輪荷重走行疲労実験における RC 床版の水平ひび割れの発生時期の推定

日大生産工(院) 佐藤大輝

日大生産工 阿部忠 日大

日大生産工(院) 木内彬喬

1. はじめに

道路橋 RC 床版は、下面に疲労による 2 方向ひび 割れの発生や、床版内部に水平ひび割れが発生して いる. 下面に発生する 2 方向ひび割れの発生は目視 による点検は可能であるが、床版内部に発生する水 平ひび割れの発生は、目視点検および非破壊検査に おいても発見しにくい損傷である.また、床版の維 持管理を実施するためにも水平ひび割れの発生時期 の推定する必要がある. そこで本研究は、モデル化 した RC 床版供試体の走行面に小径の孔を穿孔し, 輪荷重走行疲労実験の過程で孔に水を満水し、減水 深さから水平ひび割れの発生状況を検証する.また、 破壊時における RC 床版の走行面に小径コアを穿孔 し、蛍光色を混入させた浸透性接着剤を注入後、外 周をコアドリルで柱状サンプル1)を採取し、水平ひび 割れ発生位置の診断を行い、橋梁点検において RC 床版の水平ひび割れ発生の時期と健全度との整合性 を示した.

2. 道路橋RC床版の水平ひび割れ発生状況

高速道路の RC 床版の水平ひび割れ発生状況を写 真-1に示す.この RC 床版は,疲労損傷と凍結防止 剤の散布による塩害,さらに凍害の複合劣化により, 供用開始後 38 年で撤去された.写真-1(1)は,撤去 後の切断面の水平ひび割れが発生状況であり,雨水 や融解水が侵入し,土砂化となっている.また,写 真-1(2)は,圧縮鉄筋および引張鉄筋配置付近に水 平ひび割れが発生している.さらに,長期間に渡り, 凍結防止剤や融雪材の散布による塩害で,鉄筋に錆 びが発生し,この影響による水平ひび割れも発生し ている.

以上より, RC 床版の長寿命化を図るためにも水平 ひび割れの発生時期の推定が必要であると考える.

3. RC床版供試体の使用材料および寸法

(1) 使用材料
道路橋 RC 床版に使用するコンク
リートの設計基準強度は 1980 年以降の道路橋示方書
・同解説²⁾(以下,道示とする)では 24N/mm²以上
と改定され現在に至っている.そこで,RC 床版供試



(1) 水平ひび割れと土砂化
(2) 水平ひび割れ
写真-1 高速道路RC床版の損傷状況

表-1 コンクリートおよび鉄筋の材料特性値

	コンクリート	鉄筋(SD295A)		
供試体	圧縮強度	降伏強度	引張強度	弾性係数
	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(kN/mm^2)
RC-30	29.8	201	526	200
RC-35	35.3	364	520	200



図-1 供試体寸法および水平ひび割れ計測位置

体に用いるコンクリートの配合条件は,設計基準強 度を24N/mm² と30N/mm²の2種類とする.よって, 供試体に用いるコンクリートには,普通ポルトラン ドセメントと5mm以下の砕砂および5mm ~20mm の砕石(JIS-A5005)を使用する.また,鉄筋にはSD295A のD13を用いた.ここで,RC床版供試体のコンクリ ートおよび鉄筋の材料特性値を表-1に示す.なお, 圧縮強度は,実験時における圧縮試験の結果であり, 鉄筋はミルシートによる値である.

Estimation of Occurrence Timing of Horizontal Crack in RC Slab by Fatigue Test Under Running Wheel Loads

Daiki SATO, Tadashi ABE and Akitaka KIUCHI

1 - 29



サンプル採取位置

(2) 供試体寸法および鉄筋の配置 本供試体の 寸法は、道示の規定に準拠し、設計条件は支間 2.4m、B 活荷重、大型車両の1日1方向の計画交通量2000台 以上として設計し、3/5 モデルとする. ここで、3/5 モデルとした供試体寸法および鉄筋の配置を図-1に 示す.

RC 床版供試体の寸法は, 全長は 1,600mm, 支間 1.400mm, 床版厚 150mm の等方性版である. 鉄筋は 複鉄筋配置とし、引張側の軸直角方向および軸方向 に D13 を 120mm 間隔で配置した. その有効高さは, それぞれ 125mm, 112mm である. また, 圧縮側には 引張鉄筋量の 1/2 を配置した.

4. 水平ひび割れの測定方法および検証方法

(1) 水平ひび割れの測定法 水平ひび割れの発 生状況の検証位置を図ー1に併記する.

輪荷重走行疲労実験における水平ひび割れは図-1 に示す軸方向の走行範囲の曲げ領域、すなわち軸方 向の両支点からの距離 L からせん断スパン比 a = 2.5d を除いた曲げ領域の範囲とし、中央から 200mm ごとに計5箇所とする.

水平ひび割れ発生の測定法は、水平ひび割れ付近、 すなわち圧縮鉄筋配置付近まで φ12mm の孔をドリル で穿孔し、水を満水し、ひび割れ発生に伴う減水深 さを計測するものとする. ここで, 簡易的な水平ひ び割れの測定方法を図-2に示す. 図-2①に示すよ うに、φ12mm, 圧縮鉄筋位置, 深さ 25mm まで孔を 削孔する.本実験では、たわみの増加ごと、孔に水 を満水し(図-22),5分後に減水深さを計測する(図 -2(3).

次に、水平ひび割れ発生の計測は、輪荷重走行疲 労実験の過程で、たわみが 2.5mm, 3.0mm, 3.5mm, の時点で実施し、3.6mmから4.1mmまでは1mmごと、 その後は4.5mmの時点で行うものとする.

(2) 破壊後の水平ひび割れの検証 破壊時の水 平ひび割れの検証は,輪荷重走行疲労実験において, 供試体が破壊した後に柱状サンプル」を採取し、検証 する.ここで、柱状サンプルを採取する位置を図-3 に示す. 図-3より, 輪荷重走行範囲の軸方向中央付 近から 200mm 間隔で 7 カ所で診断する. 本来試験体 を軸方向に切断することで水平ひび割れの発生状況 が確認できる.しかし、維持管理においては床版の 切断は不可能である、そこで阿部らは、小口径コア ドリル試験機を用いて RC 床版のコンクリート内部 を診断する「コンクリート構造部材の柱状サンプル 採取方法」¹が提案されている. この手法を用いるこ とで床版内部に発生した水平ひび割れが適切に検証 される.

そこで、本実験においてもこの手法を用いて検証 する.ここで、柱状サンプルによる診断手順を図-4 に示す. 図-4に示すように、コアドリル装置を用い て、ドリル径 φ12.5mm で深さ 140mm までコアを穿孔 する (図-4(1), 2). コアが穿孔した後孔内を清掃 し(図-43), 蛍光塗料を混合した浸透性接着剤を 注入し (図-44), 水平ひび割れに浸透させる. こ の浸透性接着剤はひび割れ幅 0.05mm まで浸透するこ とが確認されている3).8時間の養生後、水平ひび割 れを一体化した外周, ∞25mm のコアを採取し(図-4 (5), これを柱状サンプル(図-46)として、ブラ ックライトにより水平ひび割れの発生状況を写真撮 影する.

5. 輪荷重走行疲労実験および等価走行回数

(1) 実験方法 輪荷重走行疲労実験では, RC 床 版の中央から両支点方向に 450mm(走行範囲: 900mm)の範囲に輪荷重(幅 300mm)を供試体が破 壊するまで繰り返し走行させる. 走行面に板厚の異 なる供試体 RC-30 には 3.2mm, RC-35 には 4.5mm の鋼 板を敷いて輪荷重走行疲労実験を行った.輪荷重走 行疲労実験におけるたわみの計測は、輪荷重走行 1,

表-2 実験走行回数および等価走行回数

供試体	走行回数	荷重100kN
DC 20	実験走行回数	98,850
KC-30	等価走行回数	6,409,941
DC 25	実験走行回数	190,300
KC-35	等価走行回数	12,336,901

10, 100, 1,000, 5,000 回および 5,000 回以降は 5,000 回 走行ごとにたわみを計測する.また,輪荷重走行後 に最大たわみがそれぞれの計測位置に達した後,実 験を中断して,各孔に水を満水し,減水深さを計測 する.

(2) 等価走行回数 本実験に用いる供試体は道示に準拠し、3/5 モデルとした供試体を用いて、一定な荷重 100kN で破壊するまで輪荷重走行疲労実験を実施した.よって、基準荷重と実験荷重が異なることから等価走行回数 Neq を算出して耐疲労性を評価する.等価走行回数の算定式は式(1)として与えられる.なお、式(1)における基準荷重 P は設計活荷重の 3/5 に安全率 1.2 を考慮した 72kN として等価走行回数を 算出する.SN 曲線の傾きの逆数 m の絶対値には松井らが提案する 12.7 を適用する^{4,5}.

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

ここで, N_{eq}: 等価走行回数(回), P_i: 載荷荷重(kN), P: 基準荷重, n_i: 実験走行回数(回), m: S-N 曲線 の傾きの逆数(= 12.7)

6. 実験結果および考察

(1) 等価走行回数 本実験に用いた RC 床版供試 体の実験走行回数および等価走行回数を表-2に示 す.

RC 床版供試体の破壊時の等価走行回数 Neq は,供 試体 RC-30 が 6.409×10⁶, RC-35 は 12.336×10⁶ 回である. 圧縮強度 35N/mm² の供試体は 1.9 倍の等価走行回数 となった.よって,圧縮強度を高くすることで等価 走行回数は大幅に向上している.

(2) たわみと等価走行回数
たわみと等価走行
回数の関係を図-5に示す.図-5には、疲労損傷に
よる補修・補強の推定して、たわみが床版支間 L の
1/400⁵⁾、すなわち 3.5mm の位置も併記した.

コンクリートの圧縮強度 29.8N/mm² の供試体 RC-30 の荷重 100kN で 1 走行後の初期たわみは 1.09mm であ る. たわみが 3.5mm に達した時点の等価走行回数は 3.566×10⁶ 回である. その後の走行を繰り返すことで たわみが増加し,破壊荷重時では 7.39mm である.

次に、コンクリートの圧縮強度 35.3N/mm² の供試 体 RC-35 の初期たわみは 0.94mm であり、圧縮強度が 高いことから供試体 RC-30 を下まわっている.たわ みが 3.5mm に達した付近の等価走行回数はそれぞれ 6.484×10⁶ 回である.その後、走行を繰り返すことで たわみも徐々に増加している.最大たわみは 9.0mm である.なお、両供試体ともにたわみが床版支間 L の 1/400 に達した時点で、打音法による水平ひび割れ の発生状況の診断を行った結果、水平ひび割れの発 生の確認はできない.

(3) 水平ひび割れの検証 輪荷重走行疲労実験 の過程で,水平ひび割れの検証結果を図ー6に示す.

供試体 RC-30 は、図-1 に示す計測点①~⑤の、 それぞれ φl2mm, 深さ 25mm の孔に、線香を挿入し、 水を満水した後の 5 分後に水の減水深さを測定した 結果を図-6に示した.

供試体 RC-30 は図-6(1)に示すように, たわみが 2.5mm の時点の減水深さの平均は 1.82mm である. た わみが床版支間 L の 1/400, すなわち 3.5mm の時点の 減水の深さの平均が 3.75mm である. たわみが 3.7mm 付近から減水の深さの平均が 5.06mm であり, やや多 くなっている.

たわみが 3.8mm の時点の減水深さの平均は 7.04mm であり、この時点のたわみは床版支間 L の 1/368 であ る.とくに、中央の①の減水深さは 9.3mm であり、 水平ひび割れに浸透している.たわみが 4.1mm の時 点では計点①、②、③では減水深さが 22mm ~ 24mm





に達し、水平ひび割れに浸透していると考えられる.

次に,供試体 RC-35 は図-6(2)に示すように,た わみが 2.5mm での減水深さの平均が 1.73mm である. たわみが 3.5mm の時点の減水深さの平均が 3.8mm で ある. たわみが 3.8mm での減水深さの平均は 7.0mm であり,この付近から減水深さも多くなり,水平ひ び割れに浸透していると考えられる. この時点のた わみは床版支間 L の 1/368 である. たわみが 4.1mm での計測点①,②,③の減水の平均は 20mm となり, 減水深さが多くなっている. たわみが 4.5mm では, 各計測点で 23mm 以上となっている.

以上より、本実験の範囲内では、たわみが床版支間Lの1/370付近から漏水が発生することから、この付近が水平ひび割れの発生時期と推定できる.

(4) 柱状サンプルによる水平ひび割れ診断 小径 コアドリルを用いて,採取した柱状サンプルの結果 を写真-3に示す.この柱状サンプルは,ブラックラ イトを用いての撮影した結果である.

供試体 RC-30 の実験終了後のひび割れ状況は写真 -3(1)に示すように、微細な水平ひび割れ発生位置 に、浸透性接着剤が浸透している.写真-3(1),A,G は端部の計測点であり、水平ひび割れの発生は確認 されない.写真-3(1),B,Fは端部から300mm付近 の損傷状況であり、上縁から65mm付近に発生して いる.これはせん断領域付近であり、斜めひび割れ 発生位置と同位置である.次に、写真-3(1),C,D,E は曲げ領域であり、圧縮鉄筋付近に水平ひび割れが 発生している.また、水の減水深さから確認しても 図-6(1)に示す④、⑤の位置および①、②、③の減 水量からも一致する.

次に,供試体 RC-35 のひび割れ状況を写真-3(2) に示す.一部のひび割れに樹脂が浸透されない位置 についてはひび割れを加筆した.

写真-3(2), A, G は,端部から 100mm 付近の計 測点であり,床版上面から 95mm 付近にひび割れが 発生している.この位置はせん断領域であることか ら,斜めひび割れとほぼ一致している.**写真-3(2)**, B は、端部から 300mm 付近の損傷状況であり、上縁か ら 55mm 付近に斜めひび割れと上縁から 35mm 付近、 圧縮鉄筋の下縁に水平ひび割れが発生している.F の位置も上縁から 65mm 付近に斜めひび割れ、25mm 付近に水平ひび割れが発生している.写真-3(2),C, D,Eは、鉄筋配置付近に水平ひび割れが発生してい る.曲げ領域の範囲の圧縮鉄筋付近に水平ひび割れ が発生している位置とラップしている.また、水の 減水深さから確認しても図-6(2)に示す①から⑤の 範囲には水平ひび割れが発生していることから減水 深さが多くなっているのと一致している.

以上より,破壊後に φ12.5mm の小径コアに蛍光塗 料を混入した浸透性接着剤を注入させ、その後 φ25mm のドリルで採取した柱状サンプルにおいても、接着 剤の効果により、水平ひび割れが接着され、柱状サ ンプルが採取でき、これにブラックライトを用いる ことで、ひび割れ発生位置が確認された.

7. まとめ

- (1) 輪荷重走行面端部に φ12mm, 深さ 25mm のコア を穿孔し,輪荷重走行疲労実験の過程で,所定の たわみに達した時点で,コアに水を満水し,ひび 割れの発生位置に浸透することで減水深さから, ひび割れ発生状況を検証した.その結果,供試体 RC-30 および RC-35 ともに,たわみが 3.8mm,す なわちたわみが床版支間 L の 1/370 に達した付近 から減水量が多くなり,この時点から水平ひび割 れが発生したものと考えられる.
- (2) 破壊後に樹脂注入し、小径コアドリルを用いて柱 状サンプルを採取し、水平ひび割れ発生位置を検 証した結果、輪荷重走行により、せん断領域には 斜めひび割れ、曲げ領域には圧縮鉄筋付近に水平 ひび割れが発生していることが確認された。

参考文献:

- 阿部忠,大窪克己,高野真希子:コンクリート構 造部材の柱状サンプル採取方法,特願 2017-130224
- 2) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 I, II, 2002
- 3) 大野晃,伊藤清志,山下雄史,阿部忠:超速硬繊維補強セメントモルタルを用いた道路橋 RC 床版の部分補修技術に関する研究,コンクリート構造物の補修・補強アップグレード論文・報告集,第 13 巻,pp.357-264,2013.11
- 松井繁之:道路橋床版設計・施工と維持管理,森 北出版,2007.10
- 5) 阿部忠,木田哲量,高野真希子,川井豊:道路 橋 RC 床版の押抜きせん断耐荷力および耐疲労性 の評価,土木学会論文集 Al, pp.39-54, 2011.1