

伸縮装置に関連する研究論文のレビュー

A Review of Bridge Expansion Joints

九州工業大学大学院 工学研究院 建設社会工学研究系
Department of Civil Engineering,
Kyushu Institute of Technology

教授
斉木 功
SAIKI Isao



1. はじめに

道路橋の伸縮装置は橋の温度変化・コンクリートのクリープや乾燥収縮・活荷重等により生じる桁端の変位に対して、車両が橋面を支障なく走行できるようにするための装置である。この伸縮装置の設計・施工に関する手引きとして、道路橋伸縮装置便覧¹⁾が1970年に発刊されている。一方、道路橋示方書は5年ないし10年に一度程度改定されており、本稿執筆時点では2017年版以来の改定が間近に迫っていると聞いている。2017年版では性能規定化が推進され、道路橋として求められる性能が明確化されている。道路橋伸縮装置便覧においても、改定に向けた議論が進められていたが、道路橋示方書改定後に議論が再開される見通しである。

橋の使用目的との整合性を満足するために伸縮装置に要求される性能は、車両の走行性・耐荷性・耐久性・水密性・遮音性・振動抑制・すべり抵抗である。これらの性能を担保するために、多くの研究・技術開発がなされている。学術誌における発表件数は、橋梁の他の分野に比べると多いとは言えないが、伸縮装置の特集が組まれるこの機会にこれらの研究のレビューを行うこととした。

2. 国内の研究論文

国内の研究論文は、損傷メカニズムと耐荷力に関する研究、振動や騒音に関する研究、維持管理や異常検知に関する研究に大別し、それぞれの研究目的を網羅的に述べることにした。

(1) 損傷メカニズムと耐荷力に関する研究

実際に損傷した伸縮装置の損傷メカニズムに関する研究として以下が挙げられる。川畑・神田²⁾は供用後30年で損傷した鋼製フィンガージョイント(写真1)の損傷メカニズムの解明を試み、段差の発生・遊間の拡大が活荷重応力の増加を招き、アンカープレート等の鋼材腐食による減肉にともなう応力の増加が損傷発生の原因であると述べている。

また、酒井ら³⁾は損傷した鋼製フィンガージョイントの損傷メカニズムを考察し、交通荷重によるモルタル部

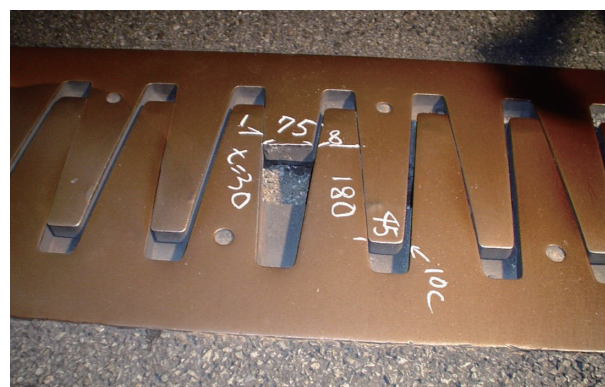


写真1 損傷を受けたフィンガージョイント

の損傷から路面排水が浸入し、アンカープレート等に腐食が進行したことを指摘している。耐荷力や耐久性に関する研究としては、阿部ら⁴⁾が老朽化した伸縮装置の取替に用いられる改良型の伸縮装置の耐荷力と疲労耐久性に関する研究を行った。山田⁵⁾は、伸縮装置の疲労照査のための荷重と繰り返し数を提案し、さらに、伸縮装置の疲労耐久性の照査方法を提案している⁶⁾。また、伏屋ら⁷⁾はビーム型伸縮装置の溶接部の疲労試験結果を報告している。

伸縮装置の取付け部に着目した研究も進められている。関口ら⁸⁾は、伸縮装置の種類と取付け部の床版厚さが疲労耐久性に与える影響を輪荷重走行試験により検討した。柳澤ら⁹⁾は、後打ちコンクリート部が伸縮装置の耐久性に大きく影響することを踏まえ、輪荷重走行試験(写真2)により、後打ちコンクリート部に生じる応力におよぼす鉄筋・かぶり厚・コンクリート強度の影響を



写真2 輪荷重走行試験の様子⁹⁾

明らかにした。松野ら¹⁰⁾は、実験および有限要素解析に基づき、鋼製フィンガージョイントの形状の合理化を行った。

(2) 振動・騒音に関する研究

伸縮装置に起因する振動・騒音に関する研究としては、松本ら¹¹⁾がモジュラー型伸縮装置の騒音発生源と騒音制御に関して実験的な研究を行った。室井ら¹²⁾は、伸縮装置の凹凸が橋梁の振動におよぼす影響を実験および有限要素解析により明らかにした。大竹ら¹³⁾は、伸縮装置前後の路面凹凸が低周波音におよぼす影響について、実験及び数値解析により検討した。

地震時には隣接する桁の相対変位により伸縮装置が損傷を受けることがある(写真3)。宮定ら¹⁴⁾は、地震動による桁間衝突が伸縮装置の変形や損傷に与える影響と、それによる車両の通行可能性を有限要素解析により推定した。また、道路橋示方書では伸縮装置の耐震基準は規定されておらず、橋梁全体に影響をおよぼさないよう、伸縮装置が損傷しても橋に影響を与えないような配慮が必要とされている。このことに鑑み、全・川島¹⁵⁾は、伸縮装置を非線形ばねでモデル化することで、鋼製フィンガージョイントが橋梁の地震応答特性におよぼす影響を検討した。



写真3 東日本大震災にて損傷を受けた伸縮装置

(3) 維持管理・異常検知に関する研究

伸縮装置の維持管理や異常検知に関する研究としては、以下のものが挙げられる。加賀山ら¹⁶⁾は、伸縮装置の維持管理を目的として、データベースに蓄積された情報からデータマイニングの手法を用い、伸縮装置の損傷に関するルール型知識の獲得を試みている。村上ら¹⁷⁾は、高速道路の日常点検データと構造等の属性データから損傷の実態と要因を分析し、数量化2類を用いた損傷予測を行い、損傷発生寄与率の高い条件を整理した。また、服部ら¹⁸⁾は、熟練技術者の判断結果を基準として、車両の伸縮装置通過音による異常検知を試み、さらにその精度向上を図っている¹⁹⁾。

3. 国際誌における研究論文

国際誌における研究論文については、伸縮装置の設計に関する研究、損傷メカニズムに関する研究、ヘルスモニタリングに関する研究から代表的なものを選び、その目的と得られた結論についてまとめた。

(1) 伸縮装置の設計に関する研究

FHWA (Federal Highway Administration) が実施した調査では、5年間の評価期間において60%以上の伸縮装置が止水機能不十分であり、残りの40%は橋梁の寿命に影響を及ぼす問題を抱えていたと指摘されている。Chang and Lee²⁰⁾は、インディアナ州の高速道路橋で使用されている複数の伸縮装置の性能を調査・評価している。この調査はアンケート、道路管理データの分析、専門家への聞き取り調査で行われた。その結果、伸縮装置の種類別ではストリップシール継手が最も性能が高く、次いで圧縮シール、一体型橋台の順であった。この論文では、伸縮装置の選択、一般的な問題の是正策、保証条項の活用、材料試験、評価基準の改訂といった改善策を提案している。特に、伸縮装置の問題はシールの亀裂や接着剤の破損に起因することが多く、コンクリートをシーラーでコーティングすること、地覆との開口部を広くとること、伸縮装置に滞水しないよう十分な勾配を設けることが提案されている。また、止水材料や伸縮装置の止水性能の試験を設置前に行い、そのデータを維持管理のために保管することを推奨している。

伸縮装置の移動量の設計のためにAASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) で設定されている温度は必ずしも実態を表していないことが指摘されている²¹⁾。これを踏まえ、Roeder²²⁾は、コンクリート橋およびコンクリート床版を有する鋼橋を対象として、設計温度と温度による移動量を決定するための方法を提案している。この論文では、全米地図上に平均最大温度や平均最低温度などをコンターで示した“design map”が提案された。これらの図の比較から、コンクリート橋の伸縮量は一般的に鋼橋よりも小さいものの、その差はAASHTOの規定ほど大きくはないことが示された。また、米国の大半の地域では、提案された鋼橋およびコンクリート橋の温度伸縮設計値は、中央北部地域を除き、現在要求されている設計値と同等か、それよりも小さいことが示された。加えて、伸縮装置と支承の設計において考慮すべき温度変化を決定するための合理的かつ経済的な手順が提案された。

Lima and Brito²³⁾は、伸縮装置をその種類・損傷・補修に関してより適切に把握し特徴付けることを目的とし、ポルトガルの高速道路橋に設置された150の伸縮装置に対する点検調査の結果をまとめている。調査の結果、

以下のことが結論付けられている。(a)移行部とアンカー部の空洞は、他の部分よりも損傷を受けやすく頻繁な補修が必要である。(b)施工不良と維持管理不足が損傷の最も一般的な原因である。(c)直接的または間接的な目視による観察が依然として最良の診断方法である。論文の最後では、エラストマー材料を用いた新しいタイプの伸縮装置により性能が改善されていること、また、可動部が少ない単純なシステムは信頼性・耐久性の面から推奨されることが述べられている。

伸縮装置にとって重要なシール材の研究・開発も行われている。Li and Xu²⁴⁾は、形状記憶ポリマーをベースとした自己修復性シール材の性能評価試験を行い、実用性を実証している。

(2) 伸縮装置の損傷メカニズムの研究

伸縮装置の損傷メカニズムに関する研究論文は、その影響の大きさを反映して長大橋を対象としたものが主であった。Guo et al.²⁵⁾は、制振ダンパーの影響に着目し、温度および変動荷重による長大橋の伸縮装置の動きを調査した。調査対象はダンパーが設置されていない吊橋、補修後にダンパーを設置した吊橋、大型のダンパーを設置した斜張橋であり、相互比較が行われた。モニタリングデータと数値シミュレーションの結果から、変動荷重による変位が伸縮装置の累積変位を大きくし、これが早期破損につながることを示された。また、ダンパー設置前後の累積変位を比較した結果、ダンパーが伸縮装置の変位を大幅に減少させたことが明らかになった。したがって、粘性ダンパーが伸縮装置の耐用年数を延ばすための効果的な手段となり得ると結論付けられている。さらに、耐久性のある摩擦材の使用、制御ばねの追加、変位拘束ベルトの採用など、複数の損傷軽減措置が実施され、その有効性は現場観察を通じて検証された²⁶⁾。

Sun and Zhang²⁷⁾は、Jiangyin 吊橋の早期に損傷したモジュラー型伸縮装置の損傷メカニズムについて、現地調査および有限要素解析の結果に基づいて論じている。現地調査は静的試験、影響線試験、トラック通過試験により行われた。その結果、以下のことが明らかとなった。静的試験および影響線試験では、伸縮装置のひずみが桁の変形によって生じること、この結果が過去の損傷と整合することが判明した。一方、トラック通過試験の結果から、大型トラックの車軸による直接的な衝撃が伸縮装置に大きなひずみを引き起こす可能性を示し、この作用によってスライディングベアリングが頻繁に損傷していたことを明らかにした。

Ding et al.²⁸⁾は大型車両がモジュラー型伸縮装置を通過する際に誘発される衝撃とその橋梁応答への影響を解析するため、分布ばね・ダンパー要素を用いた伸縮装置の数値モデルを提案した。この数値モデルを用いた解析

により、車両の軸重、支承反力、せん断力、曲げモーメントに関連する衝撃係数が評価された。その結果、伸縮装置における衝撃が支承反力とせん断力に与える影響は、曲げモーメントに与える影響よりも大きいことが明らかにされた。また、軸重の最大衝撃係数は中国やヨーロッパの基準で推奨されている値を超える可能性があることが指摘されている。

(3) 伸縮装置のヘルスマニタリングに関する研究

Ni et al.²⁹⁾は、長期モニタリングデータを利用した吊橋の伸縮装置の評価手法を提案している。まず、伸縮装置の変位と橋梁の温度の計測データに基づき、実効温度と移動量との間の正常な相関パターンを確立し、相関パターンがこの正常なパターンから逸脱することで異常を検知する。確立された相関パターンを用いて、設計上の最高温度および最低温度下での伸縮装置の変位が予測され、設計上の許容値と比較することでその妥当性が検証されている。また、伸縮装置の耐用年数と交換間隔は累積変位に強く依存するため、伸縮装置の合理的な点検または交換間隔を決定するために累積変位を正確に予測することが重要であると述べている。

Xia et al.³⁰⁾は、長大吊橋の1年間のモニタリングデータを統計的に分析し、供用条件下での構造性能への熱影響を研究した。長期的な温度とひずみ・変位・ハンガーの張力を含む構造応答のデータから、それらの相関関係が統計的に分析された。その結果、温度変化が長大橋の変形を引き起こす主要な原因であり、温度分布は橋軸方向に一様ではないことが示され、数値解析においてこの不均一な温度分布を考慮する必要があると述べている。また、本論文でひずみから推定した変位は、伸縮装置に設置された変位計や桁に設置されたGPSから直接測定された値によって検証された。

Huang et al.³¹⁾は、温度と変位の連続的なモニタリングデータを用いた伸縮装置の警報手法を提案した。まず、正準相関分析を用いて温度場と伸縮装置の変位との相関を最大化する代表温度である正準相関温度を提案した。これに基づき、伸縮装置の通常パターンを表す温度-変位関係モデルが確立された。伸縮装置の異常検知は、温度-変位関係モデルの推定誤差に対する平均値管理図により構築された。提案手法を斜張橋に適用し、正準相関温度に基づく温度-変位関係モデルの予測能力と伸縮装置の異常検知能力の高さが実証された。

Ni et al.³²⁾は、これまで決定論的に回帰されてきた橋梁の温度-伸縮装置の変位関係に不確実性を考慮することを試み、橋梁の温度と伸縮装置の変位の相関を表すベイズ回帰モデルを提案した。これにより、従来の決定論的モデルと異なり、新しく収集されたデータに対する予測の不確実性を定量化することが可能となった。このベ

イズ推定モデルと信頼性理論により、伸縮装置の故障確率を評価するための異常指数が提案された。さらに、継続的なモニタリングデータから、異常指数を更新することができ、伸縮装置の潜在的な不具合を早期に予見することが可能となる。

4. おわりに

本誌で伸縮装置の特集記事が企画されているということで、伸縮装置をキーワードに、国内外でどのような研究・開発が行われてきたかを調査した。本稿の執筆依頼を受けてから、伸縮装置の製造過程と施工現場を拝見させていただく機会をいただいた。その中で、この二、三十年程度の間に様々な工夫によって伸縮装置の高性能化・高耐久化がなされてきたことを学ぶことができた。そのための努力を積み重ねてくださった技術者に敬意を表したい。

今回の経験をもとに個人的に考えたことを以下に述べさせていただく。

- ・最も汎用的と思われる、鋼製伸縮装置とコンクリート系床版の組み合わせでは、いくつかの論文にも述べられていたように、取付け部の耐久性が重要となる。剛性が大きく異なる異種材料の接合部における変形の局所化を小さくする技術開発がさらに必要なのではないかと感じた。
- ・地震後の応急復旧が困難でないことから、伸縮装置にレベル2地震に対する耐震性は要求されていないが、写真4のように段差が生じないような損傷に限定できればそれに越したことはないと思う。
- ・近年は温度変化によると思われる橋梁の損傷も報告されている。伸縮装置や支承は温度変化を考慮して設計されているが、それらの変位を測定し（写真5）データを蓄積することで設計での想定の確認からしさを評価し、設計にフィードバックすることができるのではないかと考える。

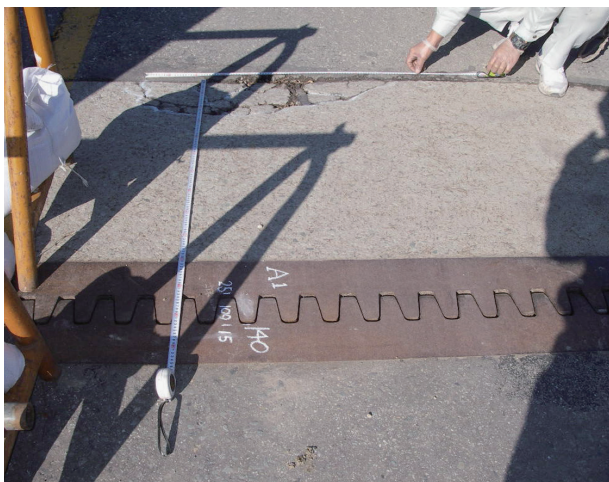


写真4 伸縮装置の遊間異常の例



写真5 伸縮装置における変位計測の様子

本稿が伸縮装置のさらなる発展に少しでも貢献できれば幸いである。本稿の執筆機会を与えてくださった関係各位に感謝します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋伸縮装置便覧，1970.
- 2) 川畑篤敬，神田一夫：供用後約 30 年で破損した鋼フィンガージョイントの損傷メカニズムの推定，土木学会構造工学論文集，Vol.50A，pp.727-736，2004.
- 3) 酒井修平，小野秀一，舘石和雄：道路橋の鋼製フィンガージョイントの損傷メカニズム，鋼構造論文集，Vol.21，No.84，pp.9-21，2014.
- 4) 阿部忠，佐々木茂隆，野口博之，水口和彦，川井豊：伸縮装置を設置した RC はりの静的耐荷力および修正 Goodman の関係式を用いた耐疲労性の評価，土木学会構造工学論文集，Vol.69A，pp.871-883，2023.
- 5) 山田健太郎：伸縮装置や標識柱に対する簡易な疲労設計荷重の提案，土木学会構造工学論文集，Vol.61A，pp.400-407，2015.
- 6) 山田健太郎：輪重の繰返しを受ける伸縮装置の疲労照査について，土木学会構造工学論文集，Vol.68A，pp.564-571，2022.
- 7) 伏屋和樹，竹市雅人，山田健太郎：ビーム型伸縮装置の溶接部の疲労試験，土木学会構造工学論文集，Vol.60A，pp.642-650，2014.
- 8) 関口幹夫，橋原正周，堀川都志雄：各種ジョイント付き CFRP 補強床版の疲労耐久性，土木学会構造工学論文集，Vol.58A，pp.1144-1155，2012.
- 9) 柳澤則文，松井繁之，長谷川真司，久保田和徳：輪荷重走行下における伸縮装置の後打ちコンクリート部の応力性状，土木学会構造工学論文集，Vol.67A，pp.710-721，2021.

- 10) 松野正見, 利根川太郎, 奥井義昭: 道路橋鋼製伸縮装置の合理化に関する研究, 土木学会論文集, Vol.79, No.11, 22-00332, 2023.
- 11) 松本泰尚, 山口宏樹, 富田直幹, 加藤誠之, 鶴野禎史, 廣本泰洋, Ravshanovich, K.A.: モジュラー型エクspansionsジョイントの騒音発生源と騒音制御策に関する実験的研究, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.1, pp.75-92, 2007.
- 12) 室井智文, 薄井王尚, 樺山好幸, 深田幸史, 梶川康男, 幸田信則: 伸縮継手付近の路面凹凸の影響を受けた大型車両と PC 桁橋の振動特性, 土木学会構造工学論文集, Vol.54A, pp.171-180, 2008.
- 13) 大竹省吾, 中村一史, 長船寿一, 大蔵崇, 鳥部智之: 高架橋の伸縮装置前後の路面凹凸の特徴と低周波音への影響に関する研究, 土木学会構造工学論文集, Vol.63A, pp.182-195, 2017.
- 14) 宮定龍司, 梶田幸秀, 大塚久哲, 北原武嗣: 桁間衝突解析による桁端部の損傷状況の推定と緊急車両の通行可能性の検討, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.4, pp.1027-1036, 2009.
- 15) 全貴蓮, 川島一彦: フィンガー型 Expansion Joint が橋梁の地震応答特性に及ぼす影響, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.1, pp.243-254, 2009.
- 16) 加賀山泰一, 河村圭, 宮本文穂, 田中信也: ラフ集合の概念による橋梁伸縮継手損傷のルール型知識獲得, 土木学会論文集, No.735/VI-59, pp.157-170, 2003.
- 17) 村上睦夫, 日野泰雄, 黒崎剛史: 効率的維持管理のための高架橋道路伸縮継手の損傷要因分析, 土木学会論文集 D, Vol.62, No.3, pp.474-482, 2006.
- 18) 服部洋, 大島義信, 塚本成昭: 車両通過音を活用した道路橋伸縮装置の異常検知に関する基礎的研究, 土木学会論文集 A2, Vol.67, No.2, pp.I_865-I_873, 2011.
- 19) 大島義信, 福田翔平, Heng, S., 服部洋, 塚本成昭: 車両通過音を用いた道路橋伸縮装置の異常検知における高精度化に関する検討, 土木学会論文集 A2, Vol.68, No.2, pp.I_751-I_759, 2011.
- 20) Chang, L.-M. and Lee, Y.-J.: Evaluation of performance of bridge deck expansion joints, J. Perform. Constr. Facil., Vol.16, pp.3-9, 2002.
- 21) Moorthy, S. and Roeder, C.W.: Temperature dependent bridge movements, ASCE J. Struct. Div., Vol.118, pp.1090-1105, 1992.
- 22) Roeder, C.W.: Proposed design method for thermal bridge movements, ASCE J. Bridge Eng., Vol.8, pp.12-19, 2003.
- 23) Lima, J.M. and Brito, J.D.: Inspection survey of 150 expansion joints in road bridges, Engineering Structures, Vol.31, pp.1077-1084, 2009.
- 24) Li, G. and Xu, T.: Thermomechanical characterization of shape memory polymer-based self-healing syntactic foam sealant for expansion joints, ASCE J. Trans. Eng., Vol.137, pp.805-814, 2011.
- 25) Guo, T., Liu, J., Zhang, Y., Pan, S.: Displacement monitoring and analysis of expansion joints of long-span steel bridges with viscous dampers, ASCE J. Bridge Eng., Vol.20, pp.805-814, 2015.
- 26) Guo, T., Liu, J., Huang, L.: Investigation and control of excessive cumulative girder movements of long-span steel suspension bridges, Engineering Structures, Vol.125, pp.217-226, 2016.
- 27) Sun, Z. and Zhang, Y.: Failure mechanism of expansion joints in a suspension bridge, ASCE J. Bridge Eng., Vol.21, p.05016005, 2016.
- 28) Ding, Y, Zhang, W., Au, F.T.K.: Effect of dynamic impact at modular bridge expansion joints on bridge design, Engineering Structures, Vol.127, pp.645-662, 2016.
- 29) Ni, Y.Q., Hua, X.G., Wong, K.Y.: Assessment of bridge expansion joints using long-term displacement and temperature measurement, J. Perform. Constr. Facil., Vol.21, pp.143-151, 2007.
- 30) Xia, Q., Zhang, J., Tian, Y., Zhang, Y.: Experimental study of thermal effects on a long-span suspension bridge, ASCE J. Bridge Eng., Vol.22, p.04017034, 2017.
- 31) Huang, H., Yu, T., Li, H., Liu, H.: New representative temperature for performance alarming of bridge expansion joints through temperature-displacement relationship, ASCE J. Bridge Eng., Vol.23, p.04018043, 2018.
- 32) Ni, Y.Q., Wang, Y.W., Zhang, C.: A Bayesian approach for condition assessment and damage alarm of bridge expansion joints using long-term structural health monitoring data, Engineering Structures, Vol.212, 110520, 2020.