論文 道路橋鉄筋コンクリート床版上面における土砂化発生特徴に関する 数値解析的検討

古川 智也*1·高橋 佑弥*2

要旨:道路橋鉄筋コンクリート床版における土砂化の発生が近年増加しているが,発生・進展プロセスに関 する知見は十分ではない現状にある。本研究は既往の土砂化モデルが実装された数値解析を用いて,土砂化 の特徴を明らかにすることに取り組んだ。過去の疲労試験結果の再現解析により既往の土砂化モデルの適用 性を確認した。床版輪荷重疲労の数値解析を用いて土砂化の進展プロセスを示し,既往の調査報告の土砂化 タイミングや箇所の傾向を定量的に示した。感度解析により,構造諸元・材料強度・輪荷重走行位置による土 砂化進展速度の大小を検討し,初回載荷時の水圧に着目して発生時期を定量評価できる可能性を示した。 キーワード:鉄筋コンクリート床版,疲労,土砂化,数値解析

1. はじめに

近年,橋梁の維持管理において鉄筋コンクリート(RC) 床版の劣化とその対策費用増加が問題視されている。中 でも,床版上面で生じる土砂化は,劣化進展の速さと車 両走行性への影響から重大な問題と認識されているもの の,発生プロセスに関する理解が進んでおらず,効果的 な事前/事後対策がなされていない。現状のままでは,今 後も土砂化箇所が更に増加し,より多くの対策費用が必 要となることが懸念される。

一方,既往研究^{1,2)}において,コンクリート構造を対象 とした非線形有限要素構造解析システム³⁾に固液二相モ デルを取り入れることで,水圧挙動に基づいた土砂化進 展を考慮した形で,湿潤状態にある床版の疲労挙動を再 現することが行われている。

以上の背景を受けて,本研究は,数値解析的手法を用 いて土砂化進展プロセスの特徴を抽出することで,効果 的な対策手法の選定に資する知見を得ることを目的とす ることとした。

2. 既往の研究

2.1 土砂化の発生過程の現状理解

中村ら 4による床版の土砂化に関する調査事例による と、床版上の土砂化箇所のうち 94%が輪荷重箇所直下で 生じている。他の材料劣化や環境作用による土砂化発生 の可能性も一部指摘されているが、本研究では、輪荷重 を主要因として発生している土砂化を主対象に検討を行 うこととする。輪荷重を主要因として土砂化が進む場合 には、床版上面の水がひび割れ・空隙中を通って内部へ 侵入した後、輪荷重がかかりその水の圧力が上昇した際 に、くさび効果によって骨材とモルタルが分離し、モル タルが破砕される、という土砂化進展プロセスが想定さ れている 5,6)。

2.2 数値解析による土砂化のモデル化

(1) 固液二相モデルによるひび割れ中の水圧の算出

Fujiyama・Mackawa は、既往の解析システム ³⁾に固液 二相モデルにより空隙やひび割れ中の液状水圧を算出す るモデルを導入している ¹⁾。固液二相モデルにおいて、 全応力 σ は固相の応力 σ *と液相の間隙水圧 p の和として 式(1)のように表される。

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^* + \delta_{ij}p \tag{1}$$

このうち,固相の応力 σ *はコンクリートの構成則より求められる。空隙水圧pは固相のひずみ $\epsilon_{i,i}$ と固相に対する液相の相対変位 $w_{i,i}$ を用いて式(2)のように算定される。

$$p = \tanh\{\overline{K}_f(w_{i,i} + \varepsilon_{i,i})\}, \overline{K}_f = \left(\frac{1-n}{K_c} + \frac{n}{K_w}\right)^{-1}$$
(2)

ここで, *K_c*, *K_w*: それぞれコンクリート・液状水の体積剛 性, n: ひび割れ空間が占める体積率である。併せてダル シー則に基づいた液状水の移動も透水係数をκとして考 慮がされている。

ひび割れ発生後は,式(1)と透水係数xが,それぞれ式 (3),式(4)のように異方性を考慮した形となる。

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^* + \delta_{ij} l_i p \tag{3}$$

$$\kappa_i = \kappa \left\{ 1 + \left(\frac{\varepsilon_{jj} + \varepsilon_{kk}}{a}\right) \right\} \tag{4}$$

ここで,*l_i*:ひび割れ面に直交する法線ベクトルである。 以上のモデルにより水圧が算出される。詳細なモデルの 定式化は既往の文献¹⁾に記載されている。

(2) 土砂化進展モデル

Hiratsuka・Mackawa は上記解析システムに間隙水圧の 繰り返し上昇による土砂化の発生のモデルを導入してい る²⁾。間隙水圧 *p*の大きさに応じて決定される水圧の履 歴 *Z*(初期値 0)を用いて,土砂化による損傷を損傷パラ

*1 東京大学 大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 (学生会員)*2 東京大学 大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 講師 博士(工学) (正会員)

メータKとして式(5)のように表現している。

 $K = \exp(-Z), Z = \int_{path} -10^n (1+f_n) p_{ampf}^{f_n} dp$ (5)

ここで, f_n , n: それぞれ S-N 曲線の傾きと切片に関する 係数 ($f_n = 4, n = 2$), p_{ampf} : 間隙水圧 p の振幅である ²)。また, 損傷パラメータ K の変化によって材料に配分 される応力の和 σ_i は式(6)のように表される。

 $\sigma_i = K\sigma_{ci} + \sqrt{K}\sigma_{si} + (1 - K)\sigma_{agg}$ (6) ここで、 $\sigma_{ci}, \sigma_{si}, \sigma_{agg}$: それぞれコンクリート骨格、鉄 筋、骨材が受け持つ応力である。無損傷の場合、K は 1.0 であるが、損傷が進むと 0.0 に近づいていく。K が 0.0 の 時コンクリート部分の応力負担が 0 になり、骨材集合体 のみが体積圧縮に耐えることとなる。このようなモデル により、ひび割れ中の高圧力の水が疲労荷重下の床版の 劣化を促進することを考慮している²。

このK値の進展挙動は床版たわみ量を用いて間接的に 検証がされてきたが、土砂化自体に着目した詳細な検証 はされてはいない。そのためまずはK値の進展挙動と実 際の土砂化損傷を比較し、対応関係を確かめることが必 要である。

3. 土砂化モデルの検証

3.1 RC 梁の4 点曲げ疲労試験結果を用いた検証

まず, RC 梁の 4 点曲げ疲労試験結果を用いて現状の 解析システムによる K 値の進展と実際の損傷状況の対応 を確認する。

(1) 実験概要および解析条件

山家ら⁷は 300mm×220mm×1300mm の RC 試験体を 用い、上面に水張りができる溝を設けて、疲労載荷に供 している。図-1 に構造諸元を示す。本実験では、水張 りのない乾燥条件と水張りをした条件で、それぞれ終局 耐力 70%と 20%の荷重の4点曲げ疲労載荷を周期 4Hz で 行っている。試験の結果、70%の荷重の水張り条件下で は 1.7×10⁵回程度の載荷回数で曲げ破壊が生じ、その時 上面部分での土砂化が確認された。一方、乾燥条件下で は 3.9×10⁵回程度で曲げ破壊が確認されたが土砂化は発



生していなかった。20%荷重の水張りのケースは 1.0× 10⁶回載荷後においても土砂化は視認されなかったが,表 層 1cm 部分を X 線撮像したところ微細ひび割れが確認 され,土砂化が進展している過程であることが推定され た⁷。

本実験と同諸元の解析メッシュ(図-2)を作成し,再現 解析を実施した。実験のコンクリート配合の情報が得ら れなかったため設計強度 30MPa、引張強度 2.27MPa、ヤ ング係数2.9×10⁴N/mm²の一般的な配合を仮定して解 析を行った。水張りのケースについては固液二相モデル および土砂化モデルを用いた解析を実施し,水張りを行 った溝部分の深さ 1.5cm の範囲を初期滞水深さとしてい る。損傷が最も激しいと思われる載荷箇所直下での損傷 パラメータ K の値に着目して検討を行った。

(2) 解析結果

図-3は、乾燥条件で終局耐力の70%荷重、水張り条件で70%荷重と20%荷重のケースについて、疲労計算時のスパン中央のたわみ量の変化を示した図である。結果を見ると、乾燥、水張りそれぞれの条件で、実験で曲げ破壊が生じた回数と同様の回数で大きくたわみ量が増加していることがわかる。図-4に水張り条件での着目箇所におけるK値の変化を表す。70%荷重のケースでは実験で土砂化が確認された1.7×10⁵回時点で0.1前後になっている。実験での土砂化顕在化に対応する解析上のK値は0.1程度であると考えることができる。一方、20%荷重のケースでは1.0×10⁶回載荷で0.7程度まで低下していた。土砂化は顕在化しないものの進展途上にあることが推察される。

3.2 RC 床版の輪荷重疲労試験を用いた検証

(1) 実験諸元と解析による再現方法

次に床版の輪荷重疲労試験の再現解析を行う。松井は 床版疲労における水の影響を検討するために水張り条件 で輪荷重疲労試験を行っている⁸⁾。300cm×200cm×19cm の床版の上面 120cm×220cm 部分を滞水させ,滞水箇所 中央の長さ 200cm に対して 30cm×12cm の輪荷重を 3.36km/h で与えている。滞水条件において 10ton と 15ton



図-24点曲げ試験解析条件

の載荷荷重で試験が行われ,10.5ton での載荷では2.0× 10⁵回載荷しても異常が確認されなかったが,15ton での 載荷では6.0×10³回程度で輪荷重中央位置に土砂化とみ られる上面異常が確認された。

本床版の輪荷重疲労載荷を図-5 に示すように解析上 で再現した。配筋条件・設計強度は実験値⁸⁾を参照した。 拘束条件については実験での弾性支持条件を単純化し, 4 辺単純支持とした。輪荷重箇所中央の要素を,K 値を 確認する着目箇所とした。

(2) 解析結果

図-6 に着目箇所における K 値の変化を示す。15ton の 荷重ケースでは,実験で上面異常が確認された 6.0×10³ 回付近で K 値が急激に減少し,0.1 を下回っている。一 方,10.5ton の荷重ケースでは 2.0×10⁵回程度でも 0.5 程 度までの低下に留まっている。

以上より, RC 梁の曲げ疲労, RC 床版の輪荷重疲労と もに, K 値が 0.1 を下回ったタイミングが土砂化の顕在 化タイミングに対応していた。解析で K 値が 0.1 を下回 った時点で土砂化が顕在化するという基準で判定を行え ば,既往の土砂化モデルを用いて土砂化進展プロセスの 検討が可能であると考えた。以上,既往のモデルによる



図-5 輪荷重試験再現解析メッシュ

土砂化進展挙動の再現可能性が検証されたといえる。

4. 土砂化進展プロセスの特徴抽出

前章において検証された土砂化モデルを用いて,床版 の輪荷重載荷解析を行い,土砂化の特徴を抽出すること を試みる。

4.1 解析条件

本検討には図-7に示す寸法 580cm×235cm×22cmの 床版支間内に1輪のみが走行する条件を用いる。設計強 度は 30MPa とし,荷重は幅 23.5cmの 5ton 荷重を 60km/h の速度で与えた。上面下面ともにかぶり 3cm,主鉄筋は 直径 19mm を 16cm 間隔で,配力鉄筋は直径 16mm を 12cm 間隔で配置する配筋条件とした。橋軸方向 2 辺を 単純支持し,かつ床版の連続性を考慮して橋軸方向端部 の断面に対して橋軸方向の拘束を与える拘束条件とした。

4.2 床版上面での土砂化の発生に関する検討

(1) 発生時期に関する特徴について

図-8に床版のたわみ量推移と水張り条件でのK値の 推移を示す。K値の推移をみると1.3×10⁷回程度の載荷 で土砂化が発生したと判断できる。一方,既往研究 %に 倣って活荷重たわみが初期値の3倍になる載荷数を疲労



限界と定めると,乾燥条件では5.0×10¹¹回程度,水張り 条件下においては4.0×10⁷回程度で疲労破壊が生じてい る。水張り条件での土砂化は,乾燥条件での疲労限界の 載荷回数の2.6×10⁻⁵倍程度,水張り条件と比較しても0.3 倍程度の回数で発生している。実損傷の報告においても 土砂化の進展が疲労に比較して非常に速いことが指摘さ れている⁵⁾が,このように解析モデルを用いることで, 土砂化顕在化の早さを定量的に示すことができた。

(2) 発生箇所に関する特徴について

床版上面で土砂化が拡がるプロセスについて検討する。 図-9は、載荷時の床版上面のK値の分布の変化を表したものである。図より輪荷重箇所で先行してK値が減少し土砂化していることがわかる。土砂化発生箇所が輪荷重走行箇所に集中しているという報告³⁾と整合する結果である。また、橋軸方向で土砂化の発生時期にほとんど差異がないことも確認できる。現実の損傷報告でも橋軸方向で土砂化発生タイミングにあまり差異がないことが指摘されている³⁾。

この結果について、水圧の上がりやすさによって説明 が可能である。図-10は初回載荷時の最大水圧値のコン ター図である。輪荷重載荷箇所の水圧は橋軸直角方向の 他の位置と比較して大きく、橋軸方向にはほとんど差が 見られない。式(5)のモデル化の通り、この分布が K 値の 進展状況を支配しており、構造上の水圧の上がりやすさ に着目する重要性が示された。

一方で,損傷事例報告³では,一部非輪荷重箇所にお ける土砂化発生の報告もある。本研究ではその原因の一 つとして床版上面での乾燥収縮ひび割れの影響を検討す る。橋軸直角方向に幅 0.02mm,間隔 1m 程度の乾燥収縮 ひび割れに相当する強制ひずみをあらかじめ導入した床 板に対して約 1.0×10⁷回輪荷重を載荷した時の K 値の分 布を図-11 に示す。ひび割れに沿って水が移動し,輪荷 重箇所以外においても水圧が上昇することで土砂化がひ び割れ箇所に沿って発生している結果である。環境作用 や材料劣化の状況によっては輪荷重箇所以外でも土砂化 が顕在化しうることが解析上でも示された。なお、図-11 には解析結果に対称性の破れが確認されるが,これは同 様に固液二相モデルを用いた既往文献¹⁰の解析結果で も確認されているものである。

4.3 床版深さ方向への土砂化の進展に関する検討

土砂化の発生後,対策が不十分であると抜け落ちが発 生する危険性がある。おおよそ床版厚さの半分程度まで 土砂化が進展すると抜落ちの危険性が非常に高まること という指摘もある⁵⁾。

図-12 はスパン中央の輪荷重箇所直下で上面からの 深さごとにK値の推移をプロットした結果である。図よ り,深い位置ほど土砂化の発生時期が遅いことがわかる。 表面での土砂化の発生が1.3×10⁷回程度であるのに対し て,床板厚さの半分である深さ11cm位置では3.3×10⁷ 回程度で土砂化が発生している。このことから,床版内 部が水でされているような状況にある床版では,上面で の土砂化の顕在化からさらに2.5倍程度の載荷回数を受 けた時点で床版の半分の深さまで土砂化し,抜け落ちの 危険性が高まる可能性があることが示唆される。土砂化 発生後の抜け落ちが生じるメカニズムは明確になってい ないため様々な要因の影響を検討する必要があるが,こ



図-9 床版解析における K 値分布の推移



のような土砂化発生領域の拡がりを示すことは維持管理 の意思決定上有意義な結果となり得ると考える。

5. 土砂化の発生特徴に関する感度分析

本章では、床版の設計や作用条件が土砂化の発生に与 える影響について検討する。まず、基礎的な情報として 構造諸元が土砂化進展に与える影響を把握することが重 要である。また、低水セメント比の箇所では土砂化が起 こりにくいことが報告されており⁵、材料強度の影響把 握も重要である。加えて、土砂化は輪荷重箇所に集中す ることから,輪荷重の位置が土砂化の発生に対して大き な影響を及ぼすことも予想できる。以上より,本章では、 構造緒元、材料強度、輪荷重走行位置をパラメータとし て感度解析を実施し、それら変数の影響を検討すること とした。

5.1 構造諸元を変数とした感度分析

4 章で用いた諸元に対して、床版厚さを 18cm にした ケース、床版幅を 376cm にしたケース、下面に弾性要素 を追加して 5mm の鋼板接着を模擬したケースを用意し、 解析を実施した。鋼板接着等の対策の影響も確認するこ とで対策効果の検討が可能であると考えた。輪荷重載荷 箇所は床板幅の中央とし橋軸方向中央の輪荷重箇所表面 の土砂化発生回数と初回載荷時の水圧に着目した。図-13 に結果を示す。床板厚さが小さいほうが、また床板幅 が大きいほうが土砂化は早く顕在化し、かつこれらの変 数の影響は大きい。翻って考えると縦桁増加や床版増厚



図-11 乾燥収縮ひび割れ存在時の K 値分布

が土砂化に対する対策手法として有効であるといえる。 これらは構造諸元の変化による変形時の水圧上昇挙動 の変化に起因すると考えられる。一方で,鋼板接着を模 擬したケースでは大きな土砂化遅延効果は見られなか った。

5.2 材料条件を変数とした感度分析

図-14 はコンクリートの圧縮強度を変化させた解析 ケースにおける K 値による土砂化の発生回数と載荷時 水圧値をまとめたものである。圧縮強度が高いほど土砂 化の発生時期が遅くなることが確認できる。圧縮強度の 増加に伴い,材料の弾性係数が増加し,荷重がかかって も空隙水のひずみが増加しづらいため,水圧が上がりに くくなったものと考えられる。土砂化が顕在化する早さ は,10MPaの強度の差異で場合によっては1オーダー以 上異なっており,強度の確保の重要性が示された。

5.3 交通条件を変数とした感度分析

輪荷重載荷箇所の主桁からの距離を23.5,47.0,70.5, 94.0cm と変化させて解析を行った。これらのケースでも, 4.2節同様,輪荷重箇所で土砂化が先行する結果であった ため,橋軸方向スパン中央かつ輪荷重位置直下のK値の 推移に着目する。着目点でのK値による土砂化発生回数 と載荷時水圧を図-15に示す。輪荷重が主桁から近いほ ど土砂化発生時期が遅くなることが確認できた。

5.4 感度解析の傾向に基づく分析

床版疲労環境下の土砂化の発生傾向について感度解析 を行ったが,構造緒元,材料強度,輪荷重位置のいずれ も,初回載荷時の最大水圧に応じて土砂化発生時期が決 まるようであった。初回載荷時の水圧の挙動に着目して 異なる条件間を統一的に分析することで,土砂化の発生 をより簡易に予測できる可能性があると考えられる。

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 既往の土砂化モデルにおいて損傷パラメータ K が
 0.1 を下回った時点を土砂化が顕在化する判断基準
 とすることで,既往の実験結果と対応付けられるこ
 とが確認された。
- ・ 土砂化が床版のたわみに基づく疲労寿命より早い



図-13 異なる構造諸元の土砂化載荷数と載荷時水圧





段階で顕在化することが定量的に示された。また, 輪荷重箇所直下で先行して発生し,橋軸方向に異な る位置でもおおむね同時期に発生すること,乾燥収 縮など材料劣化があると輪荷重箇所以外でも生じ る可能性があることが示された。

- 水分供給が十分な場合において、上面の土砂化が顕 在化した載荷回数の数倍程度の回数で、床版深さの 半分程度まで土砂化が進展して場合によっては抜 け落ちの危険性が高まる可能性があることが示さ れた。
- 種々の構造・材料・作用条件下で行った土砂化の感 度解析により各要因の影響度を定量的に示すと共
 に、初回載荷時の水圧挙動に着目することで、疲労
 解析を行うこと無しに土砂化発生時期の簡易な定 量予測が行える可能性があることを示した。

謝辞:本研究は, JSPS 科研費 18H01507 の助成を受けた ものです。ここに謝意を表します。

参考文献

 Maekawa, K. and Fujiyama, C.: Rate-dependent model of structural concrete incorporating kinematics of ambient water subjected to high-cycle loads, Engineering Computations, Vol.30, No.6, pp.825-841, 2013



図-14 異なる材料強度の土砂化載荷数と載荷時水圧

- 2)Hiratsuka, Y and Maekawa. K: Multi-Scale and Multi-Chemo-Physics Analysis Applied to Fatigue Life Assessment of Strengthened Bridge Decks, XIII International Conference on Computational Plasticity, Fundamentals and Applications, pp.596-696, Sep.2015
- Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: Multi-Scale Modeling of Structural Concrete, Taylor and Francis, 2008
- 4) 中村拓郎,角間恒,守田穫人,葛西聡,西弘明:北海 道における RC 床板の土砂化の発生傾向,土木研究 所資料第4398号 道路橋コンクリート床板の土砂化 対策に関する調査研究,pp.41-46,2020
- 5) 野田翼,松本直士,石田雅博:電磁波レーダによる 床版土砂化の予防保全,土木研究所資料第 4398 号 道路橋コンクリート床板の土砂化対策に関する調 査研究, pp.53-58, 2020
- 6) Mai Thi Hong, 千々和伸浩, 岩波光保, 斎藤智久: 液状水に起因した風車基礎アンカーリング周りの コンクリート損傷進展機構の解明, コンクリート工 学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.481-486, 2015
- 7) 山家信幸,大塚浩司,武田三弘:橋梁コンクリート床板上層部の劣化度の定量化に関する研究,土木学会第56回年次学術講演会概要集,pp.886-867,2000
- 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, Vol.9, No.2, pp.627-632, 1987
- Fathalla, E. Tanaka, Y. and Maekawa. K: Remaining fatigue life assessment of in-service road bridge decks based upon artificial neural networks, Engineering Structures, Vol.171, pp.602-616, 2018
- 10) Takahashi, Y., Ogawa, S., Tanaka, Y. and Maekawa, K.: Scale-dependent ASR expansion of concrete and its prediction coupled with silica gel generation and migration, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.14, No.8, pp.444-463, Aug. 2016