

2017 年度大畑財団助成金

鋼製支承の機能不全による鋼橋性能の影響評価
研究成果報告書

東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻

特任講師 蘇 迪

2018 年 11 月 30 日

1. 研究目的および研究概要

橋梁上下部構造の接点である支承は、上部構造の死荷重や活荷重などの鉛直荷重を確実に下部構造に伝達するとともに、地震や風などによる橋軸方向および橋軸直角方向の水平荷重の全てを下部構造に伝達する機能を有する橋梁システムにおける重要な部材である。また、構造の温度変化による伸縮や活荷重たわみによる回転変位、地震時など大きい変位に対しても確実に追従できることが要求性能として求められる。

支承の力学的特性が橋梁上部工の挙動に及ぼす影響についての研究は、最近の免震支承や反力分散支承の普及に伴ってゴム支承の地震時大変位を対象にしたものが多い。しかし、高度成長期に建設された多くの鋼桁橋には鋼製支承（BP 支承）が使用され、維持管理不足に起因する機能劣化したものも多く見られ、その代表的な損傷として支承部近傍（ソールプレート）の疲労き裂が挙げられる。また、塵埃や水分がすべり板・中間プレートを構成する要部に進入することで、鋼製部材の腐食が進んでおり、滑動や回転機能が全部失うことがある。しかし、支承機能の劣化が車両走行荷重下の鋼橋に及ぼす影響についての研究は少なく、主として静的な解析と実測による研究が行われているのが現状である。さらに、支承の機能不全は鋼桁の支持条件としては固定度を上げる方向に進行することから、一般的には鋼橋の全体挙動としては剛性が見かけ上増加する。その結果、固有振動数が高くなり、見かけは安全側に対処するが慣例だが、橋梁全体の性能への影響が不明確である。地震時可動側の支承に考慮されていない反力が集中し、設計より危険側に進入する恐れがあると考えられる。

従来の研究においては、鋼製支承の諸特性値は動摩擦係数と静摩擦係数で、ゴム支承の特性値はせん断剛性（水平ばね定数）と鉛直剛性（鉛直ばね定数）で代表させるのが一般的方法である。しかし、支承の機能劣化が鋼桁本体の耐久性に対する影響を検討する場合には、車両通過時の比較的鉛直反力が小さい領域（水平変位、回転変位が小さい領域）で、劣化後の支承の諸特性値が必要となる。鋼製支承の水平方向のすべりや回転の機能劣化を検討する場合、通常支承の摺動面にクーロン摩擦が適用されているが、**Stick-Slip** モデルに近い挙動を示しているとも考えられ、必ずしも適切なモデル化となっているかは疑問である。また、**Stick** と **Slip** の状態変化とともに、各段階の特性値が変化することを考えられる。しかも、このような特性値の変化は使用状態への橋梁性能影響が不説明のままである。

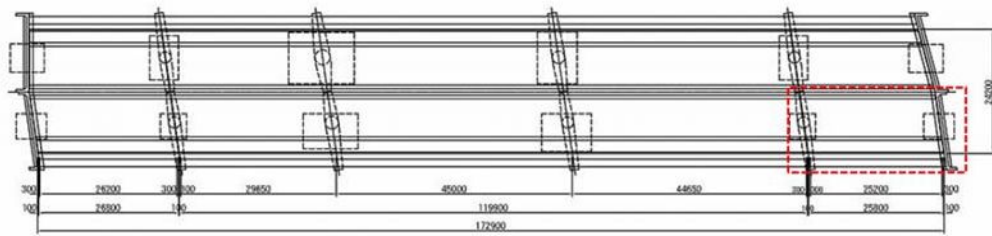
本研究では、上述した鋼製支承の機能不全が鋼橋性能に及ぼす影響を検討する上での現状の課題を解決するため、機能劣化した支承をシミュレート可能な数値解析モデルを構築する。さらに、交通荷重下での振動応答を計測し、機能劣化支承モデルを組み込んだ鋼橋の三次元 FEM 解析を行うことにより、支承の機能不全が鋼橋の通常状態の使用性に及ぼす影響を明らかにする。

2. 対象橋梁と計測概要

本研究は横浜市の 2 つ橋梁を対象に選びまして、異なる鋼製支承状態から橋梁の性能に影響することを調査した。

2.1 支承損傷橋梁 A

対象橋梁は横浜市港北区鶴見川に設置している。1970年架設され、5径間下路式鋼床版鋼箱桁橋である(図-1)。橋長172.9mで、幅員は10.25mである。点検記録より損傷度はcに判定され、主部材である橋台にひび割れ、橋脚に遊離石灰、沓座モルタルに剥離、欠損及びひび割れが認められるが、いずれの損傷も、直ちに橋梁の耐荷力に影響を及ぼす恐れはない。また、計測対象径間の一つ鋼製支承に脱落およびゆるみが認められた。損傷の原因は地震と推測しており、支承機能に障害が発生している。伸縮装置に支障機能の障害による段差等が発生していない為通行車両に支障はないが、応急補修として、橋軸方向に支承の過大变位を防ぐために木塊を差し込んでいた(図-1(c)、以下補修支承と呼ぶ)。計測センサの設置レイアウトは図-2(a)に示す。レーザー変位計と傾斜計はマグネットスタンドを使って、支承部に固定し、半日程度で計測した(図-2(b))。また、当日20トン荷重車を走行させる。



(a) 平面図(赤線枠は計測径間)



(b) 計測径間の写真

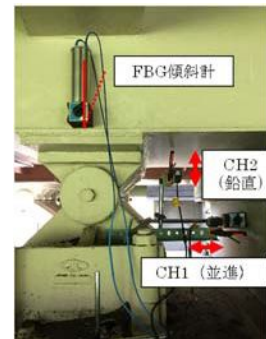


(c) 補修した脱落鋼製支承

図-1. 対象橋梁 A



(a) 計測センサ設置レイアウト



(b) 変位計と傾斜計の設置状況

図-2. 計測状況

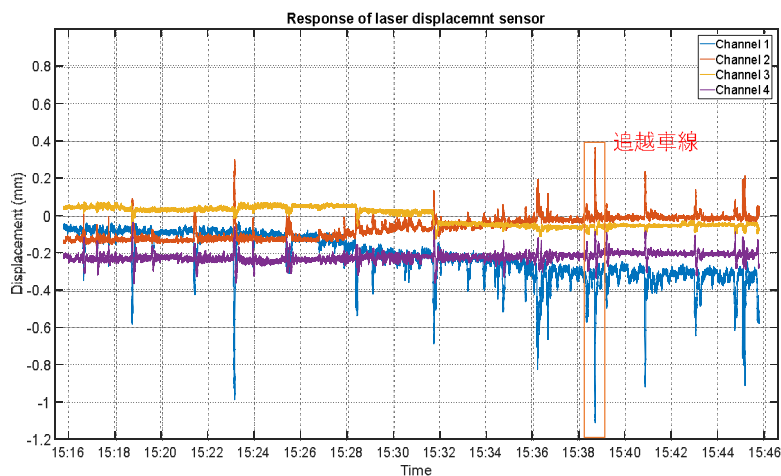


図-3. 支承部主桁の変位計結果

図-3 に支承部設置された変位計の結果一例を示している。同じ橋脚に設置されている健全支承と補修支承を比較する。まず温度変化によって支承部の主桁変位を考察する。カットオフ周波数は 1×10^{-3} Hz のローパスフィルタリングによって分離され、図-4 に環境温度と両支承の橋軸変位応答を示している。温度が低下したら、主桁は収縮する傾向が見える。また、健全支承の方は温度変化に追従しているが、応急補修用の木塊は支承のすべりを防ぐため、補修支承はほぼ変位が発生しない。

次に荷重車通過時の応答を考察する。補修支承が支持している主桁は上下方向に変位する対して、他の主桁は下向きにのみ変位する (図-5(a))。このような挙動は主桁端部の回転性能と関連すると考える。図-5(b) に示すように、補修支承の橋軸方向の変位がゼロに近い、すべり機能を制限している。通常時車両が単支持の橋梁を通過する際、支承は撓動する。主桁が合わせて回転しており、下向き変位応答を観測される。一方、補修支承の場合、撓動できず、エネルギーは回転のみによって消散され、上方及び下方の両方変位応答を観測され、平衡に達するまで継続する。両者の撓動メカニズムの差による、主桁端部の回転要求の増加が認識される。

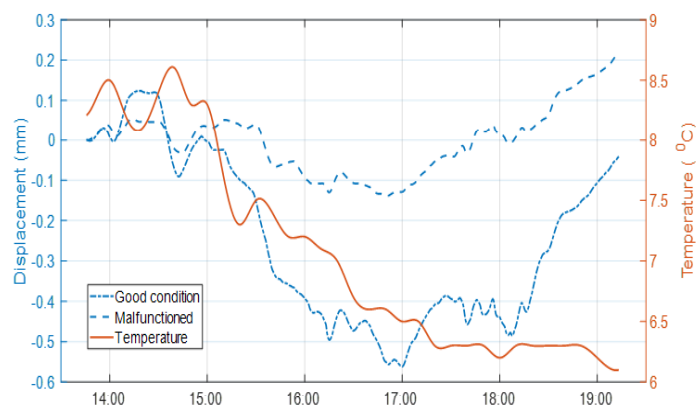


図-4. 支承部主桁の温度変位結果

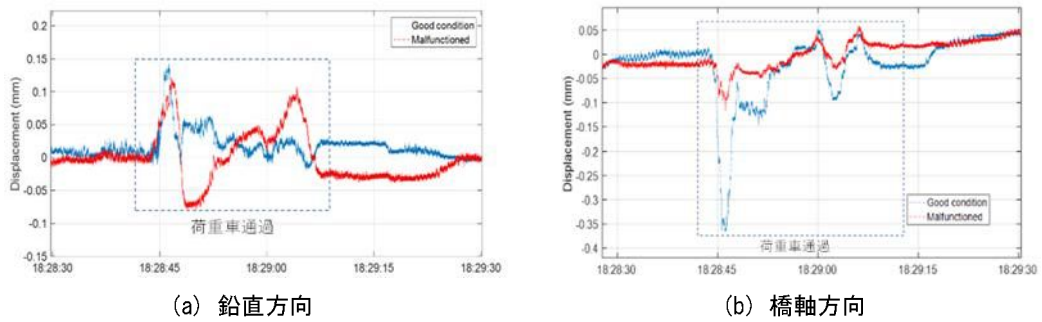


図-5. 荷重車通過時の支承部の変位結果

2.2 支承健全橋梁 B

対象橋梁 B は、横浜市内の 1973 年に完成した 2 径間連続鋼床版箱桁中路式の橋梁である。片側 1 車線の計 2 車線の対面交通となっている。図-6(a)に対象橋梁の平面図を示す。対象橋梁は両サイドエキスパンションジョイント、支承部は両端がそれぞれ可動、固定となり、中間支点は回転自由の状況であった。図-6(b)に対象橋梁の全体写真を示す。例年の橋梁点検記録より、微小の変状を把握していたが、支承の劣化や損傷を認めていなかった。本研究では、可動支承側に無線加速度計と変位計を用いて加速度と変位両方を計測した(図-7)。また、総重量既知の試験車両の走行試験を行った。

橋軸方向の典型的な変位応答を図-8 に示す。測定日の温度変化も同じ図で表示される。明確なピークは車両通過の結果であり、長時間の変位応答は温度の影響によるものと思われる。

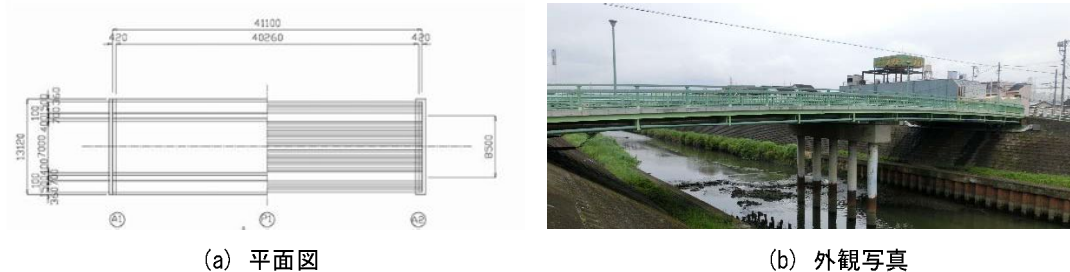
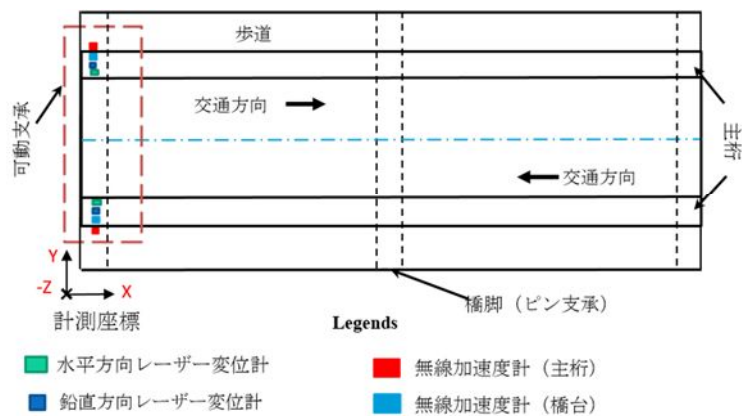


図-6. 対象橋梁 B



(a) 計測センサレイアウト



(b) 可動支承計測

図-7. 対象橋梁 B

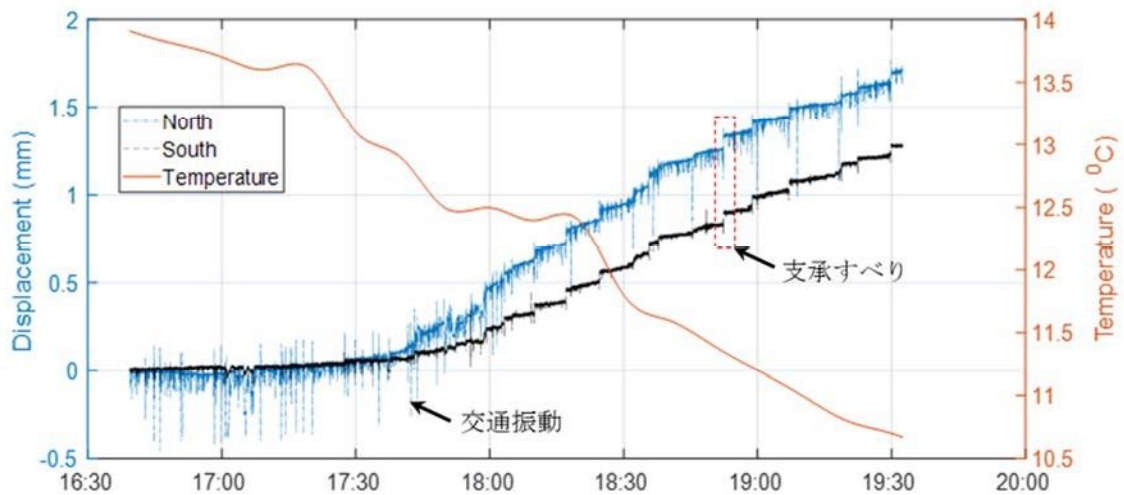


図-8. 支承部主桁の変位計結果

温度変化由来の変位は式(1)で計算される。aは鋼の熱膨張係数であり、代表値は $10.1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ であり、Lは橋梁 40.5 m であり、 ΔT は温度変化である。測定日には、温度は 13.9°C から 9.3°C まで、およそ 1.87mm の温度変位を発生しており、測定値に概ね一致しているが、図-8 から南側の支承が比較的小さい温度変位を示すことが分かる。これは、この滑り支承が部分的に機能していないこと推測する。

$$\Delta L = a \times L \times \Delta T \quad (1)$$

さらに、stick-slip 現象も計測から観察され、これは温度と車両通過の複合効果であると考えられている。例えば、温度の低下は橋梁構造を収縮させ、支承位置での摩擦は温度変位に抵抗する。車両が橋を通過する際、車両の通過によって抵抗が克服され、slip 現象が引き起こされる。車両が通過した後、温度変位に対して摩擦が支配的になることで、再び固着 (stick) が始まる。図-9 は、車両通過の結果としての stick-slip 発生の詳細を示す。

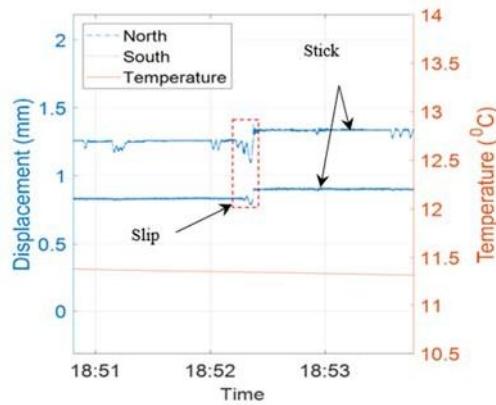
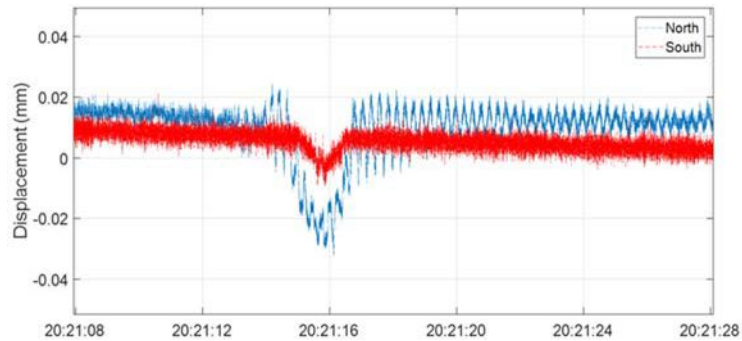
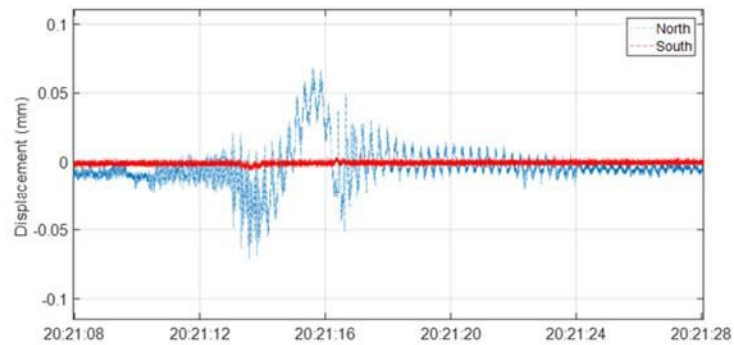


図-9. 観察された stick-slip 現象

試験車両通過時の支承部の主桁変位応答をさらに調べる．全応答から温度応答を分離するため，ハイパスフィルタリングを処理した．図-10は，試験車両が通過時の変位応答を示す．北側支承の比較的に良好に機能しているに対し，南側の支承変位は制限されているよう，摺動機能不具合を示すことが分かる．特に，北側の桁と比較して，南側の桁の鉛直変位応答がほぼゼロであった．桁の鉛直方向の変位は桁の回転に関係するため，橋軸方向の摺動不具合の場合は，支承部の回転能力を制限され，桁の鉛直変形を小さくなる．南側の鉛直応答はほぼ見えないことで，支承の機能不具合を示唆された．



(a) 橋軸方向



(b) 鉛直方向

図-10. 試験車両は南側車線通過時の変位応答

3. 数値シミュレーションと結果

計測で観察された支承の機能不全により，橋梁の影響を解明するために，橋梁Bの有限要素法モデルを構築し，温度変化や交通荷重の通過による橋梁変位を調査した．ソリッド要素を用いて構築した橋梁モデルは図-11に示している．また，本研究に重点的に支承部を調査するために，図-12に示すように，支承のディテールまで考慮している．

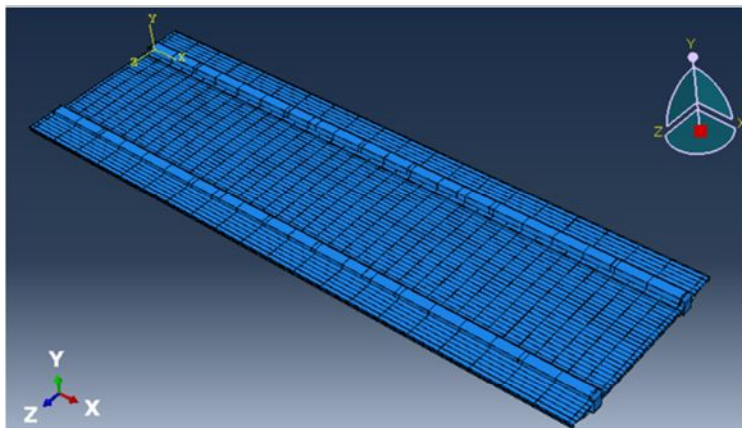


図-11. 橋梁BのFEMモデル

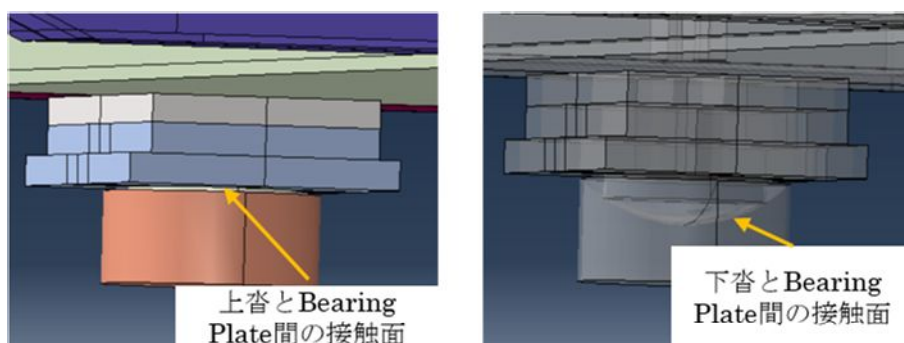


図-12. 支承部モデル

Stick-slipの数値シミュレーションは，静摩擦係数と動的摩擦係数の2つ摩擦係数によって決まれる．一般的に，摩擦係数は温度，圧力，摺動速度などの様々な要因に依存するが，本研究で，Odenらは実験に基づく提案していた摩擦モデルを採用し，圧力，温度，スリップ率に依存するデータがなくても実行できる．このモデルは，指数減衰摩擦モデルと呼ばれ，式(2)と図-13で示す．ここで μ は総摩擦， μ_s は静摩擦係数， μ_d は動摩擦係数， dc は減衰係数， $\dot{\gamma}eq$ はすべり速度である．この研究で採用された値は，摩擦係数および減衰係数の静的および動的係数はそれぞれ0.15,0.1,0.01である．滑りがない(固着,stick)場合は静的な摩擦係数が使用され，滑りの場合は静的な摩擦係数が動摩擦係数に変化し，遷移は急激ではなく，滑らかで減衰係数によって制御される．各支承の上下沓とBearing Plate間2つの接触界面があり，各界面に指数関数的減衰摩擦モデルが実装された(図-12)．

$$\mu = \mu_s + (\mu_s - \mu_k) e^{-dc\dot{\gamma}eq} \quad (2)$$

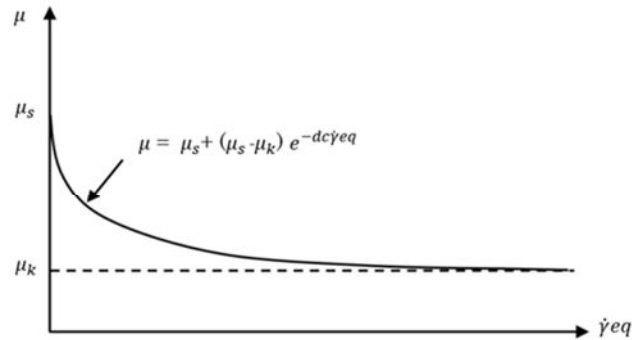


図-13. 指数減衰摩擦モデル

続いて、実際の観測条件での温度変化および試験車両の通過分析が行われた。図-14に入力温度と車両荷重条件を示しており、図-15には解析結果が示されている。解析結果から、温度影響と交通荷重の複合効果で、提案した数値モデルは stick-slip 現象を合理的に再現できることが分かった。車両が通過する前に、非常に小さな温度変位があり、車両通過時に大きな変位に発生し、slip が開始された。車両の影響がなくなった後、再び stick 現象が始まった。

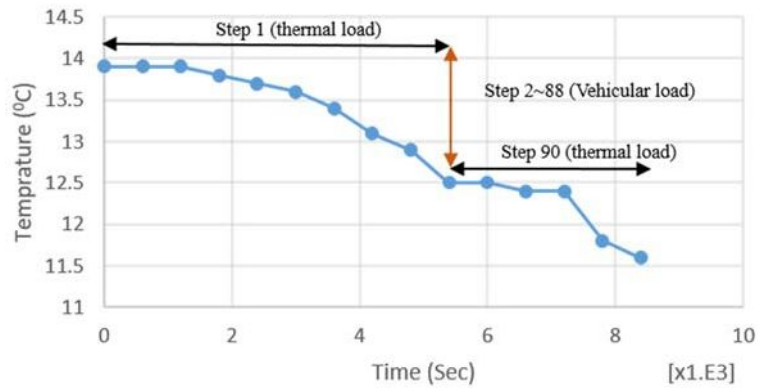
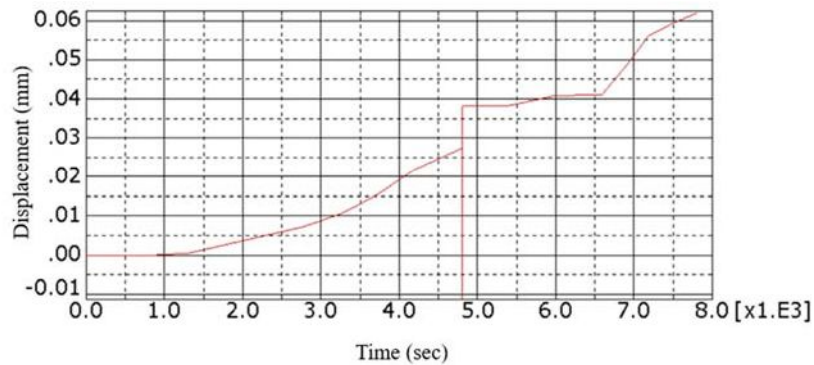
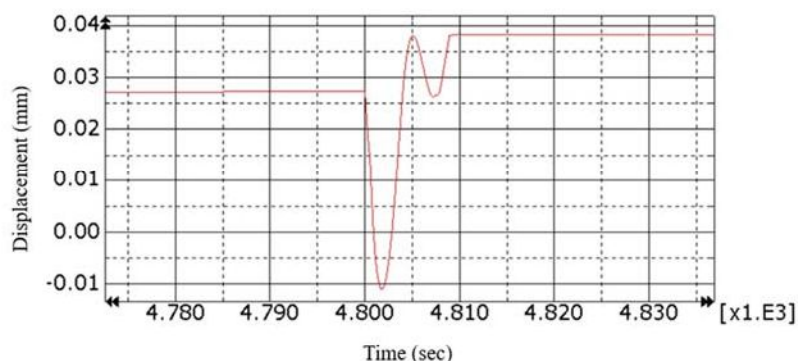


図-14. 計算条件（温度変化及び交通荷重）



(a) 変位応答



(b) 車両通過前後の変位応答

図-15. 支承部の主桁変位応答（橋軸方向）

橋梁 B の実測により、南側の可動支承は機能不全になっており、設計時の想定条件と乖離する子を予想される。このような機能不全は定期点検で発見できず、橋梁の使用性能への影響も不明である。本研究の最後に異なる支承状態で、20ton の路線バスの走行を想定して、支承部の疲労現象を調査する。解析結果は表-1 にまとめている。結果から、両方の支承不全より、片側の支承不全はより応力集中が発生しており、疲労寿命は低下する傾向を見せる。橋梁の維持管理の実務で、機能劣化の鋼製支承はより詳細に検討する必要性を示唆された。

表-1. 支承状態から疲労損傷への影響

解析状態	設計状態（通常可動支承）	南北両支承可動機能不全	南側支承のみ機能不全
応力分布			
最大応力	応力集中なし	最大 24 MPa	最大 34 MPa
疲労寿命	疲労問題なし	約 10%の低減	約 20%の低減

4. まとめ

この研究では、橋梁現場で変位応答を測定し、2種類の鋼製支承状態の橋梁を調査した。通常使用状態で、温度変形と車両通過の複合作用下での支承 stick-slip 現象が観察され、支承部の機能不全問題を効率的に発見できた。また、本研究で提案された支承モデリング手法、特に摩擦力のモデルは、stick-slip 現象と支承性能を合理的にシミュレートした。最後に提案された数値モデルを利用して、支承劣化より橋梁疲労損傷への影響を調査した。通常使用状態で、温度より疲労損傷への影響を無視できるが、交通荷重の状態では、機能不全の不利影響を解明できた。特に、片側の支承劣化はより大きい影響を発生することを確認できた。

5. 研究成果に基づいて学会発表

- 1) Hafiz Ahmed Waqas, Di Su, and Tomonori Nagayama: Feasibility of in situ displacement and acceleration measurements to identify bridge steel bearing malfunction, in 7th World Conference on Structural Control and Monitoring (7WCSCM), pp.2338-2346, Qingdao, China, 2018.
- 2) Hafiz Ahmed Waqas, Di Su, and Tomonori Nagayama: Bearing malfunction identification of steel bearings from response measurement, in JSCE conference, Sapporo, 2018.