

論文 実験及び数値解析による床板疲労寿命に影響を及ぼす諸要因の検討

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

要旨： 損傷を導入した床板および基準床板を用いて、複数点連続荷重で移動荷重を模擬した疲労実験を行った。幅 0.2mm 以上の乾燥収縮ひび割れを多数導入した試験体では、予想に反して寿命は基準試験体よりも長かった。鉄筋腐食を導入した試験体では、端部の荷重点位置で下面鉄筋の連続的な付着切れを伴う押抜きせん断破壊が生じ、基準試験体と比較して疲労寿命は減少した。基準試験体の上面に水をはったケースでも、疲労寿命は低下した。数値解析による影響要因の検討では、コンクリート圧縮強度と複数連行荷重の位相差が疲労寿命に及ぼす影響が大きい可能性が示唆された。

キーワード： 既設床板, 疲労寿命, 鉄筋腐食, 収縮ひび割れ, 分割施工, 非線形有限要素解析

1. はじめに

橋梁床板の寿命に影響を及ぼす主な要因として、交通荷重による高サイクル疲労だけでなく、飛来塩分や凍結防止材の表面散布に関連した塩害(鉄筋腐食)の進行や、早期の乾燥収縮によるひび割れの存在が指摘されている。交通荷重による鉄筋コンクリート床板の高サイクル疲労については、実験結果に基づいたS-N図による各種疲労寿命予測式¹⁾や、数値解析による分析²⁾がこれまで示されてきたが、鉄筋腐食や収縮ひび割れといった付加的損傷要因がそれらに及ぼす影響を定量的に評価に取り込むことは、依然として容易でない。

本研究では、付加的損傷をあらかじめ導入した試験体を用いて、損傷を導入しない基準試験体との比較により疲労寿命及び破壊モードの変化を調べるとともに、これらの付加的な損傷要因の評価を試みたものである。

2. 実験概要

2.1 スラブ試験体の基本条件

(1) 試験体諸元および境界条件

実験に用いたスラブ供試体の諸元を図-1に示す。供試体は、荷重進行方向(長手方向)3.2m 支間方向1.7m(支間長1.5m)、版厚190mmの2辺単純支持版とした。支間方向鉄筋の純かぶりを30mmとし、長手方向の鉄筋を内側に配置した。支間方向および長手方向の鉄筋は同量で、上面にD19ctc170、下面にD19ctc85である。支間方向下面の鉄筋は端部を曲げあげて試験体内定着し、支間方向上面の鉄筋は直線のまま試験体内に配置した。荷重進行方向(長手方向)の鉄筋は上下面とも試験体外に500mm延長し、拘束フレームに定着した。鉄筋はすべてSD345を使用した。

(2) 材料特性

試験体コンクリートの配合を表-1に示す。基準試験体 No.1 および No.2 は、水セメント比 60%、単位水量 250kg の普通コンクリートを配合した。100×100×400mm の試験体を用いた予備実験では、打設後気中養生 1 か月弱で約 300 μ の収縮ひずみが計測されている(図-2)。分割施工試験体 No.3 では乾燥収縮ひび割れを促進するため単位水量 300kg で石灰石微粉末を配合し、他の損傷導入試験体 No.4, No.6 についてもこれに準じた。養生については 2.2(2)節で述べる鉄筋腐食導入試験体以外はすべて、埃よけのための簡易なシートをかぶせるのみの屋内気中養生とした。

(3) 荷重方法

3つのアクチュエーターにサイン波で制御した荷重を与えて連続荷重することにより移動荷重を模擬した。各アクチュエーターには図-1に示す番号1→2→3の順で位相差を与え、振幅はすべて175kN \pm 125kNである。なお、いずれのケースも動的荷重の前に版中央アクチュエーター2番で300kNまで静的荷重し、版端部の浮き上がりや支承のガタツキの有無確認とその補正を行った後、ひび割れ状況の観察を行った。その後1番、3番の順で同様の静的荷重を行った。荷重条件を表-2に示す。

2.2 損傷導入試験体の個別条件

(1) 分割施工試験体 No.3

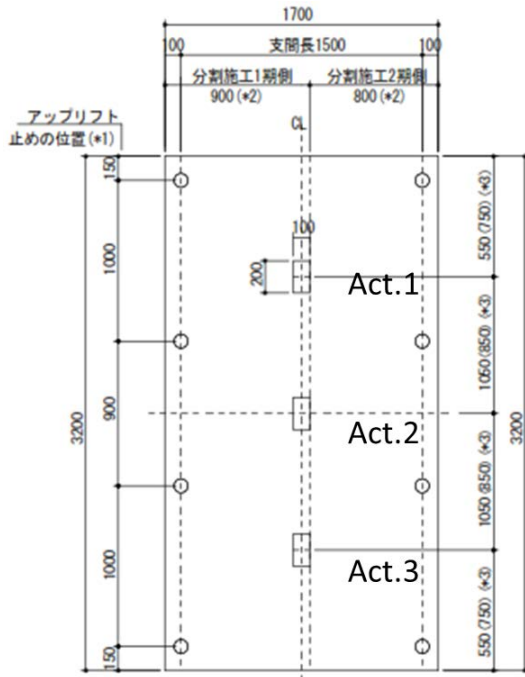
図-1に示すように、試験体長手方向をほぼ2分割する位置に打継目を設け、1期施工後約2か月間気中養生をした後、2期施工分を打設した。2期施工にあたって打継目の処理は行っていない。支間方向鉄筋に継手はなく、1期施工側から2期施工側まで連続した1本ものである。

*1 東京大学 大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 特任研究員 博(工)(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 課長 博(工) (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 (正会員)

*4 東京大学 大学院工学系研究科 教授 工博 (正会員)



- (*1) アップリフト止めは No.3,4,6 で使用
- (*2) 分割施工試験体 No.3 のみ
- (*3) 括弧内の寸法は試験体 No.3,4,6

試験体名	内容
No.1	基準試験体
No.2	基準試験体・予備
No.3	分割施工試験体
No.4	鉄筋腐食導入試験体
No.6	上面水はり試験体

図-1 試験体諸元

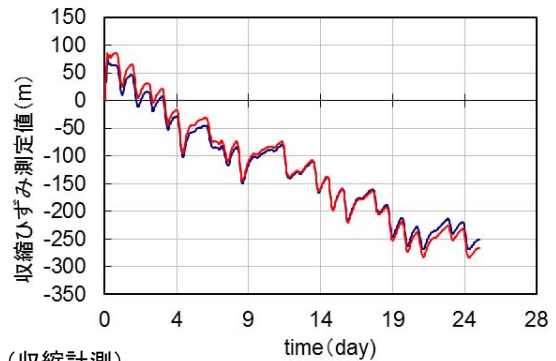


図-2 予備実験 (収縮計測)

表-1 供試体配合

試験体	セメント	水	石灰石微粉末	砂	砂利	増粘剤	AE剤
No.1, 2	417	250	0	679	692	1.6	0.13
No.3, 4, 6	525	315	200	350	692	2.0	0.16

表-2 载荷条件

試験体	静的载荷	連続疲労载荷	連続疲労载荷	備考
No.1 基準	300kN 各アクチュエータ	100±50kN 1.0Hz 位相差3π/2	175±125kN 10.0Hz 位相差3π/2	位相差3π/2でのアクチュエータ変位制御 Act 1  Act 2  Act 3  横軸 = 時間
No.2 基準(予備)	300kN 各アクチュエータ	なし	175±125kN 0.2Hz 位相差3π/2	
No.3分割 No.4腐食	300kN 各アクチュエータ	なし	175±125kN 1.0Hz 位相差2π/3	位相差2π/3でのアクチュエータ変位制御 Act 1  Act 2  Act 3  横軸 = 時間
No.6 水はり	300kN 各アクチュエータ	なし	175±125kN 10.0Hz 位相差2π/3	

載荷前に確認したひび割れ状況を図-3 に示す。下面には、1 期施工側では起点部の幅が 0.2mm を越える比較的大きなひび割れが、鉄筋間隔 (85mm) の倍数間隔で生じていた。長手方向の鉄筋を外部拘束フレームで固定しているため、コンクリートの乾燥収縮が内部鉄筋により拘束され、ひび割れが生じたと推察される。2 期施工側でも同様のひび割れがみられたが、本数は 1 期施工側に比べて少なかった。上面も同様に、1 期施工側で支間方向にほぼ等間隔に、比較的幅の広いひび割れが観察された。上下面の観察から、いくつかのひび割れは貫通しているものと推察される。また、1 期施工と 2 期施工との目地は、上下面とも概ね幅 0.1mm 程度の隙間が生じていた。

(2) 鉄筋腐食導入試験体 No.4

鉄筋は打設前に屋外環境で腐食を誘発させた後、試験体内に配置した。また、本試験体ではコンクリート練り混ぜ時に表-1 の基本配合に加え 40kg/m³ の塩化ナトリウムを投入した (他の材料との置換ではない)。

打設後は約 2 週間他の試験体と同様屋内気中養生を行った後、屋外に移動して直射日光と自然風暴露環境下で約 4 か月間 1 日 1 回の散水を行った。載荷直前に試験体を確認したところ、試験体側面で、腐食生成物による鉄筋径の膨張によって生じたと思われるひび割れが、上面鉄筋に沿って水平方向に連続的に確認されたが、下面鉄筋に沿ったひび割れは確認できなかった (図-4)。

(3) 上面水はり試験体 No.6

載荷前に床板上面を詳細に観察したところ、鉄筋の配置方向とは関連のみられない網目状のヘアクラックがほぼ全面にわたって観察された (図-5)。床板上面に囲いを設け、載荷開始 3 時間ほど前に水深 10mm 程度の水をはったが、下面や側面への水の浸透はみられなかった。

3. 実験結果

3.1 疲労寿命と破壊モード

表-3 に、各ケースの疲労寿命と破壊モードのまとめを示す。載荷回数は、3 つのアクチュエーターすべてが 2 π 周期のサイン波を終えて 1 回 (荷重が 1→2→3 の順で床板を通過することを想定) として計上している。

基準試験体 No.1 と No.2 とでは載荷速度が異なるが、載荷速度が遅い No.2 のほうが約 2000 回ほど疲労寿命が長かった。No.1 では載荷位置での押抜きせん断以外に端部で鉄筋付着切れに起因すると思われる水平ひび割れが下面鉄筋位置で見られた。No.1 は載荷速度が速く、端部での衝撃も大きいと考えられるため、鉄筋付着切れを促進し疲労寿命が短くなった可能性がある。

載荷前に上下面から幅 0.2mm 以上のひび割れが多数観察された分割施工試験体 No.3 では、疲労寿命の大幅な

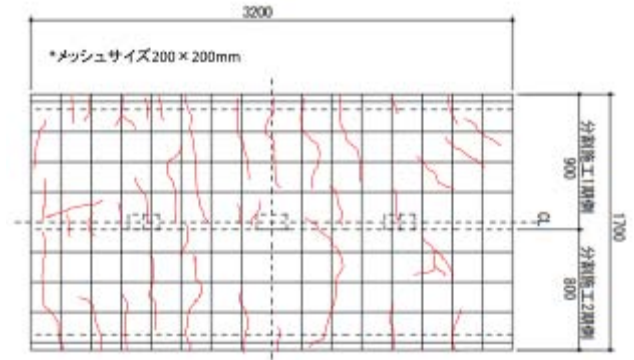


図-3 分割施工試験体 No.3 載荷前のひび割れ (下面)



屋外で毎日散水(乾湿繰り返し)4か月

図-4 鉄筋腐食導入試験体 No.4 の状況

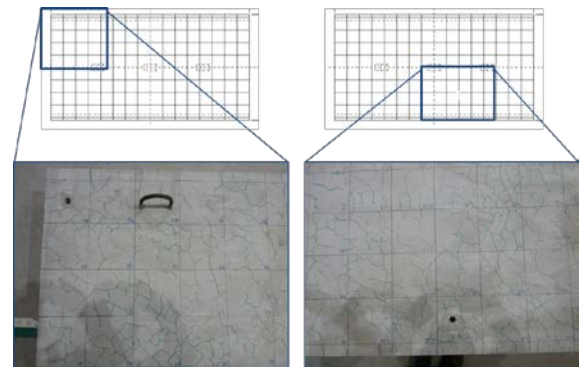


図-5 上面水はり試験体 No.6 載荷前のひび割れ(上面)

表-3 破壊モードと疲労寿命のまとめ

試験体名	破壊モード	疲労寿命
No.1 基準	Act 1 押抜きせん断	2,451
No.2 基準(予備)	Act 3 押抜きせん断	4,491
No.3 分割施工	Act 1,2 押抜きせん断	15,685
No.4 鉄筋腐食	Act 1 押抜きせん断	1,110
No.6 上面水はり	Act 1,2 押抜きせん断	1,264

低下を予想していたが、実際は基準試験体よりも6倍程度長い寿命を記録した。試験後切断面を観察したところ、押抜き破壊面角度が他の試験体はすべてほぼ45度であるのに対し、試験体 No.3 では60度程度であった点は特徴的であるが、現時点では原因の特定は困難である。今後検証を続けていきたい。

鉄筋腐食を導入した試験体 No.4 では、端部の荷点位置で下面鉄筋の連続的な付着切れを伴う押抜きせん断破壊が生じ、基準試験体と比較して疲労寿命は基準試験体の1/2~1/4程度に減少した。また、基準試験体の上面に水をはったケースNo.6は、上面のひび割れからの水の吹き出しや下面から水の浸透は破壊直前まで観察されず、押抜きせん断破壊した。鉄筋腐食供試体に次いで疲労寿命は短い。これらの結果は既往の知見³⁾⁴⁾に矛盾しない。

4. 数値解析を用いた考察

4.1 数値解析概要

本実験シリーズは実施期間が長期にわたっており、荷重実施時材齢やコンクリート強度、荷重条件も試験体によっていくつか異なる。これらの実験条件の相違が疲労寿命に及ぼす影響について、数値解析を用いて考察する。

解析モデルを図-6に示す。床板の下面には鋼材の支圧板3200mm×200mmを両辺に配置し、支圧板の中心線の鉛直変位を拘束することで2辺単純支持とした。支圧板とコンクリートとの間には図-7に示す境界面要素を配置した。コンクリートと支圧板との間に付着力はなく、摩擦係数0.6による摩擦力のみが作用する。試験体 No.3, 4, 6のアップリフト止めの使用を想定した解析では、図-1に示すアップリフト止め位置で床板上面の鉛直変位も拘束した。

2方向に配置されている鉄筋は、38mm厚のRC要素層として解析に取り入れた。それ以外は鉄筋の付着機構が及ばない無筋コンクリート領域としてモデル化した。有限要素は8節点アイソパラメトリック要素を用い、コンクリートおよび鉄筋のモデルは参考文献⁵⁾に準じた。

4.2 S-N図による評価

疲労寿命を基準試験体 No.1 の押抜きせん断耐力で正規化するため、基準試験体 No.1 の押抜きせん断耐力を数値解析により求めた(図-8)。最大耐力は390kN、その時の版中央のたわみは2.14mmであった。実験ではすべてのケースで荷重振幅は等しく、荷重の最大値300kNは耐力の77%に相当する。

実験で得られた疲労寿命を、基準試験体 No.1 の押抜きせん断耐力で正規化したものを図-9に示す。本実験シリーズの条件下では、鉄筋腐食による疲労破壊モードの変化と疲労寿命の低下と、上面に水を張ったことによる疲労寿命の低下が確認された。

4.3 数値解析による実験条件の影響度検証

(1) コンクリート強度

本実験シリーズ各試験体の打設時期、配合、試験時の材齢およびコンクリート強度を、表-4に示す。試験時のコンクリート圧縮強度には最大10MPaの相違があった。この影響を確認するため、試験体No.1の諸元を例にとり、コンクリート圧縮強度を25MPaおよび35MPaとした非線形有限要素解析⁵⁾を実施した。コンクリートの引張強度および弾性係数は参考文献⁶⁾に従って圧縮強度から算出した値を用いた。

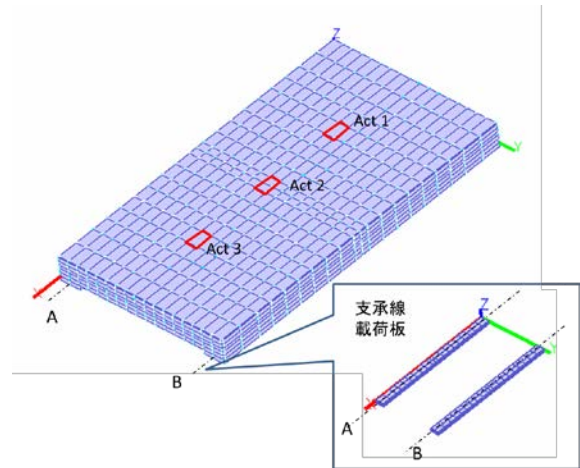


図-6 解析モデル

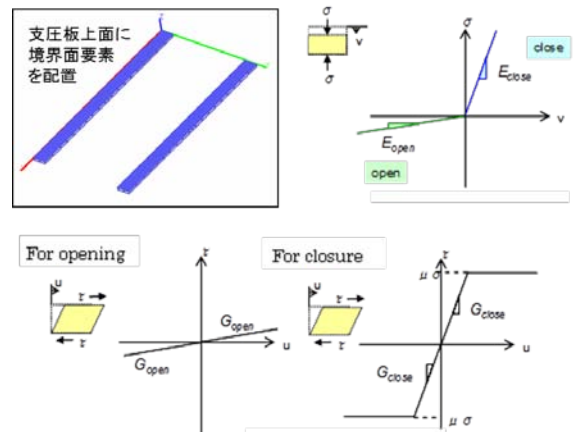


図-7 境界要素モデル

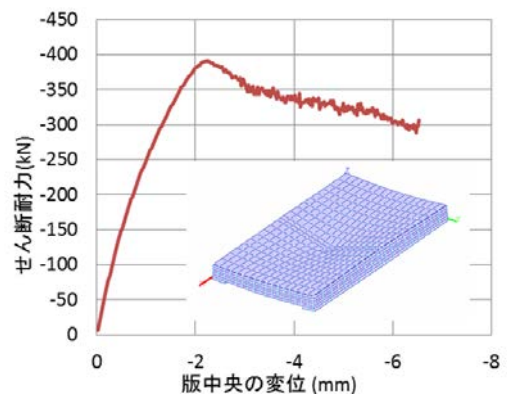


図-8 押抜きせん断耐力の算出

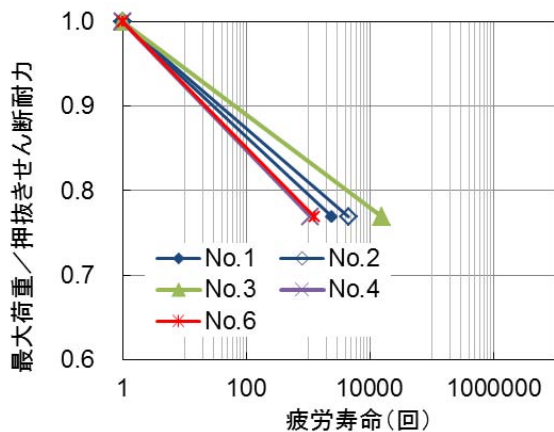


図-9 実験で得られた疲労寿命のまとめ (S-N 図)

表-4 コンクリート材料特性のまとめ

試験体名	打設時期 配合 載荷時の材齢	コンクリート 圧縮強度 (Mpa)
No.1 基準	2010/09/06 単位水量250kg 30~32日	29.7
No.2 基準(予備)	2010/09/17 単位水量250kg 35~37日	28.8
No.3 分割施工	1期施工 2010/11/19 (2期施工 2011/01/21) 単位水量300kg 404(341)~406(343)日	1期施工 30.5 (2期施工 28.7)
No.4 鉄筋腐食	2011/08/08 単位水量300kg 127~129日	25.0
No.6 上面水はり	2011/10/28 単位水量300kg 54~55日	35.9

解析結果を図-10 に示す。本実験条件のもとでは、コンクリート圧縮強度±5MPa 程度の差で疲労寿命は1/100 倍~100 倍となる可能性が示された。圧縮強度に連動してコンクリートの引張強度も変化させるので、版上下ひずみ差によって生じる曲率(たわみ)の差が顕著である。また、版の保有耐力に対して与えた荷重レベルが比較的大きいため、強度の影響が顕著に表れたと考えられる。

(2) 支持条件

本実験シリーズでは、基準試験体 No.1 および No.2 を実施した際は長手方向端部 2 辺を丸鋼による単純支持としていたが、動的載荷の際の試験体端部のアップリフトとそれに伴う試験体のガタツキにより時折荷重制御が不安定となる問題があった。このため、それ以降に実施した損傷導入試験体 No.3, No.4, No.6 では、支点付近にアップリフト止めを 4 点ずつつけた(図-1)。この支持条件相違の影響を調べるため、図-6 の解析モデルを用いて数値解析を実施した。

解析結果を図-11 に示す。アップリフト止めを設けた

場合も破壊モードは押抜きせん断であった。版中央のたわみの推移は単純支持の場合とほぼ一致しており、疲労寿命に与える影響は微小であることが確認された。

(3) 位相差

基準試験体 No.1 および No.2 では、アップリフトによるガタツキとともに 3 つのアクチュエーターに与える位相差が適切でないことも考えられた。そのため、以降に実施した損傷導入試験体 No.3, No.4, No.6 では、位相差を $3\pi/2$ から $2\pi/3$ に変更している。この影響を調べるため、図-6 の解析モデルを用いて数値解析を実施した。

解析結果を図-12 に示す。位相差を $3\pi/2$ から $2\pi/3$ に変えた場合、疲労寿命は 1/10 程度にまで低下することがわかった。これは、位相差が $2\pi/3$ と比較的小さい場合には、隣接する荷重位置の荷重が除荷過程に入ってたわみが回復する前に次の荷重位置で荷重が増加し始めるので、全体のたわみが増幅されるためである。

(4) 荷重位置

基準試験体 No.1 および No.2 では、アクチュエーター間距離を 1050mm に設定していたが、押抜きせん断破壊が端部のアクチュエーター 1 番あるいは 3 番で生じ、衝撃の影響が大きいと考えられたため、以降に実施した No.3, No.4, No.6 ではアクチュエーター間距離を 850mm に変更した(図-1)。この影響を調べるため、載荷位置を変更した場合の数値解析を実施した。

解析結果を図-13 に示す。数値解析では、アクチュエーター間距離が 1050mm の場合のほうが、疲労寿命は長かった。しかしながら、数値解析では、アクチュエーター間距離にかかわらず、版中央のたわみは端部アクチュエーター直下よりも大きく、押抜きせん断破壊は必ず版中央で生じるため、実験の破壊モードを再現できてはいない。実験では、試験体端部の鉄筋定着長が不十分であった可能性や、試験体底面のわずかな凹凸などから数値解析では算出されない付加的な振動や局所応力等が発生して破壊モードが変わった可能性が考えられる。引き続き検証を行いたい。

5. 結論

損傷を導入した床板および上面に水を張った床板を用いて、3 つのアクチュエーターによる複数点連続載荷疲労実験を行った。以下に、本研究で得られた結論を列挙する。

- 1) 鉄筋腐食が生じた場合、鉄筋の付着切れを伴う破壊モードの変化と疲労寿命の低下がみられた。
- 2) 床板上面に水をはった場合、床板の疲労寿命は低下したが、破壊モードには変化はなかった。
- 3) 数値解析を用いた実験条件の検証によって、10MPa 程度のコンクリートの圧縮強度の違いでも床板の

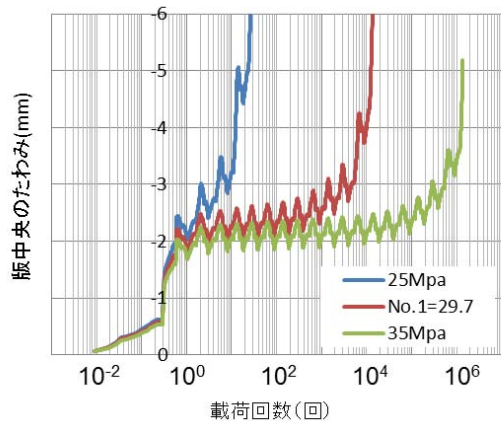


図-10 コンクリート強度が疲労寿命に与える影響

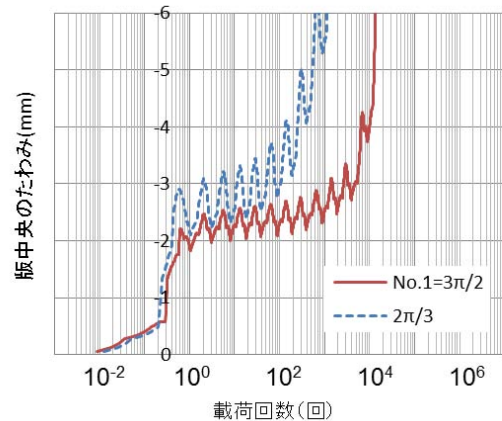


図-12 位相差が疲労寿命に与える影響

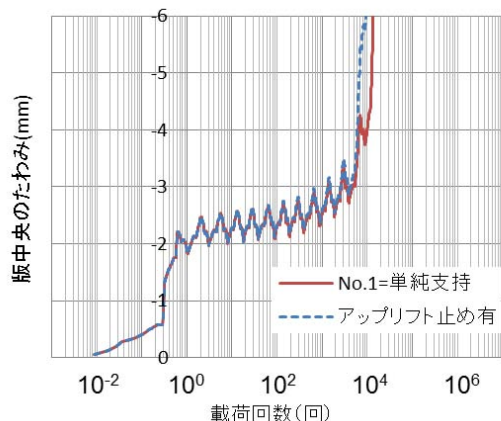


図-11 支持条件が疲労寿命に与える影響

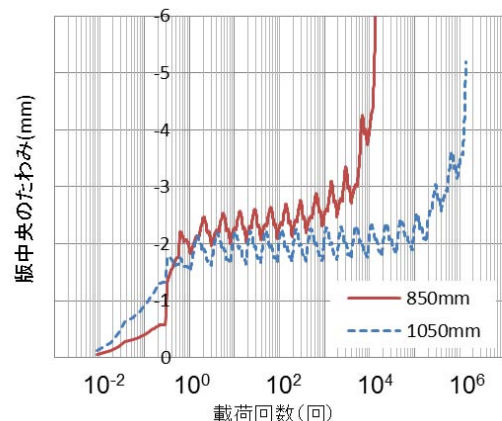


図-13 荷重距離が疲労寿命に与える影響

疲労寿命に大きな影響を及ぼすことが示唆された。

- 4) 数値解析を用いた実験条件の検証によって、複数の連行する荷重の位相差が、床板の疲労寿命に比較的大きな影響を及ぼすことが示唆された。実交通荷重では、車輪の間隔や車両の長さ等によって、位相差が発生する。設計において位相差をどのように考慮すべきか、検討する必要がある。

謝辞

本研究は、平成22年度および23年度、国土交通省・建設技術研究開発助成制度（課題名：非線形疲労応答解析に基づくコンクリート系橋梁床版の余寿命推定システム）の助成を受けた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) たとえば、国土技術政策総合研究所他：道路橋床版の疲労耐久性評価に関する研究，国土技術政策総合研究所資料共同報告書，第472号，2008。

- 2) たとえば、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.
- 3) たとえば、西脇敬一，大屋戸理明，長谷川雅志，永岡高：鉄筋が腐食した RC 梁の疲労性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol24, No.1, pp.783-788, 2002.
- 4) たとえば、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，Vol.9, No.2, pp.627-632, 1987.
- 5) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T. : *Multi-scale Modeling of Structural Concrete*, Taylor & Francis, London, 2008.
- 6) 土木学会，2007年制定コンクリート標準示方書 [設計編]，土木学会，2008。