

論文

床版上面に発生する砂利化現象の解明に向けた実験的検討

角間恒*, 久保善司**, 横山広***, 仁平陽一郎****, 畠山乃*****

*博(工), 寒地土木研究所, 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

**博(工), 金沢大学准教授, 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

***博(工), 大日本コンサルタント, インフラ技術研究所 (〒102-0075 東京都千代田区三番町6-3)

****国土交通省北海道開発局, 開発連携推進課 (〒060-0851 札幌市北区北8条西2丁目)

*****寒地土木研究所, 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

本研究は、実験的アプローチにより、コンクリート床版の上面に発生する砂利化現象の解明に向けた種々の検討を行ったものである。砂利化発生要因としてコンクリートのアルカリシリカ反応と輪荷重走行の複合作用を取り扱っており、輪荷重走行試験によりS-N曲線の導出や砂利化発生過程の観察を行うとともに、実橋での応力頻度に基づき砂利化発生までの期間に関するケーススタディを行った結果について報告する。

キーワード : RC床版, 砂利化, 複合劣化, 輪荷重走行試験

1. はじめに

道路橋コンクリート床版（以下、床版）の上面に発生する砂利化に関しては、主に実橋における発生状況の調査事例により多くの知見¹⁾²⁾が蓄積されてきた。ただし、その多くは発生要因に係る内容であり、発生進行の過程やメカニズムが十分に解明されているとは言い難い。また、維持管理の実務においては発生進行に要する時間が関心事になるが、その時間軸にも不明な点が多い。

本研究では、砂利化現象の解明に向けた検討として、輪荷重走行試験機を使用した砂利化の再現試験を実施し、砂利化発生に及ぼす活荷重作用（輪荷重の大きさ）の影響評価および砂利化発生過程の観察を行った。また、実橋における砂利化発生の時間軸の明確化に向けた検討として、床版の応力頻度推定に基づき砂利化発生までの時間を試算した。なお、本研究では、多岐にわたる砂利化発生要因のうち、コンクリートのアルカリシリカ反応（以下、ASR）と輪荷重走行の複合作用に着目している。

2. 試験方法

2.1 試験体

(1) 概要

本試験では、昭和48年道路橋示方書に準じて製作した鉄筋コンクリート床版試験体から、幅300mm、高さ200mmの矩形断面を有する長さ2000mmの鉄筋コンクリートはり試験体3体（図-1、以下、No.1～3）を切り出して試験に供した。切出しあはり軸方向が床版試験体の配力鉄筋方向に一致するように行い、後述する試験

装置の性能や試験体への作用応力を考慮して寸法を決定している。試験体の断面内には、引張鉄筋としてD16（SD345）が3本、圧縮鉄筋としてD16（SD345）が1本または2本配置されており、切出しに際して切断した鉄筋の定着加工は行っていない。

(2) ASR促進によるひび割れの導入

本試験では、砂利化の発生要因としてASRと疲労の複合作用に着目しており、コンクリートに反応性の細骨材を使用した上でNaClを配合することで、試験体コンクリートにASRによるひび割れを導入した。

図-2は、試験開始前における試験体の損傷状況であり、図中の「E側」、「W側」は試験装置への設置方向（図-3）を指す。図-2(a)および(b)より、はり試験体の切出し位置では、上面の全体および側面の上側鉄筋位置にひび割れの発生を確認できた。上面のひび割れ幅は概ね0.2mm以下であり、E側500mm付近で最大となっていた。また、側面のひび割れは0.2～0.5mmであった。

図-2(c)に、試験体高さ方向に計測したコンクリートの超音波伝播速度の分布を示す。図より、初期状態での超音波伝播速度は概ね2500～3500m/secであり、部分的に2000～2500m/secになる箇所もあった。ひび割れが確認されなかった箇所での超音波伝播速度は4000m/sec程度であったことから、いずれの試験体も軸方向全体にわたってASR促進の影響を受けていたと言える。また、W側と比較してE側で超音波伝播速度が小さい傾向があり、上面ひび割れ幅の状況も併せると、E側で相対的にASRの進行程度が大きかったと考えられる。

(3) コンクリートの圧縮試験

No.2の上面から鉛直方向にコンクリートコア（径

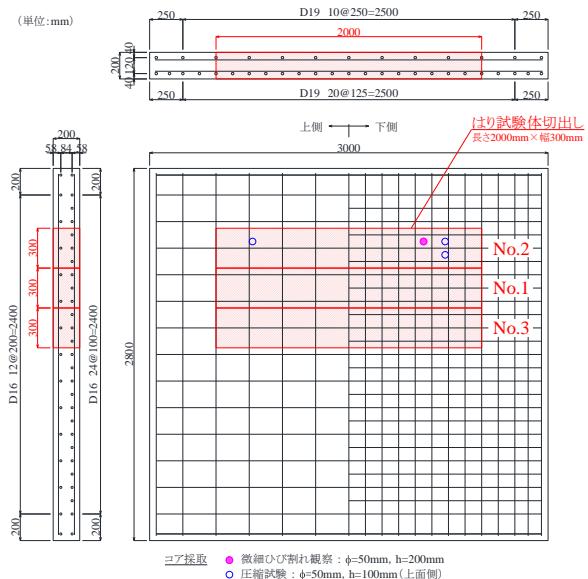


図-1 試験体の概要

50mm, 長さ 100mm) を 3 本採取して圧縮試験を行ったところ, 圧縮強度は 29.6~39.4N/mm², 静弾性係数は 11.5~13.9kN/mm² となった. 床版試験体と同時期に製作した非反応性骨材を使用したコンクリート(骨材種類を除き同一配合)の圧縮強度は 41.7N/mm², 静弾性係数は 31.2kN/mm² であり, 本試験体コンクリートにおいて ASR 膨張による静弾性係数の著しい低下を確認できた.

2.2 輪荷重走行試験

図-3 に輪荷重走行試験の概要を示し, 以下にその詳細を説明する.

(1) 試験装置

試験には, 寒地土木研究所所有のクランク式小型輪荷重走行試験機²⁾を使用した. 本試験機は, 台車部に幅 190mm の鉄輪を装着しており, 油圧ジャッキを用いて 20~40kN の任意荷重を試験体に作用させたまま, 1m の範囲を 1 時間当たり約 1500 往復の速度で走行できる.

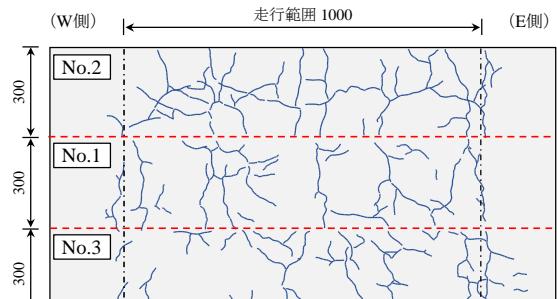
(2) 支持方法

試験体の支持は, 試験体中央から ±870mm (支点間隔 1740mm) の位置に設置した丸鋼により行い, 輪荷重走行に伴う試験体の浮き上がり等を防止するため, 支点直上の上面にも丸鋼を設置してアンカーボルトで上下に挟み込んだ. また, 試験体端部付近では, アングル材を設置して試験体のずれを防止している.

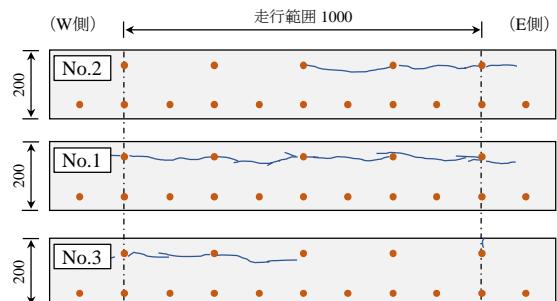
(3) 載荷方法

走行中の輪荷重は, No.1 で 20kN, No.2 で 30kN, No.3 で 35kN とした. これらは, 本試験条件を集中荷重が作用する単純はり(コンクリート引張断面を無視)と仮定して計算したコンクリート圧縮緑応力が, 道路橋示方書³⁾に規定される RC 床版に対するコンクリートの曲げ圧縮応力度制限値の 1~2 倍程度となるように設定した.

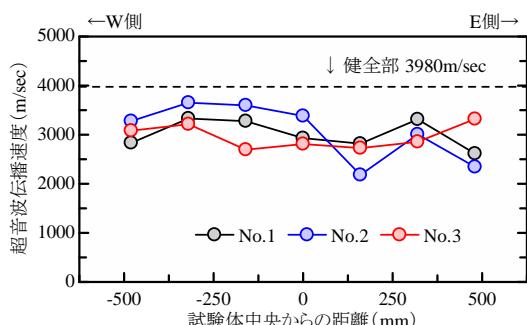
輪荷重は, コンクリート養生マット, ゴム板(厚さ 10mm), ベニヤ板(厚さ 10mm), 鋼板(厚さ 6mm)を



(a) 上面のひび割れ発生状況



(b) 側面のひび割れ発生状況



(c) 鉛直方向の超音波伝播速度

図-2 試験体コンクリートの損傷状況

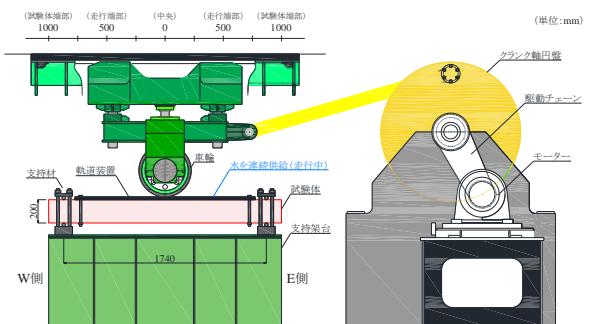
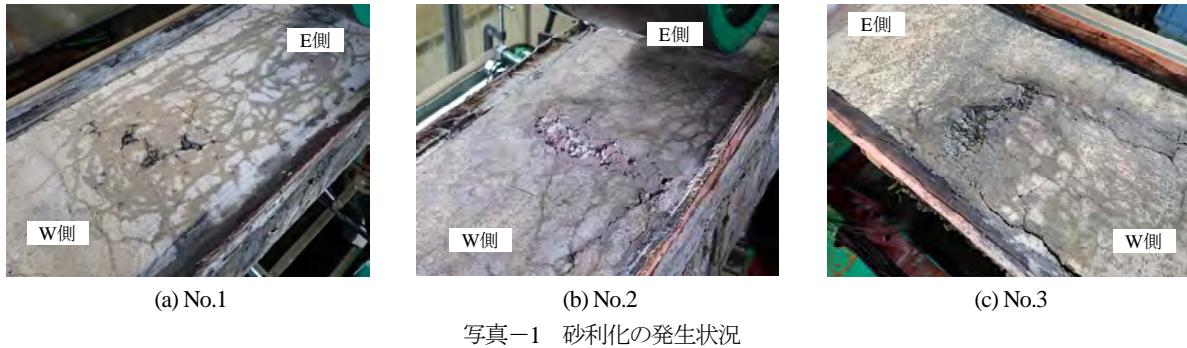


図-3 輪荷重走行試験の概要

積層した軌道装置を介して試験体に作用させた. 鉄輪による輪荷重走行試験では, 載荷面積を確保するために鋼製ブロックを介して輪荷重を作用させるのが一般的だが⁴⁾, ブロック縁端部の支圧が砂利化発生に影響することが懸念されたため, 本試験ではゴム板を設置した.

走行中は, 滴下方式により試験体中央の上面に 24 時間当たり 1.74L の速度で連続的に水を供給することで, 上面全体を湿潤状態に保った. ここで水の供給は, 供給した水が湿潤状態を保持するために上面全周に設置



写真一1 砂利化の発生状況

した堤から溢れない条件として設定したものであり、特定の水の供給環境を想定したものではない。なお、試験体側面の止水処理は行っておらず、上面から浸入した水が側面から試験体外に排出される条件とした。

(4) 損傷状況の調査

試験中は、任意の走行回数毎に輪荷重走行を停止して軌道装置を撤去した後、試験体上面および側面の目視観察を行った。

3. 試験結果

3.1 砂利化発生までの損傷進行過程

写真一1に、各試験体における砂利化の発生状況を示す。砂利化に関しては、その状態を表す明確な定義がないことから、本研究では、上面でコンクリートのセメント固化物が消失して骨材が露出する範囲が100mm程度に達した状態と定義した。いずれの試験体も試験体中央からE側走行端部の間で砂利化に至っており、そのときの走行回数はNo.1で179.5万回、No.2で67.5万回、No.3で20.7万回であった。

以下に、砂利化発生までの試験体表面の損傷進行過程を説明する。目視観察した範囲において全ての試験体が類似の損傷進行過程を呈しており、表一1および写真一2にはその特徴および代表的な損傷状況を示す。

(1) 損傷段階I

走行を開始してしばらく外観上の変化が見られなかった後、上側鉄筋位置の水平ひび割れから漏水が生じた。漏水はE側を起点に発生しており、ASR膨張の進行が大きかったE側上面から浸入して水平ひび割れに達した水が、輪荷重走行に伴ってはり軸方向に浸透していくものと考えることができる。

その後、No.1～3の順に109万回、44万回、8.2万回のときに上面に軸方向ひび割れの発生が確認され、その直前には、かぶりコンクリートに白色析出物が付着して、その付着範囲がはり軸方向および厚さ方向に拡大していく様子が確認された。析出物の付着範囲拡大は、上面から深さ方向ではなく上側鉄筋位置から上面に向かう特徴があり、コンクリートの損傷が、上面からの水の浸透ではなく、前述した水平ひび割れを通じてはり軸方向に浸透した水によりもたらされていたと言える。

(2) 損傷段階II

損傷段階Iの後、走行回数の増加につれて上面における軸方向ひび割れの発生間隔は小さくなり、No.1では167万回、No.2では58.5万回、No.3では13万回になると、高密度化したひび割れに挟まれる領域が走行停止後（水の供給停止後）も湿潤状態に保たれるようになった。この間、側面では水平ひび割れから泥状物質が滲出する様子が観察されており、かぶりコンクリートからセメント分が溶出して空隙が増加した結果、上面に滲水が生じやすくなったものと考えられる。

(3) 損傷段階III

損傷段階IIの後、10万回程度の走行を経て上面の砂利化に至った。砂利化に至る直前には、上面でひび割れが円状に進展して、その内側の領域で面的な湿潤領域が形成されていることを確認した。また、側面における泥状物質の滲出量の増加、上面から2cm程度の深さに水平ひび割れが発生してかぶりコンクリートが層状に剥離する様子が観察された。

さらに、損傷段階IIからIIIに達する過程の特徴として、試験開始時から損傷段階Iまで、損傷段階IからIIまでの過程と比較して少ない走行回数で損傷が進行したことが挙げられる。このことは、砂利化の兆候が見られてから短期間で砂利化に進展する可能性を示しており、4章において、損傷進行に要する実期間を検討する。

3.2 砂利化発生までの走行回数

図一4は、各試験体における輪荷重の大きさと砂利化発生までの走行回数の関係であり、輪荷重が小さいほど走行回数は増加した。また、両者の間には片対数軸上で線形関係が成立し、本研究において次式により線形近似（決定係数 $R^2=0.94$ ）できた。

$$P = 119.86 - 15.78 * \log_{10} N_{III} \quad (1)$$

ここで、P：輪荷重（kN）、 N_{III} ：砂利化までの走行回数（回）である。前述のとおり、本試験中にはコンクリートのASRが進行した可能性があるが、式(1)のとおり相関が強い近似式が成立したことから、砂利化までの走行回数を決める要因として輪荷重作用が支配的であったと考えられる。

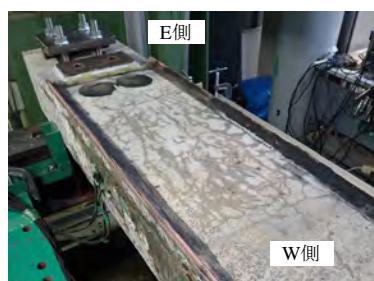
また、図中には損傷段階IおよびIIに達するまでの走行回数を輪荷重との関係により整理した結果を示して

表-1 損傷進行過程の概要

段階	損傷進行の特徴		走行回数			写真
	上面	側面	No.1	No.2	No.3	
I	・ASRの進行によるはり軸方 向ひび割れの発生	・かぶりコンクリートへの白 色析出物の付着 ・水平ひび割れからの土砂混 じりの漏水	109万回 まで	44万回 まで	8.2万回 まで	写真-2(a) 写真-3(a)
II	・はり軸方向ひび割れの高密 度化 ・ひび割れ間に湿潤領域が形 成	・水平ひび割れからの泥状物 質（コンクリートから溶出 したセメント分）の滲出	167万回 まで	58.5万回 まで	13万回 まで	写真-2(b) 写真-3(b)
III	・円状のひび割れおよび湿潤 領域の形成 ・セメント固化物の消失と砂 利化の発生	・水平ひび割れからの泥状物 質の滲出量の増加 ・かぶりコンクリートの層状 剥離	179.5万回 まで	67.5万回 まで	20.7万回 まで	写真-2(c) 写真-3(c)



(a) 段階I : 109万回

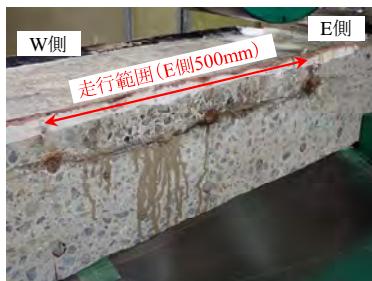


(b) 段階II : 167万回



(c) 段階III : 174.5万回

写真-2 上面の損傷進行過程 (No.1)



(a) 段階I : 44万回



(b) 段階II : 58.5万回



(c) 段階III : 65万回

写真-3 側面の損傷進行過程 (No.2)

おり、輪荷重と損傷段階IおよびIIに達するまでの走行回数の間には、砂利化発生までの走行回数 N_{III} に着目したときと同様、片対数軸上で線形関係が成立している。また、それぞれの関係は式(2)および式(3)で近似できた。

$$P = 101.49 - 13.37 * \log_{10} N_I \quad (2)$$

$$P = 103.14 - 13.12 * \log_{10} N_{II} \quad (3)$$

ここで、 N_I ：損傷段階Iまでの走行回数（回）、 N_{II} ：損傷段階IIまでの走行回数（回）である。式(1)～(3)を比較すると、三つの損傷段階で近似式の傾きは類似しており、走行開始から砂利化に至る一連の過程において、輪荷重に対して相似的に損傷が進行したと言える。

4. 損傷進行の実時間に関するケーススタディ

上記試験結果を踏まえ、砂利化に着目した耐久性評価を実時間スケールで行うためのケーススタディを実施した。具体的には、実橋における応力頻度計測結果に、輪荷重と損傷段階I～IIIに達するまでの走行回数の関係

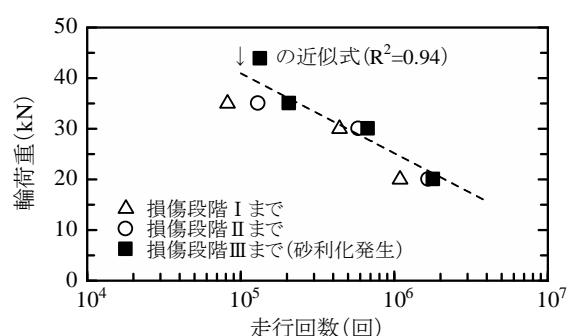


図-4 輪荷重と各損傷段階までの走行回数の関係

(図-4、以下、S-N関係)に基づくマイナーの線形累積被害則⁵⁾を適用することで、ASRが進行した床版における損傷進行の実期間（以下、損傷進行期間）を試算した。

なお、本試算が、(1)輪荷重走行試験で取り扱った損傷が実橋床版上に発生していることを前提にすること、(2)損傷進行要因として、ある特定の橋梁における活荷重作用のみを考慮していること、(3)実橋における損傷進行と

の比較により試算結果の妥当性が検証されたものではないこと、などに留意されたい。

4.1 試算方法

(1) 概要

試算に当たり、床版上面に作用する圧縮応力の大きさおよび回数により損傷段階 I～III に達するまでの走行回数を評価できる、すなわち、図-4 の縦軸を圧縮応力としても走行回数との間に線形関係が成立するという仮定を設定し、実橋床版上面の圧縮応力頻度を調査した。

なお、実橋において床版上面に作用する応力を直接的に計測するのは困難であることから、ここでは、主桁における応力（ひずみ）頻度計測結果から床版上面の応力頻度を推定して試算に用いることにした。また、推定には、骨組み解析や有限要素解析といった橋梁の3次元挙動を考慮可能な手法ではなく合成桁の断面計算による手法を採用しており、本試算結果は床版の主桁作用に着目した損傷進行期間を評価するものと言える。

(2) 主桁の応力頻度計測

表-2 に、試算対象とした橋梁の基本諸元を示す。本橋梁は、北海道旭川市から浦河郡浦河町に至る一般国道237号に架橋された道路橋であり、鋼単純鋼床版箱桁および鋼単純合成桁4連を上部工形式とする。平成24年10月上旬に、道路を管理する国土交通省北海道開発局によって、鋼鉄部（P4～A2）の支間中央付近における主桁の応力頻度計測が実施されており、この計測結果を床版上面の応力頻度を推定するための入力値にした。

図-6 に、応力計測が実施された箇所の断面図を示す。計測箇所では、厚さ 180mm の床版が 3 主桁（床版支間 2800mm）で支持されており、各主桁の上下フランジにおいて平日 24 時間の応力計測が実施されている。計測のサンプリングは 200Hz であり、計測結果にピークバレー法を適用して応力頻度を求めている。

(3) 合成桁の断面計算

床版上面の応力推定は、主桁 1 本および床版からなる合成桁の断面計算により行った。鋼桁部分の断面は設計図書より設定し、床版部分の厚さは 180mm、幅は床版の有効幅とした。また、ハンチおよびアスファルト舗装の断面も考慮している。計算に使用した静弾性係数は、鋼桁が 200kN/mm^2 、コンクリートが 27.0kN/mm^2 、アスファルト舗装が 2.7kN/mm^2 であり、舗装には、本橋梁の架橋位置における 10 月上旬の日最高気温、および、北海道における外気温と路面温度の関係の調査結果^⑨を参考に、舗装温度 25°C での特性^⑩を与えた。

対象橋梁では、応力頻度計測に併せて荷重車を用いた静的載荷による主桁の応力計測が行われており、このときの主桁のひずみ分布（中立軸）を上記断面計算により再現できることを確認している。

(4) 損傷進行期間の試算方法

S-N 関係およびマイナーの線形累積被害則に基づき、

表-2 対象橋梁

路線	一般国道 237 号
形式	鋼単純鋼床版箱桁（A1～P1） 鋼単純合成鉄部 4 連（P1～A2）
架設年次	昭和 41 年（P1～A2） 平成 13 年（A1～P1、延伸）
適用示方書	昭和 39 年鋼道路橋設計示方書
橋長	163.5m
支間	51.4m+4@27.1m
平面線形	R=∞
斜角	θ=60°

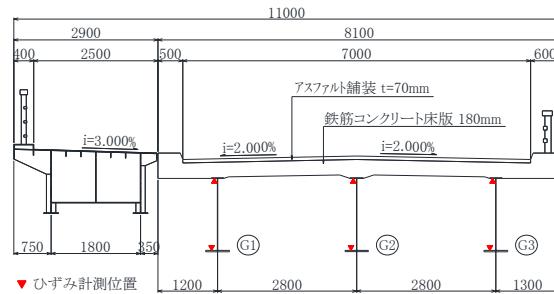


図-6 対象橋梁の断面図（P4～A2）

床版コンクリートが損傷段階 I～III に達するまでの実期間を試算した。そのときの S-N 関係には、式(1)～(3)を同一の傾き（3 式の平均値： -14.09 ）を有する S-N 関係に再近似した上で、左辺を圧縮縁応力に変換した式(4)～(6)を使用した。

$$C * \sigma_c = 105.30 - 14.09 * \log_{10} N_1 \quad (4)$$

$$C * \sigma_c = 107.86 - 14.09 * \log_{10} N_{II} \quad (5)$$

$$C * \sigma_c = 108.35 - 14.09 * \log_{10} N_{III} \quad (6)$$

ここで、 σ_c ：圧縮縁応力 (N/mm^2)、 C ：輪荷重 P (kN) を圧縮縁応力 σ_c (N/mm^2) に変換する係数であり、本研究の輪荷重走行試験条件を集中荷重が作用する単純はり（コンクリート全断面有効）と仮定した計算値より $C = P / \sigma_c = 4.74$ とした。

4.2 試算結果

図-7 に、下フランジの応力頻度から推定した床版上面の応力頻度を示しており、G1 桁および G3 桁上で圧縮縁応力が大きく、作用回数も多くなっていた。また、計測期間中の最大圧縮縁応力は G1 桁および G3 桁上で $1 \sim 2 \text{N/mm}^2$ 、G2 桁上で $0 \sim 1 \text{N/mm}^2$ と推定された。

表-3 は損傷進行期間の試算結果であり、安全側（短寿命側）の試算として、 $\sigma_c = 0 \sim 1 \text{N/mm}^2$ および $1 \sim 2 \text{N/mm}^2$ の作用回数をそれぞれ 1N/mm^2 および 2N/mm^2 の作用回数に見なした場合の結果を示している。表より、本ケーススタディでは、外桁上（G1 桁および G3 桁）において中桁上（G2 桁）の 2 倍の速度で損傷が進行する結果となった。また、損傷段階 III（砂利化の発生）に達する期間に着目すると、上面にひび割れ進展が見られた損傷段階 I からは 4～10 年程度 (=Y_{III} - Y_I)、上面に砂利化の兆候が見られた損傷状態 II からになると 1～2 年程度 (=Y_{III} -

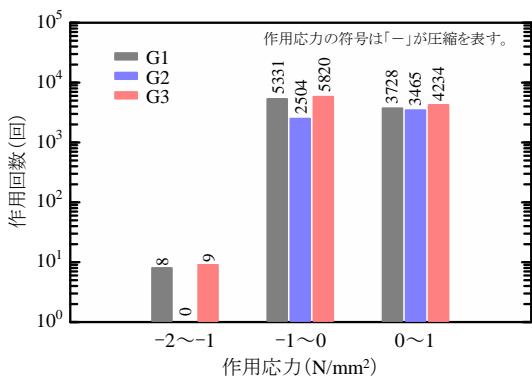


図-7 床版上面の応力頻度の推定結果

表-3 損傷進行期間の試算結果

記号	単位	主桁		
		G1	G2	G3
n_1	回/年	1,945,815	913,960	2,124,300
n_2	回/年	2,920	0	3,285
N_{I_1}	回	13,708,078		
N_{I_2}	回	6,317,828		
D_I	—	0.142	0.067	0.155
$Y_I (=1/D_I)$	年	7.0	15.0	6.4
N_{II_1}	回	20,828,871		
N_{II_2}	回	9,599,684		
D_{II}	—	0.094	0.044	0.102
$Y_{II} (=1/D_{II})$	年	10.7	22.8	9.8
N_{III_1}	回	22,565,354		
N_{III_2}	回	10,400,000		
D_{III}	—	0.087	0.041	0.094
$Y_{III} (=1/D_{III})$	年	11.6	24.7	10.6
$Y_{III}-Y_I$	年	4.6	9.7	4.2
$Y_{III}-Y_{II}$	年	0.9	1.9	0.8

【記号の説明】

- n_1, n_2 : 1年当たりの圧縮縁応力 $\sigma_c = 1\text{N/mm}^2$ および 2N/mm^2 の作用回数 (=1日当たりの作用回数 × 365)
- N_{I_1}, N_{I_2} : 一定荷重 ($\sigma_c = 1\text{N/mm}^2$ および 2N/mm^2) 走行時の損傷段階 i までの走行回数 (=式(4)～(6)による計算値)
- D_i : 損傷段階 i に着目したときの 1年当たりのマイナーノイズ累積損傷度
- Y_i : 損傷段階 i に達するまでの期間

Y_{II} の期間で砂利化に至ることがわかる。すなわち、損傷段階 I および II の損傷は、定期点検の実施間隔（5年）や、点検～調査（補修設計）～措置（補修工事）のメンテナンスサイクル間（通常 1～3 年程度）に砂利化に進展する可能性があり、維持管理において特に着目すべき損傷に位置付ける必要があると言える。

なお、現時点では、上記試算が安全側と危険側のどちらの結果を与えていたかを判断するのは難しい。例えば、本試算では主桁作用に着目したが、実際には上部工や路面の構成（主桁本数、主桁位置と走行位置の関係など）も踏まえて床版作用の影響を考慮する必要があるほか、コンクリートの材料劣化の影響も考慮しなければならないのは言うまでもない。そのため、砂利化発生の時間軸の解明に向けて、実験的アプローチによる砂利化発生進行に関するデータ蓄積とともに、実供用環境における力学および環境作用の評価も進めていきたい。

5. まとめ

本研究では、砂利化発生要因としてコンクリートの ASR と輪荷重走行の複合作用に着目した場合について、輪荷重走行試験機を使用した砂利化の再現試験を実施し、S-N 関係の導出および砂利化発生過程の詳細観察を行った。また、S-N 関係および実橋床版の応力頻度推定結果を基に、実橋における損傷進行の実期間に関するケーススタディを実施した。これらにより得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 輪荷重走行試験の結果、ASR と輪荷重走行に複合作用下における砂利化発生過程の特徴を明らかにするとともに、本試験の範囲において、輪荷重と砂利化発生までの走行回数の間に明確な相関関係があることを示した。
- (2) 輪荷重走行試験結果および北海道の国道橋における床版の応力頻度に基づき損傷進行の実期間を試算したところ、砂利化の兆候が見られてから 1～2 年程度で砂利化に進展するという結果を得た。

今後は、多岐にわたる砂利化発生要因を対象に、実験的アプローチによる砂利化の発生過程や速度に関するデータ蓄積を進めるとともに、それらの結果を用いて実供用環境での砂利化発生に関する時間軸の評価手法についても検討していく予定である。

謝辞

本研究の実施に当たり、国土交通省北海道開発局より実橋梁における応力頻度計測結果を提供いただきました。ここに付記し、関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：道路橋床版の維持管理マニュアル 2020, 2020.
- 2) 角間恒, 佐藤孝司, 西弘明, 松井繁之：縮小 RC 床版供試体を使用した輪荷重走行試験, 第 9 回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.65-68, 2016.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編, 2017.
- 4) 土木学会：道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上, 2004.
- 5) Miner, M. A.: Cumulative damage in fatigue, Journal of Applied Mechanics, Vol.65, pp.A159-A164, 1945.
- 6) 松田圭大, 川口貴之, 川端伸一郎, 中村大：凍結深さの推定に必要な外気温と路面温度の相互関係に関する検討, 土木学会論文集 E1, Vol.77, No.2, pp.I-77-I-84, 2021.
- 7) 安倍隆二, 上野千草, 木村孝司：理論的設計方法を用いたアスファルト舗装設計に関する一検討, 第 60 回(平成 28 年度)北海道開発技術研究発表会, 技 6, 2017.

(2024 年 7 月 12 日受付)