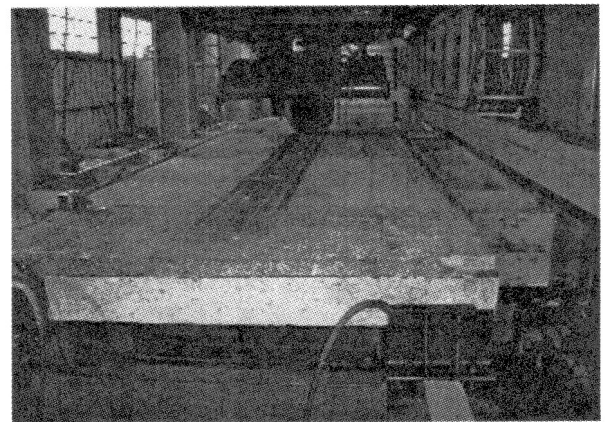


写真-3 走行疲労試験機

表-2 疲労破壊回数および静的破壊荷重

床版No.	走行荷重(kN)	走行回数(回)	静的破壊荷重(kN)	押し抜きせん断強度Po(kN)	押し抜きせん断強度P _{sx} (kN)
切り出し床版	2	157	1,000	-	792
		196	2,455		
	3	157	1,000	-	629
		196	2,455		
	4	157	1,000	-	614
		196	5,233		
モデル床版	7	157	4,331	-	846
	8	157	4,386	-	714
	9	157	1,404	-	544
	1	157	565,500	-	945
モデル床版	2	157	544,735	-	868
	3	-	-	725	994
	4	-	-	705	908
	4	-	-	705	908

4.2 疲労破壊回数

各床版の疲労破壊回数は表-2に示すとおりであり、切り出し床版No2~4は、走行荷重が1,000回走行まで157kN、1,001回以降196kNである。一方、No7~9およびモデル床版No1~2の走行荷重は157kN一定走行であ

る。切り出し床版はNo9の1,404回からNo4の6,233(1,000+5,233)回で破壊したのに対し、モデル床版は概ね100倍の55万回で破壊した。

4.3 ひび割れの発生状況

モデル床版破壊時の床版上面・下面のひび割れ発生状況および主鉄筋方向切断面のひび割れ状況の詳細を図-3に示す。下面のひび割れは、走行車輪幅より少し広い範囲まで格子状に発生し、周辺部は放射状に進展した。押し抜きせん断破壊面は、車輪幅上縁から30~45度の角度でやや広い範囲に発生した。走行面のひび割れは、走行方向に直角（主鉄筋方向）に25~30cm間隔に貫通ひび割れが発生し、“梁化現象”が確認された。また、走行面には上場筋のかぶりコンクリートの砂利化現象も確認された。鉄筋の破断はなかった。

切り出し床版のひび割れおよび切断面の詳細を図-4に示す。切り出し床版は、上面に舗装があるため走行に伴いわずらわし掘れが1~2mm程度発生した。しかし、舗装面には新たなひび割

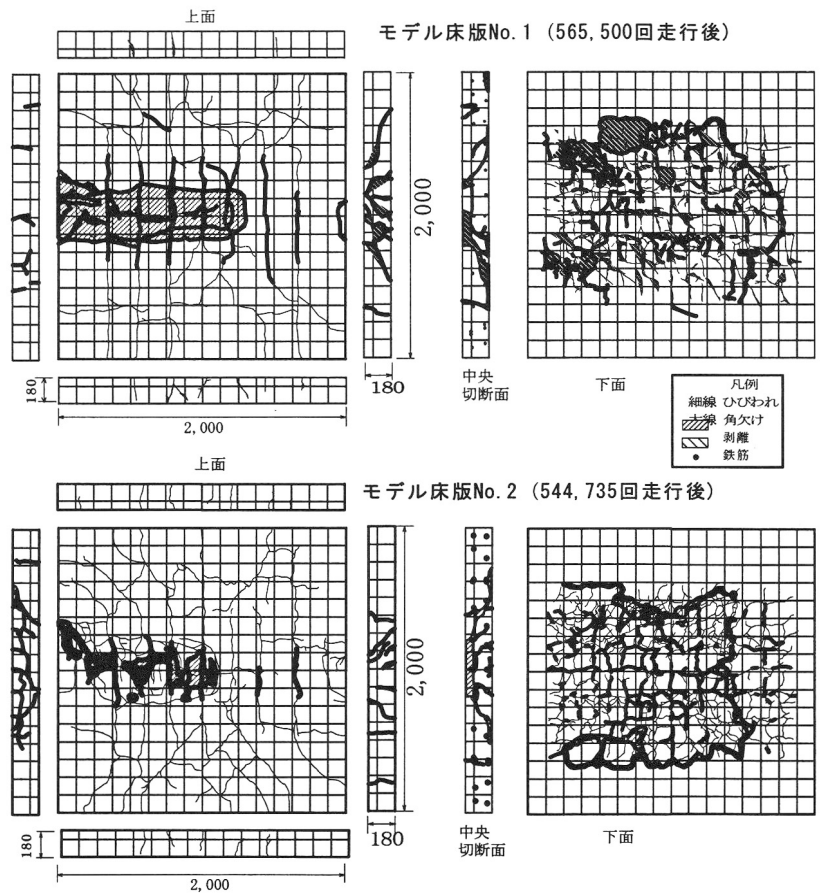


図-3 モデル床版のひび割れ図

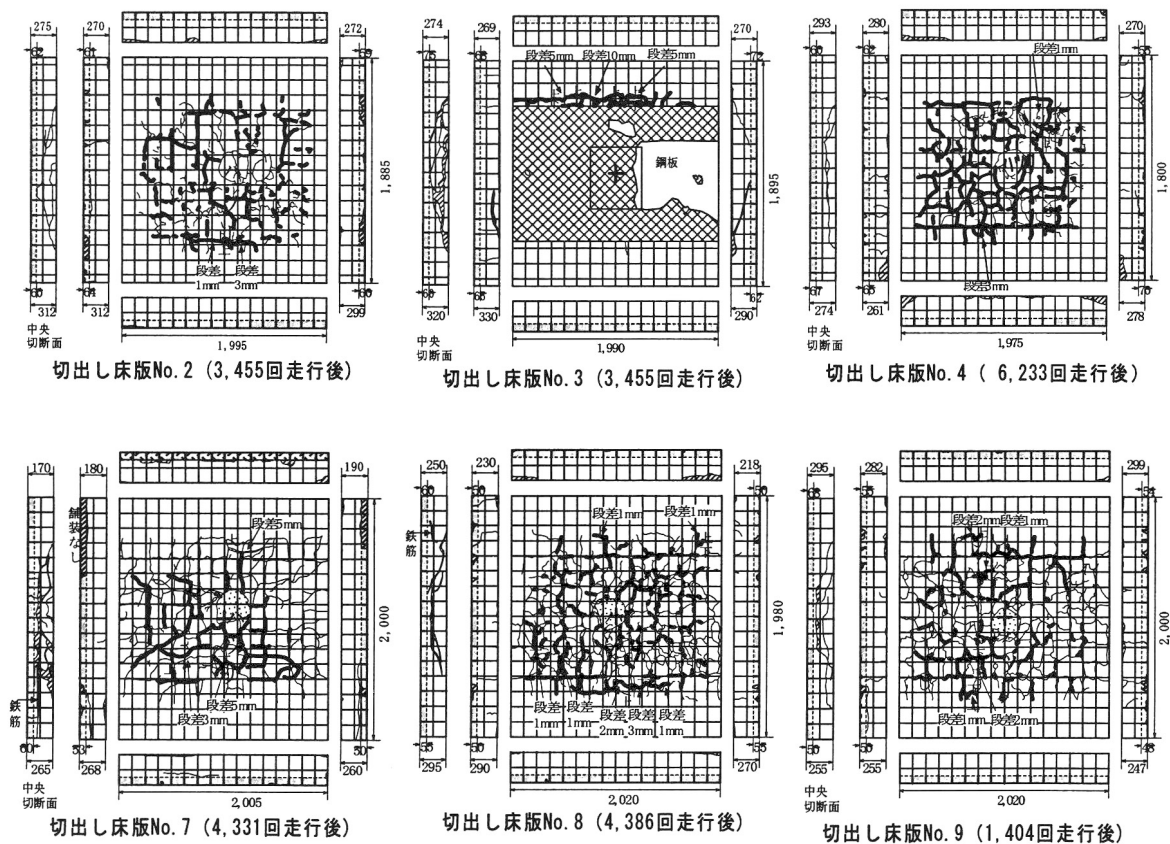


図-4 切り出し床版のひび割れ図

れはほとんど発生しなかった。ただし、No7は張り出し部の床版であるため、供用中に発生したひび割れが他の切り出し床版に比べて多く発生している。No3の鋼板接着補強床版は、ハンチ上縁近傍まで鋼板がエポキシ樹脂で接着されている。実験前の叩き点検では、剥離はなかったが、破壊直前に鋼板周辺部に剥離が生じ、急激に押し抜きせん断破壊した。破壊面は、支間方向に鋼板を切断した端部で発生し、破壊後は鋼板の大部分が剥離した。その他の切り出し床版のひび割れ状況は、モデル床版とほぼ同様な形態を示した。

4.4 ひび割れ密度

床版下面のひび割れ密度の比較を図-5に示す。切り出し床版の走行疲労開始時のひび割れ密度は14~17m/m²であり、供用限界末期の劣化状況を示している。したがって、走行回数の増加に伴うひび割れの進展は、モデル床版ほど顕著でなく、既存ひび割れの「擦り磨き」や「角欠け」がエネルギーを吸収しているものと推察される。

一方、モデル床版のひび割れは、走行回数の増加に伴って1,000回まで直線的に増加して、実橋と同程度のひび割れ密度15m/m²に進展した。また、1,000回以降は角欠けが顕著になり、1万回までひび割れの進展は緩やかであるが、10万回を越えると貫通ひび割れ、タイヤ走行面に沿ってコンクリートの砂利化現象が始まり、ひび割れ密度は最終的にNo1が26m/m²、No2が23m/m²を超えるまでに進展した。したがって、実橋の切り出し時のダメージは、157kN 載荷走行疲労の1~10万回のダメージに相当するものと推察される。

4.5 たわみの比較

157kN 載荷時床版中央点の弾性たわみ（総たわみ-残留たわみ）の比較を図-6に示す。鋼板接着補強床版の切り出しNo3は、1,000回まで他の床版に比べてたわみが25~50%と小さく、鋼板が完全に接着合成されている性状を示していたが、荷重196kNに上げた後の2,455回で急激に接着部が剥離し、押し抜きせん断破壊した。その他の切り出し床版は、走行回数が100~1,000回辺りから弾性たわみが増加し、4mmを越えると急激に押し抜きせん断破壊した。同様にモデル床版も走行回数1万回から弾性たわみが増加し、弾性たわみが4mmを超えると急激に押し抜きせん断破壊した。切り出し床版とモデル床版の走行回数と弾性たわみの関係は、切り出し床版が事前に10~100倍程度の損を受けていたと推察される。

4.6 鉄筋ひずみの比較

157kN 載荷時床版中央点の主鉄筋および配力筋の弾性ひずみ量と走行回数の関係を図-7に示す。切り出し床版No7~9は、走行回数が2,000~3,000回時に不安定な動きが見られる。鋼板の主鉄筋方向のひずみは50μと小さく、1,000回まで安定した性状を示している。切り出しNo2, 4

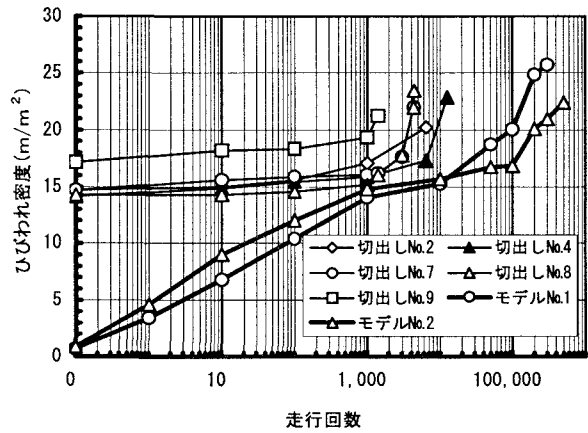


図-5 ひび割れ密度の比較

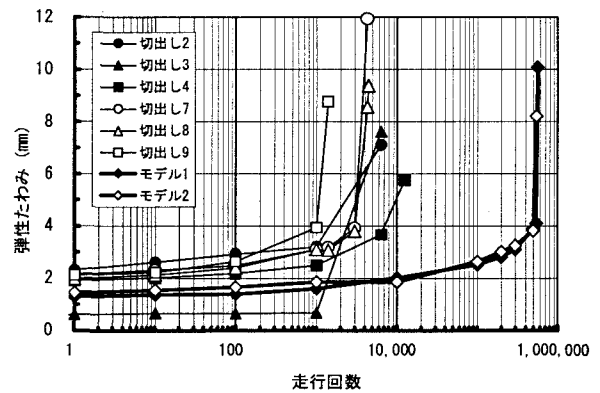


図-6 弾性たわみの比較

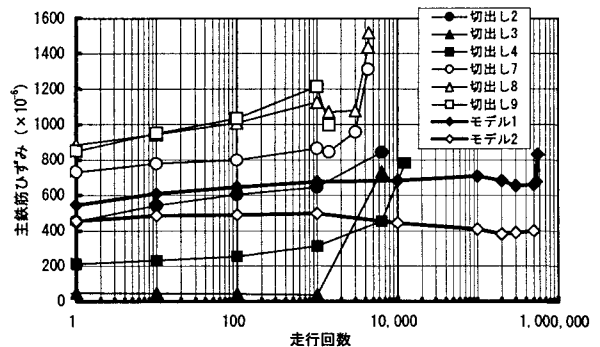


図-7 主鉄筋ひずみの比較

のひずみ量は、モデル床版とほぼ同じ程度の300~700μであるが、切り出し床版No7~9はアンダーデッキ工法で補強しなければならぬほど損傷が進行していたこともあって2倍ほど大きい700~1,200μであった。

5. 残存耐久性の評価

切り出し床版とモデル床版の比較を行うに当たっては、切り出し床版の供用期間中の交通荷重については、追跡調査期間中に測定した表-1に示す交通量調査結果より推定した走行車別累積大型車交通量=累積49kN 輪荷重と見なして検討する。すなわち30年間の走行車線別累積49kN 輪数は、切り出しNo2,3,4,8,9については、表-3のd車線に対応しており3,351万台となる。切り出しNo7は、張り

出し部のf車線に対し1,124万台である。これらの関係を表-4の実測値の列に示す。

これらの実測値を157kN荷重の換算走行回数は、式(1)の関係が成立するものと仮定する。

$$N_{eq(P=157kN)} = \sum (P_i/157)^m \times N_i \quad \text{式(1)}$$

ここに

$N_{eq(P=157kN)}$: 換算走行輪数

P_i : 実荷重

N_i : 荷重 P_i に対応する走行輪数

ここでは、式(1)の $N_{eq(P=157kN)}$ =モデル床版の157kN走行破壊回数の平均値を代入して、No.7を除いた切り出し床版のmの最適値を求める。

計算結果mの最適値は3.53となった。表-4の157kN換算値(m=3.53)の列に計算結果を示す。すなわち累積49kN輪数の157kN換算走行回数は、それぞれ3,351万台≒54万回(1,124万台≒18万回)となる。また、No.2,3の196kN走行回数2,455回の157kN換算回数は5,397回、No.4の5,233回は11,504回に換算される。したがって、損傷した高井戸陸橋床版の供用30年後の残存疲労耐久性は、(疲労走行回数/モデル床版平均走行回数)による単純比較では、切り出しNo.9の0.3%からNo.4の2.3%であるが、使用限界30年×2.3%=0.69年以内とも換算できる。

切り出し時の側間床版は、24パネル中5パネルに抜落ちを防止するためアンダーデッキ工法で平成10年に補強しており、20%は使用限界を超えていた事実があること。切り出し床版のコンクリート強度は、設計値27.4MPaを下回る22.2MPaに対して、モデル床版の強度は37MPaと約40%大きく、モデル床版の耐久性は過大に評価している。モデル床版の破壊回数を約40%低減するとmは4程度となり、残存耐久性は3.6%以内で約1年以内と推定される。

6. まとめ

供用30年で供用限界に達した高井戸陸橋から切り出した床版と同一仕様のモデル床版を用いて輪荷重走行疲労実験を実施した。両者の比較から残存疲労耐久性について、次の結果が得られた。

- (1) 切り出した床版の床版厚は、設計値180mmより5mm小さく、鉄筋量は設計値にほぼ合致していた。コンクリートのコア強度は、設計値27.4MPaを下回る22.2MPaと低品質であり、早期に損傷した原因の一つに挙げられる。
- (2) 切り出した床版もモデル床版も走行回数の増加に伴

表-3 交通量調査結果

一方向交通量	年度	S45	S47	S49	S52	S55	S60	H6	H9	H12	
	経年	0	2	4	7	10	15	24	27	30	
日交通量(万台/日)		0.75	1.10	1.50	1.85	2.15	2.25	2.98	2.82	2.89	
大型車混入率(%)		13	15	16	20	20	21	24	27	27	
累積全交通量(×10 ⁶)		0.00	6.76	16.25	34.59	56.49	96.64	182.54	214.30	245.55	
累積全大型車交通量(×10 ⁶)		0.00	0.93	2.39	5.73	10.08	18.23	37.93	46.11	54.58	
車線別	f:内廻り(走)	10.3%	0.00	0.19	0.49	1.18	2.08	3.76	7.81	9.50	11.24
累積全大型車交通量(×10 ⁶)	d:内廻り(追)	30.7%	0.00	0.57	1.47	3.52	6.19	11.19	23.29	28.31	33.51
	a:外廻り(走)	17.7%	0.00	0.33	0.85	2.03	3.57	6.45	13.43	16.32	19.32
	c:外廻り(追)	41.3%	0.00	0.77	1.97	4.73	8.33	15.06	31.33	38.09	45.08

注：車線別累積全大型車交通量は平成6年度の実測車線混入率からの計算値

表-4 耐久性評価

供試体 No.		実測値				157kN換算値 (m=3.53)				走行回数/モデル平均
		累積49kN輪数	疲労走行回数		累積49kN輪数	疲労走行回数		合計		
			157kN	196kN		157kN	196kN			
切り出し	2	33,510,000	1,000	2,455	552,071	1,000	5,397	558,468	1.2%	
	3	33,510,000	1,000	2,455	552,071	1,000	5,397	558,468	1.2%	
	4	33,510,000	1,000	5,233	552,071	1,000	11,504	564,575	2.3%	
	7	11,240,000	4,331	0	185,177	4,331	0	189,508	0.8%	
	8	33,510,000	4,386	0	552,071	4,386	0	556,457	0.8%	
モデル	9	33,510,000	1,404	0	552,071	1,404	0	553,475	0.3%	
	1	0	565,500	0	0	565,500	0	565,500	101.9%	
	2	0	544,735	0	0	544,735	0	544,735	98.1%	
平均	0	555,118	0	0	555,118	0	555,118	100.0%		

(注) m : S-N線図傾きの逆数(絶対値)

って、ひび割れが進展し、ひび割れ密度、たわみおよび鉄筋ひずみの何れも増加傾向を示し、破壊直前に急激に増加するパターンで一致する。

- (3) 157kN走行疲労破壊回数の比較では、切り出し床版は1,400回から1万回であり、モデル床版は55万回である。床版のコンクリート強度を考慮すると切り出し床版の残存耐久性は、モデル床版の1/30~1/300程度であり、約1年以内の残存寿命と推定される。
- (4) 供用30年間のひび割れ密度は、14~17m/m²であった。この値は、モデル床版の157kN走行回数1万~10万回の損傷に相当すると評価される。
- (5) 載荷荷重の換算係数(m乗則)は、舗装の4乗則に近い3.53乗(コンクリート強度考慮の場合4乗)と仮定すると、大型車交通量を49kN輪数と仮定して求めた高井戸陸橋の30年間の累積車線別交通量と157kN走行疲労回数は概ね一致する。

7. おわりに

実験においては、大阪工業大学の堀川都志雄教授のご指導を賜りました。ここに記して、謝辞を申し上げます。

参考文献

- 1) 関口幹夫(1986):高井戸陸橋RC床版損傷の経年変化, 昭61. 都土木技研年報, 163-173
- 2) 関口幹夫, 宍戸薫, 今里光夫(2000):供用30年間のRC床版追跡調査結果, 平12. 都土木技研年報, 55-66
- 3) 関口幹夫, 宍戸薫, 森俊介(2002):高井戸陸橋RC床版の残存疲労耐久性の評価, 平14. 都土木技研年報, 101-112