

# レール継目における衝撃が上路プレートガーダーの疲労に及ぼす影響

金島 篤希\* 小林 裕介\*\* 井上 太郎\*\*\* 松岡 弘大#

## Influence of Impact Load at Rail Joint on Fatigue of Steel Deck Girder

Atsuki KANESHIMA Yusuke KOBAYASHI Taro INOUE Kodai MATSUOKA

In order to identify the vibration mode excited by the impact load at the rail joint, a running test was conducted at the deck girder. The purpose of the test also includes the clarification of the effect of vibration mode on the stress properties of the upper and lower ends of the vertical stiffener. As a result, we find that the impact load at the rail joint generates the bending vibration of the main girder and out-of-plane vibration of the web or flange panel. The rail joint type and the step at the joint affect the stress at the stiffener.

キーワード：レール継目，上路プレートガーダー，補剛材，振動，疲労，応力

### 1. はじめに

レール継目は、レールとレールの接続部である。温度伸縮を許容するために不連続な構造となっており、列車の車輪がレール継目を通過する際には衝撃が生じる。この衝撃は、鋼鉄道橋の疲労き裂の発生を助長することが多く、レール継目に起因して生じた疲労き裂の中には、部材が破断するような事象<sup>1)</sup>も報告されている。

一般に、衝撃は鋼鉄道橋の部材に振動を励起する。鋼鉄道橋は、様々な部材で構成されており、構造形式によって部材の構成が異なるため、励起される振動モードは多様であり、各振動モードによって溶接継手の応力性状に及ぼす影響も異なると考えられる<sup>2)</sup>。

振動モード励起の衝撃源となるレール継目は、供用される環境により、レール継目の形状や状態が異なるため、レール継目での衝撃の大きさも異なると考えられる。さらには、列車の走行速度も衝撃に影響を及ぼす因子であると考えられる。つまり、溶接継手の応力性状に及ぼす影響は、振動モードにくわえて、レール継目の条件や走行速度によっても異なると考えられる<sup>3)</sup>。このように、レール継目の衝撃が鋼鉄道橋の疲労き裂の発生に及ぼす影響は非常に複雑であると言える。

レール継目の衝撃が鋼鉄道橋の疲労に及ぼす影響を明らかにするためには、衝撃によって励起される振動モー

ドの同定、および振動モードが溶接継手の応力性状に及ぼす影響を明らかにする必要がある。そこで本研究では、供用されている数が最も多い構造形式である上路プレートガーダーを対象として、レール継目の衝撃によって励起される振動モードを同定するとともに、上路プレートガーダーにおいて疲労き裂が発生しやすい中間補剛材上端の溶接部<sup>例えは4)</sup>および中間補剛材下端と腹板の廻し溶接部<sup>例えは5)</sup>(以降、補剛材上端/下端、もしくは上下端)に着目して、振動モードがその溶接部の応力性状に及ぼす影響を明らかにした。併せて、レール継目の形式やその状態と、走行速度をパラメータとして、それらが補剛材上下端の応力性状に及ぼす影響についても明らかにした。本稿ではこれらの検討結果について報告する。

### 2. 検討概要

本検討では、試験橋梁上での走行試験を実施することで、レール継目の衝撃によって励起される振動モードを同定し、補剛材上下端に生じる応力を評価した。振動モードの同定では、固有値解析の結果を参考にした。本章では、走行試験および固有値解析について概要を記述する。

#### 2.1 走行試験

##### (1) 試験橋梁・レール継目・軌道モーターカーの概要

走行試験を行った試験橋梁を図1に示す。支持する軌道は単線かつ直線であり、その軌道構造は締結装置と上フランジがまくらぎを介さずに連結される鋼直結軌道である。

レール継目は、レール継目がない状態で測定した後レールを切断し、固定支承側のレールを交換して作成した。試験に用いた車両は軌道モーターカー（以下、MC）

\* 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室（現 東日本旅客鉄道株式会社）

\*\* 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室

\*\*\* 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室（現 九州旅客鉄道株式会社）

# 鉄道力学研究部 構造力学研究室

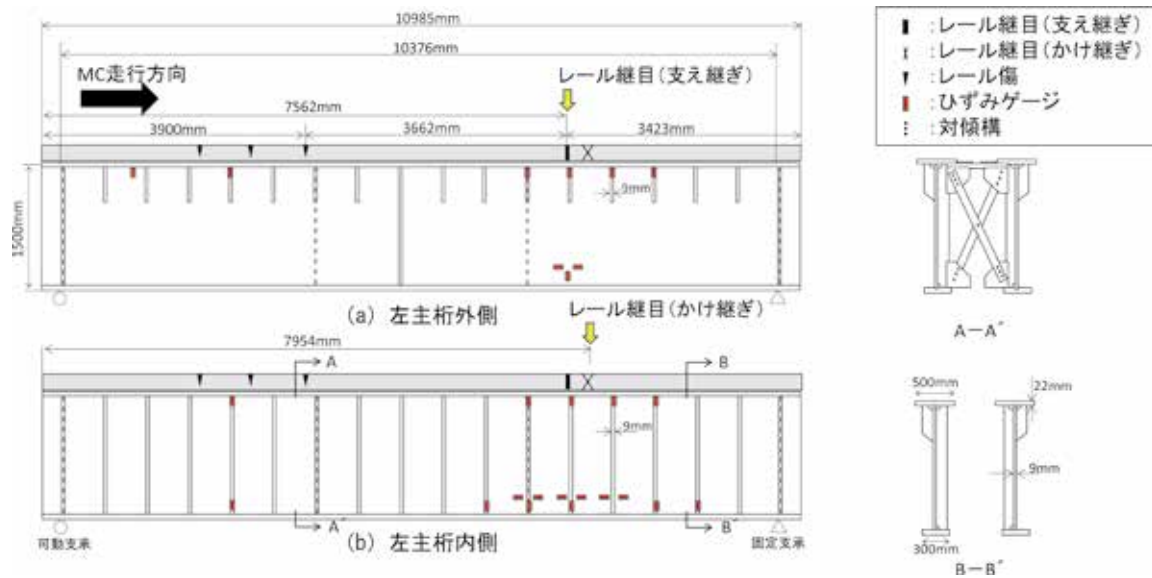


図1 対象橋梁と応力測定位置



図2 軌道モーターカー (MC)

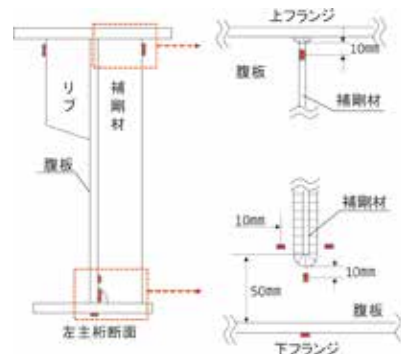


図3 ひずみゲージ設置位置

であり、MCの走行方向は、可動支承側から固定支承側とした(図2)。

(2) 応力測定

レール継目の衝撃によって励起される振動モードの同定と振動モードが補剛材上下端の応力に及ぼす影響を明らかにするため、ひずみゲージ(ゲージ長5mm)によりMC走行時の補剛材上端溶接部、補剛材下端の廻し溶接部の応力を測定した。ひずみゲージの設置位置を図1および図3に示す。なお、応力測定のサンプリング周波数は2kHzとした。

(3) レール継目条件とMCの走行速度

表1にレール継目条件およびMCの走行速度を組み合わせた試験ケースを示す。なお、走行試験は、測定結果のばらつきを考慮し、各条件において3回ずつ実施した。

a) レール継目の形式

一般にレール継目は、「かけ継ぎ」と「支え継ぎ」の2つの形式が用いられる。「かけ継ぎ」は、レール締結装置間に継目を有する構造(図4(a))であり、「支え継ぎ」は、レール締結装置の直上に継目を有する構造(図

4(b))である。なお、橋梁上においては一般的にかけ継ぎが用いられ、支え継ぎが用いられることは少ないが、以降のレール継目の状態や速度が及ぼす影響の評価は、支え継ぎの条件で実施している(表1)。これは、4章で示すように、支え継ぎの方がレール継目での衝撃によって生じる応力が大きかったことによる。

b) レール継目の状態

レール継目は、車軸が繰り返し通過することで段差が生じる場合がある。本試験では、固定支承側のレールを上方向にずらすことで、模擬的に段差を再現した。段差量は、0mm、1mm、2mmとした(図5)。段差は、MCの車軸が登る方向としているが、この理由は、登る方向の方がレール継目での衝撃によって生じる応力が大きいためである。

遊間は、レールの温度による伸縮を考慮して設けられるレール間の隙間である。本試験では遊間量を、1mm、9mm、17mmと設定した(図5)。なお、本試験に用いた継目板の都合により、17mmが最大値となっている。

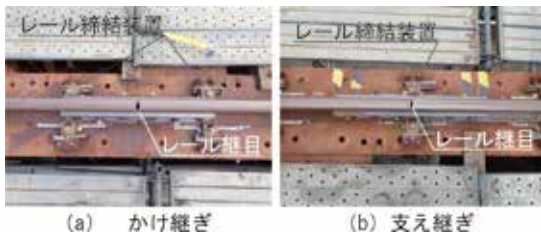


図4 レール継目の形式

表1 試験ケース

試験番号	レール継目条件			MC速度 (km/h)		
	継目形式	段差量 (mm)	遊間量 (mm)			
N-01	—	—	—	22		
N-02	—	—	—			
N-03	—	—	—			
S-01	支え継ぎ	2	17	22		
S-02						
S-03						
S-04				11		
S-05						
S-06						
S-07				6		
S-08						
S-09						
S-10		1	17	22		
S-11						
S-12						
S-13						
S-14					0	22
S-15						
S-16	2	9	22			
S-17						
S-18						
K-01	かけ継ぎ	2	17	22		
K-02						
K-03						

c) MCの走行速度

MCの走行速度は、約22km/h、約11km/h、約6km/hの3パターンとした。なお、試験橋梁上の試験線の長さの制約により、約22km/hがMCの試験橋梁上の最大速度となっている。

2.2 固有値解析の概要

固有値解析には、レール継目の衝撃により励起される振動モードの変形形状を推定することを目的として図6に示す解析モデルにより行った。境界条件は単純支持とした。使用要素は、4節点シェル要素を基本とし、対傾構等の一部では2節点は要素を用いた。要素分割は図6に示す通りであり、節点数は34084、要素数は35016である。なお、本固有値解析では、軌道はモデル化しておらず、MCの重量も考慮していない。解析コードとしてNX Nastran、プリポストプロセッサとしてFemap 11.4.0を使用した。

3. レール継目に励起される振動モードと補剛材上下端に及ぼす影響

3.1 補剛材上端および下端に生じる応力

ここでは、レール継目の衝撃によって、補剛材上下端

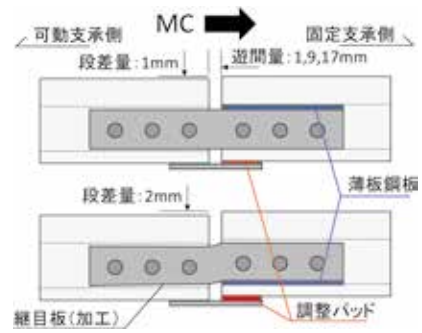


図5 段差と遊間の設定

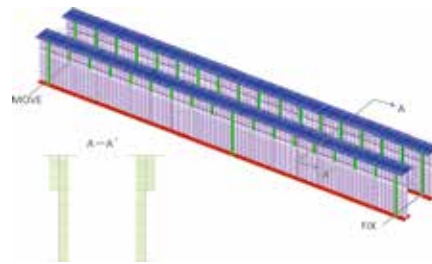


図6 固有値解析モデル

に生じる応力を示す。レール継目がない場合 (N-01) とある場合 (S-01) の応力波形を図7に示す。同図は、レール継目直下のリブ (以降は補剛材上端として扱うこととする) と補剛材下端 (水平方向可動支承側) に着目している。なお、グラフの横軸はMCの車軸 (1軸目) の位置を示している。

図7より、レール継目の有無によらず、補剛材下端では引張方向に、補剛材上端では圧縮方向に大きくなる応力成分が生じることがわかる。この応力成分は、MCの軸重により桁が変形して生じたものと考えられる (以降、準静的な応力成分という)。レール継目の応力に着目すると、補剛材上下端では、車軸がレール継目を通過する瞬間に大きくなる応力成分が生じる。この応力成分は、レール継目がない場合には見られないことから、レール継目の衝撃によって生じたものと考えられる。つまり、レール継目を有する上路プレートガーダーの補剛材上下端には、準静的な応力成分とレール継目の衝撃によって生じる応力成分が重畳した応力が生じる。

以降は、レール継目の衝撃によって生じた応力成分に着目し、振動モードの同定と振動モードが補剛材上下端の応力に及ぼす影響を示す。

3.2 レール継目によって励起される振動モードと補剛材上下端の応力に及ぼす影響

ここでは、レール継目の衝撃によって励起される振動モードの同定結果と、同定した振動モードが補剛材上下端の応力に及ぼす影響について示す。

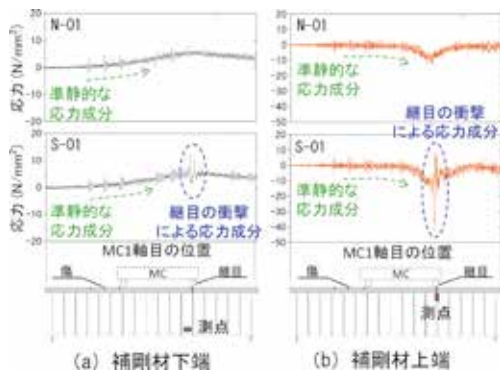


図7 補剛材上下端に生じる応力

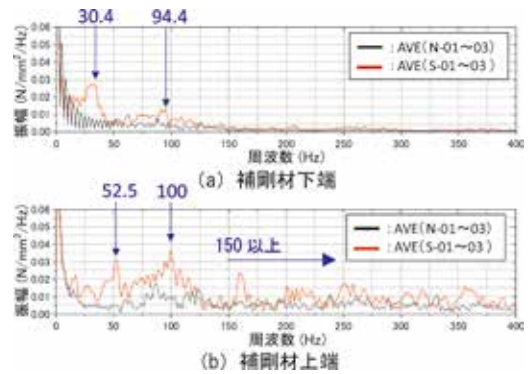


図8 レール継目に励起される周波数

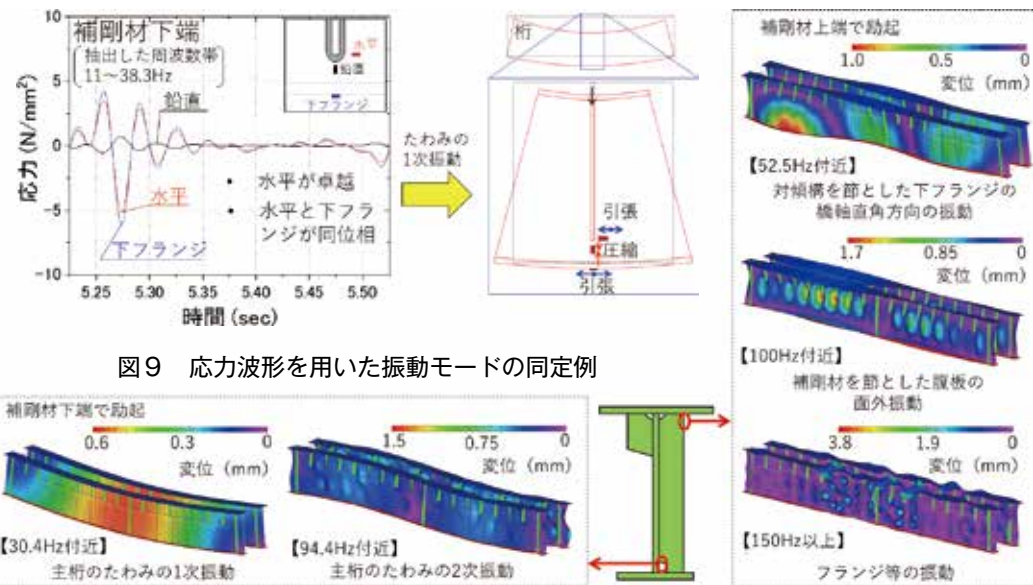


図9 応力波形を用いた振動モードの同定例

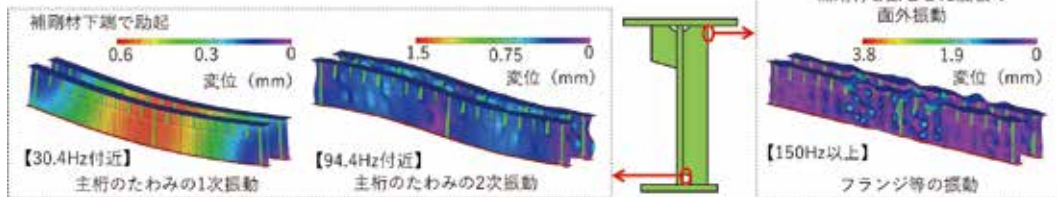


図10 振動モードの同定結果

(1) レール継目によって励起される振動モード

レール継目によって励起される振動モードの周波数を把握するため、レール継目の有無で周波数スペクトルを比較した。図8にレール継目によって励起された周波数を示す。図8は、レール継目直下の補剛材上下端に着目し、レール継目の有無ごとに、3試番分(表1:N-01~03, S-01~03)のデータを平均化したものである。

続いて、図8に示すレール継目によって励起された周波数について、それぞれの振動モードを同定した。振動モードの同定では、応力測定の結果を主として利用し、モード形状の確認のために固有値解析の結果を参考とした。測定した応力による振動モードの同定は、着目する周波数帯の応力をフィルターにより抽出し、測点同士の位相差などに着目して分析した(図9)。

振動モードの同定結果を図10に示す。図10より、レール継目によって励起される振動モードは、補剛材下端ではたわみの1次振動、たわみの2次振動であり、補剛材上端では、対傾構を節とした下フランジの橋軸直角方向の振動、補剛材を節とした腹板の面外振動、フラ

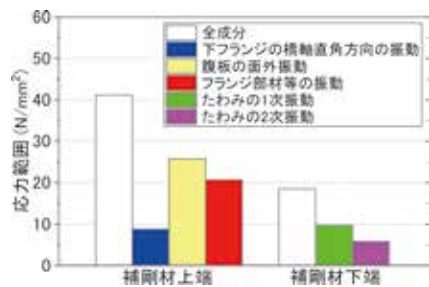


図11 振動モード毎の補剛材上下端への影響

ンジ等の振動である。

(2) 振動モードが補剛材上下端の応力に及ぼす影響

補剛材上下端で励起された振動モードごとの応力範囲を比較した結果を図11に示す。図11は、各振動モードによって生じた応力範囲に加え、全成分(準静的な応力成分のみを除いたもの)の応力範囲も併せて示している。

まず、補剛材下端に着目する。図11より、補剛材下端応力は、主桁のたわみの1次振動の影響を最も大きく受けており、主に図9に示すような桁の面内方向の振動

によって生じていると言える。一方で、補剛材上端の応力は、補剛材を節とした腹板の面外振動、フランジ等の振動による影響を大きく受けており、主に図12に示すような部材の面外方向の振動によって生じていると言える。なお、50Hz付近で励起された対傾構を節とした下フランジの橋軸直角方向の振動(図10)は、周波数スペクトル(図8)では腹板の面外振動と同等の振幅を示していたが、応力範囲は前述の2つの振動モードよりも小さく、補剛材上端に及ぼす影響は小さかった。

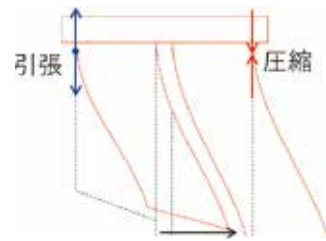


図12 補剛材上下端の応力発生イメージ

以上より、本試験橋梁では、レール継目の衝撃によって補剛材上下端に生じる応力は、補剛材下端では、主に主桁のたわみの1次振動、主桁のたわみの2次振動によって生じており、補剛材上端では、主に補剛材を節とした腹板の面外振動、フランジ等の振動によって生じていると考えられる。なお、本結果は、MCの重量が小さく、速度も低い条件においてのものであり、これ以外の条件については、今後も引き続き検討していく予定である。

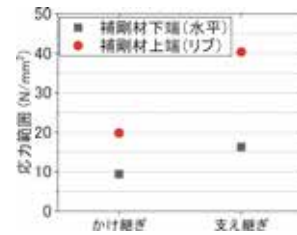


図13 レール継目形式ごとの応力範囲の比較

#### 4. レール継目の衝撃を増大させる諸因子

レール継目の衝撃は、レール継目の形式や状態といったレール継目条件と列車の走行速度によって異なる。本章では、レール継目の形式、レール継目の状態とMCの走行速度の違いが補剛材上下端の応力に及ぼす影響について示す。

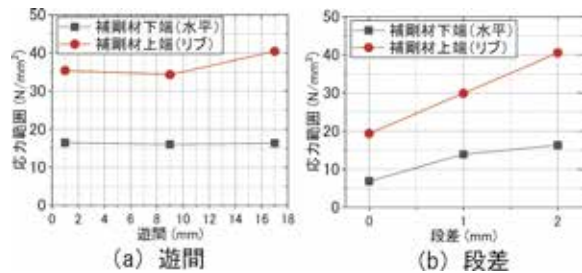


図14 レール継目状態ごとの応力範囲の比較

##### 4.1 レール継目条件と走行速度が補剛材上下端の応力に及ぼす影響

ここでは、レール継目の形式およびレール継目の状態が補剛材上下端の応力に及ぼす影響を示す。

###### (1) レール継目形式

支え継ぎとかけ継ぎで生じた補剛材上下端の応力範囲を図13に示す。図13の応力範囲は、レール継目の状態を段差2mm、遊間17mmとして得られた測定応力から抽出したものである。着目箇所はレール継目直下の補剛材上端と下端である。なお、本章に示す図の着目箇所はすべて図13と同じである。

図13より、応力範囲は、補剛材上下端ともに支え継ぎの方が大きいことがわかる。これは、支え継ぎはレール締結装置の直上にレール継目を有する構造であるため、レール継目の衝撃が直接桁に伝わるのが理由であると考えられる。

###### (2) レール継目の状態

段差量と遊間量ごとの補剛材上下端の応力範囲を図14に示す。図14(a)の応力範囲は、段差量を2mmに固定して遊間量を変化させて得られた応力から抽出し、図14(b)の応力範囲は、遊間量を17mmに固定して

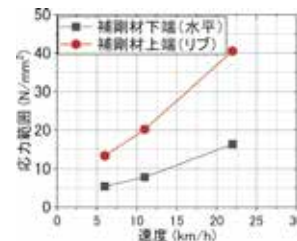


図15 速度ごとの応力範囲の比較

段差量を変化させて得られた応力から抽出したものである。なお、レール継目の形式はどちらも支え継ぎとした。

まず遊間に着目する。補剛材上下端の応力範囲は、遊間量による有意な差がみられないことがわかる(図14(a))。これは、遊間量が車輪径(762mm)に対して非常に小さいため、遊間量が変わっても車輪の落ち込み量、つまり重心の上下動がほとんど生じないことが理由であると考えられる。一方で、段差に着目すると、応力範囲は、段差量の増加とともに大きくなっていることがわかる(図14(b))。つまり、段差が補剛材上下端に及ぼす影響は大きいですが、遊間量の影響は非常に小さいと言える。

###### (3) 走行速度

速度ごとの補剛材上下端の応力範囲を図15に示す。

図 15 の応力範囲は、レール継目の形式は支え継ぎとし、段差は 2mm、遊間は 17mm に固定して速度を変化させて得られた応力から抽出したものである。

図 15 より、補剛材上下端の応力範囲は、速度の上昇とともに大きくなっており、速度は、補剛材上下端の応力性状に影響を及ぼす要因の一つであると言える。ここで、段差量に応じた補剛材上下端における応力範囲の増加（図 14 (b)）と、速度に応じた増加（図 15）を比較すると、今回の試験条件において、それぞれの因子の増加または上昇に伴う応力範囲の増加量は、段差量よりも速度の方が大きい。実際の供用下にあるレール継目では、2mm の段差が生じることはほとんどないのに対し、速度の変化はもっと大きいことを考慮すると、実橋梁では、速度による応力範囲への影響の方が因子としては大きいと考えられる。

以上より、補剛材上下端の応力に及ぼす影響が大きい因子は、レール継目の形式では支え継ぎ、レール継目の状態では段差および走行速度であると言える。なお、遊間量は補剛材上下端の応力に及ぼす影響が非常に小さい。

#### 4.2 段差・速度と励起される振動モードの関係

ここでは、段差および速度が応力に及ぼす影響について 3 章で示した振動モードとの関係を示す。

段差量と各振動モードによって生じる応力範囲を図 16 に、速度と各振動モードによって生じる応力範囲を図 17 に示す。なお、図 16、図 17 では、補剛材上端と下端の応力のそれぞれの発生因子となる振動モード以外の振動モードも含めて示している。これは段差と速度の違いによって、応力とその因子となる振動モードの関係に変化が生じないかを確認するためである。

図 16、図 17 より、補剛材下端の応力範囲は、段差量の増加および速度の上昇に伴い主桁のたわみの 1 次振動および 2 次振動が大きくなり、補剛材上端の応力は、補剛材を節とした腹板の面外振動とフランジ等の振動が大きくなるのがわかる。つまり、段差と速度は、補剛材上下端の応力とその発生因子となる振動モードとの関係を変えることなく、これらの増加により補剛材上端と下端のそれぞれに影響の大きい振動モードをより強く励起させると言える。

### 5. まとめ

レール継目の衝撃が鋼鉄道橋の疲労に及ぼす影響を検討するにあたり、上路プレートガーダーの補剛材上下端を対象に、レール継目の衝撃によって励起される振動モードを同定し、振動モードが補剛材上下端の応力に及ぼす影響を明らかにした。併せて、レール継目の形式お

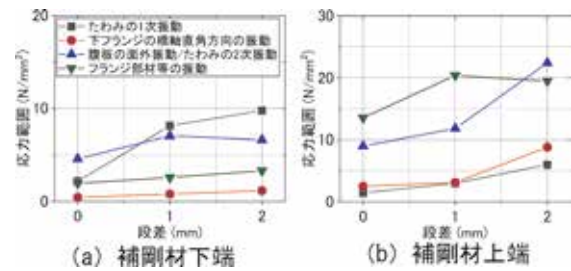


図 16 段差ごとの応力範囲の比較

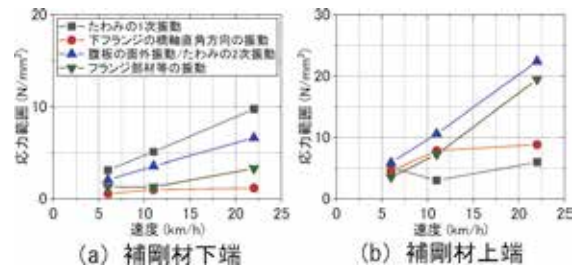


図 17 速度ごとの振動モードの応力範囲

よび状態、走行速度といったレール継目の衝撃に影響を及ぼす諸因子が補剛材上下端の応力に及ぼす影響を明らかにした。

以下に、本研究で得られた成果を示す。

- (1) レール継目の衝撃によって生じる補剛材上下端の応力は、補剛材下端では、主に主桁のたわみの 1 次振動、主桁のたわみの 2 次振動によって生じており、補剛材上端では、主に補剛材を節とした腹板の面外振動、フランジ等の振動によって生じている。
- (2) 補剛材上下端の応力に及ぼす影響が大きい因子は、レール継目の形式では支え継ぎ、レール継目の状態では段差および走行速度である。
- (3) 段差および速度の増加は、補剛材上下端の応力の発生因子である振動モードをより強く励起させる。

### 文献

- 1) 鈴木延彰, 工藤伸司: 中央線第二平等川橋梁縦桁損傷とその対策, SED, No.25, pp.2-9, 2005
- 2) 井上太郎, 小林裕介: レール継目での衝撃が箱断面上路鉸桁床組の疲労に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.67A, pp.555-565, 2021
- 3) 金島篤希, 井上太郎, 蒲原浩平, 松岡弘大, 小林裕介: レール継目の衝撃が上路鉸桁の補剛材上下端の応力性状に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.67A, pp.566-577, 2021
- 4) 丹野泰郎, 野中大輔, 大畑和弘: 在来線における鉄桁管理について, 土木学会第 61 回年次学術講演会, IV-329, 2006
- 5) 谷口紀久, 阿部允: 鋼桁の中間補剛材下端の疲労変状, 構造物設計資料, Vol.78, pp.24-27, 1984