

論文 複数の移動荷重が同時または交互に作用するスラブの疲労損傷機構

藤山 知加子^{*1}・池野 誠司^{*2}・小林 薫^{*3}・前川 宏一^{*4}

要旨: 一定間隔の2レーンが同時に移動荷重を受ける鉄道橋スラブに対し、道路橋床版では車両走行位置によって載荷位置は随時変化する。本稿では、移動荷重が同時または交互に作用する場合について、非線形有限要素解析による高サイクル疲労のシミュレーションを実施し、破壊機構の違いを示した。さらに、載荷レーン間隔、スラブ厚、支間長を指標として解析結果を分析し、破壊モードの変化と疲労寿命への影響を示した。移動荷重が2つのレーンに交互に作用する場合について実大スラブを用いた移動荷重疲労実験を実施したところ、数値解析で予測された破壊モードの違いが実験でも確認された。

キーワード: 移動荷重, 疲労, スラブ, 非線形有限要素解析, 実大スラブ

1. はじめに

高サイクル荷重が直接作用する橋梁スラブは、疲労破壊の危険性が最も高い部材のひとつである。体積に比して大きな表面積を持つことから、乾燥収縮による初期ひび割れの発生など、環境作用による影響も受けやすい。様々な要因が長期耐久性に影響を及ぼすことが懸念される所以である。

道路橋においては、1960年代に鋼橋床版の深刻な疲労損傷問題が顕在化した。これに対し、1980年代以降、輪荷重走行試験機が導入され、現在まで実物大床版を用いた数々の実験的研究が行われている¹⁾²⁾³⁾。その結果、移動荷重下の鉄筋コンクリート床版は、定点繰返し荷重下に比べ疲労損傷の進行が著しいことや、雨水の浸透によって損傷が加速することが報告されてきた¹⁾²⁾³⁾。

一方、鉄道構造物においては、道路橋床版のような深刻な疲労損傷事例は、これまで報告されていない。鉄道高架は鉄筋コンクリートスラブと梁・柱とが一体化した、剛性の高い連続構造であるため、鋼道路橋床版とはたわみや振動モードが異なることが挙げられる。また、一定間隔の2レーンが同時に移動荷重を受ける鉄道橋スラブに対し、道路橋床版では車両走行位置によって載荷位置が随時変化するなど、荷重条件の相違も破壊過程に影響を及ぼすと考えられる。

本研究は、後者の、荷重条件の違いがスラブの疲労損傷過程に及ぼす影響について、数値解析および実験的手法を用いて検討したものである。コンクリートの疲労損傷を考慮可能な直接経路積分型非線形解析が近年開発され、解析精度と信頼性が期待できる対象が検証されつつある⁴⁾⁵⁾⁶⁾。本研究ではこの数値解析システムを採用することとした。

2. 数値解析による検討

2.1 解析モデルと仮定

(1) 解析対象の諸元

解析に用いた部材モデルを図-1に示す。荷重進行方向3.0m支間2.0m、版厚190mmの2辺単純支持版とした。要素の特性は表-1および表-2に示す。版厚および配

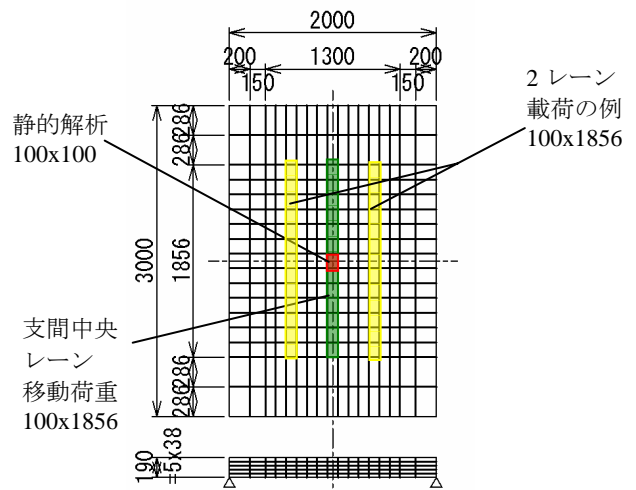


図-1 床版解析モデル

表-1 材料特性

材料強度	弾性係数 (N/mm ²)	特性値 (N/mm ²)
コンクリート	2.5 x 10 ⁴	圧縮強度 24.0
鉄筋	2.1 x 10 ⁵	降伏点 295.0

表-2 鉄筋配置

配筋	支間方向	荷重進行方向
上面	D16 ctc 200	D16 ctc 260
下面	D16 ctc 100	D16 ctc 130

*1 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 (正会員)

*2 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 主席 (正会員)

*3 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 課長 博(工) (正会員)

*4 東京大学大学院工学系研究科 教授 工博 (正会員)

筋は、道路橋床版の既往の研究¹⁾を参考に決定した。

(2) 検討ケース

図-2に、静的荷重時の中心点荷重一版中央たわみ関係を示す。最大耐力は691kN、たわみは11mmで、押抜きせん断破壊モードで終局に至った。これより、疲労解析時の疲労破壊判定基準は、荷重載荷レーンの位置によらず、版中央のたわみが11mmに達した時点と便宜的に設定した。移動荷重による疲労解析では、静的耐力の35%に相当する荷重を用いた。版中央1レーンのみに載荷する場合を基準とし、これをPシリーズと称する。

2レーン同時載荷(Dシリーズ)では、Pシリーズで用いた荷重の1/2を、2レーン同時・同方向に移動荷重として与える。2レーン交互載荷(Kシリーズ)では、Pシリーズと同じ大きさの荷重を、左右のレーンに交互に与えるものとした。DシリーズおよびKシリーズでは、載荷レーンの順間隔を200mmごとに変化させた検討を行ったものである(表-3)。

2.2 解析結果

(1) 疲労損傷の考察

図-3に、移動荷重による疲労解析の基準Pシリーズの、載荷走行回数一版中央たわみ関係を示す。定点繰返し荷重のP-fixに対して移動荷重のP-movは、およそ二桁程、疲労寿命が短い結果となった。移動荷重下では、荷重の進行に伴って版に交番せん断力が生じるためである。交番応力は、片振りの繰返し応力に比べて、ひ

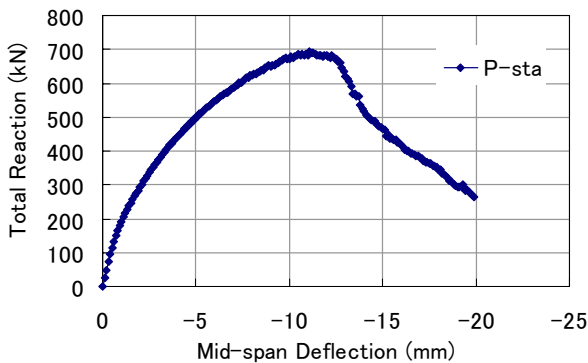


図-2 静的荷重時 荷重-たわみ関係図

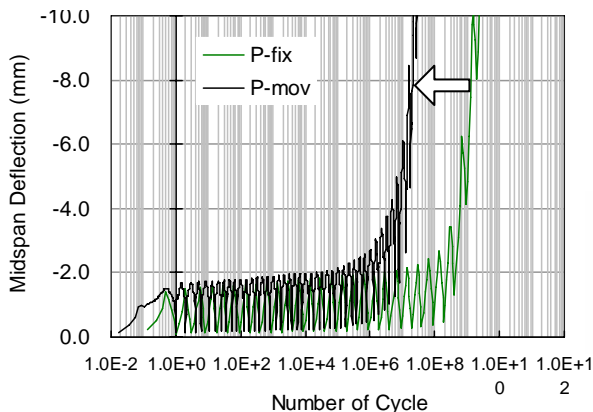


図-3 Pシリーズ載荷回数-たわみ関係図

び割れ面のせん断伝達能力を大幅に低下させ、鉄筋とコンクリートの付着劣化も早めると報告されている⁷⁾⁸⁾。

図-4に、移動荷重のケースP-movについて、破壊時の変形および主ひずみ分布図を示す。移動荷重に沿って損傷が進行し、支間方向でせん断変形が卓越して終局に至っている。

次に、各シリーズの疲労寿命と載荷レーン間隔の関係を、図-5に示す。ここに、 l は載荷レーンの純間隔(mm)、 a は載荷レーンから支点までの距離(mm)、 d はスラブの有効高で160(mm)である。

2レーン同時載荷のDシリーズでは、 l/d が大きくなるにつれて、あるいは a/d が小さくなるにつれて、疲労寿命は長くなる。疲労寿命が基準ケースP-movを下回るケースD-100およびD-300では、載荷レーンの純間隔が近接している(図-6(a))。このため2つのレーンの破壊領域が重なり、1レーンのみの基準ケースに比べて広い損傷領域が形成される。その結果、全体剛性が低下し、疲労寿命も短くなったと考えられる。

一方、D-900の2本の載荷レーンが離れているケース(図-6(b))では、同時載荷によってレーン間の曲げモーメントの変化は緩やかで、せん断力が支配的な状態ではない。レーン間にせん断破壊面が生じる可能性は低く、早期の破壊には至らない。破壊モードの相違は、本研究の検討範囲条件では、 $l/d=2\sim4$ 程度で解析上、生じた。

表-3 検討ケース

載荷レーン 純間隔 l (mm)		0	100	300	500	700	900	1100
P	静的荷重	P-sta	-	-	-	-	-	-
	定点繰返し 荷重	P-fix	-	-	-	-	-	-
	1レーン 移動荷重	P-mov	-	-	-	-	-	-
D	2レーン 同時載荷	-	D-100	D-300	D-500	D-700	D-900	D-1100
K	2レーン 交互載荷	-	K-100	K-300	K-5100	K-700	K-900	K-1100

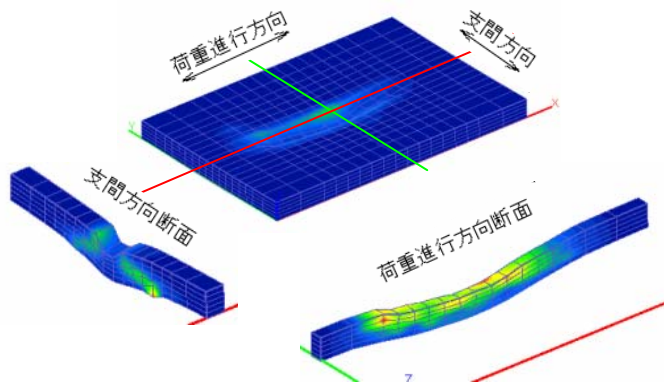


図-4 P-mov 破壊時主ひずみ分布図 (変形 x5)

一方、交互荷重のKシリーズでは、荷重レーン間隔が1100mmの場合を除くすべてのケースで、P-movよりも短い疲労寿命が予測された。荷重が左右のレーンに交互に荷重されることによって、荷重進行方向だけでなく支間方向にも交番応力が生じたためであった。

図-7に、K-100およびK-900の支間方向断面主ひずみ分布図を示す。K-100では、疲労寿命はP-movの1/1000程度しかないが、破壊モードはP-movと同様、せん断破壊であった。K-900では、片側の荷重点下(図-7(b)メモリ140mm)に損傷が集中していた。このことから、2レーン交互荷重では、 l/d が増加するに従って、交番応力の影響は小さくなり、終局状態は片側レーンのみの破壊モードに移項すると予見される。K-1100ではさらに外側に荷重されK-900に比べ曲げモーメントの影響が小さくなるため、寿命が一層増加したと考えられる。

(3) S-N 図による疲労寿命の推定

図-8は、定点繰返し荷重のP-fix、移動荷重の基本ケースP-movとともに、D-100、K-100の移動荷重-推定疲労寿命関係(S-N図)を整理したものである。D-100ではP-movに比べ概ね1オーダー程度、K-100では概ね3オーダー程度、数値疲労寿命が短くなった。

実構造物の設計では、 d 、 l 、 a の絶対値だけでなく、配筋量や支持条件も様々に異なるため、 ld や a/d といった指標だけで疲労寿命の評価をすることは難しい。しかし、本検討により2レーン同時荷重時、交互荷重時ともに荷重間隔次第で破壊モードが変化し、疲労寿命にも大幅な差違が生じる可能性が解析から示された。

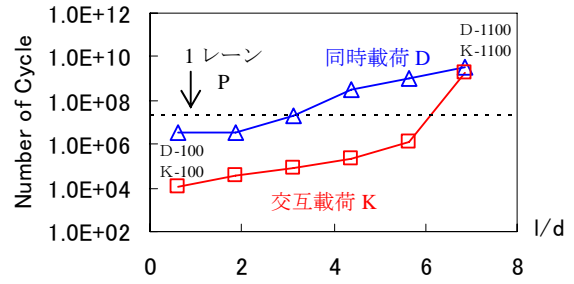
3. 実大スラブを用いた実験

3.1 実験概要

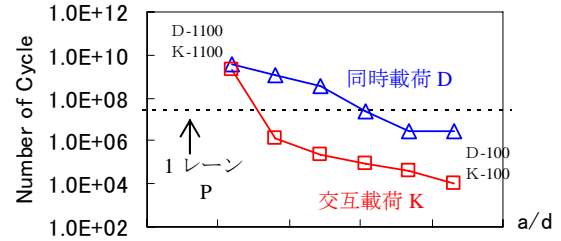
前節の数値解析で得た知見を確認するため、実大軌道試験機を用いて、複数の移動荷重が交互に作用するスラブの疲労実験を実施した。実験に用いたスラブ供試体の諸元を図-9に示す。供試体は、荷重進行方向2.2m支間方向1.2m、版厚140mmの2辺単純支持版とした。

本試験機は、4つのアクチュエーターが位相差45度で動作することにより、移動荷重を再現するものである。荷重制御のため、スラブの損傷が進行してたわみが増大した場合、制御に支障をきたす場合がある。本実験では、損傷進行状況に応じて荷重速度を2Hzあるいは4Hzに調整した。また、荷重条件ごとのひび割れ発生状況や破壊モードの相違に着目するため、たわみの変化が微小な安定推移状態に入った場合、荷重及び繰返し回数を変えるとともに、スラブ上面に水を張り、損傷を加速させるものとした。

荷重ケースは、支間中央の1レーンのみに荷重するケースA、2レーン交互荷重のケースB1(純間隔100mm)



(a) l/d -疲労寿命関係



(b) a/d -疲労寿命関係

図-5 荷重レーン間隔-疲労寿命関係図

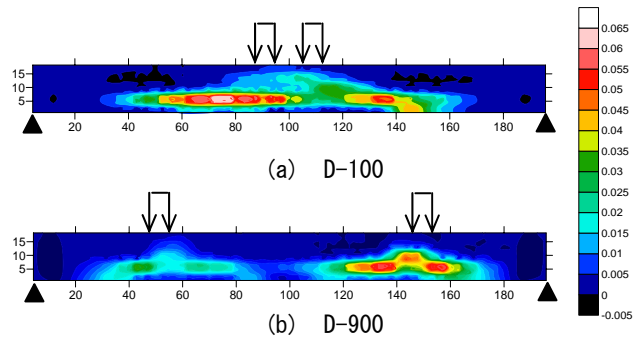


図-6 Dシリーズ主ひずみ分布図 (変形x10)

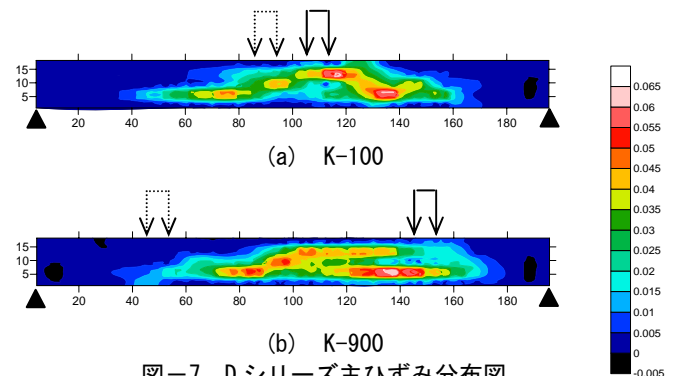


図-7 Dシリーズ主ひずみ分布図

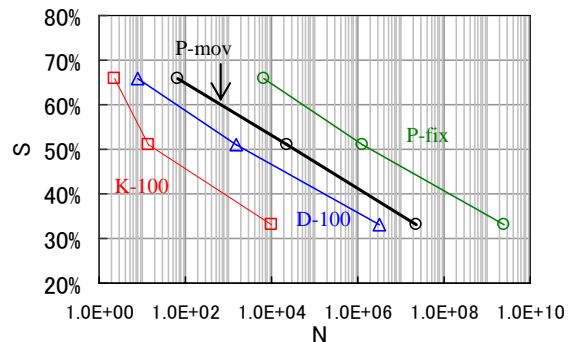
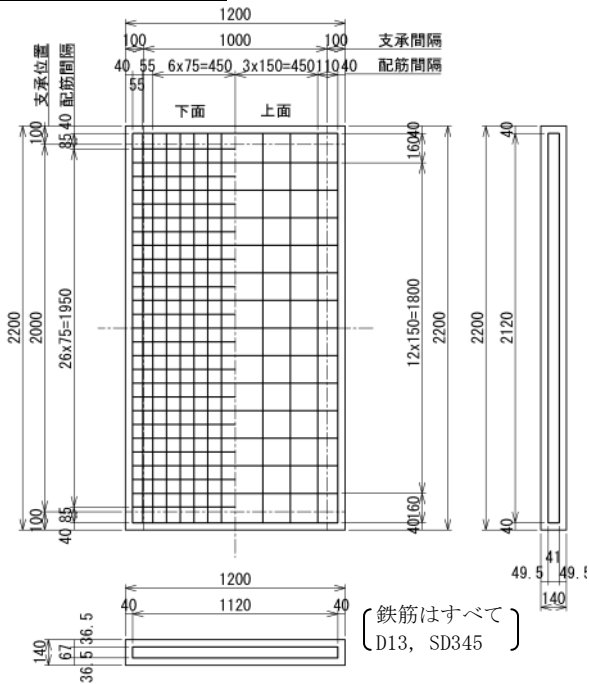


図-8 荷重荷重-疲労寿命関係図

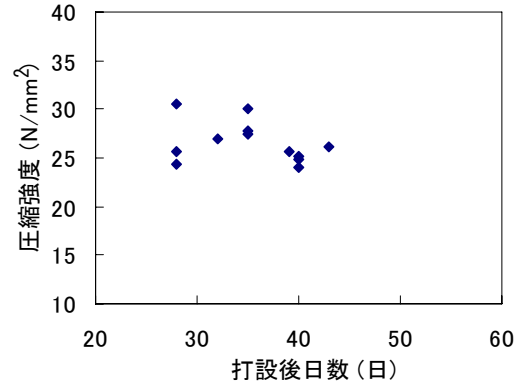
および B2 (純間隔 300mm) の 3 種類の移動荷重による疲労実験と、ケース A の 2, 3 番目の載荷点を用いた (図-9 (b)) 静的載荷実験 S の 4 種類とした。ケース B1 で

は、試験機の制約上、荷重進行方向に前後 100mm ずつ載荷位置を移動した。実験では、載荷レーンを 1 回毎に移動させることはできないため、片側およそ 10 万回を

供試体配筋および支承位置



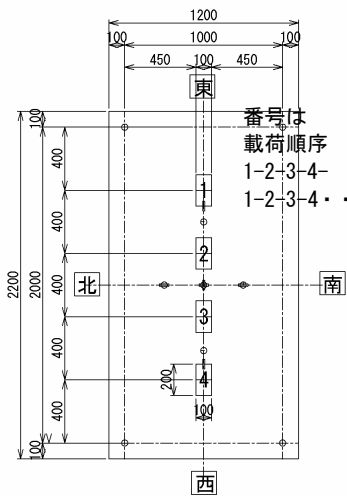
供試体コンクリート圧縮強度—打設後日数関係



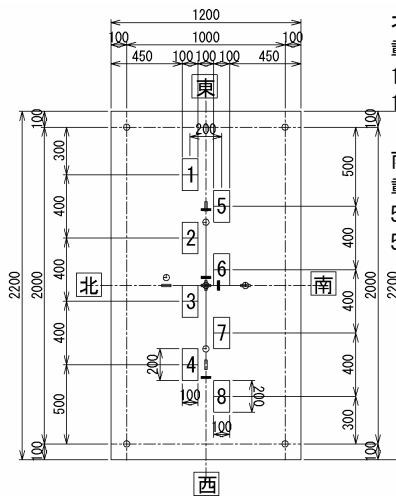
載荷ケースおよび載荷レーン位置一覧

	有効高 d (mm)	純間隔 l (mm)	支点距離 a (mm)	l/d	a/d	l/d a/d
A	160	-	400	-	2.500	-
B1	160	100	350	0.625	2.188	0.286
B2	160	300	250	1.875	1.563	1.200

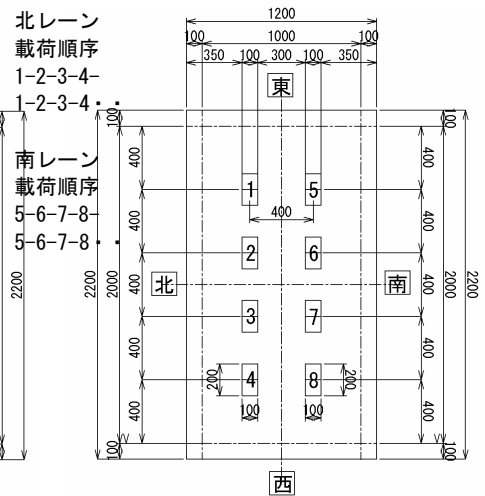
(a) 供試体概要



(b) ケース A 載荷位置



(c) ケース B1 載荷位置
図-9 供試体諸元



(d) ケース B2 載荷位置

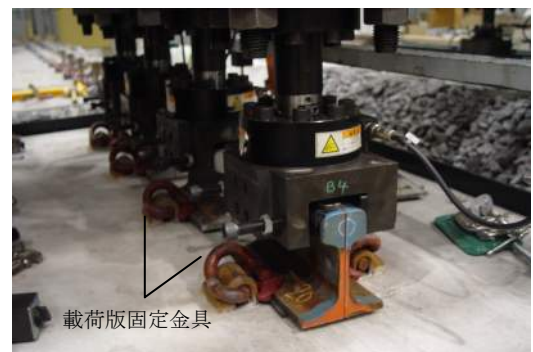


図-10 供試体セット状況

目安として荷重レーンを移動した。

100x100mm の荷重板は、高速荷重時のずれや跳ねを防止するため、供試体に埋め込んだ固定金具により固定した。実際の供試体セット状況を、図-10 に示す。

表-4 実験での荷重荷重および繰返し回数

A			B1			B2				
kN	Hz	回数	kN	Hz	回数	レーン	kN	Hz	回数	レーン
0-90	-	1	0-75	-	1	北	0-80	-	1	北
10-100	4	640	10-50	2	100,760	北	10-75	2	130,000	北
10-60	4	436	10-75	2	150,000	南	10-80	2	200,000	南
10-60	2	540	10-85	2	460,000	南	10-100	2	3,770	南
10-40	2	900					10-100	4	211,000	南
10-30	2	1,000,000								
10-50	2	500,000								
1,502,517			710,761			544,771				

3.2 実験結果

(1) 損傷過程と破壊モードの観察

ケース S では、移動荷重によるクラック進展を模擬するため、荷重点 2 番に 200kN まで荷重して除荷した後、

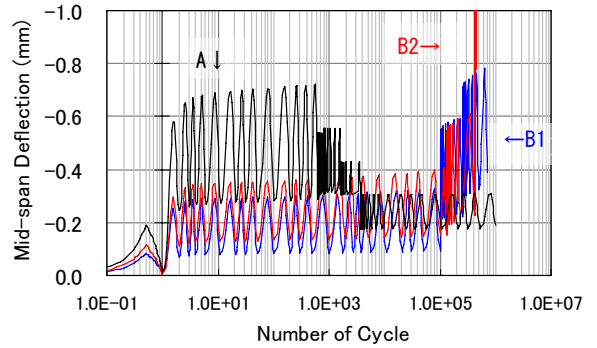
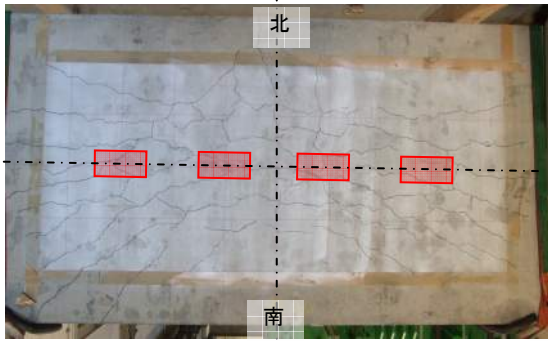


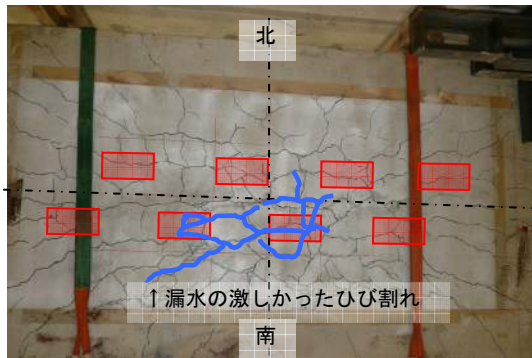
図-11 数値解析による再現

実験結果 スラブ下面のひび割れ状況

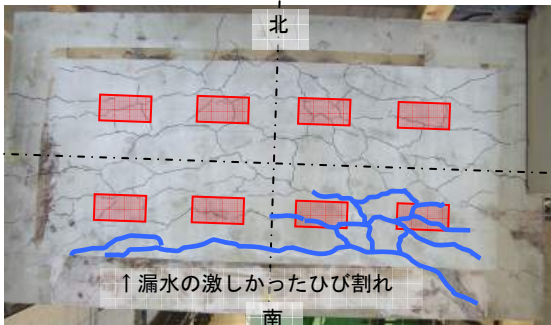
(a) ケース A



(b) ケース B1

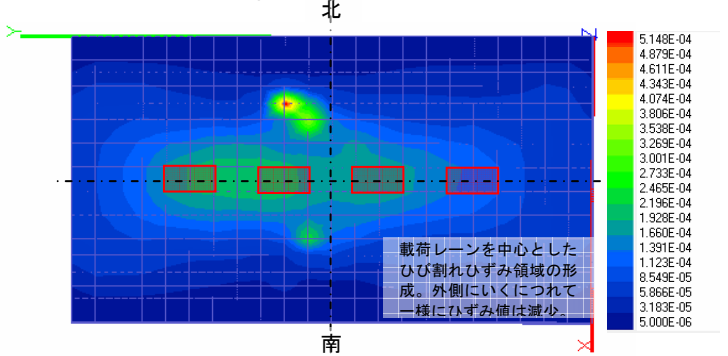


(c) ケース B2

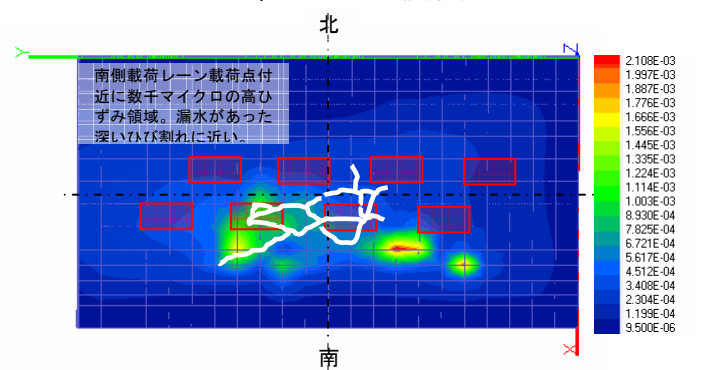


解析結果 スラブ下面のひび割れ分布

(a) ケース A step968:40 万回荷重時



(b) ケース B1 step968:63 万回荷重時



(c) ケース B2 step650:42 万回荷重時

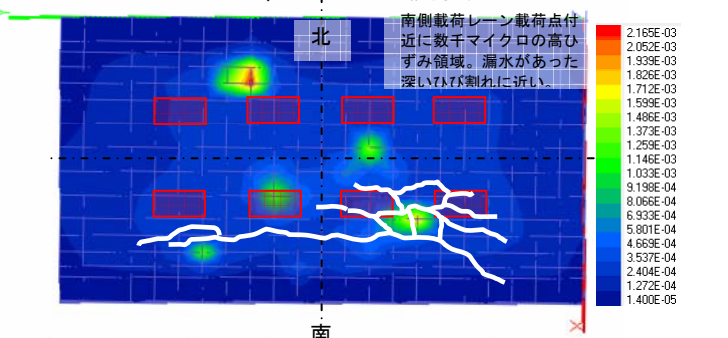


図-12 実験後のひび割れ状況とひずみ分布解析の比較

載荷点3番に再載荷し、破壊させた。3番に載荷した際、既に載荷点2番を中心に放射状に発生していたひび割れに対し、新たに発生した支間方向のひび割れが交差することによって、格子状のひび割れが生じる過程が観察された。最大耐荷重は326kNで、押抜きせん断破壊モードで終局に至った。

移動荷重のケースAでは、静的耐力の約30%にあたる100kNで載荷を始めたが、最初の600回程度までで、載荷で支間中の載荷レーンを中心に概ね放射状に近い形ひび割れが発生し、支点付近まで一気に進展したため、以降は荷重レベルを下げて経過を観察した。最後にスラブ上面に水を張ったが、破壊には至らなかった。

ケースB1では静的耐力の約15~25%にあたる50~85kNで順次荷重を増加させたところ、71万回を越えたところで、載荷点周囲に貫通ひび割れを生じて破壊に至った。床版上面に張った水は、この押抜きせん断と見られる貫通ひび割れから、漏れ出していた。

引き続き、ケースB2について、静的耐力の約25~30%にあたる85~100kNで載荷した。スラブ下面には、ケースB1よりもさらに広範囲にわたって格子状のひび割れが形成されていた。また、最終段階では、載荷レーンより外側(支点側)に、支持辺に沿ったひび割れが連続的に貫通し、破壊に至った。

(2) 解析結果の検証

ケースA, B1, B2の荷重の大きさおよび繰返し回数を表-4に、数値解析による再現計算結果を、図-11に示す。この数値解析では、スラブの上面に水を張ったことの影響は考慮していない⁷⁾。

実験後のスラブ下面のクラックパターンと、解析によるスラブ下面の主ひずみ分布の比較を、図-12に示す。実験の疲労損傷位置(最後に過大なひび割れの発生)は、解析による予測と概ね一致している。B1解析においてひずみの蓄積が顕著な載荷点周囲では、実験で押抜きせん断モードの破壊を生じた。B2においては、高いひずみ領域が載荷点付近あるいは外側(支点側)に離れて点在することを、解析でも確認することができた。

本研究では、載荷レーン位置をわずか200mm変更したことで移動荷重によるスラブの破壊モードが変化することを、数値解析および実験の双方で確認することができた。

4. まとめ

本研究は、道路や鉄道に関する実構造物の荷重条件を想定し、複数の移動荷重が同時または交互に作用する場合にスラブの疲労損傷に与える影響について、数値解析および実験による検討を行った。以下に本研究の結論を示す。

- (1) 複数の移動荷重が同時または交互にスラブに作用する場合、1レーンだけの載荷に比べ、大幅に疲労寿命が低下する可能性がある。
- (2) 上記の疲労寿命の変動は、スラブ厚、支間長、載荷レーン間の距離、載荷幅等の条件に依存することを、数値解析によって示した。
- (3) 軌道試験装置を用いて移動荷重の2レーン交互載荷を実施し、載荷レーン間隔のわずかな条件の違いによってもスラブの疲労破壊モードが変化することを、実験においても確認した。
- (4) 上記の実験結果は、数値解析による破壊予測と概ね一致していた。

参考文献

- 1) 前田幸雄, 松井繁之: 輪荷重移動装置による道路橋床版の疲労に関する研究, 第6回コンクリート工学年次講演会論文集, 1984, pp221-224.
- 2) 日本道路公団試験所コンクリート研究室: 試験所技術資料第413号 道路橋鉄筋コンクリート床版の損傷機構に基づく健全度判定と補修工法の選択, 1985.3.
- 3) 松井繁之: 移動荷重を受ける道路橋RC床版の疲労強度と水の影響について, コンクリート工学年次論文報告集, 9-2, pp.627-632, 1987.
- 4) Maekawa, K., Gebreyouhannes, E., Mishima, T. and An, X.: Three-Dimensional Fatigue Simulation of RC Slabs under Traveling Wheel-Type Loads, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.4, No.3, pp.445-457, 2006.
- 5) Maekawa, K., Fukuura, N. and Soltani, M.: Path-Dependent High Cycle Fatigue Modeling of Joint Interfaces in Structural Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.6, No.1, pp.227-242, February 2008.
- 6) K. Maekawa, T. Ishida and T. Kishi: Multi-Scale Modeling of Structural Concrete, Taylor and Francis, 2008.
- 7) Gebreyouhannes, E., Kishi, T. and Maekawa, K.: Response of cracked concrete interfaces subjected to reversed cyclic shear loading and effect of water, Proceeding of the Tenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, 2006.
- 8) Gyorgy L. Balazs: Fatigue of Bond, ACI Material Journal, pp.620-629, November-December 1991.