

施設研究 ニュース

No. 364 2020.12. 1

公益財団法人 鉄道総合技術研究所 施設研究ニュース編集委員会

「鉄骨造旅客上家の耐震診断指針」の一部変更

1. はじめに

「鉄骨造旅客上家の耐震診断指針」は、既存鉄骨造旅客上家に対して、構造形態や構造種別に応じた耐震性能の評価方法を検討し、鉄道事業者における耐震診断業務で運用可能な耐震診断指針として整備したものです。本指針は、2017年3月に鉄道技術推進センターのホームページにおいて公開（施設研究ニュース No. 322 2017. 6. 1 参照）され、これまでに各鉄道事業者において実運用がなされるなかで、一部の内容について修正や追加の必要が生じました。そこで、本稿にて変更内容を報告します。

2. 変更箇所

本指針の目次を図1に示します。今回の変更は、以下の2つからなります。

- (1) 付属資料1と2に関する変更
(旧国鉄標準型上家の耐震診断例に関する変更)
- (2) 付属資料3に関する変更
(高架上家の応答増幅の設定法に関する変更)

上記について、以降でそれぞれ報告します。

3. 付属資料1と付属資料2に関する変更

本指針の付属資料1および付属資料2においては、旅客上家の耐震診断での参考とするため、旧国鉄標準型上家を対象とした耐震診断例を示しています。このうち、「V型上家」(図2)において、接合部等の評価の考え方を修正しました。具体的な修正内容は、図3に示す通りです。この結果、V型上家の耐震診断結果(C値、F値、Is値)にも修正が生じます。その一例として、HTBタイプの耐震診断結果の修正を表1に示します。C値、F値、Is値の増減はケースにより異なりますが、元々が基準(q値、Is値)を上回っていたケースでも、修正により下回る場合があります(表1中の橙色のケース)。なお、修正はV型上家のみであり、その他の型式(Y型、F型、W型、T型、M型)については変更はありません。

1. 総則	1
2. 耐震診断の基本方針	2
3. 基礎調査、実態調査	7
4. 本診断	9

付属資料	変更(1)
付属資料1 旧国鉄標準型上家耐震診断報告書	
付属資料2 旧国鉄標準型上家で用いられる各種接合部の耐力評価事例	
付属資料3 鉄道高架上家の耐震診断用A ₂ の設定法(案)	
参考資料	変更(2)
参考資料1 鉄道高架上家の耐震診断用A ₂ の算定精度に関する検討	
参考資料2 微動測定から推定した土木高架橋の固有周期または固有振動数	
【追加予定】参考資料3 高架上家診断用A ₂ と時刻歴応答解析の比較検証	

図1 本指針の目次(一部表記省略)と変更箇所

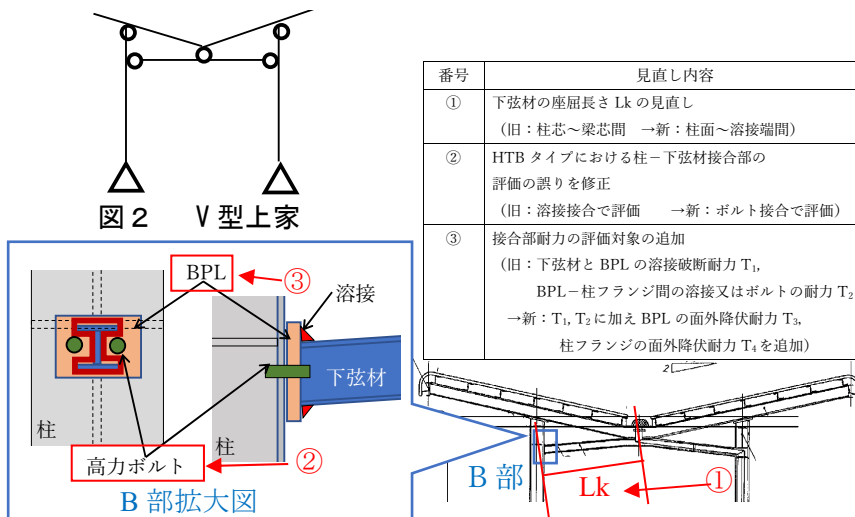


図3 V型上家の評価の見直し内容

表1 V型上家 (HTBタイプ) の耐震診断結果の修正

荷重	上家幅	線路横断方向					
		耐震診断結果(変更前→変更後)					
		C		F		Is	
S0	6	0.34	-0.24	2.9	-2.0	0.98	-0.49
	7	0.30	-0.22	1.8	-2.0	0.55	-0.45
	8	0.39	-0.34	1.8	-2.0	0.61	-0.68
	9	0.36	-0.31	1.8	-2.0	0.74	-0.62
S1	10	0.31	-0.27	1.8	-2.0	0.57	-0.54
	6	0.23	-0.13	1.8	-2.0	0.41	-0.27
	7	0.29	-0.23	1.8	-2.0	0.52	-0.46
	8	0.24	-0.16	2.9	-2.0	0.69	-0.32
S2	9	0.26	-0.15	2.9	-2.0	0.76	-0.31
	6	0.21	-0.11	1.8	-2.0	0.37	-0.23
	7	0.22	-0.15	1.8	-2.0	0.39	-0.30
	8	0.12	-0.10	2.9	-2.0	0.35	-0.20
9	0.27	-0.13	1.8	-2.0	0.48	-0.27	

4. 付属資料3に関する変更

4.1 付属資料3の位置づけ

高架上家(図4)の耐震診断においては、高架橋上にあることによる応答増幅を適切に考慮する必要があります。しかし、高架上家と高架橋で質量が大きく異なるため、一般建築物における実用的な応答増幅の評価法が適用困難と考えられます。そこで、付属資料3では、高架上家の応答増幅の実用的な評価法(以下、「 A_2 設定法」)を示しています。

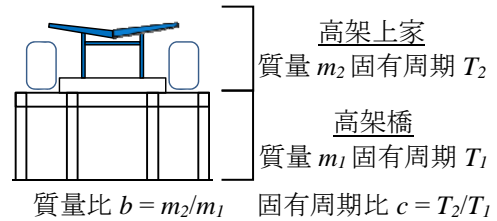


図4 高架上家および高架橋

4.2 現行の A_2 設定法の課題

現行の A_2 設定法は、建築物の構造関係技術基準解説書¹⁾に定められた算出法(以下、「精算法」)を基本として提案したものです。図5に示す通り、現行の A_2 は、 A'_2 (高架上家/入力地震動の応答倍率)を A'_1 (高架橋/入力地震動の応答倍率)で除した A'_2/A'_1 としており、これは精算法の考え方に合わせたものです。

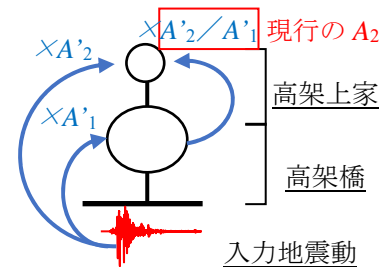


図5 応答倍率の概念図

しかし、層(階)ごとの質量や剛性が概ね均一である一般建築物とは異なり、高架上家と高架橋では、共振現象の影響を大きく受けるため、 A'_2 が増加するだけでなく、 A'_1 が低下する性状となります(図6)。 A'_1 (分母)が低下することで、必要以上に A_2 が大きくなると考えられます。この結果、設計用地震力が必要以上に大きく設定され、耐震補強量が過大となる場合があります、運用上の課題となっていました。

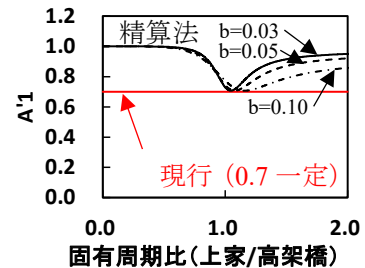


図6 精算法および現行の A'_1

4.3 新たな A_2 設定法

現行の A_2 設定法が $A_2=A'_2/A'_1$ としているのは、精算法の考え方に合わせて高架橋の応答を基準としたためです。一方で、入力地震動を基準とすることで、 $A_2=A'_2$ とすることができると考えられます(図7)。そこで、この新たな A_2 設定法($A_2=A'_2$)と現行の A_2 設定法($A_2=A'_2/A'_1$)について、時刻歴応答解析との比較検討を行いました。図8に、高架上家の1次設計レベルの設計用地震力を、各方法で算出した結果(質量比0.03の場合)を示します。ここでは、1次設計レベルのため、高架橋の応答(層せん断力係数)を0.20とし、入力地震動は応答スペクトルがそれと同等になるように設定しました。時刻歴応答解析と比較して、現行の設定法は固有周期比1.0近傍で大きくなる一方、新たな設定法は良い整合を示します。以上の解析検討をふまえ、 $A_2=A'_2$ としても良い($A'_1=0.7$ で除さなくても良い)ものとししました。なお、現行の A_2 設定法は安全側であり、引続き使用可能です。

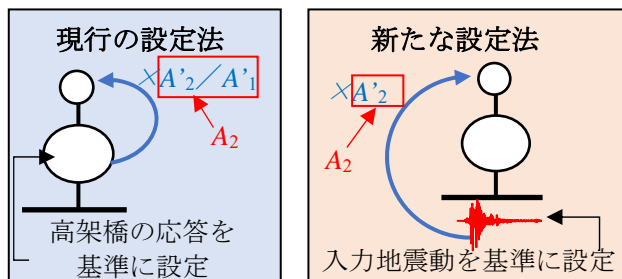


図7 各 A_2 設定法の概念図

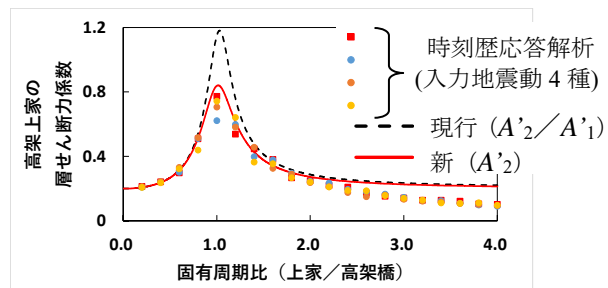


図8 時刻歴応答解析と各 A_2 設定法の比較

5. おわりに

以上を反映した本指針の変更版は、鉄道技術推進センターのホームページにて2020年12月中に公開するとともに、出版を予定しています。

参考文献 1) 2020年版 建築物の構造関係技術基準解説書, pp.599-600, 2020

執筆者: 構造物技術研究部 建築研究室 三木広志

担当者: 構造物技術研究部 建築研究室 清水克将, 石川大輔

砂路盤上における SFC てん充道床軌道の適用

1. はじめに

図1に示すような砂州地域に敷設されている砂路盤上のバラスト軌道においては、経年劣化によるバラストの細粒分に加え、台風等に伴う強風により砂が道床内に飛来し堆積することで噴泥を生じる場合があります。そこで、鉄道総研では当該区間のバラスト軌道において将来的に噴泥が生じないように、既設の噴泥していないバラスト軌道に対して「SFC てん充道床軌道¹⁾」の適用を検討しています。SFC てん充道床軌道とは、経年した既存のバラスト道床に充填可能な超微粒子セメント(SFC)ミルクを用いることで道床交換を不要とした低コストなてん充道床軌道です。本稿では、営業線で砂路盤の剛性等を調査するとともに、室内試験においてSFC てん充道床軌道の適用可能性について検討した結果を報告します。

2. 砂州地域におけるバラスト軌道の調査

本調査では現地の砂路盤とバラストの粒度分布および砂路盤の剛性を確認しました。図2に現地の砂路盤およびバラストの粒径加積曲線を示します。同図に示すように、現地の砂路盤は東北5号珪砂と近い粒度分布を示し、均等係数は2.0，曲率係数は1.0でした。よって、現地の砂路盤は土質材料の工学的分類体系において「砂(S)」に分類され、均等係数が小さいため鉄道盛土材料の群分類²⁾としては「B群」に分類されます。また、現地のバラストは粒径0.3～0.5mm程度の含有率が高くなっており、これは砂が混入したことによるものと考えられます。

砂路盤の剛性は簡易動的コーン貫入試験および小型FWD試験により測定しました(図3参照)。なお、設計標準²⁾において省力化軌道を敷設可能な路床の適合みなし仕様として $K_{30} \geq 110\text{MN/m}^3$ と定められており、SFC てん充道床軌道においては路盤に同条件を適用しています。測定の結果、小型FWD試験から求めた K_{30} 値の平均値(3地点)は 146MN/m^3 となり目標値を満足しましたが、簡易動的コーン貫入試験から求めた K_{30} 値の平均値(3地点、深さ50cmまで)は 42MN/m^3 となり、両試験の測定値が異なる結果となりました。これは上述したように現地の砂路盤が土質材料の工学的分類体系として「砂(S)」に分類され、比較的単一の粒径で構成されており、その性質を反映した強度特性によるものと推察されます。以上より、現地で測定した路盤剛性のみではSFC てん充道床軌道の適用可能性を判断できなかったため、後述する実物大試験により詳細な沈下特性を確認しました。

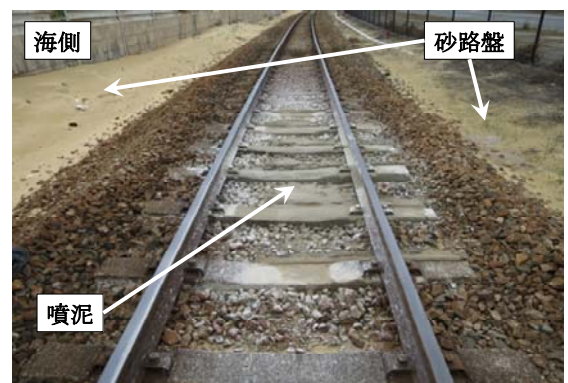


図1 砂州地域に敷設されているバラスト軌道の噴泥

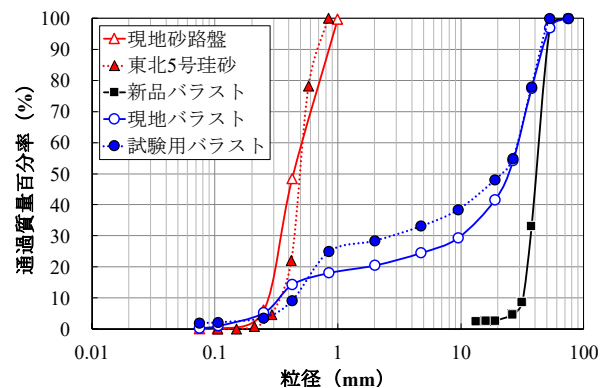


図2 粒径加積曲線

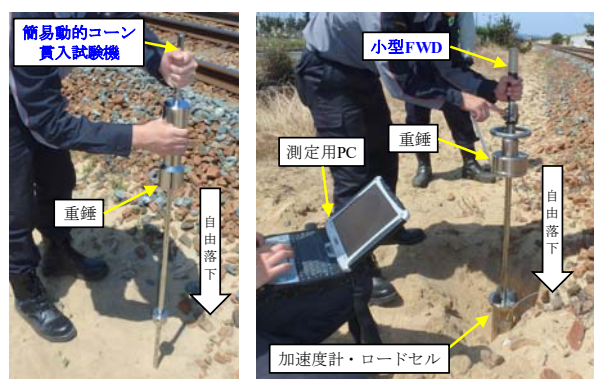


図3 路盤剛性の測定

3. 実物大軌道供試体の繰返し载荷試験

図4に実物大軌道供試体の概要を示します。砂路盤(東北5号珪砂)の密度は 1.677g/cm^3 (相対密度90%,含水比4%)とし、小型FWD試験による K_{30} 値は 188MN/m^3 でした。試験用バラストは新品バラスト、クラッシュランC-30および東北5号珪砂を混合して現地のバラストを再現し、密度は 2.035g/cm^3 (締固め度90%,含水比3.3%)としました。表1に試験条件を示します。図5に示すように、SFCミルクはまくらぎ周囲のバラストを掘削した注入孔から自然流下により道床部に注入します。本試験では、まず若材齢における沈下特性を把握するため材齢2時間後に9時間をかけて1,500回の繰返し载荷を行いました。その後、材齢3日で30万回、材齢21日で散水下(78L,雨量30mm相当)における35万回の繰返し载荷を行いました。

図6および図7にまくらぎおよび路盤の最大変位の平均値と载荷回数との関係を示します。材齢2時間以降の载荷において、まくらぎの最大変位は 0.41mm 、残留変位は 0.33mm となり、初期沈下量は微小であることを確認しました。また、材齢3日の30万回载荷において、まくらぎおよび路盤の最大変位の増加は僅かであり、最大変位はまくらぎ 0.55mm 、路盤 0.31mm でした。2章の結果から砂路盤上における軌道の沈下量は大きくなることも想定されましたが、本試験の結果から軌道は殆ど沈下しないことを確認しました。さらに、散水下での35万回载荷における最大変位はまくらぎ 0.67mm 、路盤 0.47mm となり、噴泥等の変状を生じないことを確認しました。

4. おわりに

本稿では、砂路盤上におけるSFCでん充道床軌道の適用事例について紹介しました。その後、現地で試験施工を行いましたので、継続して軌道検測データによる軌道状態の確認を行います。

参考文献

- 1) 瀧上翔太, 中村貴久, 高橋貴蔵, 桃谷尚嗣: 細粒分含有率が高いバラストを活用したでん充道床軌道に関する研究, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.73, No.3, pp.179-187, 2017.
- 2) 公益財団法人鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物, 丸善, 2017.

執筆者: 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室 瀧上翔太

担当者: 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室 中村貴久, 高橋貴蔵, 桃谷尚嗣

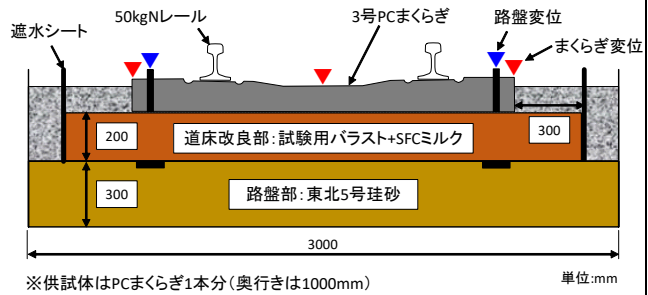


図4 実物大軌道供試体の概要

表1 試験条件

試験ケース	SFCミルク材齢	散水	荷重振幅(kN)	载荷周波数(Hz)	载荷回数
CASE1	2時間	—	5~100	10	1500回*
CASE2	3日	—	5~100	10	30万回
CASE3	21日	○	5~100	10	35万回

*100回×3h+200回×6h=1500回/9h

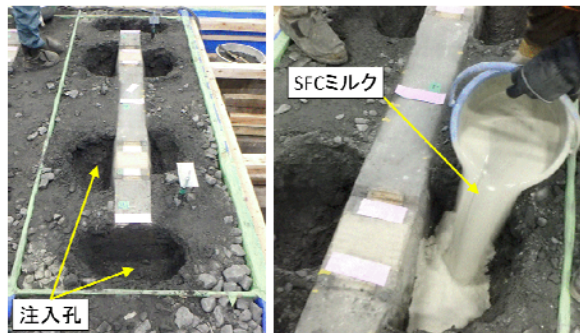


図5 道床部へのSFCミルクの注入

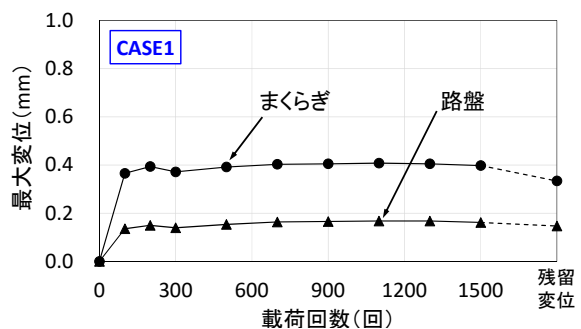


図6 材齢2時間以降における载荷試験結果

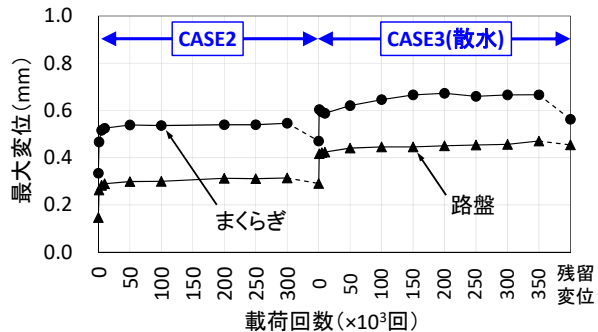


図7 材齢3日以降における载荷試験結果

テルミット溶接部の曲げ疲労強度向上方法

1. はじめに

テルミット溶接法は東海道新幹線の建設に国産タイプが適用されましたが、開業当初から損傷が頻発したため、信頼性が大幅に向上して在来線での適用比率が4割を超えている現在においても、新幹線ではその使用が制限されています。一方、現在新幹線の現場溶接法（三次溶接）として緊張ガス圧接法とエンクローズアーク溶接法が採用されていますが、前者はレール移動を許容できない分岐器付近の施工には適さず、後者は高度な技術を必要とする技術者の高齢化などに伴う技術者不足などの課題に直面しており、簡便でレール移動の必要ないテルミット溶接法の新幹線への適用が検討されています。

そこで、テルミット溶接法の新幹線の高速区間への導入を目標として、エンクローズアーク溶接部と同等程度まで曲げ疲労強度を向上させて疲労破壊に対する余裕度を持たせるための施工方法について検討し、余盛形状を改良したモールドの使用に併せて余盛止端部表面の研磨を組み合わせる工法と既存溶接部の余盛止端部にピーニング処理を施す工法を考案しました。本文では、余盛形状を改良したモールドを使用する工法について紹介します。

2. 余盛止端部形状を変更したモールド

テルミット溶接法は他の溶接法のように加圧装置や電源を必要とせず、使用器具も簡便・軽量であるため機動性に富み、溶接時間も短いことから、三次溶接に最も適しています。しかしながら、**図1**に示すようにテルミット溶接部はあご部から底部まで余盛が存在しているため、その止端部は列車荷重が作用した際に応力が集中しやすい形状をしています。また、レール溶接部には溶接に伴う熱サイクルによって溶接残留応力が生じています。テルミット溶接部の場合、上首部と下首部付近に大きな引張応力が残留しており、曲げ疲労試験では**図1**に示すようにレール底部上面の余盛止端部を破壊起点として疲労破壊することがわかっています。曲げ疲労強度向上に最も適した余盛止端部形状は、止端部をなくすこと、すなわちレール断面形状になるまでグラインダ研削で余盛を除去することですが、作業的に現実的ではないことから、容易に余盛止端部の形状を改善できる方法として、モールドの内部形状の改良に取り組みました。

図2に応力集中の低減を主目的として検討した余盛（モールド内部）形状を示します。既存のモールドを適用した場合、高さ6mm、幅40mmの余盛が形成され、止端部は鑄バリ（レールとモールドの隙間にはみ出して凝固した溶接金属）の発生状況にも影響されますが、ほぼ直角な形状になります。一方、改良モールドでは余盛止端部の応力集中を低減させる観点から、余盛高さは同一で、余盛止端部の角度を 30° とする緩やかな傾斜形状としてモールドを製作することとしました。

なお、余盛止端部を緩やかな傾斜形状とした場合には、応力解析モデルにて計算した結果、現行と比較して2割程度の応力集中低減効果が得られることを確認しています。

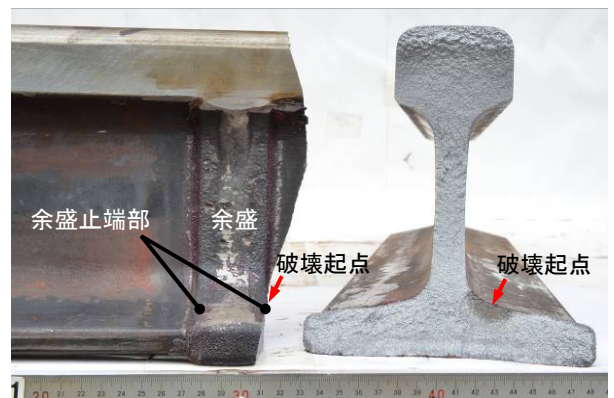


図1 曲げ疲労試験で破壊した試験体外観

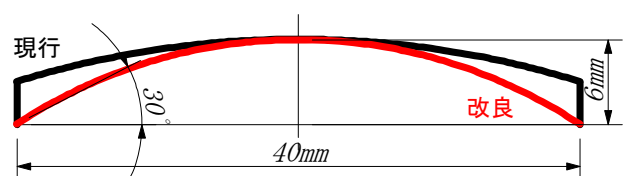
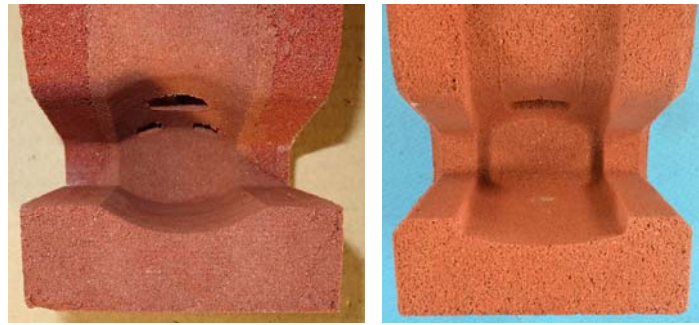


図2 検討した余盛（モールド内部）形状

図3に製作したモールドの内部形状を現行モールドと併せて示します。止端部形状を変更したため、余盛形成領域が現行より小さくなり、溶鋼の湯流れやレールの溶融などに影響を及ぼす可能性が示唆されました。そこで、現行のモールド（SkV-F型）ではなく、シングルユースルツボ（専用テルミット溶材含む）との組み合わせにより溶融性能などを向上させたSkV-Eliteのモールド型をベースとして、余盛形状を変更しました。



(a) 改良

(b) 現行

図3 レール底部領域のモールド内部形状

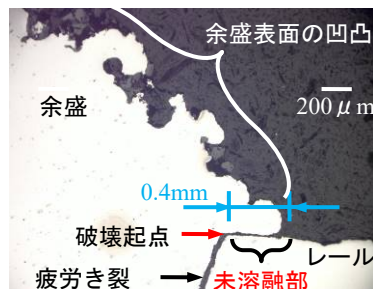
3. 余盛止端部表面の研磨

余盛止端部形状を変更した改良モールドを適用して作製した試験体の余盛止端部形状は設計通りでしたが、図4に示すように余盛止端部の溶接金属がわずかにレールに被さる形態の未溶融部が底部領域に観察され、曲げ疲労試験においてもそのわずかな未溶融部が破壊起点となることが判明しました。そこで、予熱完了時点で比較してレール底部端部の温度が約100℃高くなるよう、予熱時間を標準より30秒延長することにしました。

この予熱条件の見直しにより、改良モールドの適用のみでも曲げ疲労強度は向上しましたが、底部余盛止端部のレールの溶融にばらつきが認められ、応力全振幅270N/mm²の試験条件では、底部上面の余盛止端部表面のわずかな凹凸や未溶融部から疲労破壊する事象が認められました。そのため、図5に示すように、超硬バーを取り付けた棒グラインダで余盛止端部の表面形状および未溶融部を研磨除去する手法を組み合わせ、余盛止端部を局部的に滑らかな形状に処理した結果、無欠陥のエンクローズアーク溶接部と同等の270N/mm²までの200万回曲げ疲労強度向上を達成しました。なお、底面の余盛止端部の被りは270N/mm²までの試験条件では曲げ疲労強度に影響を及ぼさないため、研磨処理は必要ありません。



(a) 余盛止端部の被り



(b) 破壊起点となった未溶融部



図5 余盛止端部の研磨処理状況

図4 作製した試験体に観察された未溶融部の状況

4. おわりに

本研究では、余盛形状を改良したモールドの使用に併せて余盛止端部表面の研磨を組み合わせる施工法を考案し、曲げ疲労強度の3割向上を達成しました。今後は、課題として残った未溶融部への対応および凝固割れと施工不良の発生防止方法に関する検討を進めたいと考えています。

執筆者：軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室 寺下善弘

数値解析に基づく RC 高架橋の構造物音評価法

1. はじめに

近年、列車速度が向上したことにより、鋼鉄道橋などに比べて構造物音が小さいと考えられてきたコンクリート高架橋においても、部材の動的応答の増大に伴う構造物音の顕在化が懸念されるようになってきました。列車走行による構造物音は、車両、軌道、構造物、沿線空間など様々なパラメータが介在する現象であり、現車試験や実験などによる現象の再現や検証が容易ではないため、数値解析による問題解決への期待が高まっています。本稿では、筆者らが開発した数値解析に基づく構造物音評価法¹⁾を用いて、鉄筋コンクリート(以下、RC)高架橋を対象とした解析事例をご紹介します。

2. 構造物音評価法の概要¹⁾

図1に構造物音評価法の概要を示します。車両、軌道、構造物、沿線空間からなる全体系を有限要素法によりモデル化し、数値解析により構造物音を評価します。ただし、全体系を一体としてモデル化すると解析自由度が膨大となり解析時間も実用的ではないものとなるため、全体系を車両/軌道系、軌道/構造物系、構造物/沿線空間系の各モデルに分割し、それぞれを弱連成問題として取り扱うこととしました。これにより、全体系を一体で解析する場合に比べて大幅に解析自由度を削減することができ、効率的な解析が可能です。また、各種パラメータの条件を任意に設定することができ、様々な条件を想定した数値実験を行うことが可能です。

3. RC ラーメン高架橋を対象とした解析事例

(1)対象構造物と解析モデルの概要

図2に対象構造物を示します。対象構造物は1ブロック25mの標準的な3径間RCラーメン高架橋とそれに隣接したスパン10mのRC桁を対象としました。軌道構造は普通スラブ軌道とし、走行車両は車両長25mの近年の一般的な新幹線車両としました。

図3に解析モデルの概要を示します。車両/軌道系モデルではレールおよび軌道スラブをはり要素、軌道パッドおよび軌道スラブ下のCAモルタルをばね要素でモデル化します。本モデルでCAモルタル相当のばね要素のばね反力を「移動加振力」として高架橋の走行ラインに入力します。軌道/構造物系モデルでは、柱ははり要素でそれ以外の部材はシェル要素でモデル化します。ここで得られた高架橋の各節点の「振動速度」を、構造物/沿線空間系のモデルに入力し、音響解析を行うことにより、沿線の構造物音を求めます。

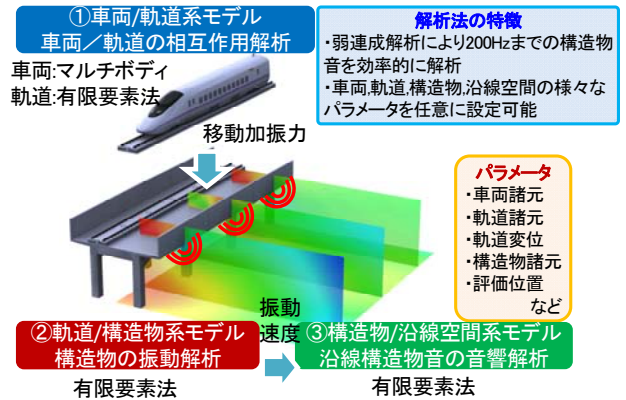


図1 構造物音評価法の概要

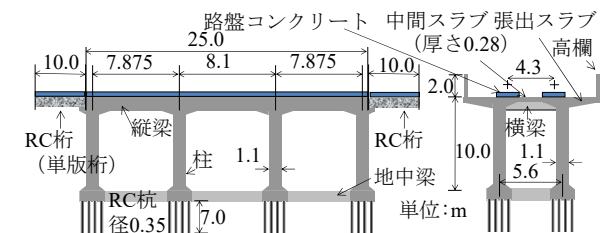


図2 対象構造物 (RC ラーメン高架橋)

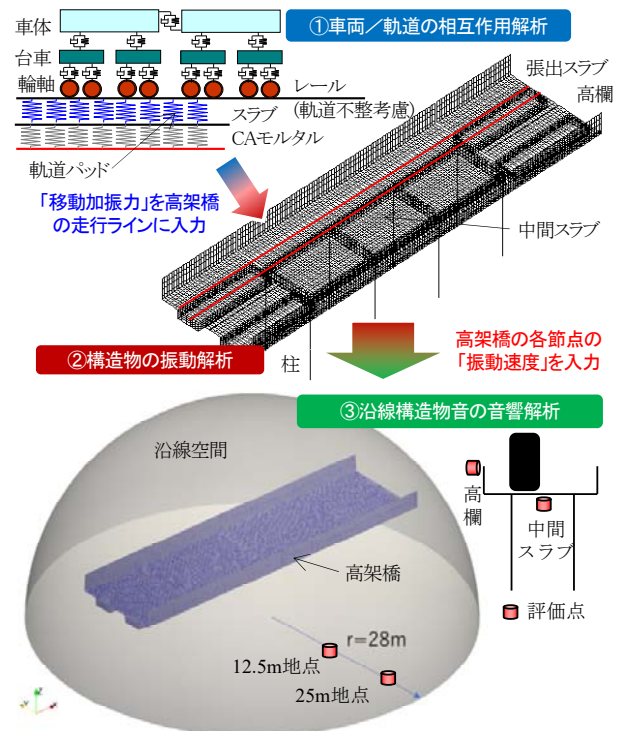


図3 RC ラーメン高架橋の解析モデルの概要

表1に解析に用いた各種定数や条件を示します。音響解析において、地面は完全反射境界、沿線空間を模擬した半球面(半径28m)は無境界としました。

(2)解析結果の例

図4にRCラーメン高架橋の沿線構造物音の音響解析結果を示します。評価点は図3で示した4箇所です。面部材である中間スラブ中央の近傍が最も音圧レベルが大きいこと、高架橋から離れるにしたがって音圧レベルが小さくことなどが分かります。また、6.3Hz, 16~20Hz, 80Hzでは、高欄先端の近傍よりも12.5m地点の音圧レベルの方が大きいことが分かります。

図5にRCラーメン高架橋の振動モード形と音圧分布の例を示します。高架橋の振動モード形は軌道/構造物系モデルで求めました。図より、高架橋の振動モード形に対応して解析領域内において音圧の大小が変動しており、振動モード形の山と節の数が増える高い周波数ほど音圧分布の縞模様の間隔が狭くなっていることが分かります。

(3)高架橋補強による低減効果検証のための数値実験

ここでは、構造物音の音源となりやすい中間スラブについて、補強工法(剛性5倍に増加)²⁾を適用した場合の低減効果検証のための数値実験を行った結果を紹介します。図6に示す結果のように、補強工法を適用すると、例えば中間スラブ下面では4.8dB, 12.5m地点では1.1dBの低減効果が得られる可能性が示されました。

4. まとめ

本稿では数値解析に基づく構造物音評価法を用いて、RCラーメン高架橋を対象とした解析事例をご紹介しました。今後は、列車の速度向上の影響、各種対策工の評価、沿線の構造物音に対する部材ごとの寄与度の評価などを行っていきたく考えています。

参考文献 1)渡辺他：数値解析に基づくRCラーメン高架橋の構造物音評価法,鉄道総研報告,Vol.34,No.8,pp.41-45,2020
2)白井他：超高強度繊維補強コンクリートによるRCスラブの補強工法の開発,コンクリート工学年次論文集集,Vol.36,No.2, pp.1243-1248,2014

執筆者：鉄道力学研究部 軌道力学研究室 渡辺勉
担当者：鉄道力学研究部 構造力学研究室 徳永宗正

表1 音響解析に用いた定数と境界条件

	RC ラーメン	RC 桁
レール種別	60kg レール	
軌道パッド公称ばね定数(MN/m)	60	
軌道スラブ	寸法(mm)	4930×2340×190
	ヤング係数(kN/mm ²)	31
CA モルタル	弾性係数(N/mm ²)	3500
	厚さ(mm)	25
高架橋	ヤング係数(kN/mm ²)	26.5
コンクリート		24.0
減衰定数(%) (全てのモードで一律の値)	2%	

	定数		境界条件
音速(m/s)	340	ドーム部	無限境界
空気密度(kg/m ³)	1.225	地面	完全反射境界
解析周波数(Hz)	200 ($\Delta f = 0.49$)	高架橋	面音源

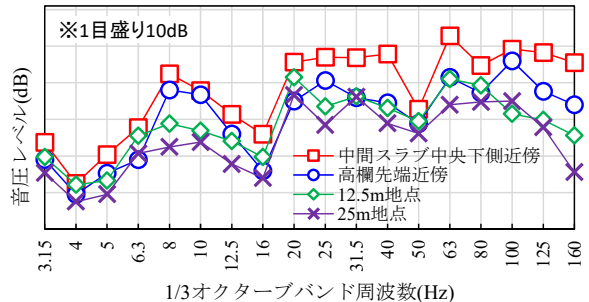


図4 沿線構造物音の音響解析結果

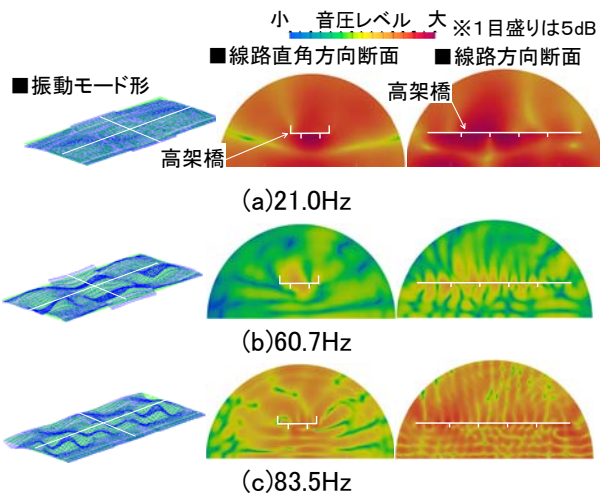


図5 振動モード形と音圧分布の例

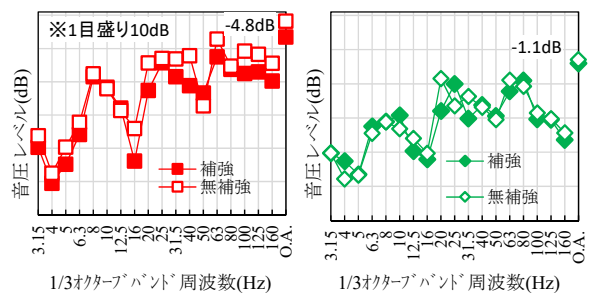


図6 中間スラブ補強による低減効果の試算

編集委員会からのお知らせ:2014年度より施設研究ニュースのpdfデータを鉄道総研HPに掲載いたします。詳しくは、鉄道総研HPのトップページから【研究開発】⇒【研究ニュース】⇒【施設研究ニュース】(http://www.rtri.or.jp/rd/rd_news.html)にアクセスしてください。

発行者：小林 裕介 【(公財) 鉄道総合技術研究所 施設研究ニュース編集委員会 委員長】
編集者：中村 麻美 【(公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造】