RC床版の疲労余寿命に及ぼす 先行荷重履歴の影響

平塚 慶達¹・千田 峰生²・藤山 知加子³・前川 宏一⁴

¹正会員 ショーボンド建設株式会社 首都圏北陸支社技術部 (〒136-0076 東京都江東区南砂2-2-17)

E-mail: hiratsuka-y@sho-bond.co.jp

²正会員 ショーボンド建設株式会社 東京支店 (〒136-0076 東京都江東区南砂2-2-17)

E-mail: senda-m@sho-bond.co.jp

³正会員 法政大学准教授 デザイン工学部都市環境デザイン工学科

(〒162-0843 東京都新宿区市谷田町2-33)

E-mail: fujiyama@hosei.ac.jp

⁴フェロー 東京大学大学院教授 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail: maekawa@concrete.t.u-tokyo.ac.jp

過去の荷重履歴によって導入された損傷の程度から、道路橋RC床版の余寿命を推定する方法（例えばデータ同化）の成立性について考察を行った。過大な荷重や定点点疲労載荷を予め床版に与えた後に移動輪荷重を作用させ、疲労余寿命を実験的に求めるとともに、数値解析法の精度の検証を行った。実橋梁床版に作用する重量車両荷重160kNから220kNの範囲内で、かつ鋼材腐食やASRによる劣化が無い条件下では、先行荷重履歴や荷重作用位置を陽に考慮しなくても、現時点での荷重応答たわみから残存余寿命をほぼ推定できること、および直接経路積分型の疲労有限要素解析を用いても、余寿命推定が可能であることを示した。余寿命推定にマイナー則を用いる場合と比較し、たわみによる同定方法では、高荷重レベルまで含める場合に、余寿命推定に優れることを示した。

Key Words : RC bridge slab, fatigue, wheel moving load test, life prediction

1. はじめに

昭和40年代に道路橋RC床版の損傷事例が多数報告され、劣化機構の解明と補修補強対策に関する多くの研究が行われてきた。中でも移動荷重によって二方向ひび割れが発生・進展し、面外せん断で破壊に至るケースに対して多面的な研究が進められ、材料劣化との複合を含め、劣化機構が明らかになりつつある^{1,2)}。

既設床版の残存余寿命の推定は、橋梁の合理的な管理を行う上で必要不可欠であり、推定精度の向上が維持管理水準の向上に繋がる。現在、土木学会³⁾や国土交通省⁴⁾で示されている床版の損傷度は、第一次近似として外観目視で判定される。これを構造性能の定量評価に結び付けること、すなわち点検データと構造解析技術を同化すること(data assimilation)が次の課題となる。このデータ同化が工学的に成立するには、損傷に至る過去の載荷経路の如何に関わらず、現状の構造損傷データあるいは構造応答値から将来の構造性能が大凡、推定できることが必

要条件となる。損傷に至る様々な載荷経路と構造余寿命との関係性を実験・解析両面から明らかにすることが、データ同化の考え方を適用する上で必要である。

RC梁部材では、高サイクルせん断力のもとでのスターラップの挙動に着目した実験が上田・岡村によってなされ、せん断荷重履歴と疲労強度との関係が明らかにされている⁵⁾。先行荷重を受けた後のスターラップの平均ひずみの荷重応答（データ）が分かれば、これを修正トラス疲労モデルと同化することで、その後の疲労荷重に対応するせん断補強鉄筋のひずみを算定できる。土木学会コンクリート標準示方書によるせん断疲労設計は、この知見に立脚したものである。但し、梁部材のせん断疲労に関する当該知見は固定点疲労荷重が対象である。損傷モードが3次元的な広がりを持つRC床版で、しかも移動荷重下では、上記のデータ同化の考え方が同様に成立するかは不明である。前者は部材内での主応力軸方向がほぼ固定された状態で応力が増減する。後者は主応力軸が回転し、多方向に交差するひび割れ群が開閉する。

表-1 鉄筋の物性(MPa)

鉄筋径	材質	降伏点	引張強度
D10	SD295A	381	532
D13	SD345	417	582
D16	SD345	419	576

梁部材で成立するデータ同化の考え方がそのまま橋梁床版で成立する保証はない。

本論文では、高サイクル移動荷重を受ける道路橋RC床版を対象とし、既存RC床版の残存余寿命推定に際して、床版中央のたわみ応答の推移（実橋梁で実測可能）に着目することとした。さらにひび割れ発生から損傷の蓄積を経て破壊に至る過程を逐次追跡する3次元有限要素解析⁹⁾を用いて実験の再現を試み、荷重履歴をパラメータとした系統的分析から、床版の疲労寿命に対するデータ同化法の成立性について検討を行った。

2. 試験概要

(1) 試験体諸元

試験体は、昭和39年鋼道路橋設計示方書に従って設計されたスパン2,500mm、橋軸方向3,500mm、橋軸直角方向2,800mm、厚さ160mmのハンチ付きRC床版である。形状および配筋を図-1に示す。

D10鉄筋はSD295A、D13、D16鉄筋はSD345規格とした（表-1参照）。コンクリートの配合を表-2に示す。試験体の製作時は型枠を転用するため、早強セメントを用いた。乾燥収縮が床版の疲労寿命に及ぼす影響を考慮し、床版と同条件で養生した100×100×400mmの無筋コンクリート試験体を製作し、乾燥収縮量を載荷実験前に測定した。試験体は打設後2日まで型枠内に留め置き、脱型後はシート掛けをして気中養生とした。

(2) 試験方法

輪荷重移動載荷試験では、航空機用ゴムタイヤを装着した自走式の250kN疲労試験機を用いた（写真-1）。ゴムタイヤの接地面積は載荷荷重により異なるが、概ね315～346mm×346～403mmの範囲内である⁹⁾。輪荷重は、試験体の中央を橋軸方向全域に渡って走行することで与えた。移動速度は概ね2～4km/hr、3試験体を同時に載荷した。試験体両端に鋼製のレールを設置して試験機を折り返す構造のため、3体の試験条件に違いはない。

橋軸直角方向をスパン2,500mmで単純支持し、支持桁上面に丸鋼を設置した。床版下面の支持桁接触部にはt=9mmの鋼板をエポキシ樹脂で圧着した。橋軸方向は3,300mmの間隔で弾性支持した。試験体隅角部には浮き上がり防止のボルトを取り付けたが、回転は許容する構

図-1 RC床版の形状および配筋

表-2 コンクリートの配合

W/C	s/a	W	C	S	G	AE
%		kg/m ³				
60	47.3	170	283	862	985	2.83

写真-1 移動載荷試験

写真-2 定点載荷試験

表-3 検討ケース

試験体名	予備載荷	本載荷	概略図
22-S	静的 288kN +移動荷重 160kN(1,000 回)	220kN	
22-F	定点載荷 220kN(3 万回) +移動荷重 160kN(1,000 回)	220kN	
22-M	移動荷重 160kN(1,000 回)	220kN	
16-S	静的 230kN	160kN	
16-F	定点載荷 160kN(10 万回)	160kN	
16-M	— (基準載荷:全期間で一定載荷)	160kN	

造とした。

次節で述べる先行予備載荷では、500kN定点載荷試験機を輪荷重移動載荷試験機と併せて使用した（写真-2）。載荷ヘッドには形鋼を取り付け、載荷面積は315mm×350mmとした。H鋼の下に25mmの鋼板を取り付け、9mm (3mm×3枚)のゴムシートを設置した。1～3Hzの正弦波の集中荷重を床版の中央に与えた。

(3) 先行予備載荷と本載荷

データ同化による余寿命推定法の成立性を検討する上で、あえて実橋梁に作用する交通荷重とは極端に異なる先行荷重による疲労損傷履歴（疲労経路）を試験体に与え、その後に交通移動荷重下での残存余寿命を実験的に検討することとした（表-3）。移動荷重のみを受ける基準試験体は2体とする。

22-Mは実橋梁よりも著しく大きい移動荷重を受ける試験体であり、これを本論文では<基準試験体、220kNを基準荷重>と称す。異なる先行荷重を受ける22-S、22-Fと合わせて以下、<22シリーズ>と称す。22-Sはスラブ中央での定点静的載荷、22-Fは定点疲労繰り返し載荷によって予め損傷を与えたものである。22-Mは基準試験体であるが、後述の16シリーズと比較するため、160kN移動載荷試験の予備載荷を受ける。以上の予備載荷後に、一等橋の設計荷重よりも大きい220kNで移動載荷試験を実施した。本論文ではこれを本載荷と定義する。

16-Mは設計軸重を一輪に置き換えて疲労を受ける、もう一つの基準試験体(160kN)とし、16-S、16-Fと合わせて<16シリーズ>と呼ぶ。22シリーズと同様に、過大な静

的載荷および定点疲労載荷によって損傷を与えたものである。16-Mは予備載荷を受けない。前述の予備載荷の後に、本載荷は一等橋の設計軸重⁹⁾に相当する160kNで移動載荷実験を実施した。

(4) 載荷方法

22-S、16-Sの過大荷重による静的実験では、本載荷（各220kN、160kNの移動荷重）よりも大きい荷重を、床版中央に1回だけ静的に載荷した。22-F、16-Fの定点疲労載荷実験では、移動載荷実験と同等の荷重で1～3Hzで床版中央に繰り返し載荷した。22シリーズは先行予備載荷としての160kNでの移動載荷に加え、さらに大きい荷重(220kN)での移動疲労載荷実験を実施し、破壊までの経過を観察した。16シリーズは基準荷重レベルが22シリーズに比較して小さく、破壊まで載荷するには長期間を要する。本論文では16シリーズについてはたわみの増加パターン（あるいは活荷重剛性）に着目して構造損傷度を評価することとし、終局破壊までの載荷は行っていない。

3. たわみ応答の推移と疲労余寿命

(1) コンクリート材料特性

コンクリート打設後、表乾状態で乾燥収縮計測用の試験体にコンタクトゲージの測点を300mmピッチで取り付けた。コンクリートの収縮ひずみは材齢3日までは12時間ごと、材齢7日までは24時間ごと、その後は1～2週間程度ごとに計測した。材齢24時間の値を基準値として、

図-2に収縮ひずみを示した。乾燥収縮計測用の試験体の養生環境は、床版試験体のそれと同じである。1,200 μ 程度の収縮ひずみが確認されたものと600 μ 程度との二者に分かれた。これは使用骨材の体積安定性が影響したものと考えられる¹⁰が試験体ごとの骨材の詳細は不明である。体積表面積比を考慮して床版の平均収縮量に換算すると、800 μ 及び400 μ 相当となる。

コンクリートの圧縮強度、引張強度は载荷実験前と終了時にそれぞれ測定した。22-S, 22-Fについては、移動载荷実験実施前にも測定した。材齢と圧縮強度、引張強度の関係を図-3に示す。

(2) 高レベル荷重下(220kN)の疲労損傷

a) 先行予備载荷

図-4に本载荷に先立ち実施した、床版中央における定点点疲労载荷および静的载荷による荷重とたわみの関係を示す。たわみ値は所定の回数を繰り返した後、床版中央に静的に载荷してたわみ応答値を計測した。

$$D_n = D_{mn} - D_{R0} \quad (1)$$

ここに、 D_n は各回数のたわみ値、 D_{mn} は各回数のたわみの実測値、 D_{R0} は载荷前の初期たわみ値である。既往の床版载荷試験では、 D_{R0} を用いずに一回载荷した後の残留たわみ D_{R1} との差を総たわみ値とすることが多い。この場合、支持台と試験体との馴染みや試験装置の床上設置誤差等(bedding error)の影響がたわみ値に混入する度合いを小さくできる。しかし、残留たわみの絶対値の推移が明確でなくなる。また、本論文で用いた試験体では荷重の大きさや载荷方法が異なるため、各試験体での D_{R1} は異なり、相互比較の検討が困難である。そこで、 D_{R0} との差を総たわみとし、過去の荷重履歴の影響を総合的に評価することとした。

静的载荷実験、定点点疲労実験の初期载荷時には、約50kNごとに階段状に荷重を増加させ、その都度、荷重を固定した。その間にクリープたわみの増加が見られる。定点点疲労試験では除荷剛性が低下している様子も伺える。同時に残留たわみが増加している。

図-5(a)に160kN移動载荷実験の荷重-たわみ関係を、図-5(b)に160kN移動载荷実験時のたわみと回数について、総たわみを実線で、残留たわみを点線で示した。なお、定点点疲労を実施した試験機から移動载荷試験機へ試験体を移動する過程で試験体がさらに変形し、結果としてたわみの回復が見られた。クレーンによる釣り上げ時の重力の作用、再設置時の床面との取り扱いなどが考えられるが、定かではない。この回復量の計測は、試験体を定点点疲労試験機から撤去する前と移動载荷試験機へ設置した後の鉛直変位(光学水平儀)から求めた。残留たわみの表示には、この移動時の付加変形を含んでいる。した

図-2 乾燥収縮ひずみ

図-3(a) 材齢と圧縮強度

図-3(b) 材齢と引張強度

図-4 定点点・静的载荷時の荷重たわみ関係

がって、以後の評価にあたっては、主に試験体と装置等の馴染みが安定する領域での変位の変化量に着目することとした。なお、移動荷重160kNでの予備载荷が処女載

図-5(a) 160kN移動載荷時の荷重たわみ関係

図-5(b) 160kN移動載荷時の総たわみ (実線) と残留たわみ (点線)

図-6 220kN移動載荷時の総たわみ (実線) と残留たわみ (点線)

荷となる基準試験体22-Mでは試験体自体の移し替えは不要である。事実、総たわみ、残留たわみともに連続的に単調増加し、除荷剛性が漸次、低下していく様子が伺える。

定点載荷実験を実施した22-F、静的載荷実験を実施した22-Sの2体は、移動載荷試験を重ねるに従い、残留たわみの若干の減少(回復)が見られる。これは過去に受けた荷重履歴によって損傷していた部材が、移動載荷試験での繰り返し荷重を受けることにより、応力分担がスパン中央の載荷点直下から床版全体へと変わる荷重の再配分が起こったものと推定される。

図-7(a) 基準試験体へのシフト (シフト前)

図-7(b) 基準試験体へのシフト (シフト後)

b) 220kNによる本載荷 (異なる先行予備載荷後の挙動)

図-6に220kN移動載荷実験時のたわみと回数について、総たわみを実線で、残留たわみを点線で示した。22-Fは622回で、22-Mは1,173回で、22-Sは1,427回でそれぞれ、スパン中央のたわみが急増した。本論文ではこのたわみ急増時の走行回数をもって疲労寿命とした。

基準載荷レベル220kNの本載荷開始時の各試験体のたわみは、疲労経路が異なっても大差なかった。ひび割れの発生・進展・開口を経て、版の面外変位が急激に増加する。スパン中央のたわみ応答値は版全体の剛性に相当するので、床版の損傷度合いを平均的に代表するものでもある。基準載荷レベルに対応するたわみ応答のみから床版の疲労余寿命が推定できれば、過去の荷重履歴を紐解くことなく床版の余寿命が推定可能となる。この可能性について、以下に検討を進める。

過去に受けた先行荷重によって、なんらかの損傷を内在する既存床版が、その後に基準となる疲労荷重を受けた時の応答を図-7に模式的に示す(original)。これに対して、最初から基準疲労荷重を受け続けた場合の基準試験体の応答(Standard)と比較することとする。基準疲労荷重レベルに対応する既存床版の初期たわみは、基準床版の疲労履歴100回目のたわみに相当する。ここで既存床版

に関するたわみ-疲労回数曲線の横軸を100回目に横シフトさせ、これが基準試験体の疲労カーブと重なれば、既存床版の損傷は、標準試験体の100回目の損傷レベルに相当する（同化した）と考えられる。たわみ情報に基づく同一性が成立するのであれば、現時点でのたわみ情報（データ）と基準カーブ（寿命予測モデル）から余寿命を推定することができる（データとモデルとの同化）。以上の考え方のもとで、初期荷重時のたわみを基準試験体22-Mについて、計測間隔を線形補完すると22-Fは73回に、22-Sは9回に該当する。これらを図-7のようにシフトさせ、たわみと回数の関係を示したものが図-8である。疲労経路は大きく異なるものの、3ケースの疲労カーブはおおよそ一つのカーブに集約されることが判る。さらに移動荷重試験での疲労損傷の進行を確認するため、移動荷重試験開始時の残留たわみとの比較を行うこととした。

$$D_{nw} = D_{mn} - D_{Rw1} \quad (2)$$

ここに、 D_{nw} は各回数の移動荷重試験によるたわみ値、 D_{mn} は各回数のたわみの実測値、 D_{Rw1} は移動荷重試験1回目の残留たわみ値であり、160kN予備荷重の時の値を用いた。図-9に結果を示す。3試験体ともたわみの推移が類似している。大きな荷重作用下では、過去に受けた荷重履歴の影響は小さくなるとも言える。

初期たわみが不明な場合でも、現場で計測可能な活荷重たわみ（車両による荷重と応答変位）についても同様に検討した。

$$D_{Ln} = D_{mn} - D_{Rn} \quad (3)$$

ここに、 D_{Ln} は各回数の移動荷重試験による活荷重たわみ値、 D_{mn} は各回数のたわみの実測値、 D_{Rn} は各回数の残留たわみの実測値である。

図-10(a)に本荷重における活荷重たわみの挙動、図-10(b)にシフトした活荷重たわみの挙動を示す。活荷重たわみによる損傷レベルの同定では、22-Sは70回、22-Fは1,003回に相当する。総たわみの同定結果と比較すると、活荷重たわみの方が損傷レベルの同定では1桁程度大きめの値を示したが、3体とも同定後のたわみの挙動に大差なく、破壊時期もほぼ一致した。

c) ひび割れおよび破壊状況

図-11にひび割れの進展過程を示す。静的荷重試験と定荷重試験では放射状のひび割れが発生する。その後移動荷重を荷重すると、ひび割れの進展が放射状のひび割れで阻止される。但し、全てのケースの最終的な破壊モードは床版面外への押し抜きせん断破壊であった。

図-12はひび割れ密度の推移を示している。たわみの進展と同様に、回数軸上でシフトさせたひび割れ密度を図-12(b)に示す。先行予備荷重と本荷重では、ひび割れ

図-8 220kN荷重時のシフトさせた総たわみと残留たわみ

図-9 220kN移動荷重によるたわみの挙動

図-10(a) 220kN移動荷重時の活荷重たわみ

図-10(b) 220kN移動荷重時のシフトした活荷重たわみ

図-11 22シリーズ各段階でのひび割れ状況

図-12(a) 220kN移動載荷時のひび割れ密度

図-12(b) 220kN載荷時のシフトさせたひび割れ密度

の方向が大きく異なるため、一概にひび割れ密度を使って22-Mに適用させるのはではなく、総たわみ値から求めた回数を用いてシフトさせることとした。

たわみの進展とは異なり、ひび割れ密度の進展は、基準試験体に一致しているとは言えない。これは静的載荷や定点載荷によるひび割れ方向が、移動荷重によるひび割れの主たる方向と異なるためと考えられる。ひび割れ密度（方向性は考慮不可）のみで損傷レベルを同定することは、荷重パターンが異なる場合には実務的に精度

が落ちる。この場合、ひび割れ分布自体と数値解析とをデータ同化するPseudo-cracking法¹⁾が適切と考える。

(3) 一般的な交通に相当する荷重下の疲労損傷

a) 先行予備載荷

図-13に定点載荷および静的載荷による荷重とたわみの関係を示す。22シリーズと同様に、定点載荷試験では剛性の低下や残留たわみの増大が見られた。

図-13 定点・静的荷重時の荷重たわみ関係

図-15 160kN荷重時のシフトさせた総たわみと残留たわみ

図-14(a) 160kN移動荷重時の荷重たわみ関係

図-16 160kN移動荷重によるたわみの挙動

図-14(b) 160kN移動荷重時の総たわみと残留たわみ

b) 160kNの本荷重

図-14(a)に一般交通に対応する160kN移動荷重試験結果を、図-14(b)に基準移動荷重160kNの疲労回数と総たわみを実線で、残留たわみを点線で示す。16シリーズでも22シリーズと同様に、剛性の低下と残留たわみの増加が見られる。しかし、先行予備荷重での損傷の程度が異なるため、移動荷重試験が処女荷重となる16-Mと比べて、大きな差は出ていない。一方で総たわみ、残留たわみとも順調に増加する傾向が見られた。

22シリーズでは、定点荷重試験機から移動荷重試験機への試験体の移動に伴い、たわみの回復が見られたが、

16シリーズではたわみの回復量は微少であった。このため、残留たわみの回復値としては考慮しないこととした。過大な定点荷重を受けた22-F、22-S試験体では、その後の移動荷重に従って残留たわみが減少したが、16シリーズではこの傾向は見られなかった。予備荷重で受けた損傷が22シリーズと比べて小さく、相対的に本荷重で付加された非線形性が顕著であったと考えられる。

本研究の範囲では、16シリーズ3体の試験体は押し抜きせん断破壊までに至らなかった。そこで、活荷重たわみが引張側無視の理論値に達するまでの疲労回数を、たわみの増加傾向から外挿して判断した。移動荷重試験は途中23,194回に達した時に試験機の都合で100日程度試験を停止した。その後再開したが、試験再開にあたって、たわみの回復が見られたもののその理由は不明である。そこで試験再開時から23,194回のたわみに達するまでの回数は、走行回数として加算しないこととした。

図-15にシフトさせたたわみと回数の関係を示す。損傷状態の同定では、16-Fは1,231回、16-Sは112回に該当した。16-Fは他の2試験体に比較して、たわみは大きくなる傾向があった。予備荷重で与えた損傷が放射状のひび割れで移動荷重での損傷と異なり、移動荷重における初期たわみと損傷形態が異なるためと考えられる。

一方で荷重を継続するに従い、たわみの増加は16-Mと同様の傾向を示した。移動荷重初期には格子状のひび

割れが発生し損傷が進行するが、移動載荷を繰り返すことで新たなひび割れ発生がなくなり、16-Mに漸近した。このため、16-Fの場合は、初期たわみで疲労余寿命を推定した場合は、疲労余寿命を過大評価する危険性があり、このことは数値解析で疲労余寿命を推定する場合でも同様の傾向があることが示されている¹²⁾。しかし3体ともたわみの増加傾向は同じであり、1オーダー程度の誤差はあっても、概ね同時期で破壊すると想定される。

図-16は式(2)を用いて算出した移動載荷時のたわみの挙動である。過大荷重を受けた場合とは異なり、移動載

荷による疲労劣化過程は一致しているとはいえない。特に残留たわみでその傾向が大きい。しかし総たわみ応答の増加率は概ね同様の傾向を示しているため、初期の移動載荷による疲労の影響が軽微な段階ではひび割れの方方向の影響を受けるが、移動載荷の影響が大きくなると同じ劣化過程を辿っているものと推察される。シフトさせたたわみの挙動と合わせて考えれば、総たわみで劣化過程を同定することは、安全率を設定した上で可能であると考えられる。図-17(a)に式(3)を用いた活荷重たわみの挙動を、図-17(b)にシフトした活荷重たわみの挙動を

図-17(a) 160kN移動載荷時の活荷重たわみ

図-17(b) 160kN移動載荷時のシフトした活荷重たわみ

(a) 16-S 予備載荷(静的230kN)

(b) 16-F 予備載荷(定点N=100,000)

(a) 16-S 160kN 移動載荷 (N=10,000)

(b) 16-F 160kN 移動載荷 (N=10,000)

(c) 16-M 160kN 移動載荷 (N=10,000)

図-18 16シリーズ各段階でのひび割れ状況

示す。総たわみの挙動と同様に、16-Fは定点载荷の影響を受けてたわみが少し大きくなる傾向があったが、途中からのたわみの増加傾向は同じであった。

損傷状態の同定では16-Sは55回、16-Fは928回に相当した。22シリーズと異なり、総たわみの同定を行った場合とあまり差がなかった。以上から、22シリーズと合わせて本試験の範囲内では総たわみ、活荷重たわみのどちらを用いても、実用的に問題ない範囲内で損傷状態を同定できることが分かった。

c) ひび割れおよび破壊状況

図-18にひび割れの進展を示す。22シリーズと同様に静的载荷試験や定点载荷試験では放射状のひび割れが発生し、移動载荷試験でひび割れが新たに発生すると、ひび割れの進展が既存の放射状のひび割れで阻止された。移動载荷試験10,000回終了後は、すべての試験体で格子状のひび割れが発生している。16-Fは16-Mや16-Sと比較して多少ひび割れは多いが、各試験体同士での差は22シリーズと比較してあまり大きくない。

図-19はひび割れ密度の進展である。22シリーズとは異なり、ひび割れ密度の増加傾向はある程度一致している。予備载荷で与えた初期損傷の影響が22シリーズほど顕著でないためと考えられる。

d) 22シリーズと16-Mの比較

22シリーズの予備载荷は160kNで1,000回の移動载荷であるため、16-Mと比較が可能である。図-20に22シリーズ予備载荷と16-Mの総たわみの比較を示す。1,000回分のデータから22-Fの考察は難しいが、22-S、22-Mでは基準となる16-Mのたわみの増加とよく一致している。

図-21はひび割れ密度の比較である。処女载荷である22-Mが16-Mとよく一致するのにに対し、予備载荷を行った22-Fや22-Sのひび割れ密度は一致しない。

22シリーズ、16シリーズの結果と合わせて考えれば、過去の荷重履歴によらず、たわみの増加傾向は一致している。損傷を受けた既存床版の標準荷重に対する初期たわみが分かれば、将来の疲労余寿命予測が可能であることを示唆している。このことは、床版下面に発生しているひずみに着目し、数値解析で適用性を示した事例があるが^{12,13)}、極端に荷重履歴を変えた床版に対しても、その仮定がほぼ、成立することが確認された。試験体によって乾燥収縮量が大きく異なったが、基準载荷の疲労たわみ曲線が描ければ、収縮量が著しく異なる場合でも、その影響も含めて劣化過程をあらわした、同定することも示された。

一方、過去に著しく異なる荷重履歴を受けた場合には、ひび割れの方法と分布が移動荷重によって導入されるそれとは大きく異なる。そのため、ひび割れ密度のみから余寿命を推定することは困難と考えられる(データ同化の不成立)。ただし、16-Mと22-Mのようにひび割れの

図-19(a) 160kN移動载荷時のひび割れ密度

図-19(b) 基準载荷160kNにシフトさせたひび割れ密度

図-20 22シリーズ予備载荷と16-Mの総たわみの比較

図-21 22シリーズ予備载荷と16-Mのひび割れ密度の比較

分布状況が類似している場合には、ひび割れ密度から残存疲労余寿命を同定することは可能である¹⁴⁾。

4. 数値解析による試験結果の再現

(1) 概要

本章では第3章で検討した荷重履歴の異なる床版の疲労損傷過程について、たわみの挙動を数値解析で再現することを試みる。

ゴムタイヤ式の移動載荷試験の様に試験期間が長期にわたる場合、試験期間中にも乾燥収縮が進行する。乾燥収縮の影響は試験期間が長くなれば疲労寿命に影響を与えるため解析でも考慮する必要がある¹⁵⁾。本章では、試験に用いた荷重履歴の異なる床版について、試験期間中の乾燥収縮の影響を考慮し、コンクリートの打設から供用終了までの物性と応答の推移を時刻歴で追跡する3次元構造-材料応答連成解析システム(以下Linkモデルと称す)を用いることとした^{6,7)}。また試験期間中の乾燥収縮の影響を排除し、疲労単独の場合と比較することで、実橋へのデータ同化の適用性を検討する。

(2) 数値解析概要と解析モデル

本解析は水和反応-空隙構造-水分移動の三者の数理モデルを連結させた熱力学連成解析システム(DuCOM)と、複数の微細なひび割れの挙動を、有限体積上で平均化することにより、平均ひずみ-平均応力関係を規定し、ひずみ経路に沿って積分すること(直接経路積分型)で巨視的な全体挙動を再現でき、疲労荷重に対する適用性の検証を経ている非線形有限要素解析(COM3)を並列作動させ、微視的なレベルでの材料情報と巨視的な構造応答を共有して事象を追跡するMulti-scale modelを形成している。

解析に用いた要素モデルを図-22に示す。走行面で二分割した対称モデルとし、有限要素にはshear lockが回避できるenhanced strainモデルによる8節点固体要素を用いた。床版、主桁上フランジとも平板要素ではなく、3次元要素でモデル化した。

主桁上フランジは橋軸方向及び鉛直方向を固定とし、ウェブの微小な変形を再現するため、橋軸直角方向は拘束しないこととした。試験では輪荷重の走行で床版のたわみが大きくなり、段差が生じることで衝撃により床版が破壊しないように、横桁上に鋼板を入れて弾性支持とした。解析では支持材の接触部は鉛直方向のみ拘束することとした。これらの拘束条件は、主桁も含めてモデル化した詳細モデルと事前に比較し、図-22で示す床版単独の要素モデルでも同様の解析結果が得られることを事前に確認している。外気温20℃湿度60%として全期間

図-22 解析モデル (Unit:mm)

表-4 解析に用いた材料特性

材料	弾性係数 (N/mm ²)	特性値
コンクリート ^{*1}	2.1×10^4	圧縮強度 25.5N/mm ² 引張強度 1.8N/mm ²
鉄筋	2.1×10^5	降伏点 355.0N/mm ²

*1: COM3 単独解析のみに適用

セメントの種類	温度	湿度	骨材の最大収縮量
早強	20℃	60%	600μ(22-S, 22-F) 200μ(22-M, 16 シリーズ)

表-5 解析に用いた配筋

配筋	主鉄筋	配力筋
上 面	D16 ctc300 相当	D10 ctc300 相当
下 面	D16 ctc150 相当	D13 ctc300 相当

図-23 定点載荷試験のたわみと回数の関係

を通じて一定とした。

解析によるたわみ値は、所定の回数を移動載荷した後、一旦除荷し、床版中央に静的に荷重を作用させて得たものである¹⁶⁾。輪荷重の走行は、実際に試験で行った3km/hrで試験体を走行後、40秒間の停止時間を設けた。さらに、たわみの計測は10分程度で行うこととした。実際の試験機では空気式ゴムタイヤを用いているため、与える荷重レベルによって厳密には接地面積が若干異なるが、本論文では接地面積は一定とし、幅300mm×長さ450mmとした。床版試験体の解析に用いた材料特性値を

図-24(a) 22シリーズの本載荷のたわみと回数

図-24(b) 16シリーズの本載荷のたわみと回数

図-25 床版下面の主ひずみの分布

表-4, 配筋を表-5に示す。

(3) Linkモデルによるたわみの再現

図-23に定点載荷試験でのたわみの挙動を示す。試験結果(マーク)はおおむね良好に解析(曲線)で再現できている。22-Fの解析では約13,000回で試験時のたわみにまで達したため、定点載荷はその時点で終了し、移動載荷させることとした。

図-24(a)は22シリーズ、図-24(b)は16シリーズにおける本載荷での比較である。解析ではブリージングに伴う床版上側鉄筋に沿った脆弱層を考慮できておらず、試験体の確認はできていないものの、ここを起点とする水平ひび割れは実験より少なくなっているものと推定される。このため、高荷重を作用させた22シリーズでは、圧縮せん断破壊モードよりも面外せん断破壊モードが先行し、やや大きめの疲労寿命を示すが、500回程度までの範囲ではいずれの試験体も、概ね実験結果と同じようなたわみの増加傾向を示した。変形した試験体をクレーンで釣り上げ、疲労試験フロアに再設置した段階で、残留たわみの戻り量が2.65mm, 2.55mmとなった(水平儀レベル測量での値)。解析では瞬時に残留変形を維持したまま境界条件のみが変更されるので、試験体運搬中での残留

変位の戻りは発生しない。本シリーズの試験体は残留変形が他のケースと比較して大きく、構造剛性も低下しているため、試験体の移動と再設置に伴う付加変形、フロアとの馴染みなどの要因が無視できない可能性がある。この点については、今後の課題としたい。

先行荷重履歴によって与えられた損傷レベルが中程度の16シリーズは、初期たわみに差がみられるが、これは試験体と支持桁とのなじみによる影響と考えられ、たわみの変化が安定する100回以降、試験結果と同様の結果を得た。たわみの増加傾向から考えられる解析での疲労寿命は、試験値とおおよそ整合していると考えられる。

図-25に移動載荷前の床版下面の主ひずみ分布を示す。放射状のひび割れが静的載荷や定点載荷で入っている様子が伺える。これらは試験でのひび割れ発生状況とほぼ一致している(図-10, 図-18も参照)。藤山らは実測されたひび割れの位置と幅からひび割れひずみを求め、この実測データと疲労数値解析とをデータ同化することで、以後の疲労余寿命をおおよそ予測できることを提示している¹²⁾。

本論文では、変位データと疲労数値解析によるデータ同化手法も同様に成立するか否かを検討することとした。ひび割れ情報に基づくデータ同化手法では、床版下面全

図-26(a) 22シリーズのシフトさせた総たわみ

図-27(a) 22-Mの移動載荷試験でのたわみの推移

図-26(b) 16シリーズのシフトさせた総たわみ

図-27(b) 22-Sの移動載荷試験でのたわみの推移

体のひび割れを過不足なく入力することが求められる。一方、活荷重変位は特定の一点のみのデータで事足りるため、変位に基づくデータ同化手法によって余寿命推定の手間が大幅に短縮できる可能性も期待できる。第3章と同様の方法を用いて、種々の疲労経路を有するケースのたわみ計算値を初期たわみとして余寿命を推定する方法の適合性を以下に確認する。

図-26に示すように、余寿命曲線は基準の寿命曲線にほぼ一致している。22シリーズの実験における最終の破壊形態は曲げせん断破壊であったが、中小の損傷レベルでは、先行する荷重履歴が異なっても、初期たわみで現在の損傷状態を把握できれば、おおよそ将来の寿命予測が可能であることが解析からも示唆された。

16Fと16Sによる先行荷重によって展開されるひび割れの分布は、移動荷重によるひび割れの方向や分布が大きく異なる。このような場合には、ひび割れデータに基づくデータ同化手法が合理的であることは論を待たない。実際、集中荷重を疲労経路に持つ16Fや16Sの結果を、前章の方法でグラフを16Mにシフトさせると、疲労荷重初期の適合性が落ちていることがわかる。しかし、荷重回数を増やしていくごとに、疲労によるたわみ増加傾向は、基準曲線を与える16Mにほぼ一致してくることがわかる。これは移動荷重に伴うひび割れパターンが

図-27(c) 22-Fの移動載荷試験でのたわみの推移

図-27(d) 16シリーズの移動載荷試験でのたわみの推移

卓越し、先行载荷による放射状のひび割れ分布の影響が薄れてきた結果と推定される。変位に基づくデータ同化手法も、ひび割れデータに基づく同化法と同様に、実用上の成立性が期待できることが解析で示された。

(4) Linkモデルによる移動载荷試験のたわみの挙動

移動载荷試験で受ける損傷について、式(2)を用いて求めたたわみの挙動を図-27に示す。22シリーズではたわみの増加傾向は同じであるが、解析による疲労寿命を実験の破壊たわみと同じと仮定した場合、解析は実験と比較して疲労寿命をやや過大評価する。部材のせん断耐力の実験での再現性はおよそ変動係数で10%であることから、移動荷重を240kNに変動させた解析結果も併せて示した。16シリーズでは载荷荷重レベルは低く、実験再現性は一般に高いと推定される。やや疲労寿命は過大評価する傾向があるものの、試験と同様のたわみの挙動を示した。以上のことから、移動载荷によって受ける損傷は疲労経路によらず、同様の傾向を示すことが解析からも示されている。

活荷重たわみを用いて同様に損傷状態を同定することを試みる。図-28(a)は22シリーズの、図-28(b)は16シリーズの活荷重たわみの挙動である。载荷初期から破壊近傍にいたるまでの推移の予測は、全たわみを用いるデータ同化(前節の(3))と比較しても、全体的にデータと解析予測の適合性が向上しているのがわかる。ただし、解析における疲労破壊直前での活荷重たわみの増加傾向は、実験のそれと比較して総じて緩慢である。本論文で用いた疲労解析システムを実測の活荷重たわみデータと同化して余寿命を推定する場合には、破壊の判定基準の取り方は今後の課題とするが、疲労余寿命の対数値に対して1桁程度の安全率をかけておくのが適当と考えられる。

(5) 乾燥収縮がたわみの挙動に与える影響

一般的な実橋の床版は、養生後に舗装や地覆、高欄が施工されるため、打設完了から供用開始までには長期間にわたる。室内試験では試験期間中に乾燥が継続するが、実橋では乾燥収縮がある程度進行した後に供用される。そこで一定の初期収縮を与えた後、疲労単独のたわみの推移を構造解析(COM3)で求めた。コンクリートの圧縮強度は 25.5N/mm^2 、引張強度 1.8N/mm^2 とし、たわみは式(1)の定義に従った。

図-29が各シリーズの疲労損傷単独だけでシフトさせたたわみの比較である。载荷に伴って進行する乾燥収縮の影響を排除すると、16シリーズではたわみの挙動が基準とした16-Mとほぼ一致し、適合性がさらに向上する結果となった(図-26も参照)。一方で22シリーズでは急激に破壊が進行した。これは文献12)で示された、低レベルの損傷を受けた版では疲労余寿命の推定は可能で

図-28(a) 22シリーズの活荷重たわみの挙動

図-28(b) 16シリーズの活荷重たわみの挙動

図-29(a) 疲労損傷のシフトさせた総たわみ(22シリーズ)

図-29(b) 疲労損傷のシフトさせた総たわみ(16シリーズ)

あるが、損傷が著しい場合は、推定剛性の違いから損傷レベルを精度よく表現できない、という結論にも一致している。高レベルの損傷を受けた場合には、より鋭敏に疲労破壊にいたる回数が特定される。16-Fや16-Sのひび割れの方向性が異なることによる初期たわみの増加は、解析でも再現できた。一方で疲労载荷中にも乾燥収縮の影響によりひび割れが進展し、たわみの挙動が異なることが解析から示された。この点については別途報告を予定している。

比較のため、鉄筋が腐食した床版で、シフトさせたたわみの比較を図-30に示す。鉄筋腐食による腐食ゲルの生成から腐食ひび割れのモデル化は既往の研究で確認されている¹⁷⁾。解析モデルは鉄筋位置を考慮できる要素分割とし、床版全体が鉄筋腐食により層状の破壊が生じ、疲労寿命が低下することを防ぐようにモデル化した¹⁸⁾。腐食量は20mgで一定とし、引張圧縮側双方の鉄筋が床版全体で腐食している最も単純かつ厳しい条件を考察の対象とした。一般的な荷重と定義した160kNと比較しても、たわみの挙動は一致しない。腐食モデルでは鉄筋腐食に伴って、層状のひび割れが鉄筋に沿って平面方向に発生するため、移動荷重で受ける損傷とは異なり、結果としてたわみの挙動が異なったためである。これは既往の研究成果から示された結果であり、腐食した床版のたわみの挙動の詳細には、今後の研究成果が待たれる。

以上から、損傷レベルが著しく大きい場合、鉄筋腐食などの極端に損傷形態が異なる場合を除いては、たわみによる損傷レベルの同定が可能であることが示された。

5. 荷重作用位置が異なることによる疲労寿命への影響

(1) 概要

移動载荷試験では、床版中央に単独の輪荷重を走行させることで、疲労寿命を評価している。一方で実橋では、常に床版中央に輪荷重が作用するわけではない。本章では実橋を対象とするT荷重の作用位置を念頭におき、荷重作用位置が異なる場合の疲労荷重下のたわみの進行と荷重履歴との関連について、さらに議論を進める。

(2) 数値解析モデル

T荷重1組の作用を受ける前提で床版スパンを3.5mとし、昭和39年鋼道路橋設計示方書に従い、解析対象の床版の諸元を決めた。荷重の载荷位置はジャンボジェットタイヤを用いた移動载荷試験機のモデル化(Center)としてスパン中央に橋軸方向450mm×橋軸直角方向300mm、T荷重のモデル化(Wheel)としてスパン中央から均等な位置に橋軸方向200mm×橋軸直角方向500mmで1組配置するもの

図-30 腐食した床版のたわみの挙動

図-31 荷重配置の概要 (Unit:mm)

図-32 解析モデル (Unit:mm)

表-6 解析に用いた配筋

配筋	主鉄筋	配力筋
上面	D16 ctc250 相当	D10 ctc300 相当
下面	D16 ctc125 相当	D13 ctc300 相当

と仮定した(図-31)．橋軸直角方向の中央で2分割した対称モデルとした．解析に用いた要素モデルを図-32に示す．材料特性値は表-4で示したものをを用い、配筋は表-6に示すとおりとした．

(3) 荷重作用位置の影響

一般的な荷重レベルを160kNに設定し、移動載荷試験と同様にスパン中央を通行させる場合と、T荷重のように一定の間隔を保って160kN(片側80kN×2)のT荷重を作用させる場合とを比較すると、前者が床版に対して厳しい．そこで、T荷重で移動載荷試験の160kN相当のたわみとなるように、初期たわみが概ね一致するようにT荷重レベルを設定し、その後のたわみの挙動を比較した．220kN相当のT荷重は、160kN相当の移動荷重と初期たわみに対して等価であることを確認した．これら3ケースのたわみの挙動を図-33に示す．

初期たわみを一致させたCenter / 160kNとWheel / 220kNは概ね同じたわみの挙動を示し、疲労寿命の差も小さい．作用位置が異なっても、スパン中央のたわみに着目したデータ同化で、およそ疲労余寿命が推定できると期待される．そこで、作用位置を途中から変更する場合に対しても、データ同定の成立性について検討を進めた．

予備載荷として、中央で160kNを10,000回載荷した後T荷重220kNを載荷した場合、T荷重220kNを10,000回載荷した状態から中央で160kN載荷した場合の二者について、載荷位置変更後の初期たわみで同定した損傷状態から、その後のたわみの挙動を比較した．図-34に結果を示す．作用位置が異なることで大きな損傷を受ける位置が変わり、やや長めの疲労寿命を示している．しかし、疲労余寿命で1オーダーも変わらず、これは疲労解析の再現性の範囲内に収まっているとみてよい．以上から、走行ラインの変動を特に考慮することなく、床版中央のたわみデータに着目したデータ同定の可能性が示唆された．

6. 数値解析によるマイナー則との比較

(1) 概要

道路橋床版の疲労状態を表す手法として、載荷荷重が異なる場合マイナーの線形累計被害則が適用される¹⁹⁾．本手法は過去に受けてきたすべての載荷荷重が明らかな場合には、現在の損傷レベルから将来の疲労寿命の予測が可能となるが、一般的な道路橋の床版は過去の荷重履歴を知ることは不可能に近い．マイナー則は鋼部材のような単一の材料レベルでの適用性は確認されているが²⁰⁾、RCのような複合部材や、せん断の方向性が変わるような荷重を受け、その荷重レベルが大きく異なる床版に適

図-33 載荷位置の違いによるたわみの比較

図-34(a) 作用位置を変更した疲労寿命(中央→T荷重)

図-34(b) 作用位置を変更した疲労寿命(T荷重→中央)

用可能かは不明確である．

本章では、4章でたわみによるデータ同化で適用性を検討した非線形数値疲労解析を用いて、部材レベルでのマイナー則の適用性について考察を進める．部材レベルでの適用性を確認する目的で、定点載荷荷重を受けた場合についてもあわせて確認する．

(2) 数値解析

解析対象は図-22で示した昭和39年道路橋示方書で設計したモデルを用いることとし、コンクリート強度等は表-4による．実橋の床版では、打設後に十分な期間をおいてから供用されるため、初期に乾燥収縮として400μを

与えて、載荷時の乾燥収縮の進行は考慮しないこととした。

解析における破壊は、移動載荷試験での22-Mでの破壊時のたわみ $D_n \geq 15.98\text{mm}$ を基準とし、他の荷重の破壊たわみは、これを荷重の比率を乗ずることで定義することとした。

$$D_{fp} = D_n \cdot \frac{P}{P_0} \quad (4)$$

ここに、 D_{fp} は各荷重の破壊時のたわみ値、 D_n は220kNの破壊時のたわみ値で15.98mm、 P は荷重、 P_0 は今回基準とした荷重で220kNである。押し抜きせん断荷重は、559kNである。

(3) 低レベルの荷重で損傷を受けた床版

荷重は計算時間の関係から、設計荷重よりも大きい、移動荷重は160kN、220kN、250kN、280kNの4種類として、定荷重は250kN、280kN、350kNの3種類として、基準となるたわみ曲線を描いた。

移動載荷について、マイナー則でいう破壊回数までの1/3程度に相当する160kNで20万回の損傷を予備載荷として与え、その後荷重レベルを変更してたわみの挙動を確認した。定荷重についても同様に破壊までの40%程度に相当する250kNで44万回の損傷を予備載荷で与え、その後の荷重レベルを変更した。基準となるたわみの挙動を点線で、荷重変更後のたわみの挙動を実線とし、破壊時のたわみを×印として、結果を図-35に示す。移動載荷を受けた場合のたわみで同定した場合を(a)に、マイナー則で同定した場合を(b)に示す。また定荷重を受けた場合のたわみでの同定とマイナー則の比較を(c)(d)に示している。

予備載荷の荷重が低い場合、初期たわみを一致させて破壊回数を推定する場合でも、マイナー則を用いて破壊回数を推定する場合でも疲労寿命に大きな差はなかった。但し280kNのように荷重レベルが著しく異なる場合、1/3程度の損傷を受けていても、初期たわみはマイナー則で示される280kNの基準のたわみ曲線の1/3レベルよりも大幅に小さめになり、その後たわみの進行が大きいこととなる。一方で初期たわみから損傷状態を同定する手法では、その後のたわみの挙動は基準となるたわみの挙動と損傷過程は同じである。これらは低い荷重レベルで損傷を受けた場合、その後の大きな荷重での損傷が支配的となって疲労寿命が実質的に決まり、必ずしもマイナー則で表されるような損傷レベルに達していないことを示唆している。

(4) 高レベルの荷重で損傷を受けた床版

移動載荷について、マイナー則でいう破壊回数までの10%程度に該当する250kNで1,000回の損傷を予備載荷と

図-35(a) 低レベルの移動載荷による損傷(たわみで同定)

図-35(b) 低レベルの移動載荷による損傷(マイナー則)

図-35(c) 低レベルの定荷重による損傷(たわみで同定)

図-35(d) 低レベルの定荷重による損傷(マイナー則)

して与えた。定点載荷について、破壊の40%相当の350kNで1,300回載荷し、同様にその後のたわみの挙動を確認した。結果を図-36に示す。同定方法与載荷パターンは図-35で示したものと同一である。

予備載荷の荷重が大きくなると、たわみで同定させた場合、その後のたわみの挙動は同様の履歴を辿るが、マイナー則を適用した場合、特に荷重レベルが小さいものでは一致しない。高レベルの移動荷重履歴を受けた床版は、その後の荷重レベルを下げて160kNで載荷した場合、残存寿命の90%は有しておらず、早期に破壊する。約4万回程度で破壊たわみに達することとなり、160kNの単一荷重を載荷した場合の実に6.6%でしかない。S-N曲線の傾きが松井による $m=12.76$ であるとして¹⁹⁾、250kNでの予備載荷を160kNに換算すると、約30万回に相当することとなるが、160kNの破壊回数の60万回には及ばない。したがって高レベル荷重を受けた床版について、マイナー則で評価することは危険側の評価を与えることとなる。これは定点載荷でも同様である。350kNで40%程度の損傷を受けた場合、その後の荷重レベルを250kNにしても2.7%の疲労寿命しか有していない。

本論文で検討した数値計算の範囲ではマイナー則は厳密には成立しない結果となった。そのため、高レベルの損傷を受けた床版に対して、S-N曲線の傾きを用いて低レベルの損傷状態に等価に同定することができない。また一般的に試験期間を短縮する目的で用いられる、階段載荷のように荷重を徐々に上げていく方法では、高レベルでの損傷が支配的となっていて、低レベルでの損傷を精度良く評価できていないことが、あわせて示された。床版では、マイナー則による損傷レベルの推定は、高荷重レベルまで含めると、危険側の評価を与える恐れがある。これに対して、たわみによるデータ同化は高荷重レベルまで含めて相対的に安全側の余寿命推定を与えることが示された。

(5) 階段状漸増載荷の妥当性の検証

移動載荷試験によって疲労寿命を評価する場合、低レベルの荷重から所定の回数ごとに段階的に荷重を増加させる、いわゆる階段載荷によることが多い²⁰⁾。本論文では床版の疲労寿命はマイナー則に従わず、低レベルの荷重の影響よりも高レベルの荷重が支配的となることを述べた。このため、階段状漸増載荷で疲労寿命を推定する場合の妥当性を、数値計算で考察することとした。

本論文で検証に用いた漸増載荷荷重は100kNから開始することとし、2万回ごとに20kN増加させることとする。荷重の載荷パターンを図-37に示す。等価繰返し載荷回数 N_{eq} の算出にあたっては、S-N曲線の傾きは松井による $m=12.76$ を用いることとし¹⁹⁾、式(5)を用いて $P_0=100\text{kN}$ での載荷回数に換算した。

図-36(a) 高レベルの移動載荷による損傷(たわみで同定)

図-36(b) 高レベルの移動載荷による損傷(マイナー則)

図-36(c) 高レベルの定点載荷による損傷(たわみで同定)

図-36(d) 高レベルの定点載荷による損傷(マイナー則)

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^m \cdot n_i \quad (5)$$

一方、単一の荷重で移動載荷させた場合についても式(5)から100kNの等価繰返し載荷回数に換算し、疲労寿命を比較した。たわみ値については、載荷荷重で得られた値をそのまま用いて式(4)により破壊の判定とすることとし、等価繰返し回数との関係を図-38に示す。破壊までの等価繰返し回数は、最も少ない160kNで 2.4×10^8 、最も多い220kNで 1.6×10^9 と約1桁程度の差があった。一方で階段状漸増載荷での破壊時の等価繰返し回数は 1.1×10^9 であり、最大値と最小値の間に収まった。階段状漸増載荷でも単一荷重で載荷した場合でも、破壊までの等価繰返し回数については、疲労寿命という観点からは大きな差はなく、本論文で検証した範囲内では、階段状載荷と一定荷重との算出寿命の差を定量的に示すことができ、一般的に用いられる階段状載荷は疲労寿命推定を大きく過大過小評価するものではないことが示された。

7. まとめ

本論文で得られた知見を取りまとめると、以下のとおりである。

- (1) 異なる荷重履歴を与えたRC床版に移動輪荷重を繰返し作用させ、残存する疲労余寿命を実験的に求めた。その結果、床版スパン中央における、疲労荷重に対応するたわみ（あるいは剛性）値と基準載荷試験におけるたわみを組み合わせることで、残存疲労余寿命を推定できることを確認した。すなわち、過去の荷重履歴の如何に関わらず、損傷レベルによるたわみの推移が既知であれば、既往床版の損傷度を荷重応答たわみで代表させることができることを示した（たわみデータ同化法の成立性）。
- (2) 過去の荷重履歴によるひび割れの方角と分布が異なるような場合には、床版全面に対するひび割れ密度を用いて残存する疲労余寿命を同定することは困難であることを、実験と解析から示した。すなわち、ひび割れ密度によるデータ同化法は成立し難いことが分かった。
- (3) 荷重履歴の大きく異なる実験結果を用いて、疲労経路を厳密に追跡する既往の3次元非線形応答解析法の適用性を検証した。数値解析においても、床版中央で計測される疲労荷重に対応する総たわみで損傷度を代表させることができることを確認した。

図-37 階段状荷重漸増載荷方法

図-38 階段載荷と単一載荷によるたわみの挙動

- (4) 荷重作用位置が異なる場合でも、床版スパン中央のたわみに着目すれば、疲労寿命は推定可能であることを、数値解析から確認した。疲労荷重履歴の途中で作用位置を変えた場合でも、実用上問題ない誤差範囲内で疲労損傷が同定できることを解析から示した。
- (5) 仮に過去の荷重履歴が把握できたとしても、マイナー則では荷重の大きさが異なる場合には、疲労寿命を危険側に評価することがある。たわみによる同定では、高荷重レベルまで含めて疲労余寿命推定がおおよそ可能であり、一定の適用性が認められた。

謝辞：疲労試験の実施にあたり、法政大学藤山研究室から協力頂いた。大阪大学名誉教授・松井繁之博士、高知工科大学・岡村甫博士、日本大学・岩城一郎博士から、損傷機構に関して貴重な助言を賜った。ここに記して感謝の意を表します。本研究は科学研究費補助金(23226011)の一部を受けて行ったものである。

参考文献

- 1) 前島拓, 子田康弘, 土屋智史, 岩城一郎: 塩害による鉄筋腐食が道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響, 土木学会論文集 E2, Vol. 70, No. 2, pp. 208-225, 2014.
- 2) 前島拓, 子田康弘, 岩城一郎, 梶尾聡, 岸良竜: 疲労と ASR の相互作用が道路橋 RC 床版の耐疲労性に

- 及ぼす影響, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-132, pp. 263-264, 2015.
- 3) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】, 2008.
- 4) 国土交通省, 橋梁定期点検要領(案), 2004.
- 5) 上田多門, 岡村甫: 疲労荷重下のスターラップの挙動, コンクリート工学, Vol. 19, No. 5, 1981.
- 6) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H.: *Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete*, Spon Press, 2003.
- 7) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: *Multi-Scale Modeling of Structural Concrete*, Taylor & Francis, London, 2008.
- 8) (社)土木学会鋼構造委員会, 道路橋床版設計の合理化と耐久性の向上, 2004.
- 9) 多田宏行: 橋梁技術の変遷, 鹿島出版会, 2000.1.
- 10) 後藤幸正, 藤原忠司: コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材の影響, 土木学会論文集, No. 286, pp. 125-137, 1979.
- 11) Fujiyama, C., Tang, X. J., Maekawa, K. and An, X. H.: Pseudo-cracking approach to fatigue life assessment of RC bridge decks in service, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 11, pp. 7-21, 2013.
- 12) Fujiyama, C., Tang, X. J., Shang, F., An, X. H. and Maekawa, K.: Fatigue life assessment of existing bridge decks based on visual inspection data and numerical simulation, *Journal of Management*, Serial Number: SMS12-5765, 2012.
- 13) Tang, X. J., Fujiyama, C., Shang, F., Maekawa, K. and An, X. H.: Residual fatigue life assessment of damaged RC bridge slabs based on observed cracking damage: A quantitative discussion, *Proc. of 1st Int. Conf. on Performance-based and Life-cycle Structure Engineering*, Hong Kong, pp. 1947-1954, December, 2012.
- 14) 松井繁之, 前田幸雄: 道路橋 RC 床版の劣化度判定法の一提案, 土木学会論文集, Vol. 374, pp. 419-426, 1986.
- 15) Hiratsuka, Y. and Maekawa, K.: The influence of the drying shrinkage on the fatigue life of RC slabs, *Ageing of Materials & Structures*, pp. 362-369, 2014.
- 16) 藤山知加子, 商峰, 櫻井信彰, 前川宏一: 直接経路積分法に基づく鋼コンクリート合成床版の疲労寿命推定と損傷モード, 土木学会論文集 A, Vol. 66, No. 1, pp. 106-116, 2010.
- 17) Toongoenthong, K. and Maekawa, K.: Simulation of coupled corrosive product formation, migration into crack and propagation in reinforced concrete sections, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 3, No. 2, pp. 253-265, 2005.6
- 18) 平塚慶達, 藤山知加子, 前川宏一: 経路依存性を考慮した数値解析に基づく鋼板接着補強床版の疲労寿命分析, 道路橋床版シンポジウム講演論文集, Vol. 8, pp. 19-24, 2014.
- 19) 松井繁之: 道路橋床版 設計・施工と維持管理, 森北出版, 2007.
- 20) 日本道路協会: 鋼道路橋疲労設計指針, 2002.
- 21) 中谷昌一, 内田賢一, 西川和廣, 神田昌幸, 宮崎和彦, 川間重一, 松尾伸二: 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, 2002.

(2015. 11. 16 受付)

FATIGUE-BASED STRUCTURAL BEHAVIOR OF RC BRIDGE SLABS WITH DIFFERENT LOADING HISTORIES

Yoshisato HIRATSUKA, Mineo SENDA, Chikako FUJIYAMA
and Koichi MAEKAWA

This paper discusses the path dependency of high cycle fatigue behaviors of RC bridge slabs under various loading histories in use of laboratory experiments and numerical behavioral simulation.

A prototype standard RC slab and another two specimens, which were initially loaded statically in advance, were prepared for the subsequent wheel-type loading. All three of them were tested under a moving load of 160kN. Observed is the independency of the progressive mid-span deflection on the loading histories. Furthermore, the same trend is rather observed at a level of 220kN as well with another set of specimens of exactly the same shape and dimension.

The observed phenomenon in the experiments was successfully simulated by direct path-integral 3D nonlinear FE analysis considering the varying boundary conditions from the preliminary loading state to the main one to introduce the high cycle fatigue damages.