

高性能軽量コンクリートを用いたPC床版の疲労特性に関する研究

ドービー建設工業(株) 技術センター 正会員 ○ 田村 聖
 同 上 正会員 蛭名 貴之
 大阪工業大学工学部 土木工学科 谷口 義則
 同 上 堀川 都志雄

1. はじめに

近年、プレストレストコンクリート(以下、PC と称す)橋梁の分野において、主桁自重の軽量化を図るため、構造分野および材料分野からの新技術開発や新工法開発が積極的に行われている。構造分野より PC 橋の軽量化を図る手法として、鋼とコンクリートの複合構造の採用、外ケーブル構造の採用等が挙げられる。また、材料分野より PC 橋の軽量化を図る手法として、人工軽量骨材を用いたコンクリートの適用、高強度コンクリートの採用が試みられている。

人工軽量骨材に着目すると、骨材の製造技術の改良により従来の軽量骨材と比較して、格段に高強度で且つ低吸水性を示す人工軽量骨材が開発された(以下、高性能軽量コンクリートと称す)¹⁾。この高性能軽量コンクリートを波形鋼板ウェブPC橋の上・下床版に適用することによって、主桁総重量は従来のPC箱桁の約54%まで低減できることが報告されている²⁾。このように、構造分野と材料分野で開発された技術を組み合わせ、PC橋の高機能化・軽量化を図ることによって、革命的なPC橋を創造することが可能である。

しかし、最近の交通量の増大および車両の大型化による影響を考慮すれば、高性能軽量コンクリートをPC橋に用いる場合には床版の疲労特性を明確にすることが急務となる。

本研究は、高性能軽量コンクリートを用いたPC床版およびRC床版を対象として、輪荷重走行試験からこれらの疲労特性の検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料とコンクリートの配合

使用した材料の物理特性と示方配合を表-1および表-2に示す。粗骨材には絶乾密度1.2g/cm³の造粒型高性能人工軽量骨材を用い、細骨材には川砂を用いた。また、本実験では、材齢28日での圧縮強度が40N/mm²以上となるように配合した。

表-1 使用材料の物理特性

使用材料	種	種類	密度*1	物性または成分
セメント	C	早強ポルトランドセメント	3.13	比表面積 4450cm ² /g
細骨材	S	大井川産川砂	2.62*2	吸水率 0.98%
	G	大井川産川砂利	2.65*2	吸水率 0.63%
粗骨材	HLA	造粒型高性能人工軽量骨材	1.15*3	最大骨材粒径 15mm 24h 吸水率 0.08%
	AE	AE 助剤	1.0	変性7-メルカプトン酸系
混和剤	SP	高性能AE減水剤	1.0	ポリカルボン酸系

*1: 単位 (g/cm³) *2: 表乾状態 *3: 絶乾状態

表-2 コンクリートの示方配合

呼名	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位置 (kg/m ³)					SP (C×%)	AE (C×%)
				W	C	S	G	HLA		
HLA*1	38.0	53.0	5.5	165	434	898	—	345	0.65	0.04

*1: 高性能軽量コンクリート

2.2 供試体の概要

供試体の形状と供試体の設置概要を図-1および表-3に示す。導入プレストレス量をパラメータとしてPC床版を3体、比較のためにRC床版を1体、合計4体の供試体をプレキャスト床版として製作した。すべての供試体の寸法

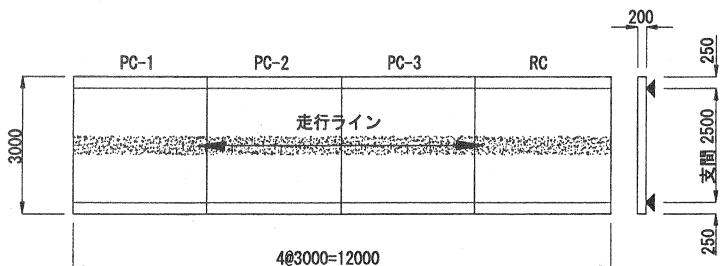


図-1 供試体の設置

表-3 供試体の形状

供試体 No.	形状寸法 (m)	床版支間 (m)	導入プレストレス量 (N/mm ²)	PC 鋼棒 (mm) 径・ピッチ	主・配力鉄筋 (mm) 径・ピッチ
PC-1	3.0×3.0×0.2	2.5	1.5	φ23 @300	D16 @150
PC-2			1.0	φ23 @400	
PC-3			0.5	φ23 @600	
RC			—	—	

表-4 輪荷重試験機のパフォーマンス

負荷荷重	最大値 245kN
走行速度	0.4km/hr～5.0km/hr
走行区間	最大 14.25m

は、橋軸方向3.0m×橋軸直角方向3.0m×床版厚0.2mとした。導入プレストレス量は1.5N/mm²、1.0N/mm²および0.5N/mm²の3タイプであり、各供試体ともPC 鋼棒φ23mmを用いてポストテンション方式で導入した。供試体は実構造物を想定した床版支間長5.8mの連続版で設計し、主鉄筋量および配力鉄筋量を決定した。また、全ての供試体において同一の鉄筋量とした。供試体床版の支間長は正の曲げモーメント部分を受ける床版を対象としているので2.5mとした。

2.3 輪荷重走行装置と載荷プログラム

本実験は、自走式輪荷重移動載荷装置を用いて実施した。自走式輪荷重移動載荷装置のパフォーマンスを表-4に示す。載荷装置の走行区間は最大で14.25m、負荷荷重は最大で245kNを有しており、空気入りタイヤを介して載荷している。

載荷プログラムを図-2に示す。輪荷重による載荷方式は階段載荷とした。初期走行荷重は98kN(5万回走行)とし、その後、走行荷重を118kN(8万回走行)、128kN(10万回走行)、148kN(8万回走行)と増加させ、最終の走行荷重は167kNとし現在継続中である。

計測項目は、床版のたわみ、主鉄筋のひずみ、ひび割れの開閉量であり、さらにひび割れ網の観察からひび割れ密度の成長率を追跡した。なお、RC 供試体は総走行回数13万回の時点で計測を打ち切った。

3. 走行実験の結果および考察

3.1 載荷時のコンクリート強度

載荷実験開始直前に実施したコンクリートの強度試験結果を表-5に示す。圧縮強度は目標とした40N/mm²以上の強度に達していた。単位重量は約18.5kN/m³程度となり、普通コンクリートの単位重量を23.0kN/m³とすれば約20%の軽量化が図られている。しかし、圧縮強度に対する引張強度の比率は約1/16となり、従来の軽量コンクリートと同様に普通コンクリートにおける比率よりも低下していた。

3.2 静的載荷による経時変化

輪荷重走行の繰返しで床版は疲労作用を受け、次第に床版の曲げ剛性の低下によって床版は劣化傾向を示すことは周知の事実である。以下では、走行回数に伴って静的載荷を行い、たわみや鉄筋ひずみの挙動を明

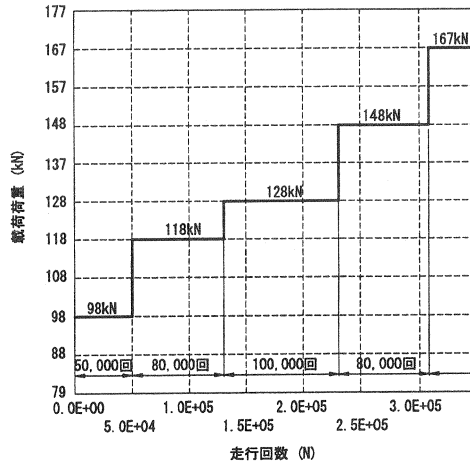


図-2 載荷プログラム

表-5 コンクリートの強度試験

供試体 No.	実験開始時の材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	単位重量 (kN/m ³)
PC-1	36	47.1	2.87	23.4	18.5
RC					
PC-2	37	43.5	2.69	23.1	18.4
PC-3					

らかにする。

3.2.1 たわみ

PC-1 供試体の床版中央部での総たわみと残留たわみの経時変化を図-3に示す。走行試験では、一般に総たわみから残留たわみを差引いた値、すなわち活荷重たわみを比較することによって床版の劣化過程が論じられている。しかし、本実験では階段荷重を採用しているため、計測データには荷重の大きさによる影響が含まれる。そこで、弾性成分は載荷荷重と比例関係にあることを利用して、基準とする荷重(本検討では98kNとした)が作用した場合の換算弾性値(98 kN/載荷荷重)を用いることで荷重の大きさによる影響を除去した。PC-1 供試体およびPC-2 供試体の床版中央部での弾性たわみの経時変化を図-4に示す。図-4の全断面有効時の計算値は、表-5の弾性係数を用い、板理論より全断面を有効として算出した値である。一方、引張無視時はコンクリートの引張領域を無視した板剛度より計算した値である。

図-4より、いずれの供試体も走行回数が約5万回まで、全断面有効時の計算値と実測値は概ね一致している。輪荷重の走行作用を受けるたわみは、走行回数が増加するに伴い次第に増加する傾向となる。結果として、導入プレストレス量がPC-1 供試体より少ないPC-2 供試体の弾性たわみの経時変化はPC-1 供試体と比較して大きくなっていることから、PC-2 供試体の曲げ剛性がほぼ1.2倍程度低下していることが判る。

3.2.2 鉄筋ひずみ

PC-1 供試体中央点での下側主鉄筋の総ひずみと残留ひずみの経時変化を図-5に示す。たわみの項で述べた手法と同様にして荷重による影響を除去したPC-1 供試体およびPC-2 供試体の弾性ひずみの経時変化を図-6に示す。

弾性たわみの経時変化と同様に、いずれの供試体も走行回数が約5万回まで、全断面有効時の計算値と実測値は概ね一致しているが、走行回数が増加するに伴い鉄筋の弾性ひずみは次第に増加する傾向となった。走行回数が約13万回までのPC-2 供試体の主鉄筋ひずみはPC-1 供試体に比べて大きくなっているが、13万回以降ではPC-1 供試体より小さな値で推移していることが判る。しかし、床版中央点以外の計測点においては走行回数に依らずPC-2 供試体のほうが大きくなっていった。

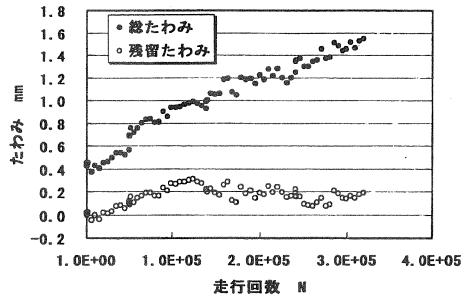


図-3 総たわみおよび残留たわみの経時変化

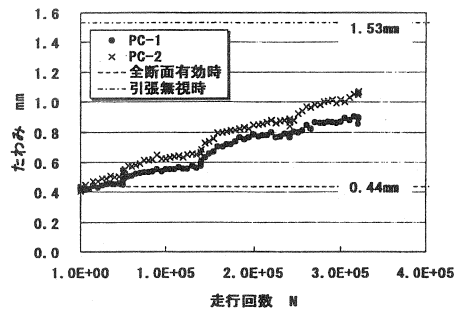


図-4 弾性たわみの経時変化

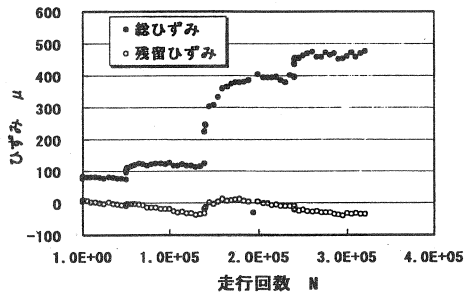


図-5 総ひずみおよび残留ひずみの経時変化

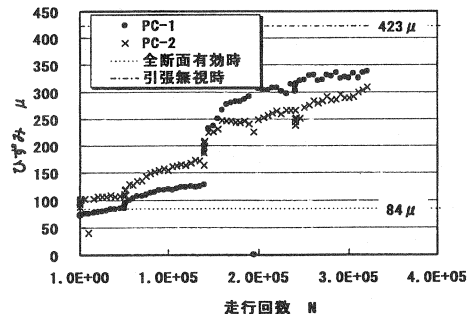


図-6 弾性ひずみの経時変化

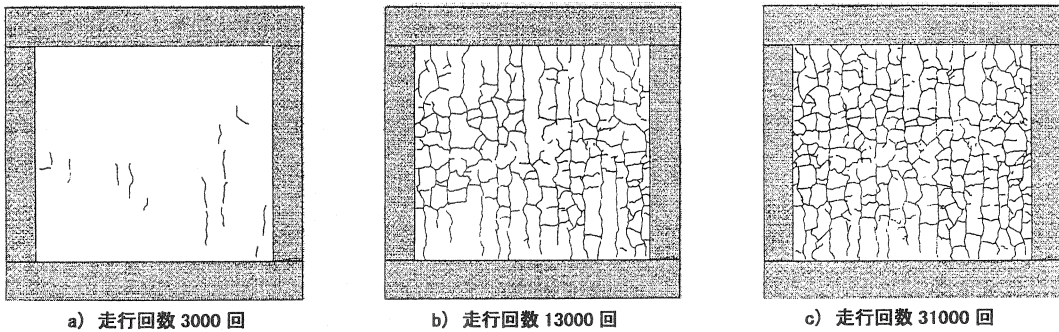


図-7 ひび割れの進展

3.2.3 ひび割れの進展状況

PC-2 供試体下面のひび割れの進展状況を図-7に示す。初期ひび割れは、輪荷重による曲げモーメントにより主鉄筋方向に発生した(走行回数 3000回)。主鉄筋方向のひび割れ発生後、床版は等方性版から次第に異方性版へと変化し、配力筋方向のひび割れが発生した(走行回数 13000回)。最終的には二方向のひび割れが発達し網目状に至った。なお、ひび割れの進展状況は全ての供試体において同様な傾向であった。このようなひび割れの進展は、既往の研究成果による普通コンクリートを用いたRC床版のひび割れ状況と同様である。高性能軽量コンクリートを用いたPC床版およびRC床版の走行繰返しによるひび割れの伸展状況は、通常のRC床版とほぼ同様な現象を呈することが確認された。

3.2.4 ひび割れ閉閉量

PC-2 供試体の床版中央点近傍に発生した橋軸直角方向ひび割れにπゲージを添付し、ひび割れの閉閉量の経時変化を追跡した。その結果を図-8に示す。走行回数の増加に伴って、たわみや鉄筋ひずみと同様に漸増傾向にあることは明らかである。輪荷重が除荷された状態では残留閉閉量が得られ、走行回数 33 万回時で約 0.1mmであった。また、輪荷重を載荷した場合、すなわち総閉閉量は約 0.15mmに達していた。残留閉閉量が一般的に床版のひび割れ網として観察されている。

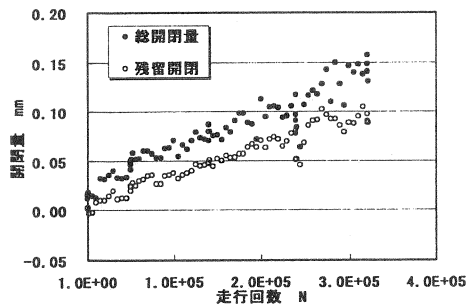


図-8 ひび割れ閉閉量

表-6 弾性たわみの成長率

供試体 走行荷重	PC-1	PC-2	PC-3	PC-4
98kN	8.9	20.3	23.9	26.8
118kN	9.7	13.2	24.2	26.8
128kN	19.4	20.4	32.7	—
148kN	15.0	22.9	29.1	—

単位: mm/cycle

3.2.5 弾性たわみの成長率

各供試体の弾性たわみの走行回数に対する平均成長率を表-6に示す。弾性たわみの成長率は、各荷重のたわみ量を走行回数で除し、その傾きで表示している。PC-2 供試体の成長率はPC-1 供試体に比べて、最終段階で約 1.5 倍程度大きくなっている。すなわち、PC-2 供試体の曲げ剛性の低下率はPC-1 供試体よりも大きいことを示している。PC-2 供試体は初期時においてもPC-1 供試体よりも約 2 倍程度大きな値から始まっていることより、PC-2 供試体はPC-1 供試体よりも載荷開始時から乾燥収縮による影響を潜在的に受けていたことが考えられる。

3.2.6 ひび割れ密度

PC-1 供試体～PC-3 供試体下面のひび割れ密度の比較を表-7 に示す。いずれの供試体も、走行荷重が増加するに伴いひび割れ密度も増加している。また、導入プレストレス量の影響により PC-3 供試体よりも PC-1 供試体のひび割れ密度が小さくなっており、導入プレストレス量が大きくなれば床版の疲労特性は向上していることが推測される。

表-7 ひび割れ密度の比較

走行荷重	PC-1	PC-2	PC-3
98kN	0.49	5.67	3.93
118kN	6.11	10.07	10.40
128kN	11.77	12.51	15.51
148kN	13.15	15.51	16.72

単位：m/m²

3.3 輪荷重走行時における挙動

輪荷重走行時におけるたわみやひび割れ開閉量の挙動は、前述の静的載荷とは異なる性状を示す。すなわち、静的載荷による経時変化では掌握できない実走行下での挙動がこの計測により推定できる。計測に当たっては、測定項目の初期値を測定たびごとに零にクリアしているため、残留による影響はないと考えられる。従って、たわみやひび割れ開閉量等の計測された値はほぼ弾性成分に相当する。

3.3.1 たわみ

床版初期時の挙動を表す走行回数 1 万回および終了直前での 32 万回時点における PC-1 供試体と PC-2 供試体の床版中央点でのたわみの走行移動下での挙動を図-9 および図-10 に示す。また、PC-1 供試体において供試体上面を輪荷重が走行する時間を横軸にとり、走行荷重との関係を図-11 に示す。図-11 に示すように、各供試体上面を走行する輪荷重の大きさは床版の不陸等によって一定ではなく±5%程度の荷重変動を受ける。そこで、床版に作用する輪荷重を図-11 に示すように3ヶ分の平均値となるように約 130 分割した柱状の荷重に置換し、

3.2 で述べた手法により全断面有効時および引張無視時の計算値を算出した。

どちらの供試体も走行回数が 1 万回時点では、全断面有効時の計算値と実測値の形状は概ね一致している。走行回数が 32 万回になるといずれの供試体も引張無視時の計算値よりも小さく、PC-2 供試体は PC-1 供試体の値よりも大きいことが判る。また、PC-2 供試体は引張無視時の値に漸近していることより、導入されたプレストレスの大きさによって床版が劣化した場合でのたわみに影響していると考えられる。ここで、引張無視時の計算値は、松井³⁾の提案する使用限界状態のたわみ値を意味する。

3.3.2 ひび割れ開閉量の挙動

PC-1 供試体上面のひび割れ開閉量の挙動を図-12 に示す。また、PC-2 供試体下面のひび割れ開閉量の挙

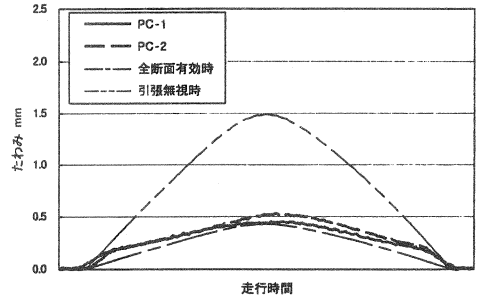


図-9 たわみの挙動(1万回)

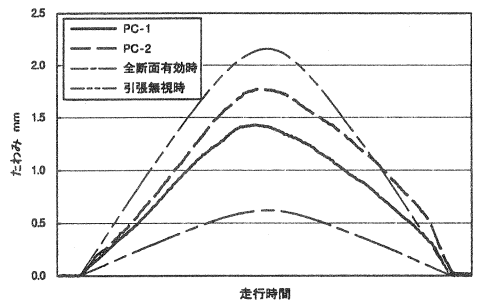


図-10 たわみの挙動(32万回)

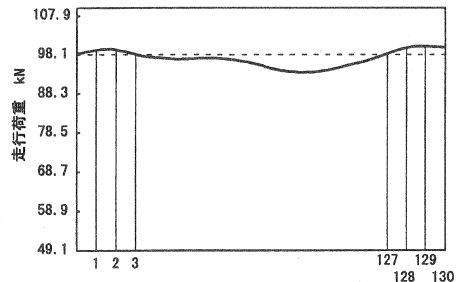


図-11 輪荷重と走行荷重の関係

動を図-13 に示す。図中に示す開閉量の正負の符号は、ひび割れが開く挙動を正で示し、ひび割れが閉じる場合を負で示している。初期時(98kN)の開閉量を基準にして、輪荷重が148kN 作用下での開閉量は、基準の値を149/98倍することで換算値が得られ、開閉量の成長割合が推定できる。例えば PC-1 供試体では、換算値に対して閉じる方向で約2.7 倍、開く方向で約2.0 倍に拡大している。また、PC-2 供試体では、換算値に対して閉じる方向で約2.6 倍、開く方向で約2.2 倍に達する。すなわち、ひび割れの開閉量の成長は床版の上面あるいは下面を問わず、輪荷重の大きさに比例して線形的に増大せず、輪荷重の大きさにかかなり支配されていることが判る。

また、図-12 および図-13 より、床版に発生したひび割れは輪荷重の繰り返しにより開閉とすりみがき現象が生じていることを表している。普通コンクリートを用いた RC 床版においてもこのような現象を繰り返すことにより、ひび割れの角欠けやスリット化が生じ、やがて剥離や剥落が生じる過程をたどることが既往の研究成果より明らかにされている。本研究では、コンクリート片の脱落が生じるまでの走行回数には至っていないが、走行回数をさらに増加させることによって高性能軽量コンクリートを用いた PC 床版においても同様な挙動を示すことが予想される。

4. 結論

本研究で使用した、造粒型高性能人工軽量骨材を用いた高性能軽量コンクリートにプレストレスを導入することによって製作された PC 床版の劣化過程は、普通コンクリートを用いた PC 床版や RC 床版と同様、たわみや鉄筋ひずみおよびひび割れ開閉量の定量的な計測結果から、ほぼ同程度であった。本研究より得られた結論を以下に示す。

- 1) 床版中央部のたわみの経時変化は、導入プレストレス量が少ない供試体ほど大きくなる傾向となり、プレストレスの大きさによって疲労特性は改善される。
- 2) 高性能軽量コンクリートを用いた PC 床版および RC 床版のひび割れの進展状況は、普通コンクリートを用いた RC 床版のひび割れ状況と同様な性状を示している。
- 3) ひび割れ密度は、導入プレストレス量が大きい供試体ほど小さくなり、プレストレスを導入することにより高性能軽量コンクリートを用いた PC 床版の疲労特性は向上する。
- 4) 高性能軽量コンクリートを用いた PC 床版のひび割れ開閉量の走行荷重下での挙動は、普通コンクリートを用いた RC 床版と同様な挙動を示すことより、ひび割れの角欠けやスリット化の現象が懸念される。

【参考文献】

- 1) 岡本享久、早野博幸、柴田辰正：超軽量コンクリート，コンクリート工学，Vol.36，No.1，pp.48-52，1998.1
- 2) 田村聖、立神久雄、上平謙二、石川雄康、前堀伸平：高性能軽量骨材コンクリートおよび波形鋼板を用いた PC 橋の試設計，土木学会第 54 回年次学術講演会概要集第 5 部，pp.670-671，平成 11 年 9 月
- 3) 松井繁之：道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究，大阪大学学位請求論文，1984.11

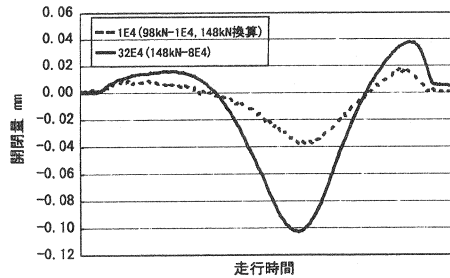


図-12 ひび割れ開閉量の挙動(上面)

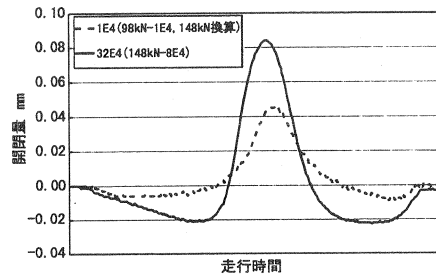


図-13 ひび割れ開閉量の挙動(下面)