

合成 2 主桁橋の床版上多点移動載荷疲労試験

ON FATIGUE TEST TO RC SLAB OF COMPOSITE GIRDERS WITH MULTI-POINT MOVEMENT AXLS

佐藤 悠樹* 橋 肇**
Yuki Sato Hajime Tachibana

社会インフラの老朽化が問題視されている昨今、建設後 50 年以上経過する道路橋は、全国で約 20 万橋存在するといわれている。これらの橋梁は、長期間の供用による経年劣化に加え、建設時に比べ車両荷重の増大や大型車交通量が多くなっていることから、輪荷重の繰返しによる鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版）の疲労損傷が年々顕著になってきている。コンクリートの疲労劣化は、設計荷重よりも低い荷重で破壊に至るため、合成桁橋の RC 床版損傷は、橋梁全体としての耐力に影響することから、床版の疲労を把握することは、橋の安全性や使用性を確保するため重要な事項と言える。

本研究は、RC 床版が損傷した状態において、RC 床版と主桁の合成効果を期待できるかどうかを把握するため、RC 床版の損傷を想定した試験体（合成 2 主桁）を作製した。試験にあたっては 3 点曲げ載荷を行い、構造システムとしての限界状態の把握を目的とした。

本稿では、合成 2 主桁の RC 床版に疲労損傷を与えた試験体を作製し、床版の多点移動繰返し載荷による疲労試験（以下、多点移動疲労試験）結果とその特性について報告する。

キーワード：RC 床版、ひびわれ、多点移動疲労試験

1. はじめに

平成 29 年 7 月に改定された道路橋示方書（以下、道示）では、従来の許容応力度法から部分係数設計法及び限界状態設計法へと移行した。ここでは、部材の限界状態のみならず、橋梁としての限界状態の定義も与えられている。これは、構造システムとしての冗長性を期待するものであるが、橋梁の限界状態を適切に設定するためには、定量的な評価が必要である。

例えば、既設橋における RC 床版の疲労損傷事例は数多く報告されている。RC 床版が疲労損傷している橋梁の限界状態を定量的に判断できれば、車両通行の可否を迅速かつ適切に判断することが可能となる。

一方、RC 床版の損傷を考慮した合成桁の限界状態に着目した検討事例は少なく、今後の設計をより合理的に行うには、実験による検証が不可欠である。

本研究では、実橋の RC 床版で報告されているひびわれ損傷を再現するため、移動する載荷点を 2 点とし、載荷荷重を載荷点位置における床版の押抜きせん断耐力、ならびに押抜きせん断疲労耐力に着目し設定することで、RC 床版の損傷を制御した多点移動繰返し載荷法による疲労試験（以下、多点疲労試験）について報告する。

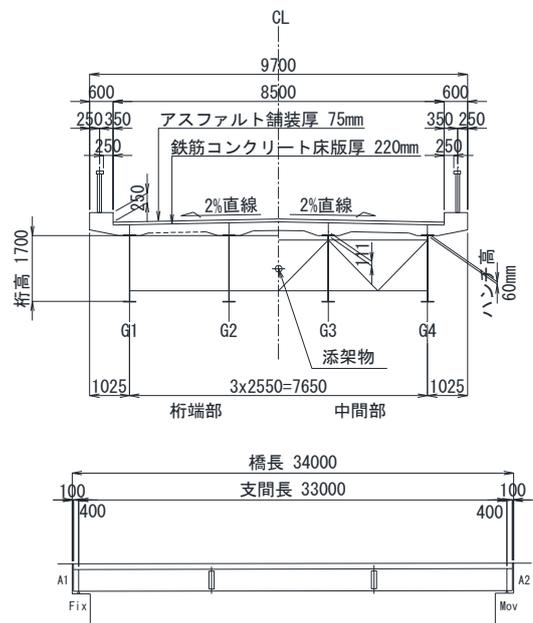


図-1 モデル化の対象とする単純合成桁¹⁾

2. RC 床版の多点移動疲労試験

2.1 試験体概要

一般的な合成桁を対象とし、文献 1) に示される図-1 の単純合成桁から、支間中央断面を 1/2 スケールとした合成 2 主桁橋（以下、試験体 A）を作製し、床版には輪荷

* 生産技術本部 橋梁設計部 東京設計課 **生産技術本部 技術研究部

表-1 鉄筋の機械的性質（ミルシート値）

使用鉄筋	材質	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び率 (%)
D13	SD345	384	540	21
D16		399	568	22

表-2 コンクリートの配合

コンクリート仕様	設計値	実測値	
		試験体A	試験体B
圧縮強度(N/mm ²)	27	34.5 (材齢28日)	34.4 (材齢28日)
スランプ(cm)	8	9.5	9.5
空気量(%)	4.5	4.4	3.8
水セメント比(%)		53.3	
細骨材率(%)		42.3	
単位量(kg/m ³)	セメント	306	
	水	163	
	細骨材	764	
	粗骨材	1083	
	混和剤	3.06	
粗骨材最大寸法(mm)		20	
セメントの種類		普通ポルトランドセメント	
混和剤		AE減水剤	

重による疲労損傷を再現する。

具体的には、RC床版のみの試験体（試験体B：載荷プログラム確認用）を作製し、多点移動疲労試験の載荷プログラムにて輪荷重による疲労損傷の再現性について検証を行い、その後、試験体Aにて疲労試験を行った。

2.2 試験体の作製

(1) 試験体概要

試験体Aの断面を図-2に、試験概要を図-3に示す。載荷試験におけるスペースを考慮し、試験体Aの支間長は7m、床版支間を1.5mとした。載荷プログラム確認用の試験体Bの支間長は試験体Aの1/2とし、床版支間長は試験体Aと同様に1.5mとした。つぎに、床版寸法は、平成24年版の道路橋示方書（以下、H24道示）にもとづくと、最小床版厚は170mmとなり、床版配筋の施工性も考慮して、床版厚を170mmとした。

主鉄筋はH24道示より、T荷重に対する設計曲げモーメントから、鉄筋の許容応力度が120 N/mm²程度になるように設定し、D16@100mmで配置した。これは、鉄筋の許容応力度140 N/mm²に対して、20 N/mm²の余裕を考慮している。また、配力鉄筋は、床版劣化の再現で、ひびわれが発生しやすくなるよう、既往の研究²⁾から主鉄筋の25%の鉄筋比となるD13@250mmを配置した。鉄筋の材質はSD345を用いた。鉄筋の機械的性質を表-1に示す。

試験体のコンクリートは、普通ポルトランドセメント、

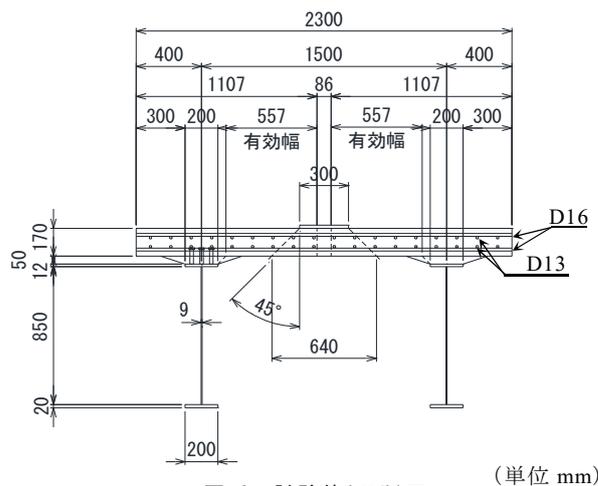
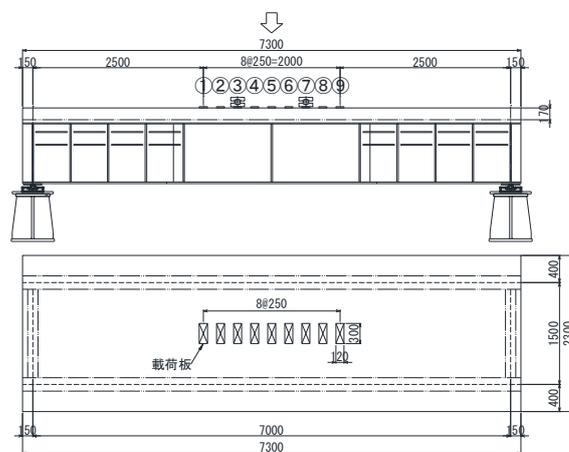
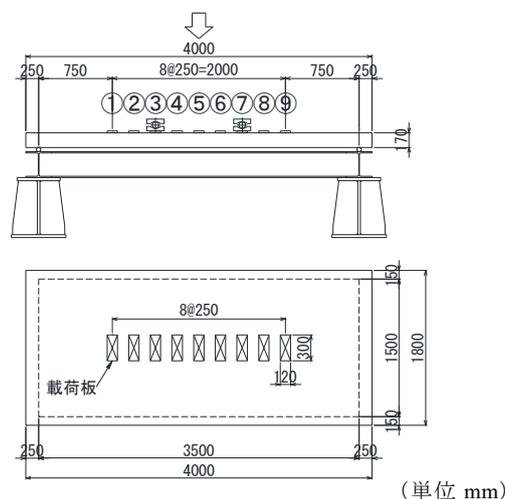


図-2 試験体Aの断面



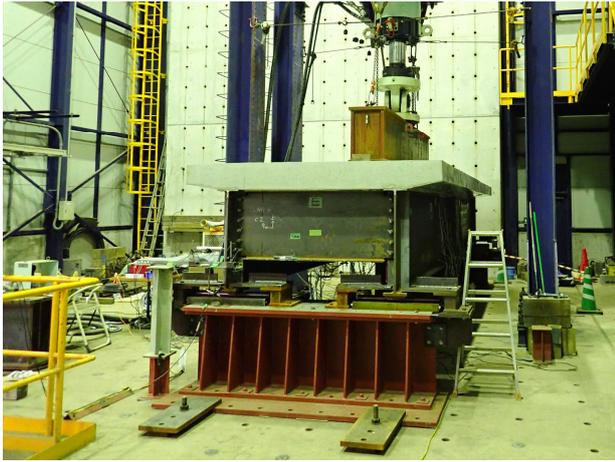
(a) 試験体A概要図



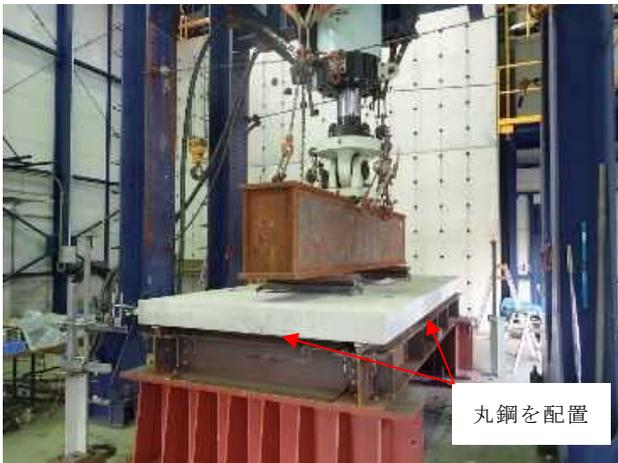
(b) 試験体B概要図

図-3 試験体A（上）と試験体B（下）の概要図

粗骨材最大寸法20mmを使用し、呼び強度27 N/mm²とした。本試験に用いたコンクリートの配合を表-2に示す。コンクリートは試験体Aと試験体Bの作製日が異なることから、グループ分けして表-2に示した。



(a) 試験状況 (試験体A)



(b) 試験状況 (試験体B)

写真-1 試験体A1(上)と試験体B(下)の試験状況

(2) 試験体支持条件

試験体の支持条件は、試験体 A については床版を主桁と端横桁による 4 辺支持、鋼桁を単純支持とした。試験体 B については丸鋼による 4 辺単純支持とした。各試験体の試験状況を写真-1 に示す。

3. RC 床版多点疲労試験

3.1 載荷荷重の設定

RC 床版に導入する疲労損傷は、文献2)にある、2方向ひびわれとし、格子の大きさは0.5~0.2 m、ひびわれ幅は0.2 mm以上となる性状を目標とした。これは、比較的交通量が多い既設橋で見られる床版下面の亀甲状の曲げひびわれである³⁾。

各STEPの載荷荷重は、RC床版の押抜きせん断耐力 V_{pcd} ⁴⁾を算出し、載荷位置の曲げモーメントの比率より設定した。ところで基準となるRC床版の押抜きせん断耐力について既往の研究^{5),6)}では、支持条件を4辺単純支持とした場合のRC床版の静的載荷試験を行い、面部材として

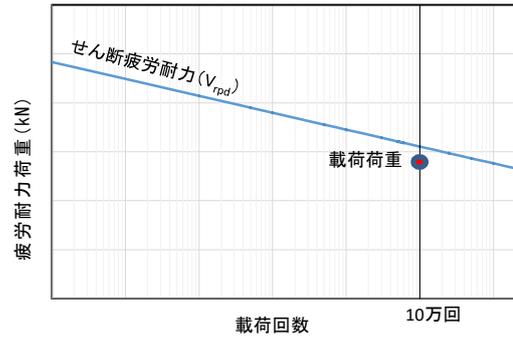


図-4 載荷荷重の設定概要図

表-3 疲労耐力と載荷荷重

10万回載荷時疲労耐力 V_{rpd} (kN)		
載荷位置	載荷荷重	V_{rpd} (kN)
①⑨	160	171
②⑧	130	160
③⑦	95	149
④⑥	80	137

のRC床版の設計押抜きせん断疲労耐力 V_{rpd} ⁷⁾との比較を行い評価している。その結果からは、実耐力は理論耐力の1.51~1.57倍となることが報告されている。そこで、本研究では以下で算出される値の1.5倍の耐力を有しているものとし、載荷荷重を下式にて設定した⁴⁾。

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_\gamma \cdot f'_{pcd} \cdot U_p \cdot d / \gamma_b \quad (1)$$

ただし、

$$\beta_d = \sqrt[4]{1000/d}$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100p}$$

$$\beta_\gamma = 1 + 1/(1 + 0.25u/d)$$

$$f'_{pcd} = 0.20\sqrt{f'_c} \quad (2)$$

ここで、 β_d : 寸法効果の係数、 β_p : 鉄筋比を表す係数、 β_γ : 載荷板周長の影響を表す係数、 f'_{pcd} : コンクリートの強度の影響を表す係数、 U_p : 載荷板から $d/2$ 離れた断面周長、 d : 有効高さ、 γ_b : 部材係数、 p : 鉄筋比、 u : 載荷面の周長、 f'_c : コンクリートの圧縮強度 (本研究における f'_c には、コンクリートの圧縮強度 f'_c を用いる) である。

本研究における係数 β_d は、1.5を超える場合は $\beta_d=1.5$ とし、 γ_b は載荷試験であることから、安全率を見込まず、1.0とした。また、載荷板のサイズは 120×300 mmとした。

各荷重は、繰返し載荷回数10万回に達する時点での、面部材としてのRC床版の設計押抜きせん断疲労耐力 V_{rpd} 以下としている。耐力の変化と載荷荷重との関係を図-4 に示す。

$$V_{rpd} = V_{pcd} \left(1 - V_{pd} / V_{pcd}\right) \left(1 - \frac{\log N}{14}\right) \quad (3)$$

ここで、 V_{pd} :自重、 N :疲労寿命、である。本試験では $N=10$ 万回としている。各載荷位置の疲労耐力と載荷荷重の関係を表-3に示す。表中の丸数字は、図-3の載荷位置に対応している。ここで、面部材の設計押抜きせん断耐力の算出に用いるコンクリート強度は、設計基準強度の 27N/mm^2 とした。また、支間中央の載荷荷重は、押抜きせん断耐力の50%程度で設定した。

3.2 試験体B (載荷プログラム確認用試験体)

(1) 載荷プログラム概要

多点移動疲労試験の概要図を図-5に示す。載荷梁直下の載荷点をSTEP1からSTEP10となるように床版端部側から支間中央に向かって移動する方針とした。載荷に際して、はじめに各STEPの載荷位置で静的載荷を行った。その後、所定の位置で載荷周期を5Hzとして、10万回の繰返し載荷を行った。繰返し載荷前後には同位置で静的載荷を実施するものとし、これを基本STEPとした。なお、1STEP終了ごとに床版下面のひびわれ状況、床版の変位を計測した。

試験体Bの載荷荷重は表-4に示す値とし(ただし、載荷梁の重量を見込む)、コンクリートの設計基準強度は実強度とした。表中の丸数字は、図-5の載荷位置に対応している。はじめに各ステップの各載荷位置で静的載荷を行った後、載荷周期を5Hzとして、10万回の繰返し載荷を2サイクル実施した(累計160万回)。

ここで、2サイクル目については、STEP1とSTEP8の載荷荷重が1サイクル目STEP1の載荷荷重の1.10倍、STEP2とSTEP7の載荷荷重が1サイクル目STEP2の載荷荷重の1.15倍、STEP3とSTEP6の載荷荷重が1サイクル目STEP3の載荷荷重の1.20倍、STEP4とSTEP5の載荷荷重が1サイクル目STEP4の載荷荷重の1.25倍とした。これにより、1サイクル目で発生したひびわれをより伸展させることを目的とした。

つぎに、2サイクル実施後、支間中央1点で疲労試験(10万回)を実施した。最大荷重は、下側主鉄筋に発生するひずみが 1000μ 程度となる荷重に設定している。これは、鉄筋の降伏応力に1.7倍の安全率を考慮した 200N/mm^2 の応力に相当する。

全サイクル終了後、支間中央1点(図-3⑤)を400kNで載荷し、押抜きせん断破壊させて試験終了とした。

(2) 試験体B 試験結果

試験体Bの床版下面のひびわれ発生状況を図-6に示す。STEP1~STEP8の2サイクル実施した時点で、RC床版は押抜きせん断破壊は生じず、床版下面全体に亀甲状のひびわれが発生していることから、疲労試験で用いた載荷プログラムの妥当性を確認することができた。この

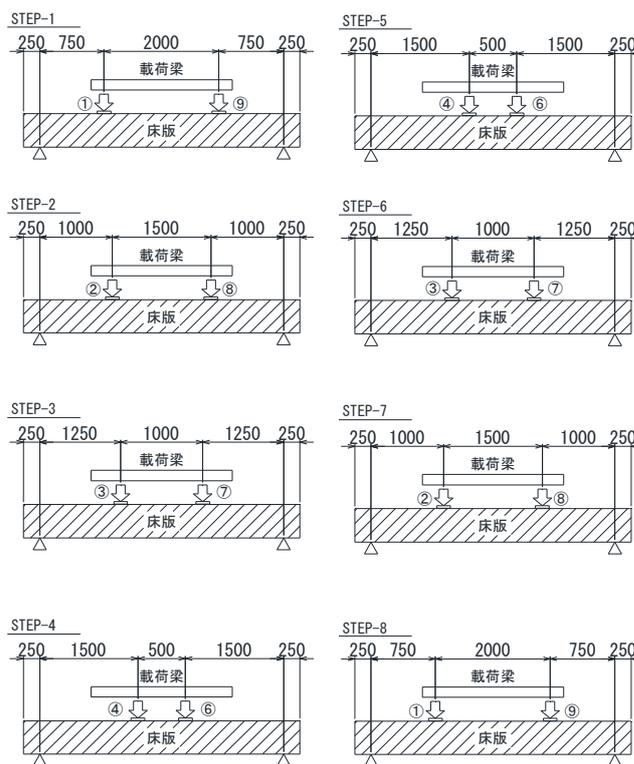


図-5 多点疲労試験の概要図(試験体B)

表-4 試験体B 載荷ステップ

載荷STEP	載荷位置	各載荷位置の荷重(kN)	
		1サイクル目	2サイクル目
STEP1	①⑨	160	176 (1.10倍)
STEP2	②⑧	130	150 (1.15倍)
STEP3	③⑦	95	114 (1.20倍)
STEP4	④⑥	80	100 (1.25倍)
STEP5	④⑥	80	100 (1.25倍)
STEP6	③⑦	95	114 (1.20倍)
STEP7	②⑧	130	150 (1.15倍)
STEP8	①⑨	160	176 (1.10倍)

2サイクル目終了後、⑤位置で400kNまで載荷。

()は1サイクル目に対する倍率を示す。

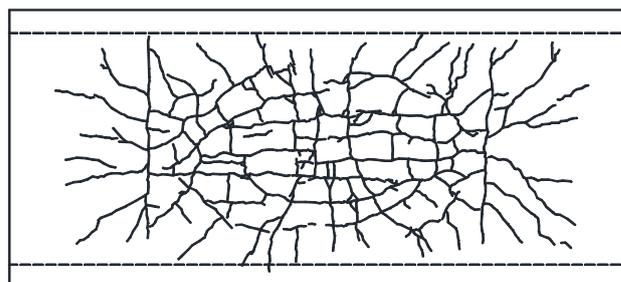


図-6 試験体B ひびわれ状況

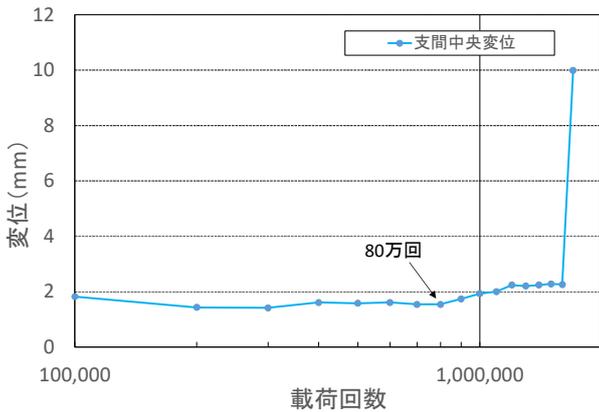


図-7 試験体 B 荷重回数と変位の関係

結果を踏まえ、試験体 A においても同様なひびわれが発生させることが可能であると判断した。

図-7 に荷重回数と変位の関係を示す。1 サイクル目ある 10~80 万回の荷重では変位は 1.6 mm 程度を推移し、2 サイクル目となる 80 万回以降に変位が 2.2mm 程度まで増加した。さらに、最終 STEP (170 万回) 終了後の静的荷重によりコンクリートの押抜きせん断破壊が生じたことから、変位は 10mm に急増した。

3.3 試験体 A

(1) 荷重プログラム

荷重荷重および荷重位置は試験体 B と基本的に同様とするが、ひびわれの発生状況に応じ、荷重を増加させた。また、荷重位置は支間中央 1 点を追加し、計 9 点とした。各ステップの荷重荷重を表-5 に示す。表中の丸数字は、図-8 の荷重位置に対応している。

試験体 B と同様に各ステップの各荷重位置で静的荷重を行った後、荷重周期を 5 Hz として、10 万回の繰り返し荷重を 2 サイクル実施した。ここで、1 サイクル目 STEP6~10 の荷重荷重は、1 サイクル目 STEP1~5 の荷重荷重の 1.5 倍とした。これは、予想していたひびわれに伸展せず、鉄筋ひずみも試験体 B の 1/2~1/3 程度であったことから荷重を増加させた。また、2 サイクル目については、STEP1 と STEP10 の荷重荷重が 1 サイクル目 STEP10 の荷重荷重の 1.10 倍、STEP2 と STEP9 の荷重荷重が 1 サイクル目 STEP9 の荷重荷重の 1.15 倍、STEP3 と STEP8 の荷重荷重が 1 サイクル目 STEP8 の荷重荷重の 1.20 倍、STEP4 と STEP7 の荷重荷重が 1 サイクル目 STEP7 の荷重荷重の 1.25 倍、STEP5 と STEP6 の荷重荷重が 1 サイクル目 STEP6 の荷重荷重の 1.30 倍とした。これは、試験体 B と同様に、1 サイクル目で発生したひびわれをより伸展させることを目的として設定した。

表-5 試験体 A 荷重ステップ

荷重STEP	荷重位置	各荷重位置の荷重(kN)	
		1サイクル目	2サイクル目
STEP1	①⑨	160	264 [1.10倍]
STEP2	②⑧	130	224 [1.15倍]
STEP3	③⑦	95	171 [1.20倍]
STEP4	④⑥	80	150 [1.25倍]
STEP5	⑤	70	137 [1.30倍]
STEP6	⑤	105 (1.50倍)	137 [1.30倍]
STEP7	④⑥	120 (1.50倍)	150 [1.25倍]
STEP8	③⑦	143 (1.50倍)	171 [1.20倍]
STEP9	②⑧	195 (1.50倍)	224 [1.15倍]
STEP10	①⑨	240 (1.50倍)	264 [1.10倍]

()は1サイクル目のSTEP1~STEP5に対する倍率を示す。
[]は1サイクル目のSTEP6~STEP10に対する倍率を示す。

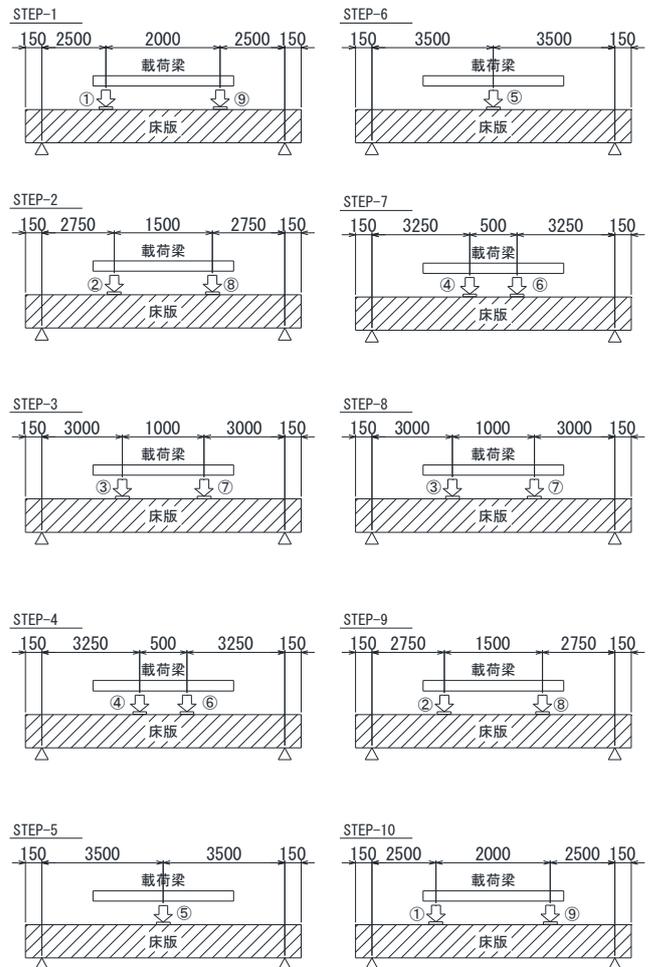
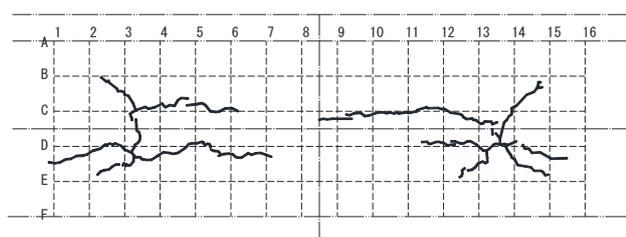
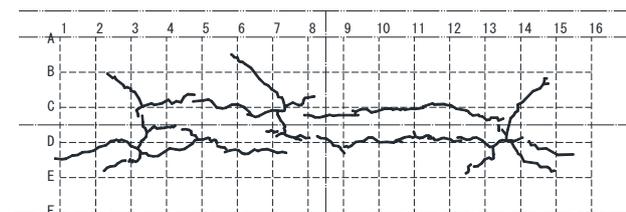


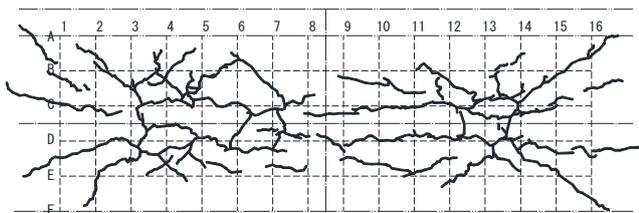
図-8 試験体 A 荷重ステップ図



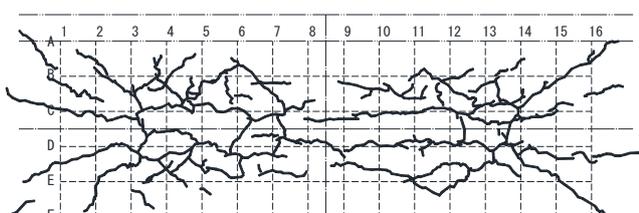
1 サイクル目 STEP1
(累積回数 10 万回時)



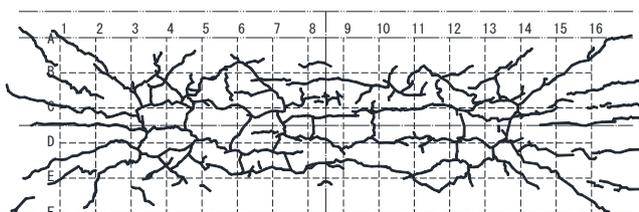
1 サイクル目 STEP7
(累積回数 70 万回時)



2 サイクル目 STEP1
累積回数 110 万回時



2 サイクル目 STEP5
(累積回数 150 万回時)



2 サイクル目 STEP5
(累積回数 200 万回時)

図-9 RC床版下面のひびわれ発生履歴

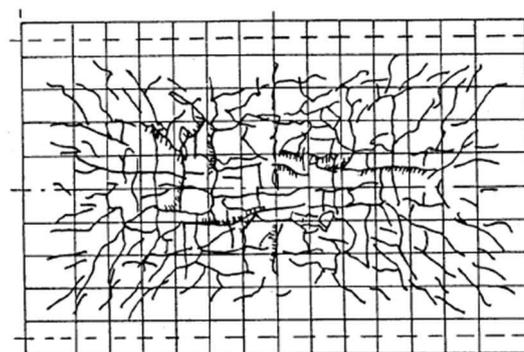


図-10 既往実験によるひびわれ³⁾

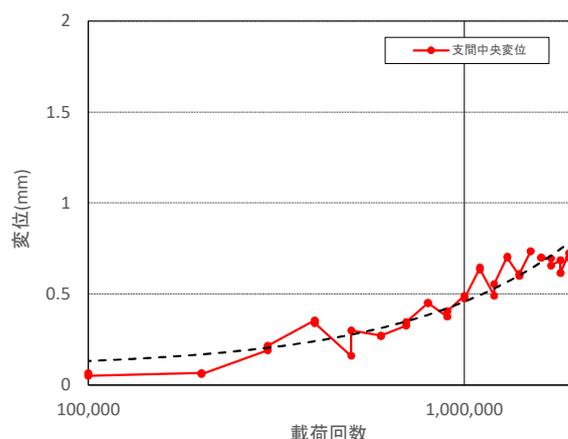


図-11 試験体 A 載荷回数と変位の関係

(2) 試験体A試験結果

試験体 A における RC 床版下面の各ステップ時のひびわれ発生状況を図-9 に示す。

床版下面には破線で示すように、200×200 mmのマス目を罫書している。発生したひびわれは、2方向ひびわれであり、格子の大きさは0.5～0.2 mであった。

図-10 に既往研究³⁾の輪荷重走行試験により得られたひびわれ図を示す。亀甲状に生じているひびわれは、本試験でも同様に発生していることがわかる。

図-11 に載荷回数と変位の関係を示す。試験体 A では2 サイクル目終了時となる200万回まで変位が徐々に増加する傾向を示し、0.7 mm程度となった。

疲労試験終了時におけるひびわれ幅は、試験体 B では最大2.2 mmであったのに対し、試験体 A1 で最大0.1 mm、であった。

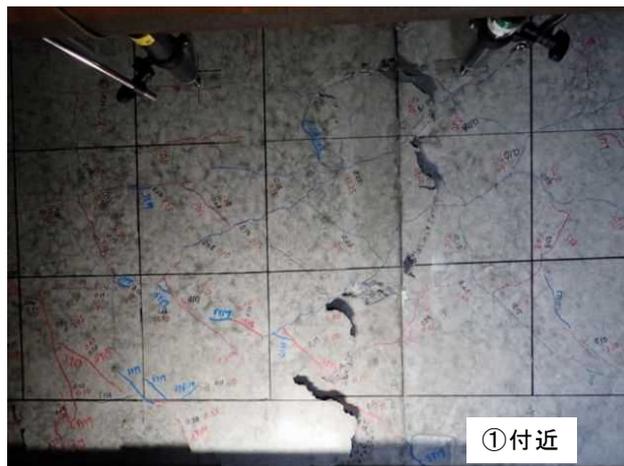
以上より、導入した疲労損傷は、実橋でみられる亀甲状のひびわれを概ね再現していると言える。試験体 B を含めた、全試験体の最終ひびわれ状況を写真-2 に示す。

4. まとめ

本研究では、合成2主桁試験体の3点曲げ載荷試験を行うにあたり、RC床版にひびわれが発生した状況を再現す

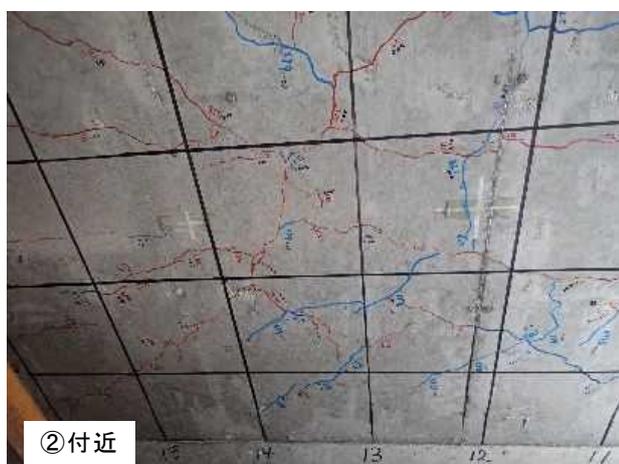


床版上面の押抜き破壊状況



①付近

(a) 試験体 B

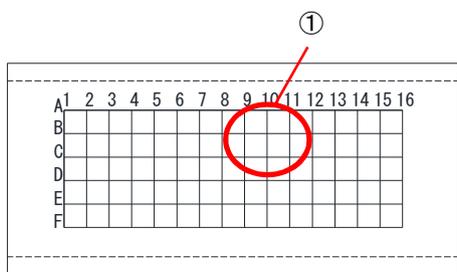


②付近

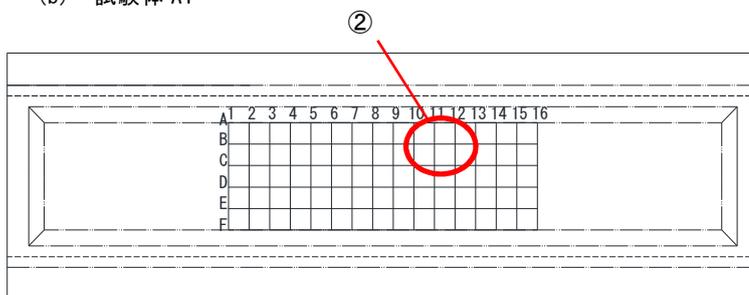


ひびわれ

(b) 試験体 A1



試験体 B



試験体 A1, A2

写真-2 試験体 B, A1 および A2 のひびわれ状況

るための、多点移動疲労試験を実施した。

本試験において、移動する荷点を2点とすることでひびわれを分散することができ、荷重を移動する荷点位置における床版の押抜きせん断耐力、ならびに押抜きせん断疲労耐力に着目し設定することで、RC床版の損傷度を制御することができた。これにより、疲労試験中にRC床版が押抜きせん断破壊することなく、既設橋で多く見られる床版下面に亀甲状のひびわれを再現することが確認できた。

今後、作製した試験体Aを用い、RC床版が損傷した状

態においても、RC床版と主桁の合成効果を期待できるかどうかを把握するため、試験体の3点曲げ荷重試験により、構造システムとしての限界状態の把握を行い、今後の合成桁橋設計の一助となることを目標としている。

5. 謝辞

本研究は早稲田大学、長岡技術科学大学のご指導の下実施しました。また、試験に際し、特に早稲田大学 佐藤靖彦教授、竹田京子氏にご指導およびご協力頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本橋梁建設協会：合成桁の設計例と解説～道示 平成29年11月対応～，2018.
- 2) 国土交通省道路局国道・技術課：橋梁定期点検要領，2019.
- 3) 岡田清，岡村宏一，岡田恵一郎，島田功：道路橋鉄筋コンクリート床版のひびわれ損傷と疲労性状，土木学会論文集報告集，第321号，pp.49-51，1982.
- 4) 土木学会：2017 制定コンクリート標準示方書 設計編，2017.
- 5) 大塚裕太，阿部忠，木田哲量，徐銘謙，澤野利章：RC床版の押抜きせん断耐力に関する実験研究，第39回日本大学生産工学部学術講演会講演概要，土木部会，No.2，2006.
- 6) 竹田京子，佐藤靖彦：支持条件と段階状漸増载荷の影響を考慮に入れた輪荷重走行試験における RC 床版の疲労寿命予測に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.2，2018.