

第7回 床版の疲労耐久性評価

講師：後藤 俊吾*1・長谷 俊彦*2

1. はじめに

道路橋床版更新における基礎知識について、第7回では取り替える床版の疲労耐久性評価について説明します。

東、中、西日本高速道路株式会社（以下、「NEXCO」）の床版取替工事で取り替える床版の形式は、施工条件、品質および維持管理性を考慮して、プレキャストプレストレストコンクリート床版（以下、「PC床版」）を用いることを標準とし、プレキャストPC床版相互の接合構造はRCループ継手（写真-1）を標準としています。

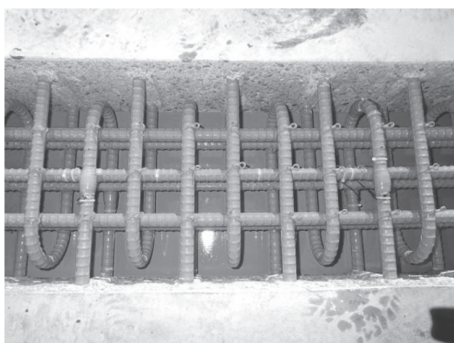


写真-1 RCループ継手

しかし、現場の施工条件の制約によっては各製造会社が新たに開発している機械式定着併用重ね継手などの接合構造を採用する場合があります。接合構造の疲労耐久性は、各社さまざまな手法や条件で評価が行われていたのが実状でした。そこで、NEXCOでは令和元年7月に「構造物施工管理要領」、「NEXCO試験方法」および「設計要領第二集橋梁保全編」を改定し、輪荷重走行試験による疲労耐久性の確認と性能証明書の提出を義務付けました。

本稿では、床版相互の接合部の疲労耐久性評価手法として、輪荷重走行試験とNEXCOで設定した試験方法、試験における荷重条件の設定に関して説明いたします。

2. 輪荷重走行試験とは

鋼道路橋の鉄筋コンクリート床版（以下、「RC床版」）の疲労による劣化は、昭和40年代に問題となり、室内試

験および実橋調査等により損傷メカニズムの研究が行われましたが、従来行われてきた定点荷重による疲労試験では、床版の疲労劣化メカニズムを忠実に再現することができませんでした。定点荷重に対して、実橋の床版は輪荷重の走行による荷重の移動繰返しによって生じる鉛直方向の交番せん断力や床版面内のねじりモーメントによる交番せん断力の繰返し作用によるひび割れの進展があり、それを再現できる疲労試験として、輪荷重走行試験が考案され、輪荷重走行試験機が開発されました¹⁾。輪荷重走行試験機は、その構造から、フライホイールの回転力を往復運動に変換し鉄輪を介して荷重を行うクランク式試験機と移動台車に駆動装置を搭載しゴムタイヤを介して荷重を行う自走式試験機に大別されます。この輪荷重走行試験機を用いることにより、床版の疲労劣化メカニズムを再現し、実際の挙動に即した床版の疲労耐久性評価が可能となりました。(株)高速道路総合技術研究所が保有するクランク式の試験機を写真-2に示します。

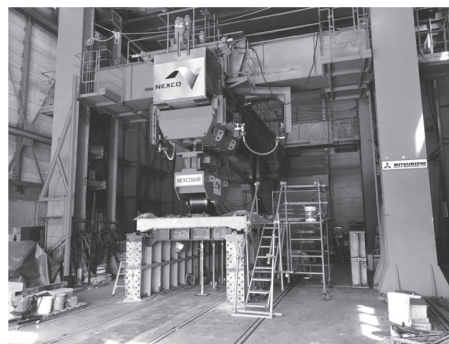


写真-2 輪荷重走行試験機

3. NEXCOで規定する輪荷重走行試験方法

NEXCOで規定するプレキャストPC床版相互の接合部の性能照査は、NEXCO試験方法の試験法442またはそれと同等以上と認められる輪荷重走行試験方法により、道路橋示方書の設計供用期間²⁾と同様の耐用年数100年相当の載荷荷重および載荷回数³⁾の走行後、漏水試験を実施して漏水がないことを確認するものとしています。ここでは、NEXCO試験法442に示す輪荷重走行試験方法の各規定の

* Shungo GOTO：中日本高速道路(株) 技術・建設本部 環境・技術企画部 構造技術課 係長

* Toshihiko NAGATANI：(株)高速道路総合技術研究所 道路研究部 橋梁研究室 室長

設定根拠について解説します。

3.1 供試体諸元の設定

供試体の床版厚さは、NEXCOで標準としているRCループ継手を使用した場合の最小床版厚³⁾として220mmとしました。

床版支間長は、床版厚220mmに対して、既往の研究⁴⁾におけるPC床版の押抜きせん断破壊面の角度から、図-1のように載荷板端部の床版上面からPC鋼材下面までを36°、それより下を10°としたときにハンチにひび割れがかからない支間長として2.5mを設定しました³⁾。なお、床版取替えを行う橋梁の床版支間長は、日本道路公団の「標準桁配置および床版標準設計」(昭和45年4月の内部通知から平成2年7月設計要領巻末資料まで規定されている(平成10年4月改定で削除))から2.0m～3.8mと想定され、想定される支間長の範囲での設定としました。

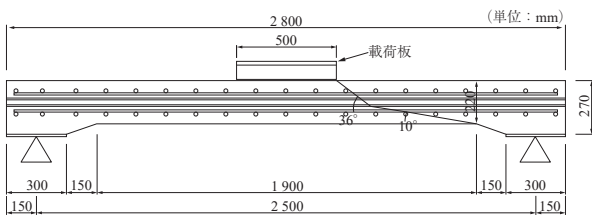


図 - 1 既往の研究におけるPC床版の破壊面の角度

橋軸直角方向の幅は、大きくなると国内の各研究機関が所有する輪荷重走行試験機で試験可能な試験機がかぎられてしまうため、床版支間長2.5mから最小となる2.8mで設定しました。

橋軸方向長さは、RCループ継手を使用する場合の4300mm以上(橋軸方向長さプレキャストPC床版1985mm×2枚+接合部330mm=4300mm)とし、既往の輪荷重走行試験で実績の多い4500mmとしました。

3.2 供試体の設計および使用材料

供試体の設計は、床版取替えにおける多主桁の荷重状態を再現するため、道路橋示方書⁵⁾に規定される床版の設計曲げモーメントにより、単純版の支間2.5mと同等の発生曲げモーメントとなる連続版の支間3.2mとして設計しました。

鉄筋は表-1の配筋によるものとし、プレキャストPC床版部では防錆鉄筋の使用はとくに定めないものとしました。しかし、NEXCOの設計要領では接合部に使用する鉄筋はエポキシ樹脂塗装鉄筋を使用することを基本としているため、接合部に連続する鉄筋はエポキシ樹脂塗装鉄筋を使用する必要があることに留意してください。

表 - 1 供試体の配筋

| | | |
|--------|-------------|----------------|
| 橋軸直角方向 | D13 ctc 125 | 上段 16本, 下段 16本 |
| 橋軸方向 | D19 ctc 150 | 上段 19本, 下段 19本 |

PC鋼材はφ23mmのSBPR B種(ポストテンション式)を使用し、橋軸直角方向に床版厚の中央に225mm～300mm間隔で1段配置としました。通常、床版取替えで

使用するプレキャストPC床版では、PC鋼より線SWPR7BL 1S15.2をプレテンション方式で使用していますが、プレテンション方式の場合、部材の端部より65φ区間(1S15.2の場合988mm)でプレストレスが二次放物線で分布することになる⁶⁾ため、定着長を考慮して供試体幅を設定する必要があります。よって、ポストテンション方式を採用することにより、供試体幅を極力抑えることとしました。また、PC鋼より線の場合、セット量により有効プレストレスのばらつきが大きくなることが懸念されるため、プレストレス量の調整がしやすいPC鋼棒SBPR φ23をネジ式定着して使用することとしました。

コンクリートは、JIS A 5308(レディーミクストコンクリート)とし、配合条件は表-2のとおりとしました。

表 - 2 コンクリートの配合条件

| 材齢28日における圧縮強度(N/mm ²) | 粗骨材の最大寸法(mm) | スランブ(cm) | 空気量(%) | セメントの種類 |
|-----------------------------------|--------------|----------|-----------|--------------|
| 50 | 20 または25 | 8 ± 2.5 | 4.5 ± 1.5 | 早強ポルトランドセメント |

3.3 供試体支持条件および荷重方法の設定

供試体の支持条件は、写真-3に示すように、床版支間2.5mで単純支持し、橋軸方向の端部は弾性支持としました。この弾性支持方法は、供試体が無限に長いとみなせる長さの床版と同様のたわみとなるような剛性をもつH型鋼材を計算により求めて、それを端横梁として設置するものとしました。供試体は、支点部に回転拘束を与えないように、端部の浮上りを防止する治具を用いて支持桁に固定するものとしました。

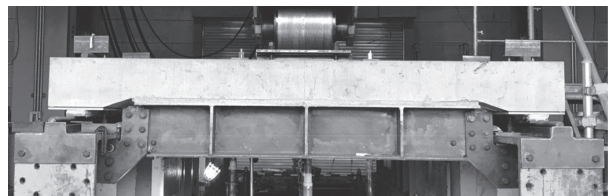


写真 - 3 供試体の支持状況

荷重方法は、支間中央に500mm×200mmの荷重ブロックを一行に並べた軌道上を、幅500mmの鉄輪、または幅500mmでゴムタイヤ2輪が往復荷重するものとしました。また、接合部には膨張コンクリートを用いることを標準としており、水浸時に膨張反応が継続する場合はとの知見もあることから、材料の違いなどによる影響を排除するため、試験時は乾燥状態で荷重を行うものとし、水張りは実施しないこととしました。

NEXCO試験法442に記載の供試体例を図-2に示します。

3.4 要求性能の設定

床版からの漏水が発生すると、桁の腐食などの悪影響を及ぼすこと、接合部界面が比較的脆弱な箇所となりエフロレッセンスが発生している事例があることなどから、接合

部および接合部界面に貫通ひび割れが生じないことを要求性能に設定することとしました。また、貫通ひび割れや接合部界面の開きを簡易的に判断するため、漏水試験を実施し、漏水がないことを判断基準としました。漏水試験状況の例を写真 - 4 に示します。供試体中央の 1.0 m × 2.0 m の範囲にスポンジなどで枠を作り、中を水で満たして 5 mm 程度の水深として 6 時間放置後、床版下面からの漏水の有無を確認することとしました。なお、写真のような水の着色は必須ではありません。

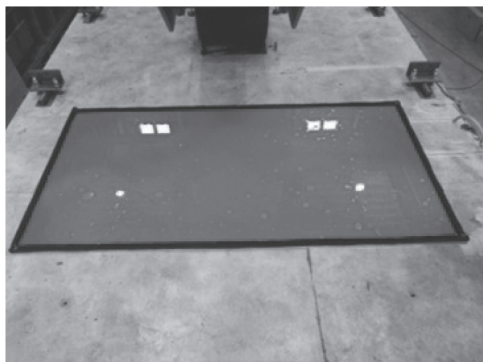


写真 - 4 漏水試験

4. 荷重条件の設定

輪荷重走行試験の荷重条件の設定として、耐用年数 100 年相当の載荷荷重および載荷回数を決める必要があります。ここでは、NEXCO 設計要領第二集橋梁保全編の解説に記載している耐用年数 100 年相当の載荷回数および載荷回数例の設定について解説します。

4.1 高速道路の 1 年間の輪荷重の等価繰返し回数

耐用年数 100 年相当の載荷荷重および載荷回数を設定するため、まず、PC 床版の高速道路の 1 年間の輪荷重の等価繰返し回数を算出します。

1 年間の等価繰返し回数 N_{eq} は、高速道路の軸重計データのうち、最新の 2005 年でもっとも平均軸重の重い東名高速道路日本平における軸重計データから換算することとしました。ここで、タイヤのバースト荷重を超過するような誤計測と考えられる結果は排除しています。使用した軸重計データを図 - 3 に示します。この時、等価換算の基本輪荷重（載荷荷重） P_0 は、荷重が小さいと試験期間が長期間に及ぶことが懸念されるため、国内の試験機の載荷能力も考慮して 2005 年東名高速道路日本平軸重計で計測されたデータの最大値（中心軸重 53.5 tf / 2 輪 = 26.75 tf / 輪）と同等程度の 250 kN に設定しました。また、換算に必要な PC 床版の S - N 曲線は、筆者らが式 (I) を

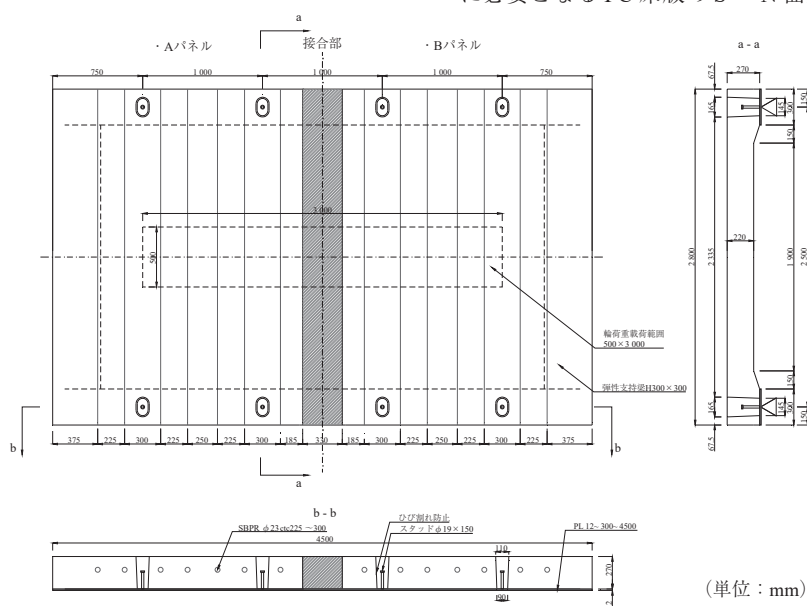


図 - 2 供試体例 (プレキャスト PC 床版)

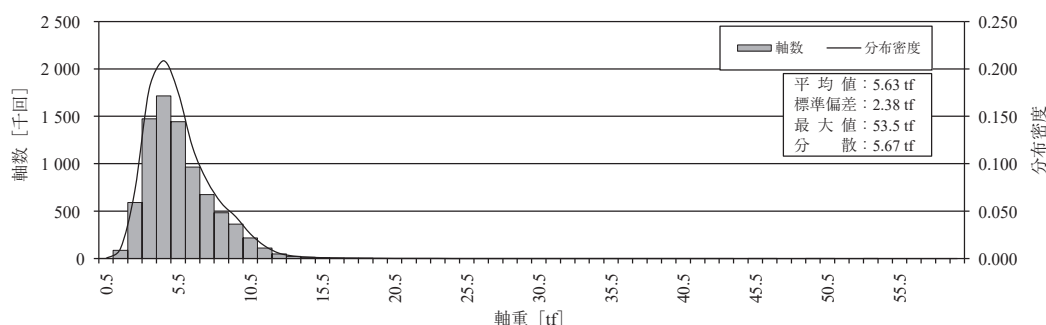


図 - 3 2005 年東名高速道路日本平の軸重分布および分布密度 ⁷⁾

提案しています⁷⁾。

$$\log\left(\frac{P}{P_{sx}}\right) = -0.13455 \log N + \log 5.65 \quad (1)$$

ここに、 P ：作用輪荷重、 P_{sx} ：梁状化した床版の押抜きせん断耐力、 N ：破壊までの繰返し回数（回）

1年間の等価繰返し回数 N_{eq} は、式(2)で算出できます³⁾。

$$N_{eq} = C_2 N_T a \quad (2)$$

ここに、

$$C_2 = \int_0^{P_{max}} \left(\frac{P}{P_0}\right)^m p(P) dP$$

C_2 ：輪荷重の大きさの換算係数、 N_T ：1年間の通行回数、 m ：S-N曲線の傾きの逆数の絶対値（PC床版の7.43⁷⁾を使用）、 P ：任意の輪荷重、 P_0 ：基本輪荷重（2005年東名高速道路日本平軸重計データの最大輪荷重と同等程度の250kNとした）、 $p(P)$ ：輪荷重に関する確率密度関数、 a ：軸重計計測データの一部欠測に伴う実交通量への補正率（交通量計測設備による計測台数/軸重計による計測台数 = 1.15）

$$N_{eq} = 5.986 \times 10^{-6} \times 8\,226\,096 \times 1.15 \\ = 56.6 \text{ 回/年}$$

4.2 水の影響を考慮した等価繰返し回数の設定

松井らの研究により、RC床版では雨水が床版に浸透することによって疲労劣化が加速することが知られています⁸⁾。一方、PC床版では同様の研究はほとんど行われていないため知見がありませんが、RC床版の劣化促進現象は、コンクリートのひび割れ内への浸透水がひび割れ面の摩耗を促進させ、セメントペーストと骨材に分離させていることで発生しているものであることから、コンクリートを主材料とするPC床版についても水張状態ではRC床版と同等程度に疲労劣化が促進されるものと仮定します。試験は乾燥状態で載荷を行うこととしたため、水張りの影響による疲労促進倍率を設定する必要があります。

水張りの影響による疲労促進倍率の設定にあたっては、松井らの研究¹⁾で提案されているRC床版における乾燥状態と水張状態のS-N曲線の倍率を用いて設定することとしました。RC床版の乾燥状態のS-N曲線は式(3)で表され、水張状態のS-N曲線は式(4)が提案されています。式(3)および式(4)のS-N曲線を図-4に示します。

$$\log\left(\frac{P}{P_{sx}}\right) = -0.07835 \log N + \log 1.52 \quad (3)$$

$$\log\left(\frac{P}{P_{sx}}\right) = -0.07835 \log N + \log 1.23 \quad (4)$$

$P/P_{sx} = 0.50$ と仮定した時、乾燥状態では $N = 1\,450\,330$ 回、水張状態では $N = 97\,349$ 回となり、水張りの影響による疲労促進倍率は、 $97\,349 \text{ 回} / 1\,450\,330 \text{ 回} = \text{約 } 1/15$ となります。

4.1で算出した高速道路における250kN/輪の1年間の等価繰返し回数に、この水張りの影響による疲労促進倍率を考慮し、100年相当の載荷回数を算出すると、56.6回/

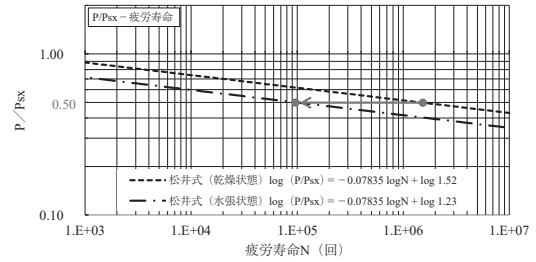


図-4 RC床版の乾燥状態・水張状態のS-N曲線

年×15倍×100年 = 84900回となります。この載荷回数を切上げた250kN/輪×10万回をPC床版の耐用年数100年相当の疲労耐久性の性能を評価する載荷荷重および載荷回数として設定しました。

なお、この載荷条件は、PC床版の疲労耐久性やPC床版における水張りの影響の今後の研究動向により見直しを行う可能性が否定できないため、あくまで「耐用年数100年相当の載荷回数及び載荷回数例」としてNEXCO設計要領第二集橋梁保全編に例示することに留めています。

5. おわりに

NEXCOではこれまで紹介してきた試験法442による試験実施と、性能の照査証明として、製造会社や公的機関またはこれに準じる機関が実施する性能照査結果をとりまとめた性能証明書を(株)高速道路総合技術研究所に提出することを規定しています。また、試験法制定以前に行った試験の取扱いについては、それぞれ異なる試験条件で輪荷重走行試験が行われているため、規定している試験法442の試験条件と同等以上の負荷条件である根拠を添付することとしておりますので、本講座の設定根拠等をご参考いただければ幸いです。

参考文献

- 1) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，森北出版，2007.10.
- 2) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編，pp.12-13，2017.11.
- 3) 長尾千瑛，広瀬 剛：プレキャストPC床版継手の疲労耐久性照査試験，プレストレストコンクリート工学会第26回シンポジウム論文集，pp.189-192，2017.9.
- 4) 長谷俊彦，上東 泰，安松敏雄：長支間PC床版の移動輪荷重走行疲労試験による耐久性評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.259-264，1999.
- 5) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋・鋼部材編，pp.292-297，2017.11.
- 6) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編，pp.101-102，2017.11.
- 7) 後藤俊吾，長谷俊彦，本間淳史，平野勝彦：PC床版の疲労耐久性評価方法の提案，構造工学論文集，Vol.66A，pp.762-773，2020.3.
- 8) 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，pp.627-632，1987.

【2021年1月6日受付】