

論文

輪荷重走行試験における載荷ブロックの形状と RC 床版の疲労耐久性に関する検討

野口堅冬*, 安東祐樹**, 竹村浩志***, 松井繁之****

*ショーボンド建設(株), 補修工学研究所 (〒305-0003 茨城県つくば市桜 1 丁目 17 番)
 **博 (工), ショーボンド建設(株), 補修工学研究所 (〒305-0003 茨城県つくば市桜 1 丁目 17 番)
 *** ショーボンド建設(株), 本社技術本部 (〒103-0015 東京都中央区日本橋箱崎町 7 番 8 号)
 ****工博, 大阪工業大学, 大阪大学名誉教授 (〒565-0824 吹田市山田西 4 丁目 6 番 4 号)

鉄輪式走行試験機の載荷ブロックは, 実車両の荷重作用を模擬する役割を担うが, その形状によっては荷重分布が偏り, 疲労試験結果に差が生じる可能性が示唆されている. ここでは, 平成 8 年と昭和 39 年の道路橋示方書に準拠した RC 床版を対象に, 通常の一体型ブロックと分割型ブロックの違いを比較した. 結果, 分割型ブロックを用いることで, ブロックの短辺端部での荷重集中の低減と疲労寿命の増加に繋がる可能性を示した.

キーワード: RC 床版, 輪荷重走行試験, 載荷ブロック, 破壊性状

1. はじめに

床版の疲労耐久性を確認する手段に輪荷重走行試験機が定着してから久しい. 特に, 鉄輪式走行試験機(以下, 鉄輪式)は, 高速かつ高荷重での評価が可能であり, 今日の床版の開発や疲労に関する研究では欠かせないものである. 鉄輪式による試験では, 実トラックのダブルタイヤの後輪を模擬するよう, 鉄輪の下にタイヤの接地面を再現する厚鋼板(以下, 載荷ブロック)を試験機走行方向に敷き並べている. この載荷ブロックは, これまで種々の形状¹⁾のものが使用されているが, ブロック形状の違いが疲労耐久性に及ぼす影響を検討した研究事例は少ない. 載荷ブロックは輪荷重の接地圧, 面積を左右する構成部材であることを考えると, 試験体の疲労耐久性にも大きく関わってくる. 特に鉄輪式試験機においては, 床版の変形に追従しながら荷重が床版面に対し均等に作用する必要がある. その対策の一つとして, 載荷ブロック(橋軸方向 200mm×橋軸直角方向 500mm)を 2 分割する(以下, 分割型ブロック)案が挙げられ, これまでに, その有効性が示されている²⁾. 本研究では, 異なる道路橋示方書(以下, 道示)の標準 RC 床版を対象に走行試験を実施し, 載荷ブロックの違いについて検討した.

2. 試験体

試験体の種類と条件を表-1 に, 各試験体の試験時におけるコンクリートと鉄筋の主要物性を表-2 に, 試験

体の形状を図-1 に示す. 試験体には, 版厚が薄く, 鉄筋量が少ない昭和 39 年道示(以下, S39)と, 床版厚, 鉄筋量ともに現行基準と同等である平成 8 年道示(以下, H8)に基づく設計の RC 床版を使用した. これは, 土研の走行試験機による道示床版の研究³⁾に倣うものであり, 床版サイズや床版厚, 鉄筋量(径, ピッチ)も当該研究と同等にした. 試験体数は, 載荷ブロックの形状差を見るために S39, H8 とも 2 体ずつとし, 計 n=4 体とした.

3. 試験方法

試験は写真-1 に示す当研究所にあるクランク型の鉄輪式を用いて行った. 本試験機は国立研究開発法人土木研究所(以下, 土研)と同型機である.



写真-1 使用試験機の外観

表-1 試験体条件

試験体名	荷重ブロック	床版厚	主鉄筋			配力筋		
			径	有効高	間隔	径	有効高	間隔
H8-1	一体型	250	D19	210	150	D16	192	125
H8-2	分割型		(D16)	(40)	(300)	(D16)	(58)	(250)
S39-1	一体型	190	D16	160	150	D13	146	300
S39-2	分割型		(D16)	(30)	(300)	(D10)	(43)	(300)

()内は圧縮側, 単位:mm

表-2 各試験体の主要物性

試験体名	コンクリート (試験開始時)			鉄筋 (SD345, D10 は SD295A) ミルシート値				
	圧縮強度 N/mm ²	ヤング係数 N/mm ²	ポアソン比	引張強さ N/mm ²	降伏点 N/mm ²	伸び %	ヤング係数 N/mm ²	ポアソン比
H8-1	25.4	24,900	0.20	D16 : 588	D16 : 396	D16 : 21	2.0 × 10 ⁵	0.3
H8-2	28.7	26,500	0.21	D19 : 575	D19 : 381	D19 : 21		
S39-1	31.6	25,600	0.19	D10 : 503	D10 : 369	D10 : 29		
S39-2	33.6	26,000	0.19	D13 : 522 D16 : 495	D13 : 388 D16 : 362	D13 : 22 D16 : 27		

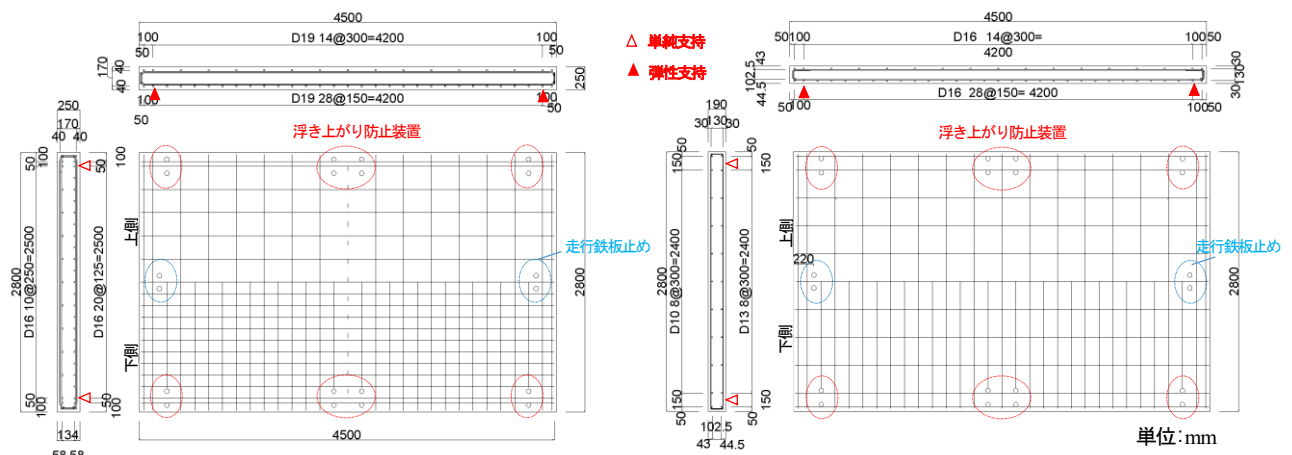


図-1 試験体形状 (左: H8 床版, 右: S39 床版)

試験は静的荷重, 走行試験の順で行った. まず静的荷重では, 走行試験開始荷重である 157kN を試験体中央に荷重し, 初期剛性を確認した. つぎに, 走行試験では, 鉄輪の往復範囲を 3m とし, 荷重は, 初期荷重 157kN から走行回数 4 万回ごとに 19.6kN ずつ上げていく“階段状荷重漸増荷重” (以下, 階段荷重) とした. なお, 走行試験中は所定の回数毎に床版のたわみや鉄筋ひずみの計測, 上下面のひび割れ観察を行い, 試験体のたわみの急増や, コンクリートの破壊の兆候を確認した時点で走行試験を終了することとした. また, 走行試験終了後には床版中央を橋軸直角方向に切断し破壊状況の観察を行った.

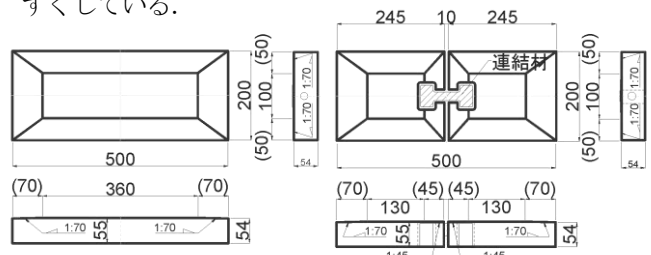
いずれの試験も試験体の支持条件は, 橋軸方向辺は主桁の上に丸鋼を載せた単純支持, 橋軸直角方向辺は横梁となる H 鋼上での弾性支持とし, 単純支持辺の四隅と中央部分には浮き上がり防止としてボルトで固定した.

4. 荷重ブロック形状について

今回, 本研究の主たる目的である荷重ブロックは, T 荷重の荷重面積となる 200 × 500mm の底面積を有する厚鋼板の荷重ブロック (以下, 一体型) と, 一体型を長手方

向に 2 分割したもの (以下, 分割型) の 2 種類を評価に用いた (図-2). 荷重ブロックは SS400 材で厚みは 55mm と十分な剛性を有し, ブロック自体の変形はごく小さい. また, 両ブロックとも図-2 に示すように, 上表面の周囲に外側に向かって下りのテーパ 1mm をつけ, 鉄輪の荷重がそれらテーパ内で作用するようにした.

ただし, 一体型では, 床版のたわみが大きくなるにつれて, 輪荷重の作用はブロックの短辺端部 (エッジ部分) に集中する恐れがある. そこで, 分割型では, ブロック同士が物理的に干渉しないよう, 10mm の遊間と連結材を設けることで, ブロックが床版上面の変形になじみやすくしている.



() はテーパ部の長さ, 単位:mm

図-2 荷重ブロック形状 (左: 一体型, 右: 分割型)

5. 走行試験結果

1) 破壊走行回数と破壊荷重

走行試験はいずれの試験体も、押し抜きせん断破壊のひび割れが車輪走行位置の端部上面に生じたのを確認した時点で終了した。表-3 に各試験体の破壊回数と破壊荷重 P_{max} 、床版が梁状化した状態での押し抜きせん断耐力 P_{sx} を示す。 P_{sx} の算出には、材料試験や試験後の切断面から測定した版厚・鉄筋位置等、表-4 に示す各パラメータの値を用いた。また、表中に示す 157kN 一定載荷の換算回数 N は、階段載荷の結果を既往研究³⁾に倣い等価換算した値で、松井らの提唱する S-N 線（以下、松井式）の傾き成分の逆数 ($m=12.763$) を使用した。

表-3 より、階段載荷の回数は、H8 床版では、H8-1 が破壊時走行回数 386,560 回に対し、H8-2 では 432,087 回となった。両者の換算回数で比較すると、H8-2 は H8-1 の 2.37 倍に延びた。ここで、 P_{sx} を見ると、H8-2 は H8-1 より約 2kN 小さく、マイナー則により疲労寿命は 0.96 倍となるが、逆に 2.37 倍延びたということは、明らかに載荷ブロック形状の影響が現れたと言える。

一方、S39 床版の階段載荷では、S39-1 が 194,607 回、S39-2 が 201,056 回でそれぞれ破壊した。換算後の走行回数は、S39-2 が S39-1 に比べ 1.16 倍多くなった。 P_{sx} の差をマイナー則で評価すると疲労寿命は理論上 1.05 倍延びるが、それ以上の差が現れたことは、S39 床版においても、多少なりとも分割型を用いた効果があったと考えてよいであろう。

2) 床版のたわみ

各試験体の走行回数毎の床版支間中央部のたわみの変化を図-3 に示す。図中のたわみは、載荷時たわみから除荷時たわみを引いた弾性たわみを 157kN での一定載荷として換算したものである。また、図中には薄板理論による引張無視時の計算たわみ（ヤング係数比 n は実測値を使用）を併せて示す。なお、H8-1 と H8-2、S39-1 と S39-2 の計算値はそれぞれ、ほぼ同じ値であった。

H8 床版は回数が進むにつれどちらもたわみは漸増し、押し抜きせん断破壊に至る直前で急増した。急増時のたわみは引張無視の計算値と概ね一致した。H8-1 と H8-2 を比較すると、回数毎のたわみの増分に差異はないが、38.6 万回で H8-1 のたわみが急増して破壊に至り、H8-2 は、H8-1 よりさらに 4.5 万回走行してから破壊に至った。

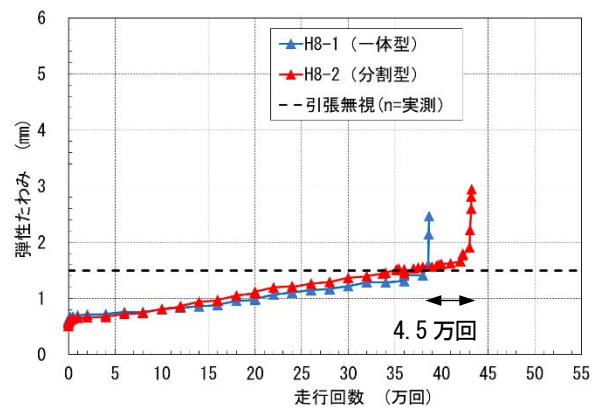
S39 床版では、S39-1、S39-2 とともに走行開始直後からたわみの増加度が大きく、その後も回数を重ねるにつれ徐々に増加し、S39-1 は 18.0 万回で急増し、S39-2 は 20.0 万回で急増した。ただし、H8 床版と異なり引張無視の計算たわみと破壊に至る直前のたわみの急増点との関係は明瞭でなかった。これは、S39 床版は曲げ剛性が小さいため、走行初期から劣化が急速に進んだためである。

表-3 走行試験結果

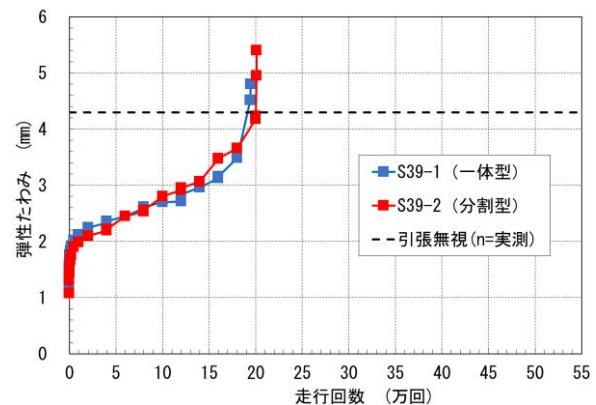
試験体	荷重 P_{max} (kN)	階段載荷破壊回数 (回)	押し抜きせん断耐力 P_{sx} (kN)	一定載荷換算回数 N (回)
H8-1 (一体)	333	386,560	571.93	867,851,477
H8-2 (分割)	353	432,087	569.90	2,059,645,269
S39-1 (一体)	235	194,607	388.09	9,524,223
S39-2 (分割)	254	201,056	389.45	11,019,269

表-4 P_{sx} 算出に使用したパラメータ

試験体	パラメータ (測定値・実測値による計算)					
	圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	有効幅 B (mm)	せん断応力 τ (N/mm ²)	中立軸高さ x_m (mm)	引張応力 σ (N/mm ²)	鉄筋かぶり C_m (mm)
H8-1	25.4	600	4.7	76.84	2.3	50.2
H8-2	28.7	593	5.0	71.77	2.5	48.8
S39-1	31.6	508	5.3	51.75	2.7	40.0
S39-2	33.6	507	5.5	50.13	2.8	38.7



a) H8 床版



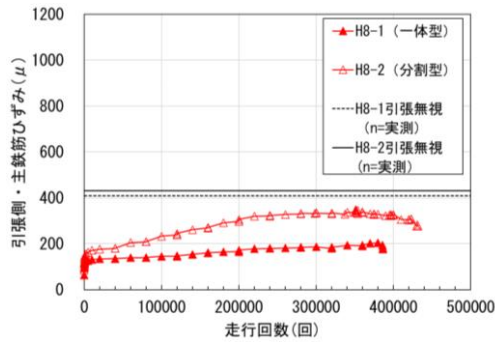
b) S39 床版

図-3 床版中央の弾性たわみ (157kN 換算) の回数変化

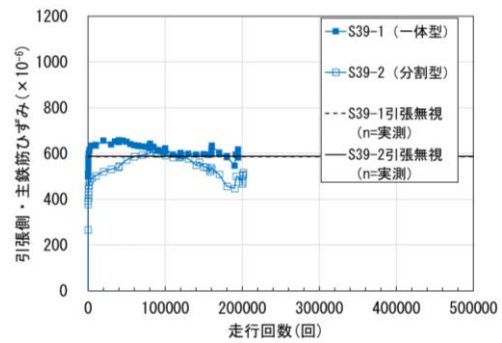
3) 鉄筋ひずみの変化

各試験体の版中央部、下段に配置した主鉄筋における弾性ひずみ (157kN 換算) の経時変化を図-4 に示す。図中には引張無視の計算ひずみ (ヤング係数比 n は実測値) を併せて示す。H8 床版では、走行初期にひずみはやや増加したが、たわみのように終局時に急増する様子はなく、両者とも引張無視の計算ひずみに至ることはなかった。ただし H8-1 と H8-2 の推移を比べると、H8-2 の方が終始大きな引張ひずみが生じている。これは、分割したブロックがたわみの増加に伴って中央側に傾くことで、荷重が中央に集中した結果と考えられるが、これについては、後述の 6. で詳細を述べることにする。

S39 床版では、走行初期から引張ひずみが急増し、早い段階で引張無視の計算ひずみまで達した。その後は引張ひずみが徐々に低下した。これは、ひび割れ密度の増加に伴いコンクリートとの付着を失った領域が拡がり、ひずみが平準化されたためと考えられる。なお、S39-1 に比べ S39-2 は初期の増加は緩やかだったが、引張無視に

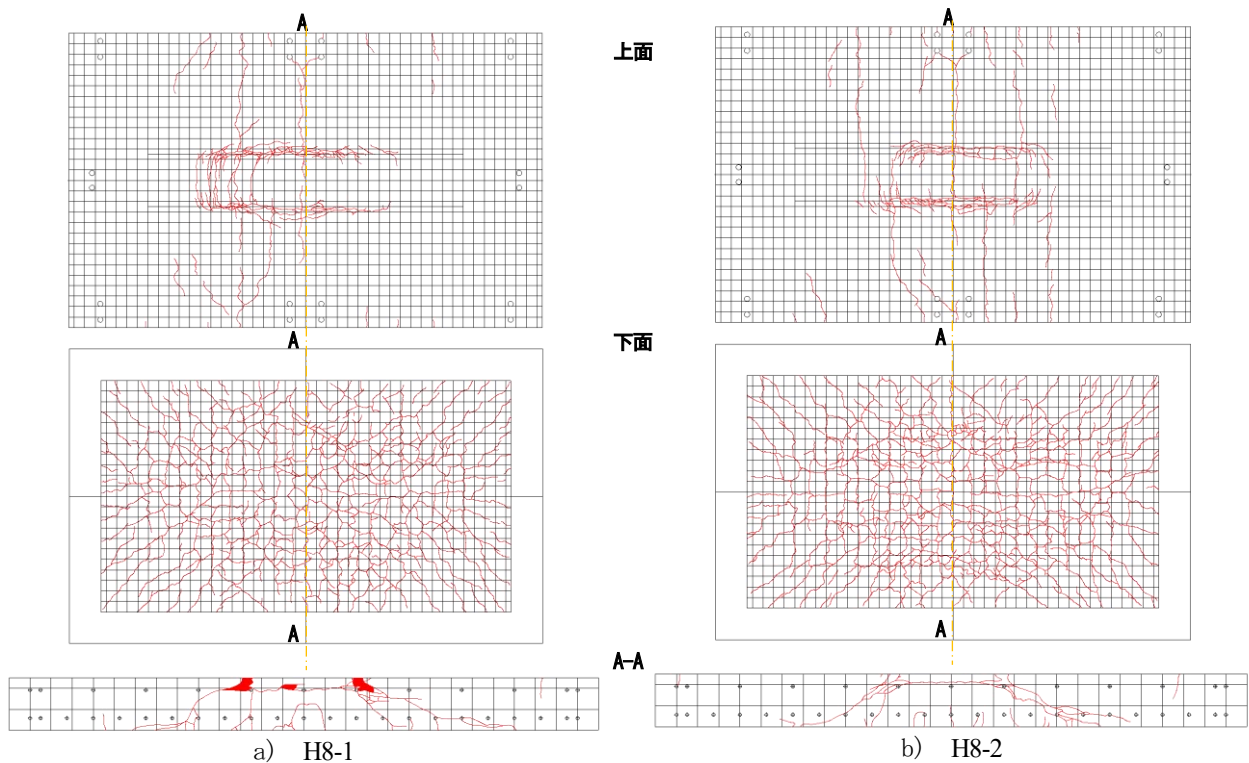


a) H8 床版



b) S39 床版

図-4 引張側主鉄筋の弾性ひずみ (157kN 換算) の回数変化



a) H8-1

b) H8-2

図-5 走行試験後の上下面ひび割れと切断面の状態 (H8 床版)

達して以降は概ね同様な推移であった。また、H8 床版に比べ初期から高ひずみ下で推移し、剛性の損失を段階的に追えていないことから、S39 床版のような剛性の小さな床版で荷重ブロックの違いを評価するには、走行荷重や荷重増分を小さくする必要があったと考えられる。

4) 床版表面のひび割れと切断面内の状態

図-5.6 に上下面、橋軸直角方向中央切断面のひび割れ性状を示す。H8 床版では、H8-2 の方が下面ひび割れの拡がりや中央部分に集中している様子が見てとれる。また、切断面 (図中 A-A) を比べると、H8-1 では荷重ブロック端部から上段鉄筋のかぶり内で破壊し、そこから斜めに押し抜きせん断ひび割れを生じ緩やかな“凸形”となっていた。これに対し、H8-2 では荷重ブロック端部からそのまま斜めに“等脚台形状”に押し抜きせん断のひび割れが生じていた。これは、S39 床版でも同じような傾向で、それぞれの切断面ではそれぞれ凸形と等脚台形状の押し抜きせん断のひび割れが生じていた。

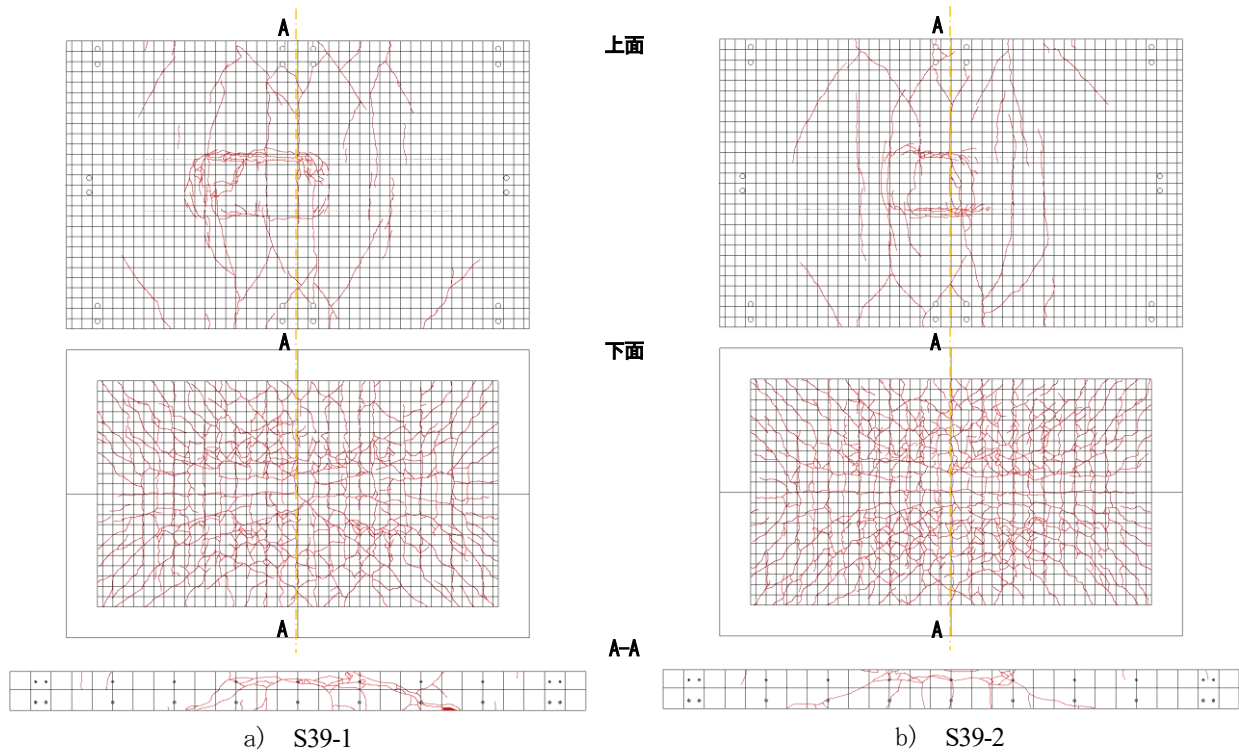


図-6 走行試験後の上下面ひび割れと切断面の状態 (S39床版)

5) S-N 関係の整理

図-7は縦軸に換算荷重 P と押し抜きせん断耐力 P_{sx} の比(P/P_{sx})を、横軸に走行回数をとったS-N関係を示す。図中のプロットは本研究の走行試験結果を示したもので、 P は157kNで統一し、 P_{sx} と換算回数 N は表-3の値である。図中の破線と一点鎖線はそれぞれ、松井式と土研のS-N線(土研式)である。

本研究の試験条件は土研式が作られた条件に近いが、本来、土研式に近づくはずである。しかしながら、本研究結果では、分割型は疲労寿命が増加したことで、S39床版、H8床版いずれも松井式寄りに位置している。今回の結果より類推するに、現状、分割型を用いた試験体の評価には、松井式を用いるのが妥当と言える。今後、分割型を用い、試験荷重を適切に設定した試験体数を増やすことで、分割型のS-N線を構築できるものと考えている。

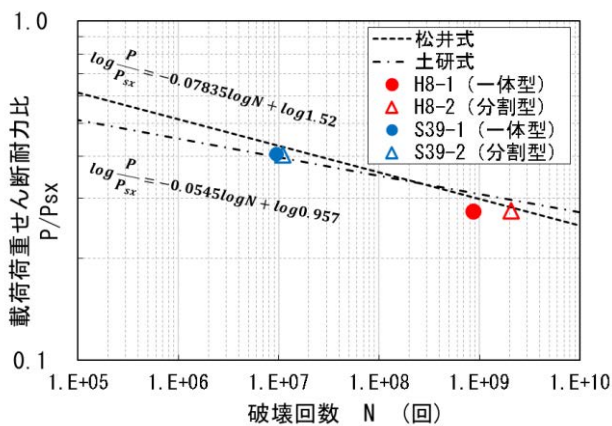


図-7 本研究結果と既往S-N関係との比較

6. 荷重ブロックの影響範囲について

1) 解析概要

荷重ブロックの荷重分布を視覚的に確認するため、静的荷重作用時の橋軸直角方向のひずみ分布に着目し、ブロック形状の違いを解析により検証した。解析には材料非線形性を考慮し、汎用有限要素解析コード(MARC)を用いた。モデルは図-8のように、対称性を考慮し床版中央で直角方向に切った1/2モデルとした。コンクリートと荷重ブロックは8節点ソリッド要素で接触(摩擦係数 $\mu=0.3$)を考慮するものとし、鉄筋はコンクリート内の8節点埋込み要素とした。荷重ブロックは図-2で示した形状で再現した。境界条件として、主桁上、横梁上いずれの支持もローラー支点とした。また、鋼製車輪が軸方向で曲げ変形しない剛なものであるため、荷重ブロックの上面に $200\text{mm} \times 500\text{mm}$ の底面積を有する直方体の剛体を接触させ、その上に分布荷重を与えた。本解析では疲労による累積損傷は考慮していないが、荷重には各試験体の走行試験における最大荷重(たわみが急増した荷重)を設定した。これは、コンクリートのひび割れによって床版の曲げ剛性が変化した後の荷重作用状態を極力再現するため、H8床版は333kN、S39床版では235kNとした。また、コンクリートおよび、鉄筋の構成則、ひび割れのモデル化に際しては、表-2の値を用いコンクリート標準示方書⁴⁾に準じた。ただし、ブロック形状の影響のみに着目できるように、表-2に示す各一体目の値(S39-1、H8-1)で統一することとした。なお、鋼材は全て、弾性係数 $E=2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ とし、荷重ブロックには降伏条件を適用していない。

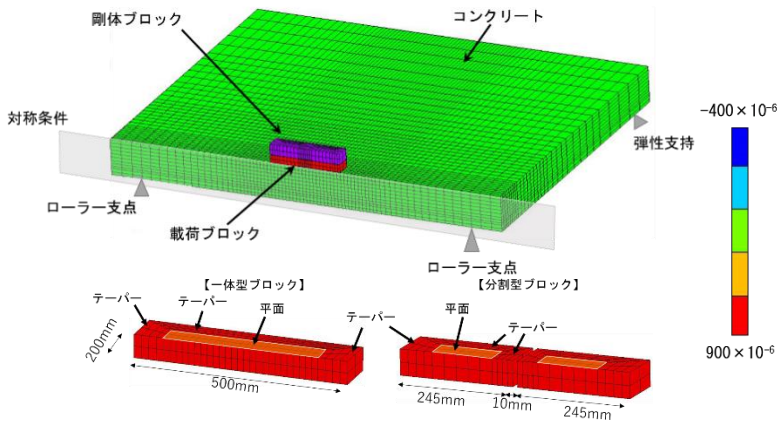
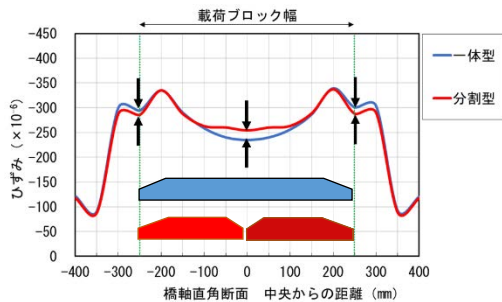


図-8 解析モデル



a) H8 床版 (333kN 荷重時)

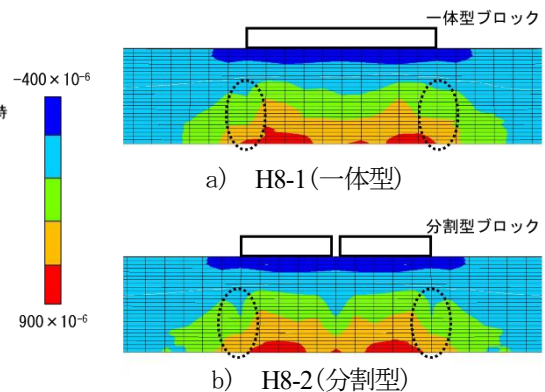
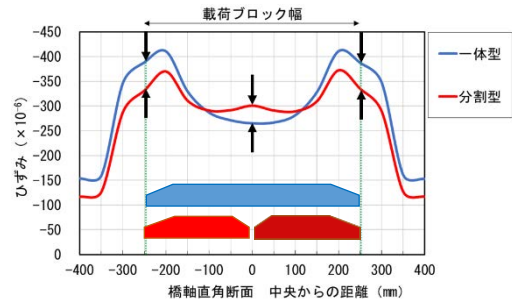


図-9 橋軸直角断面のひずみ分布 (支間方向)



b) S39 床版 (235kN 荷重時)

図-10 橋軸直角断面 床版上面のひずみ分布 (支間方向)

2) 荷重ブロック形状によるひずみ分布の違いについて

H8 床版の断面内のひずみ分布 (支間方向) を図-9 に示す。図中の荷重ブロック直下、点線で囲った引張ひずみに着目すると、図-9 a)の一体型に比べ図-9 b)の分割型を用いた場合の方が小さいことがわかる。また、荷重ブロック中央の直下も図-9 b)において小さくなっている。

さらに、床版上面と荷重ブロックとの接触状態の確認として、橋軸直角方向の圧縮ひずみ分布を図-10 に示す。H8 床版においては、一体型、分割型いずれも荷重ブロック外側端部の圧縮ひずみが卓越したが、分割型では中央部のひずみはやや大きく、荷重ブロック外側端部のひずみはやや小さいのがわかる。この傾向はS39床版でも同様であるが、H8床版に比べ分割型のひずみ分布は一体型よりなだらかで、外側端部における荷重の集中が大きく軽減されている。

分割型によるエッジ荷重の軽減が解析上でも確認することができたことより、試験荷重に対し十分な剛性を有するH8床版では、疲労損傷の進行が緩やかとなり、疲労寿命が延びたと言える。

一方、初期剛性の低下が著しかったS39床版の走行試験では、試験初期より疲労損傷の進行が激しく、解析のような分割型の効果を十分に発揮できなかったと考えられる。5.3)で述べたように、S39床版のような剛性の小さな床版では、例えばH8床版と同様に、破壊回数が30~40万回程度になるよう、初期荷重ならびに階段荷重における荷重増分量も小さくする必要があったと思われる。

7. まとめ

本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 走行試験結果より、分割型ブロックを使用することで破壊までの走行回数が増加し、疲労寿命が延びることを確認した。この傾向は、より剛性の高いH8床版で顕著であった。
- 2) FE解析より、分割型ブロックを用いると、ブロック短辺端部のエッジの荷重集中が緩和されることがわかった。
- 3) 走行試験時、分割型ブロックの効果を明確にするには、荷重に対する緩やかな剛性変化が必要で、 P/P_{sx} のバランスが重要になる。そのため、試験体の P_{sx} に合わせ、適切な試験荷重とすることが望ましい。

参考文献

- 1) 土木学会鋼構造委員会：道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上，p.24, 2004.11
- 2) 大西弘志，松井繁之，渡邊裕一：分割型荷重板を用いた輪荷重走行試験機による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, 2003.6.
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所：道路橋床版の疲労耐久性に関する試験，国総研資料第28号，pp.7-14, 2002.3.
- 4) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準方書設計編，2018.3.

(2020年7月17日受付)