

11. シームレスジョイント付き R C 床版の輪荷重走行疲労実験

Wheel Running Fatigue Testing of RC Slab with Seamless Type Expansion Joint

技術支援課 関口 幹夫、橋原 正周

1. はじめに

都道の道路橋伸縮装置（以下、ジョイントともいう）の補修サイクルは、沿道環境の保全が優先されるために3～15年と比較的短く、1990年以降の年間補修サイクルの平均は10年程度である¹⁾。このように比較的早期に補修（交換）される実態から、ジョイントの交換が数回繰返されると既設床版は、ジョイント撤去時にブレイカーによるハツリ過ぎや不用意なひび割れによるダメージを受ける。また、ブレイカー先端のノミが床版を貫通する例もあるほか、交換用ジョイントのアンカーが既設の鉄筋に当たってセットできないケースでは、鉄筋を切断することもある。このように、ジョイントを何回も交換することは、同じ箇所を何度もハツリ取るなどにより床版の疲労耐久性を悪化させていると推察できる。

そこで、伸縮装置取付け部の既設床版厚さが疲労耐久性に与える影響を把握することを目的に、都市内で環境対策として使用実績の多い①荷重支持型ゴムジョイント、簡易なノージョイントとして使用実績が増加する可能性のある②荷重分散型アスファ

ルト系ノージョイント、10年前に小滝橋で試験施工済みの新材料新形式の③荷重支持型炭素繊維シート系ノージョイント²⁾の3タイプを取上げ、輪荷重走行疲労試験機を使用して検討する。

本報文は、前年度報告したゴムジョイント³⁾とは異なる特殊アスファルト系のノージョイント形式の代表的製品であるシームレスジョイント（ヒートロック工業（株）製）を取上げ、補修を想定した取付け部の既設床版厚さが疲労耐久性に与える影響を輪荷重走行疲労試験で検討したものである。

2. 実験概要

2.1 試験体の概要

輪荷重走行実験の試験体の設置状況を図-1に示す。ジョイントを取付けるRC床版を4体製作して、輪荷重走行試験装置の主桁上に游間50mmとなるように配置し、ジョイントを3箇所設置した。ジョイントの設置は、2.2で詳述するものの即日交通開放の補修（交換）工事を再現する手順で行った。

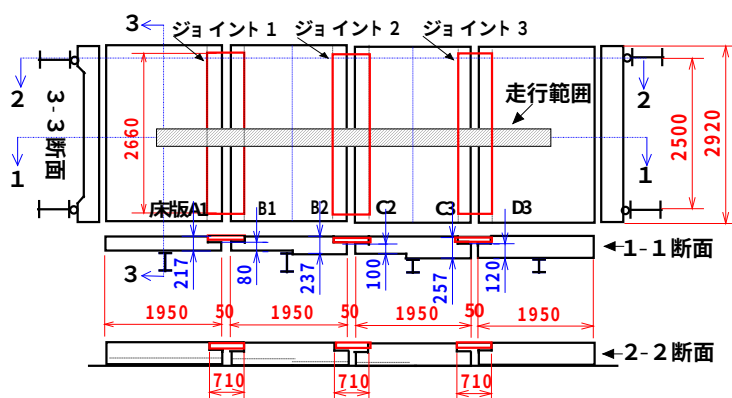
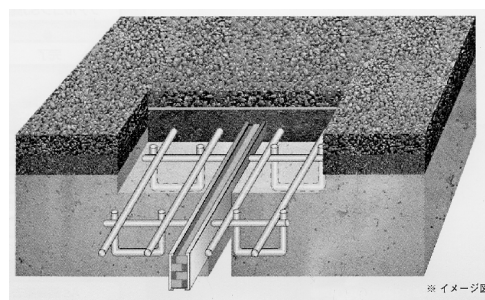


図-1 試験体寸法



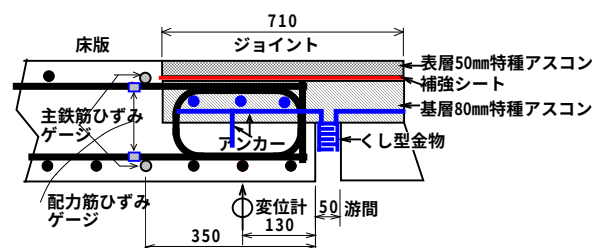
写真-1 輪荷重走行試験状況

輪荷重走行実験は、戸田橋実験場の写真－1に示すゴムタイヤ式の輪荷重走行試験機を使用して、試験体上を輪荷重が6m区間往復載荷する方式で行った。床版の支持条件は、図－1に示す走行方向（配力鉄筋方向）は支間2.5mの単純支持、支間方向（主鉄筋方向）は、床版中央の横桁（H328×B200×12×16）で弾性支持し、橋脚上の支持条件をモデル化している。



図－2 ジョイントの設置概要図

床版の実験パラメータは、ジョイント取付け部の既存床版厚をジョイント1は80mm、ジョイント2は100mm、ジョイント3は120mmとした。なお、ジョイント取付け部の既設床版厚さの決定は、特に厚さに関する制限や規定は存在しないが、日本ジョイント協会やメーカーのヒアリングでは経験的に100mm以下では早期に損傷する例が見られるとの一致した見解を参考に、取付け部既存床版厚を80、100、120mmに変化させた。



図－3 ジョイントの断面形状図

輪荷重走行実験の開始は、ジョイント設置1週間後とし、走行荷重100kN一定載荷で実験を行った。なお、タイヤ接地寸法は、157kN 載荷のとき走行方向390mm、床版支間（主鉄筋）方向340mm（有効幅230mm）、接地面積は89700mm²である。

表－1 表層用特殊アスコン（開粒）

試験項目	試験方法	単位	規格値	測定値
密度(見掛)	舗装調査・試験法便覧準拠	g/cm ³	2.26±0.05	2.276
圧裂強度(0°C)	舗装調査・試験法便覧準拠	N/cm ²	2.06±0.29	2.29
フロー値(0°C)	—	1/cm	100±20	87

表－2 基層用特殊アスコン

試験項目	試験方法	単位	規格値	測定値
密度(見掛)	舗装調査・試験法便覧準拠	g/cm ³	2.10±0.05	2.0966
圧裂強度(0°C)	舗装調査・試験法便覧準拠	N/cm ²	1.32±0.29	1.13
フロー値(0°C)	—	1/cm	75±20	68

表－3 プライマー

試験項目	試験方法	単位	試験条件	規格値	測定値
密度	JIS K 5400	g/cm ³	15°C	1.000以下	0.9187
粘度	JIS K 5400	cm ² /s	25°C	75～120	94.0
加熱残分	JIS K 5407	wt%	—	20±5	20.2
引火点	JIS K 2265	°C	—	報告値	-4.5

表－4 伸縮シート

試験項目	試験方法	単位	規格値	測定値
引張強さ	長手方向	JIS A 6022	N/cm	200以上
	幅方向	JIS A 6022	N/cm	150以上
最大荷重時の伸び率	長手方向	JIS A 6022	%	30以上
	幅方向	JIS A 6022	%	30以上
折曲げ性能	(-5°C, Φ15mm)	JIS A 6022	—	亀裂発生無し
				合格

2.2 伸縮装置

伸縮装置は、特殊アスファルト系ノージョイント形式の代表的製品であるシームレスジョイント(ヒートロック工業(株)製)である。ジョイントの設置イメージは図－2のとおりであり、断面形状を図－3に示す。ジョイント部の長さは2,660mm、幅は710mmである。ジョイント使用材料の物性値を表－1～4に示す。

ジョイントの設置は、遊間部50mmにくし形金具をアンカーで取付け、主鉄筋方向の補強鉄筋を配置してハツリ面に専用のプライマーを塗布後、基層用特殊密粒アスファルト（ファルコン AZ）を専用のクッカーで溶解して製造したタンパーで厚さ80mmに転圧舗設した。基層の上

には補強用シートをプライマーで接着して表層用特殊開粒アスファルトを厚さ50mm基層同様に舗設した。なお、表層および基層用特殊アスファルト混合物は、いずれもプレミックスタイプである。

2.3 R C床版

ジョイントを取付けるR C床版端部の仕様は、現行基準以前の補修事例が多いハンチ付きの昭和 47 年道路橋示方書に準じて設計した。図-4 に試験体の配筋を示す。コンクリートの配合表を表-5 に、鉄筋の機械的性質を表-6 に示した。実験終了後切断調査による配筋の出来高の有効高さを表-7 に、材齢約 1 年の床版から採取したコアの試験結果を表-8 に示す。なお、コアの採取位置は、床版 A1 および床版 D3 のひび割れのない箇所とした。

ジョイント 1 を設置する床版 A1 と床版 B1 の製作時の床版全厚は 217mm、ハンチ高は 40mm である。ジョイント 2 の床版 B2 と床版 C2 の製作時の床版全厚は 237mm でハンチ高は 20mm である。ジョイント 3 の床版 C3 と床版 D3 の床版全厚は 257mm、ハンチ高さは 0mm である。なお、切欠き部の製作時の床版

表-5 R C床版コンクリート配合表

呼び強度	スランプ	空気量	水セメント比	細骨材率
N/mm ²	cm		%	
24	8	4.5	57.0	43.2
セメント	水	細骨材	粗骨材	AE減水剤
Kg/m ³				
276	157	794	1,091	2.76

表-6 鉄筋の機械的性質

	呼び径	降伏応力	ヤング係数	引張強さ
	mm	N/mm ²	10 ⁴ N/mm ²	N/mm ²
主鉄筋	D19/SD345	387.8	18.3	579.6
配力鉄筋	D16/SD295A	348.0	18.4	493.4

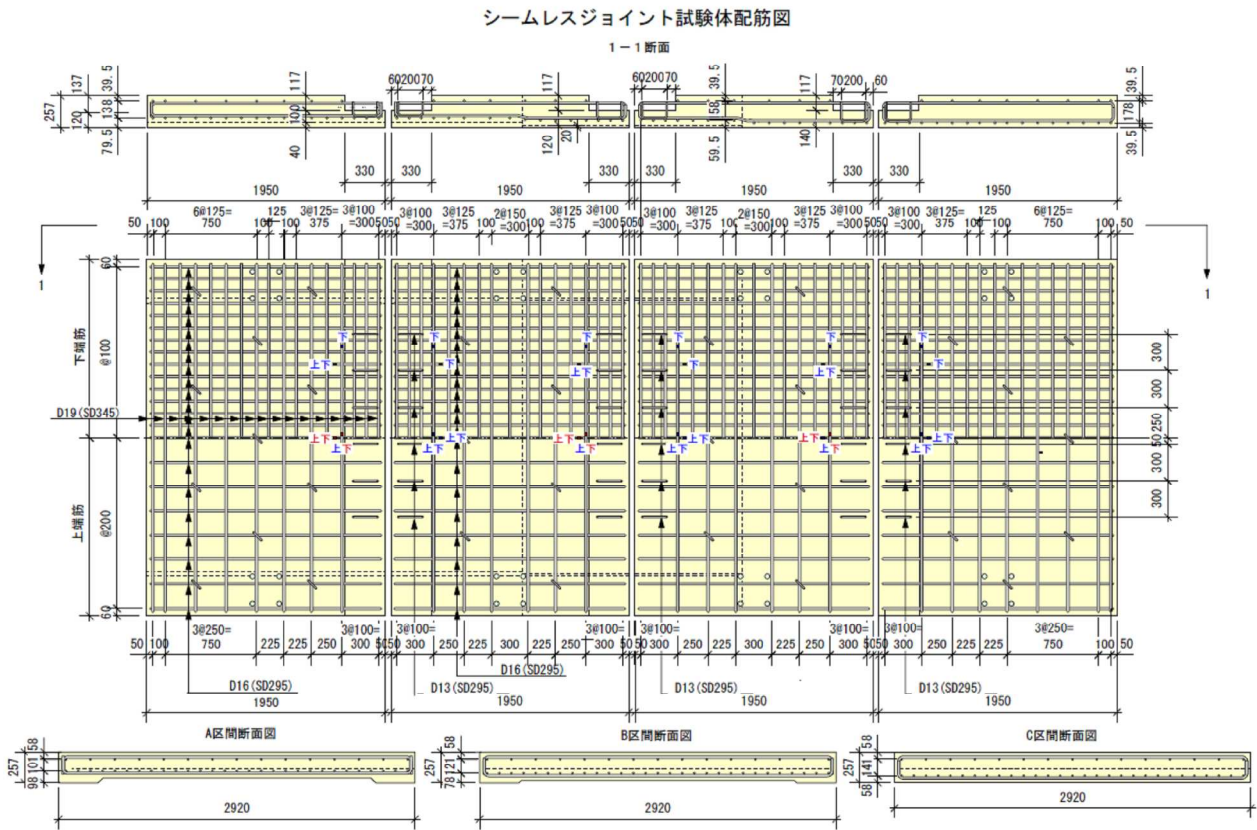


図-4 R C床版の配筋・形状寸法

表-7 床版の配筋（有効高さは出来高）

床版	床版厚 (mm)	主鉄筋(mm)				配力鉄筋(mm)			
		上側		下側		上側		下側	
		呼径・間隔	有効高	呼径・間隔	有効高	呼径・間隔	有効高	呼径・間隔	有効高
床版A1, B1	219.2	D19@225	48.1	D19@100	177.5	D16@200	66.2	D16@100	164.7
床版B2, C2	241.0	D19@225	51.7	D19@100	179.5	D16@200	68.3	D16@100	183.0
床版C3, D3	259.7	D19@225	51.9	D19@100	219.2	D16@200	71.3	D16@100	199.0

厚さは、チップング前の 20 mm を考慮して、ジョイント 1 部では 100 mm、ジョイント 2 部は 120 mm、ジョイント 3 は 140 mm で製作した。

3. 実験結果

ジョイント 1 の床版 B1 は、15,460 回で図-5、写真-2 (a) のように走行面直下切欠き部から約 30 度の角度で押し抜きせん断破壊した。その後走行範囲を床版 B2～床版 D3 に狭めて実験を継続し、床版 C2 が走行回数 104,116 回で写真-2 (b) のように破壊し、床版 C3～D3 は未破壊で実験を終了した。

3.1 床版の損傷状況

走行面及び床版上面には、図は省略したものの破壊直前までひび割れは発生しなかった。床版下面の試験終了時点のひび割れの発生状況を図-6に示す。初期ひび割れの発生は、走行前の静的载荷の 100kN 载荷時に床版厚の薄い床版 A1 および床版 B1 の支間中央走行方向（配力鉄筋方向）に長さ 30～40cm、また、床版 C2 に長さ 25 cm 発生した。

走行回数 1 回目ですべての床版下面に、タイヤ走行直下の走行方向に発生した。なお、走行面のジョイント打継目の開きは、破壊直前まで微小で一体として機能していた。開きと段差とずれについての詳細は 3.6 に記述する。

遊間部床版端から約 30 cm 離れた位置で主筋方向に切断、さらに走行ライン直下での切断断面の押し抜きせん断ひび割れを写真-2 に示す。ジョイント 1

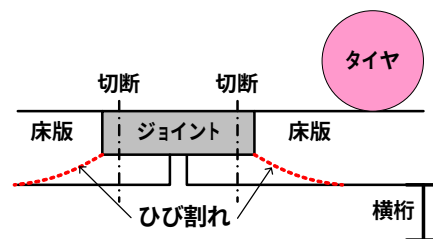


図-5 切断位置



(a) 床版 A1-B1 切断面



(b) 床版 B2-C2 切断面



(c) 床版 C3-D3 切断面

写真-2 走行位置の切断面

の床版厚 80 mm の床版 A1 および床版 B1 は、切欠き部の角から水平に対して約 30 度の角度でせん断ひび割れが、ジョイント 2 の床版厚 100 mm の床版 B2 および床版 C2 では、35～40 度の角度で、ジョイント 3 の床版厚 120 mm の床版 C3 および D3 では 40～45 度のせん断ひび割れが発生している。これらのひび割れの特徴は、切欠き部直下の下主鉄筋の床版端から 2 本目を経由して進展している。

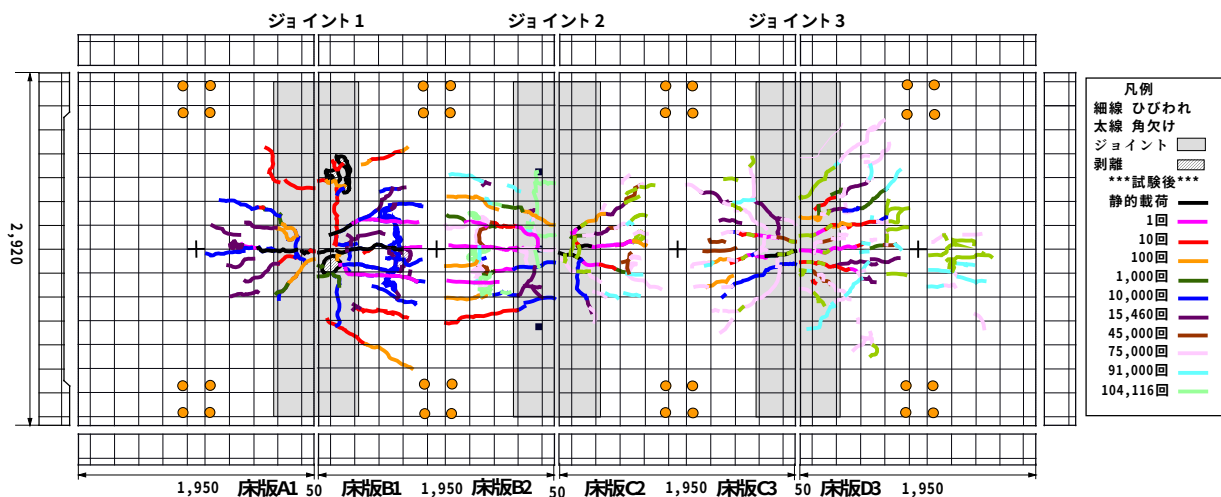


図-6 床版下面のひび割れ図



写真-3 床版主鉄筋方向切断面のひび割れ

3.2 ジョイントの破損状況

写真-3は床版端から約30 cm離れた位置での主筋方向切断面であり、タイヤ走行面でのわだち掘れの状況を白線（補強シート位置）で示している。走行45,000回でのわだち掘れ量が約7～10 mmとなり、走行に支障が生じたため段差修正用補修材（路面パッチ・ニチレキ製）で補修を行った。さらに走行回数75,000回でもほぼ同等のわだち掘れ量が生じたため同じ補修材を用いて2回目の補修を行った。試験終了時10万回での最大わだち掘れ量は、C2で18mm、C3で20 mm、D3では25 mmであった。

シームレスジョイントの表層および基層はアスファルト混合物であり、わだち掘れ抵抗性を表すDSの値は通常の改質Ⅱ型程度である。ジョイント部の舗装の厚さが130 mmと厚いため重交通での使用では、わだち掘れが発生しやすいと推察できるので、採用条件は、軽交通に限定する必要がある。なお、遊間部の舗装下面のくし形金物は、写真-4 に示すとおり変形等の損傷は発生していないことを確認した。

3.3 たわみ

ジョイント取付け部の支間中央床版端部から130 mm位置の測定点（図-3）の100kN 載荷時のたわみ計



写真-4 遊間部側の切断面

表-9 100kN 載荷のたわみ計算値（単位：mm）

床版	全断面有効	引張り無視
A1, B1	1.238	2.900
B2, C2	0.968	2.240
C3, D3	0.772	1.785

算値を表-9に示す。図-7に静的弾性たわみ（最大値－残留値）の測定結果を示す。15,460回で破壊した床版B1の1万回での弾性たわみは4.2 mmであり、引張無視時の100kN 載荷計算たわみ2.9 mmの約1.4倍に相当する。また、104,116回で破壊した床版B2は10万回走行時点で4.7 mmを超えており、ダメージ

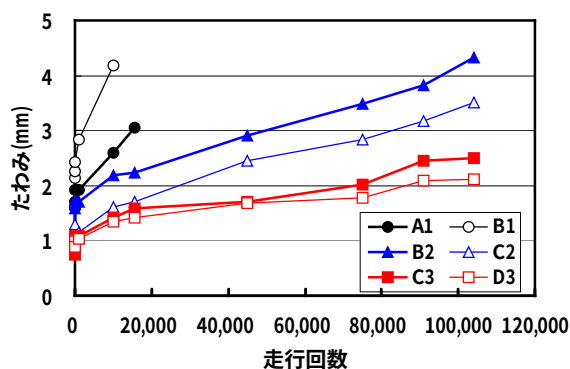


図-7 ジョイント取付け部弾性たわみ

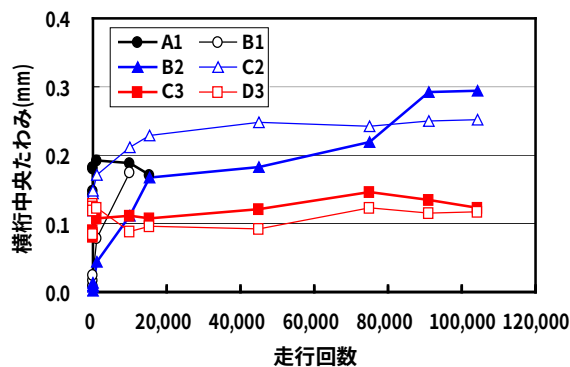


図-8 横桁の弾性たわみ

は相当進行していると推察できる。

走行1回目のたわみは、すべての床版で計算たわみの全断面有効と引張無視の中間にある。また、バラツキはあるものの各床版の100kN計算たわみを超える走行回数は床版A1、B1では1万未満、床版B2とC2および床版C3とD3では1万回程度であった。床版厚さが厚いほど耐久性が良い結果になっている。

横桁の支間中央点のたわみの推移を図-8に示す。各床版とも走行回数1万回から10万回までは概ね0.1mm～0.3mmの範囲に分散している。

3.4 鉄筋ひずみ

支間中央床版端部から350mm位置(図-3参照)における主鉄筋の100kN載荷時ひずみ計算値を表-10に示す。計算値に対応する下側主鉄筋の弾性ひずみの測定結果を図-9に示す。引張無視時計算ひずみを上回る回数は、床版A1は1万回、床版B1はゲージ断線で不明、床版B2は1回、床版C3は9.1万回、床版D3は1万回であった。また、床版C2の破壊時のひずみは約300 μ 程度であった。

上側主鉄筋ひずみの結果を図-10に示す。引張無視の計算値と実測値はかけ離れており、計算方法に

表-10 主鉄筋ひずみの計算値(単位： $\times 10^{-6}$)

床版	上側		下側	
	全断面有効	引張り無視	全断面有効	引張り無視
A1, B1	-153.4	-275.9	150.9	331.3
B2, C2	-131.4	-318.7	128.6	302.0
C3, D3	-114.1	-375.8	111.1	275.7

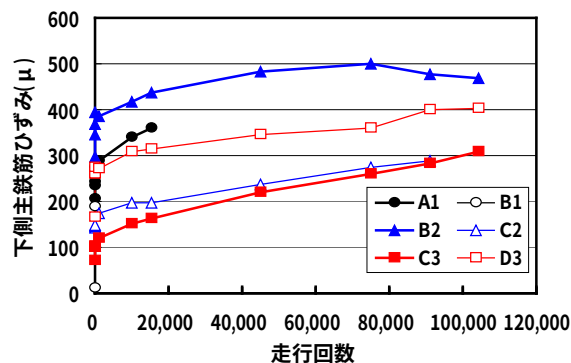


図-9 下側主鉄筋ひずみ

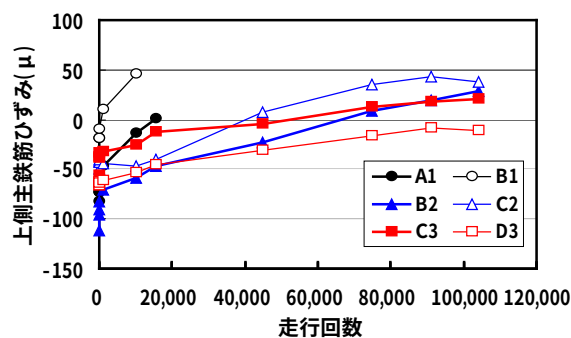


図-10 上側主鉄筋ひずみ

表-11 配力鉄筋ひずみ計算値(単位： $\times 10^{-6}$)

床版	上側		下側	
	全断面有効	引張り無視	全断面有効	引張り無視
A1, B1	-30.1	-101.5	30.1	87.5
B2, C2	-23.1	-82.2	23.1	67.9
C3, D3	-18.2	-68.1	18.2	53.5

課題がある結果となっている。計算方法については今後さらに検討する必要があるので、本検討における計算値は参考値扱いとする。

主鉄筋と同位置の配力鉄筋の100kN載荷時たわみ計算値(参考値)を表-11に示す。計算値に対応する配力鉄筋の弾性ひずみ測定結果を図-11、図-12に示す。下側配力筋の引張無視時計算ひずみを上回る回数は、すべての床版で1回目であった。また、上側配力筋の引張無視時計算ひずみを上回る回数も、すべての床版で1回目であり、計算方法に課題のある結果となった。

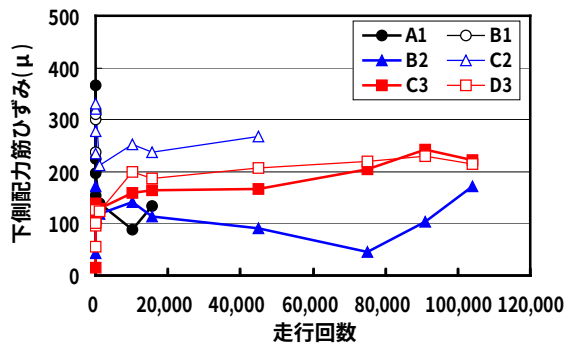


図-11 下側配力筋ひずみ

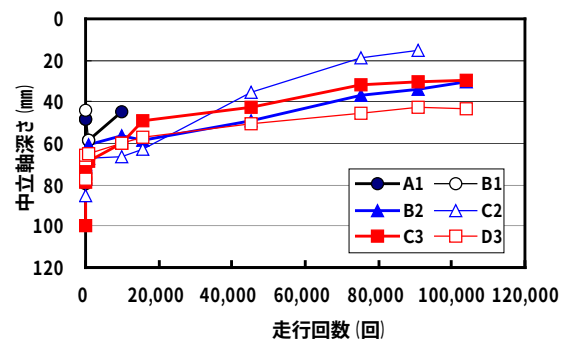


図-13 主鉄筋断面の中立軸深さ

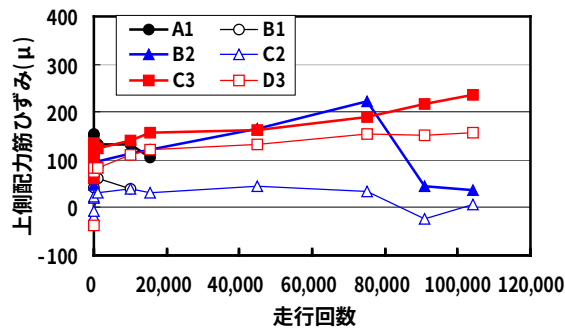


図-12 上側配力筋ひずみ

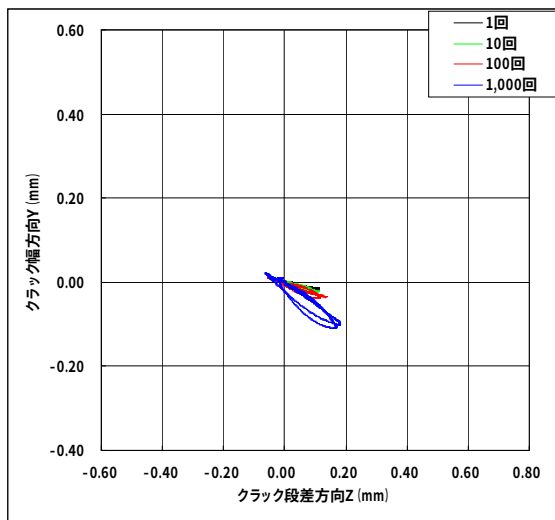
3.5 主鉄筋断面の中立軸

支間中央の床版端部から 350 mm 位置（ジョイント設置境界から約 2cm）の上下主鉄筋ひずみから求まる主鉄筋断面の中立軸深さと走行回数の関係を図-13 に示す。床版厚が薄いほど中立軸は走行回数が少ない段階で引張り無視時の計算値より浅くなり、約 1 万回で概ね 60 mm を下回り、以降は概ね走行回数に

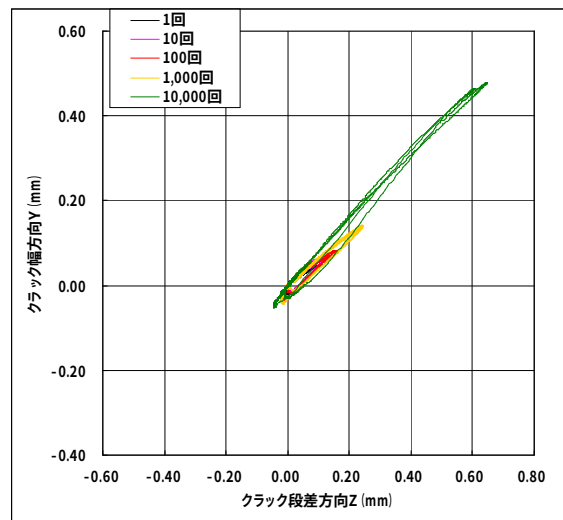
比例して減少する傾向が見られた。

3.6 打継目の幅・段差・ずれ

ジョイントと床版上面の打継目の幅（開き）・段差・水平方向ずれ量を三方向変位計により動的に測定した。測定位置は、タイヤ外側より 50 mm 離れた箇所である。走行方向の幅と段差の関係を図-14、図-15 に示す。床版厚 80 mm の薄い床版 B1 は 1 万回で幅と段差が急激に増加して破壊の前兆現象が確認された。これは、せん断ひび割れが、ジョイント上端にまで進展して破壊した現象とリンクした動きと推察できる。床版厚 100 mm の C2 は幅（開き）が走行 45,000 回以降急増して損傷が進展したことを示している。さらに走行 10 万回で段差が急増して破壊の前兆現象を捉えている。床版 D3 は段差も幅（開き）も動きが微小であり、床版と一体性を維持しておりダメージ

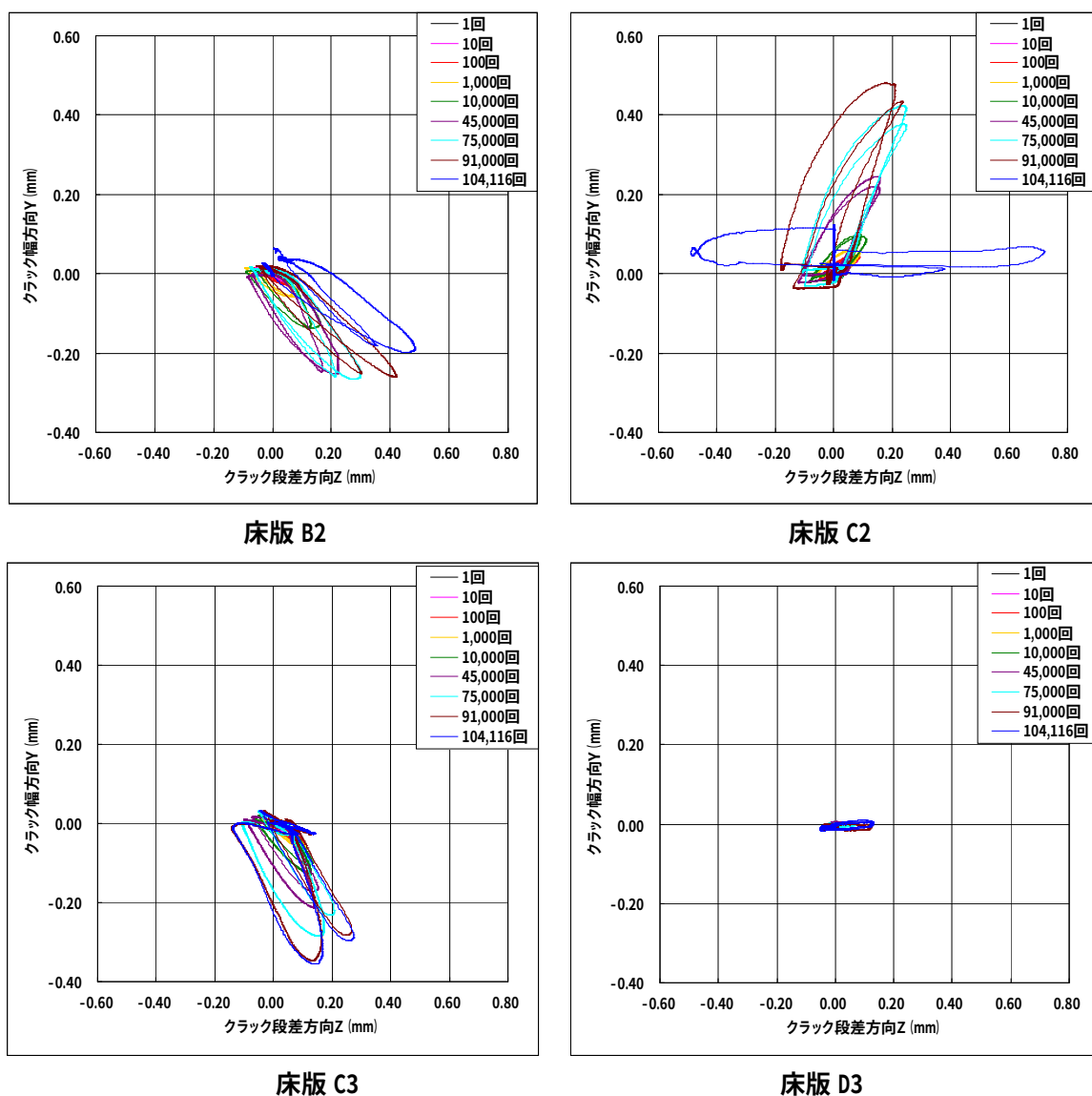


床版 A1



床版 B1

図-14 切欠き部打継目の幅（開き）と段差の測定結果

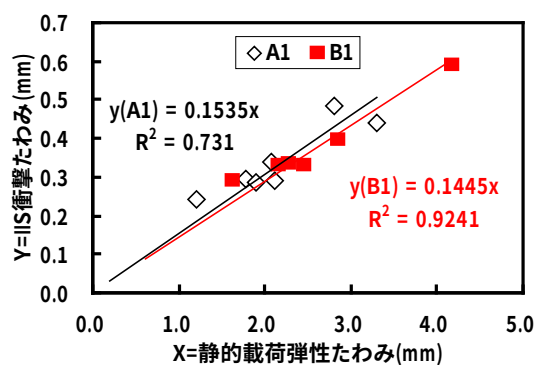


図－15 切欠き部打継目の幅（開き）と段差の測定結果

は少ないと推察できる。

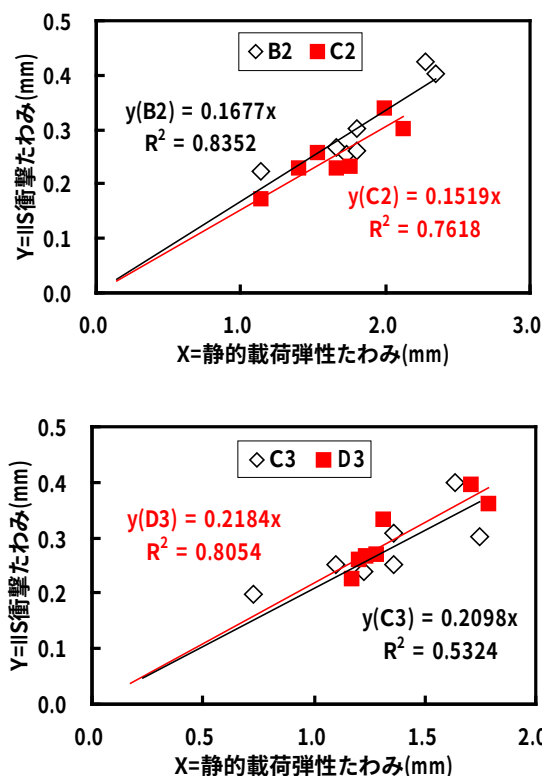
4. 重錘落下たわみ

重錘落下たわみ測定機 (IIS) によるたわみの測定は、100kg の重錘を落下高さ 300mm で測定した。100kN 静的載荷時の弾性たわみと IIS たわみの関係を図－16 に示す。ジョイント取付け部の床版にひび割れが発生進展して剛性が低下すると、たわみは剛性に比例して増加する。図－16 の床版 A1 と B1 では、静的載荷と IIS のたわみの相関決定係数は 0.73 以上である。また、図－17 に示す床版 C3 を除くと相関決定係数は 0.76 以上である。したがって、3 箇所のジョイント部の静的載荷弾性たわみと IIS 衝撃たわみの相関は、床版 C3 部以外では高い相関関係が認められ



図－16 静的載荷弾性たわみと IIS たわみの関係

る。IIS 重錘落下たわみ法は、床版の点検に有効であるが、ジョイント部の床版剛性についても簡便な点検手法に成り得ることが判った。



図－17 静的载荷弾性たわみと IIS たわみの関係

5. 疲労耐久性の評価

表－12 に輪荷重 100kN での破壊時走行回数の結果を示した。ジョイント取付け部床版の疲労耐久性を評価するために、100kN 換算輪数を式(1)により算出した。

$$N = \sum_{i=1}^n \left[\left\{ \frac{P_i}{100} \right\}^m \times n_i \right] \times a_k \times 365 \quad \dots\dots (1)$$

ここで、

N : 年間の 100kN 換算輪数

P_i : 任意の輪荷重 (軸重測定値の 1/2)

表－12 破壊回数

床版	ジョイント取付部床版厚(mm)	100kN 走行回数
B1	80	15,460
C2	100	104,116
C3, D3	120	>104,116

n_i : P_i の観測輪数 (軸数)

$a_k = A / a$

a_k : 一方向換算輪数の補正係数

A : 一方向大型車交通量/日

a : 軸重測定車線の大型車交通量/日

m : RC 床版の S-N 線図の傾きの逆数

なお、RC 床版の S-N 線図の代表的な m 値は、大阪大学⁴⁾ の $m=12.78$ が使われる例が多い。ただし、この式の S は、はり状化した床版の押抜きせん断耐荷力 (P/P_{sx}) を基にしていることから、この m を使用すると耐用年数の推定値は過大に評価される。そこで、本検討では、安全側の評価となるように環状八号線の高井戸陸橋の残存疲労耐久性の検討で得られた推定値⁵⁾ $m=3.53$ を採用する。

次に、平成 14 年度に都道で観測した軸重測定データ⁶⁾ を使って、主な地点の疲労耐久年数の算定結果を表－13 に示す。参考値として舗装設計交通区分も併記した。都道でもっとも重交通路線である環状八号線の砦地点 (三本杉陸橋や高井戸陸橋が近隣にある) の耐用年数は、15,460 回で破壊した既存床版厚 80 mm では 0.1 年、104,116 回で破壊した床版厚 100 mm では 0.8 年、10 万回でも破壊しない床版厚 120 mm では 1~2 年程度と推定される。

表－13 100kN 換算輪数による各地点の疲労耐久性

項目 \ 観測地点	環八通り砦	環七通り小茂根	町田街道町田	新大橋通り築地	永代通り永代	五日市街道秋川
舗装設計交通区分	N7 (D交通)	N7 (D交通)	N6 (C交通)	N6 (C交通)	N5 (B交通)	N4 (A交通)
一日一方向大型車交通量	9,861	6,899	1,361	4,501	5,368	683
100kN換算輪数/車線/年	69,016	40,001	21,693	8,973	3,739	6,103
100kN換算輪数/一方向/年	123,632	54,453	21,693	12,769	12,223	6,103
シームレスジョイント設置部床版厚別疲労耐久性年数	80mm	0.1	0.3	0.7	1.2	2.5
	100mm	0.8	1.9	4.8	8.2	17.1
	120mm	1~2	2~4	5~10	8~16	18~36

軽交通路線での実績が多いアスファルト系のシームレスジョイントの疲労耐久性は、荷重分散型であるため、本実験の 100kN 載荷という過酷な輪荷重走行実験では、早期に疲労破壊する結果となった。

表-13 に示す床版厚 80mm では、もっとも軽交通の一日一方向大型車交通量が 683 台である五日市街道秋川（交通区分 N4）の耐久年数は 2.5 年と短いと推定できるので、採用はしかえるべきである。少なくとも疲労耐久性を 10 年以上期待するならば、床版厚 100mm では舗装設計交通区分 N4 に、床版厚 120mm では舗装設計交通区分 N5 に制限する必要がある。

6. まとめ

都道の道路橋の伸縮装置の補修実績は、舗装の次に多く、騒音・振動等の環境に配慮した対策が取られている実態から、比較的補修サイクルは短い。補修（交換）が数回繰返されると既設床版は、ハツリによるダメージが増加すると推測され、補修後の疲労耐久性にも悪影響を及ぼしていると推察できる。そこで、アスファルト系のシームレスジョイントで補修（交換）した実物大 R C 試験体の輪荷重走行実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- ① ジョイント取付け部の床版厚が薄いほど床版下面の曲げひび割れのダメージは大きく、取付け部床版厚が厚いほど疲労耐久性は優れる結果となる。

- ② アスファルト系ノージョイントであるシームレスジョイントのダメージは、輪荷重 100kN での過酷な実験条件では、取付け部床版厚さに関係なくわだち掘れ量が大きく、10 万回で東京都建設局のわだち掘れ量に関する管理目標値である 25mm 程度になる。

- ③ シームレスジョイント付き R C 床版の疲労耐久性は、供用期間 10 年を保障するためには、設計交通量区分 N4～N5 の軽交通での適用に制限する必要がある。

- ④ IIS 重錘落下たわみ法によるジョイント取付け部床版の剛性評価では、静的載荷の弾性たわみと高い相関関係が認められ、床版同様に簡便安価な点検手法に成り得ることが判った。

7. あとがき

ジョイントを交換する際の取付け部の床版厚さが疲労耐久性に与える影響は、取付け部の床版厚さが 2 cm 変動するだけで床版およびジョイントの双方に影響を与えることが把握できた。今後、他のジョイントの実験も進めるとともに、床版補強方法についても今後検討する予定である。

最後に理論解析の計算では、大阪工業大学の堀川都志雄教授のプログラムを使わせていただきました。ここに記し感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 関口幹夫、西尾伸郎、竹田敏憲：道路橋および歩道橋の補修履歴と健全度の現状分析、平成 16 年東京都土木技術研究所年報、pp.137-152、2004
- 2) 関口幹夫：炭素繊維シート埋設ジョイント工法による騒音・振動低減高架について、平成 10 年東京都土木技術研究所年報、pp.111-116、1998
- 3) 関口幹夫、橋原正周、堀川都志雄：ゴムジョイント付き R C 床版の輪荷重走行疲労実験、構造工学論文集 Vol.55A、pp.1509-1520、2009.3
- 4) 松井繁之：橋梁の寿命予測、安全工学 Vol.30.№6、pp.432-440、2004.10
- 5) 関口幹夫、穴戸薫、森俊介：高井戸陸橋 R C 床版の残存疲労耐久性の評価、平成 14 年東京都土木技術研究所年報、pp.101-112、2002
- 6) 東京都建設局：走行車両の軸重実態調査報告書（平成 15 年 3 月）、2003.3