3214 レール継目部の剛性低下に着目した解析モデルの検討

［土］○鈴木　貴洋　［土］石田　誠

Study on the analytical model of fish plate rail joint focusing on the decrease of its flexural rigidity

Takahiro Suzuki,Member （Railway Technical Research Institute）
Makoto Ishida,　Member （Railway Technical Research Institute）

Rail dip joint has been posing a problem with deterioration of track components and track irregularity due to the decrease of flexural rigidity and joint gap, which has so far caused considerable maintenance cost. In this study, static loading tests and wheelset drop tests have been carried out to clarify the difference between fish plate joint structure and standard track structure (no joint). Also, FEM model focusing on the decrease of flexural rigidity of fish plate joint structure was studied comparing with static loading test and wheelset drop test results.

キーワード：レール継目部、剛性低下、静的載荷試験、輪軸落下試験、有限要素法
Keyword: Fish plate rail joint, Decrease of flexural rigidity, Static loading test, Wheelset drop test, FEM

1．はじめに

レール継目部では、車両の繰返し通過に伴う道床沈下およびレール頭頂面端部・継目板の塑性変形による、いわゆる継目落ちが生じ易く、そのために保守量の増加を引き起こすのが現状である。ここで、継目落ちの生成原因として、①継目板剛性がレール本体の 1/3～1/4 しか無いために、レール本体と同一構造であれば継目を中心とする前後２～３mの範囲で中間部（一般部）に比べて大きな沈下（上下変位）を生ずること、②継目箇所では遊間が存在することと折れ角を生ずることで大きな輪重変動が継目部に働くことが挙げられる[1]。

そこで、本報告では継目部での曲げ剛性低下に着目し、静的載荷試験および輪軸落下試験により継目部と中間部との違いについて検討を行った。また、輪軸落下試験を対象に、有限要素法を用いてレール曲げ剛性を局所的に低下させることにより継目部の剛性低下を模擬した解析モデルの構築を検討した。

2．静的載荷試験

2．1　試験概要

スラブ軌道に、レール継目部（かけ継ぎ構造）および中間部を設定し、DYLOC（軌道動的載荷試験車）を用いて０～100kN まで 20kN 間隔に上下静的荷重を載荷した時のレール上下変位を、図１に示す１４箇所（中間部の場合１２箇所）で測定した。試験条件として、レール種別は 50N レール、軌道パッドはばね定数 60MN/m（公称値）、締結間隔は 62.5cm である。また、載荷位置は図１に示す、①レール端部より 40mm 離れた位置（中間部の場合もこれに相当する位置）、②継目区間の１つ隣の締結間の中央、③②から１つ隣の締結間の中央の３箇所とした。測定項目はレール上下変位であり、測定箇所は図１に示す通りである。なお、変位測定は、ストローク式変位計およびカンチレバ型変位計により行った。

2．2　試験結果

図２に（a）静的載荷によるレール上下変位、(b）継目部におけるレール上下変位拡大図（載荷位置①、載荷重 100kN）、(c）静的荷重－載荷点付近のレール端部上下変位（載荷位置①）の測定結果を中間部と継目部を合わせて示す。なお、図２（c）には、測定結果から得られた回帰直線も合わせて示してある。

図 2(a)より、載荷位置が①～③と移動するに従い載荷点のレール上下変位が小さくなっていることが分かる。中間部に関しては、理論的に載荷位置①～③における載荷点の

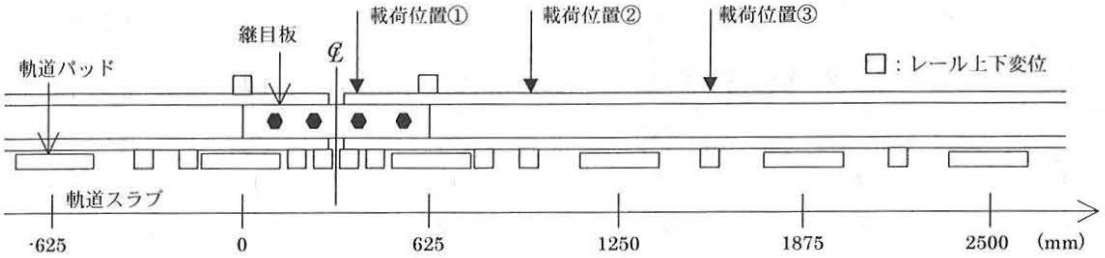
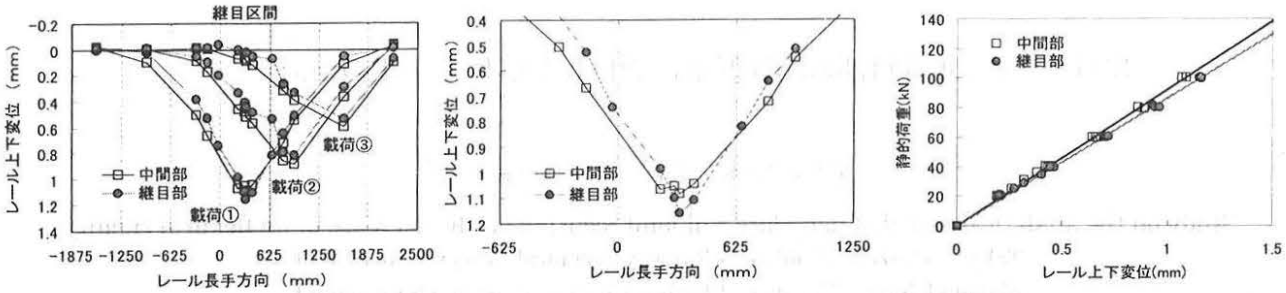


図１　静的変位測定箇所



(a) 静的載荷によるレール上下変位　(b) 継目部におけるレール上下変位拡大図（載荷位置①）　(c) 静的荷重－レール端部位置の上下変位（載荷位置①）

図２ 静的載荷試験測定結果（図における縦線は締結位置を示す）

レール上下変位は同程度となるはずである。この差異の理由として、軌道パッドの個体差や軌道敷設状態の不均一さなどが考えられる。

図 2(b)より、レール上下変位最大値は継目部の方が中間部よりも約 0.08mm 大きくなる程度であり、文献[1]で述べられている 1/4～1/3 ほどの大きな曲げ剛性低下は見られなかった。レールたわみ形状について見ると、継目部の場合で載荷点を中心とした折れ角形状となっていることが分かる。

図 2(c)より、回帰直線の傾きは継目部で 86.4kN/mm、中間部で 92.2kN/mm となった。回帰直線の傾きがレール曲げ剛性と線形関係であるものと仮定した場合、継目部の曲げ剛性は中間部の約 94%となった。

３．輪軸落下試験

３．１ 試験概要

静的載荷試験と同様に、スラブ軌道にレール継目部（かけ継ぎ構造）と中間部を設定し、輪軸落下試験を実施した。試験条件として、レール種別は 50N レール、60kg レールの２種類であり、軌道パッドのばね定数は 110MN/m（公称値）である。なお、輪軸重量は 92kN（片側 46kN）、落下高さは 10 および 20mm とした。測定項目および測定箇所を図３に示す。落重箇所は図３に示す継目のある締結間隔の中心であり、50N レールの場合は継目部の場合でレール端部より 10mm 離れた位置にも輪軸を落下させた。なお、試験は各条件で数回行い、左右動的輪重の衝撃時間差が衝撃持続時間の半分以下となるもの３回を試験結果として採用した。主な測定項目、測定方法および測定周波数帯は表１に示す通りであり、測定データのサンプリング時間は 1/12000s である。

３．２ 試験結果

（１） 動的輪重

図４および５に、50N レールと 60kg レールそれぞれの場合の(a)動的輪重波形、(b)レール上下変位、(c)動的輪重－レール上下変位の継目部および中間部の測定結果を示す。また、動的輪重波形より読み取った輪重作用時間を表 2 に示す。ここで、(b)は落重箇所におけるレール上下変位が最大値となる時の長手方向のたわみ形状を示し、(c)は落重箇所におけるレール上下変位が最大となる時の動的輪重を示し、これらより得られる回帰直線も合わせて示してある。また図４の凡例において、継目部１は落重箇所が遊間中心の場合、継目部２は落重箇所がレール端部より 10mm 離れた場合を示す。

図４(a)および５(a)の動的輪重波形および表２より、レール種別によらず継目部の場合で輪重作用時間が中間部よりも長くなっていることが分かる。また、動的輪重値の最大値について見てみると、50N レールでは中間部の方がかなり大き目となり、一方 60kg レールでは継目部、中間部とも

表１ 輪軸落下試験における主な測定項目と測定方法

測定項目	測定方法	測定周波数
動的輪重	車輪に貼付したひずみゲージ	1kHz（動ひずみ測定器）
レール変位	非接触式変位計	0-20kHz
レール圧力	圧力パッド（ひずみゲージ）	1kHz（動ひずみ測定器）
レール振動加速度	圧電型加速度ピックアップ	1-7kHz

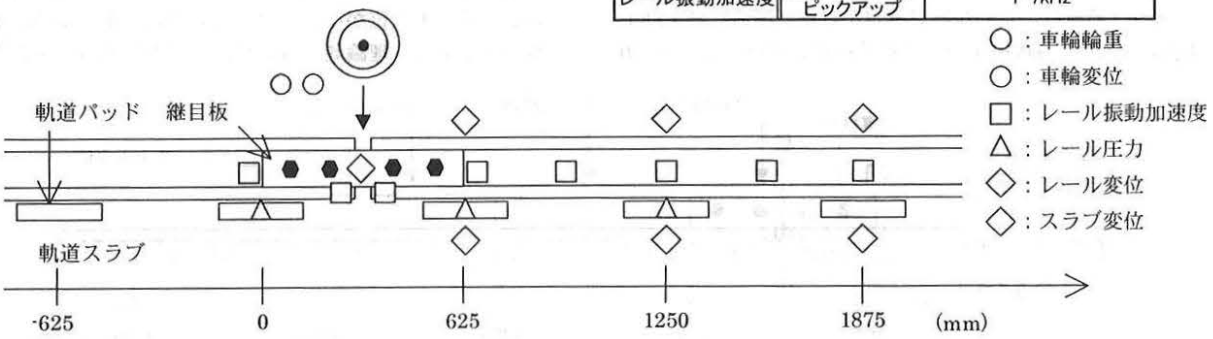
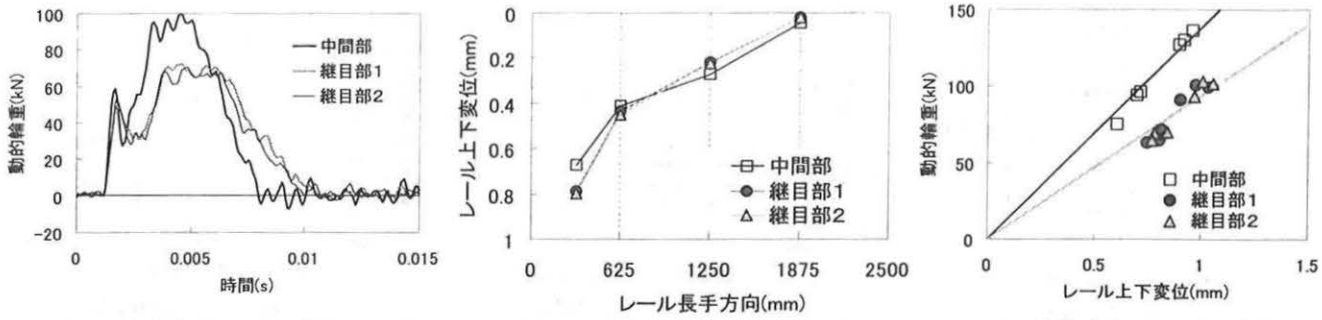
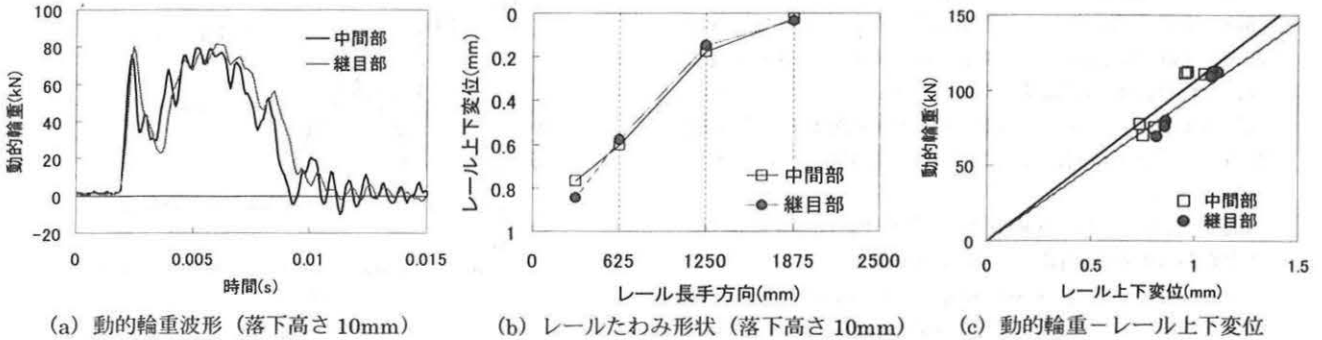


図３ 輪軸落下試験測点配置図



(a) 動的輪重波形（落下高さ 10mm）　(b) レールたわみ形状（落下高さ 10mm）　(c) 動的輪重－レール上下変位

図4　50N レールにおける動的輪重、レール上下変位測定結果



(a) 動的輪重波形（落下高さ 10mm）　(b) レールたわみ形状（落下高さ 10mm）　(c) 動的輪重－レール上下変位

図5　60kg レールにおける動的輪重、レール上下変位測定結果

に同程度となっていることが分かる。ここで、輪軸の落下高さからの自由落下時間と衝撃後空中滞在時間の 1/2 を動的輪重波形から読み取り、その比から算出した輪軸・レール間の反発係数を表3に示す。50N レール・中間部の反発係数が 50N レール・継目部1、2に比べて大き目になっていることが分かる。このことより、50N レール・中間部の場合は輪軸とレールとの接触状態が他の試験時とは異なり、そのために輪重波形が大き目に表れたものと考えられる。したがって、50N レールの場合に動的輪重を用いて中間部と継目部を比較することは難しく、一方で 60kg レールの場合は反発係数が中間部と継目部で同程度であることから動的輪重を用いた比較は妥当であると考えられる。

図 4(b)および 5(b)のレール上下変位より、50N および 60kg レールともに継目部の場合は落重箇所を中心とした折れ角のあるたわみ形状となった。また、継目部の折れ角形状の変形範囲は継目区間の左右締結位置程度までであった。

図 4(c)および 5(c)の動的輪重－レール上下変位より得られた回帰直線の傾きを表3に示す。継目部について見ると、レール種別によらずほぼ同程度になっていることが分かる。回帰直線の傾きがレール曲げ剛性と線形関係であるものと仮定した場合、60kg レールでは継目部の曲げ剛性は中間部の約 91%となり、レール種別は異なるものの静的載荷試験の結果（約 94%）と同程度になった。

4．継目剛性低下を模擬したレール解析モデルの検討

レール曲げ剛性低下を解析モデルにおいて模擬するため、

表2　輪重作用時間（ms）

落下高さ(mm)	レール種別	50N	60kg
10	中間部	6.9	7.2
	継目部1	9.3	9.5
	継目部2	8.6	----
20	中間部	6.6	7.1
	継目部1	8.2	7.5
	継目部2	7.4	----

表3　輪軸落下試験による反発係数

落下高さ(mm)	レール種別	50N	60kg
10	中間部	0.72	0.67
	継目部1	0.64	0.68
	継目部2	0.62	----
20	中間部	0.78	0.64
	継目部1	0.61	0.66
	継目部2	0.60	----

表4　輪軸落下試験による荷重－変位直線の傾き（kN/mm）

レール種別	50N	60kg
中間部	138.9	106.4
継目部1	94.0	97.1
継目部2	93.6	----

解析方法として要素毎に剛性を変えることのできる FEM を採用した。剛性低下は、断面2次モーメントにある低下係数 α を掛けて検討した。ここでは、図 6 に示すように低下係数 α は剛性低下区間全体に一律に掛けることとした。なお、レールは Euler はりとした。

剛性低下を設定するための解析対象を輪軸落下試験、低下係数 α の設定条件を3節より得られた①継目部の輪重作

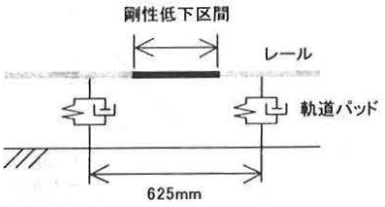
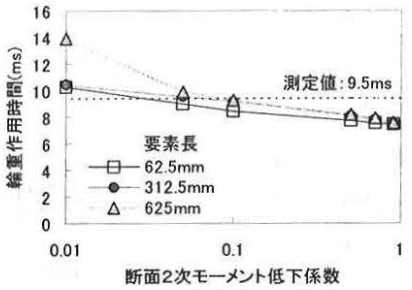
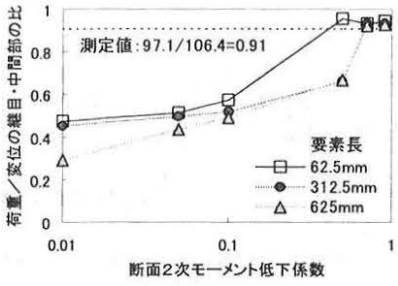


図6 剛性低下を模擬する継目部解析モデル



(a) 輪重作用時間

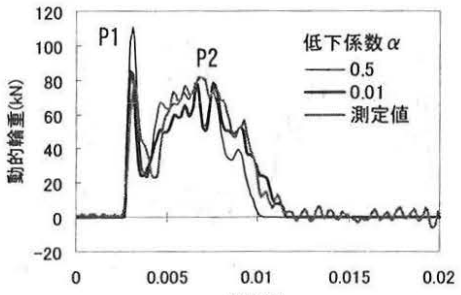


(b) 荷重／変位の比

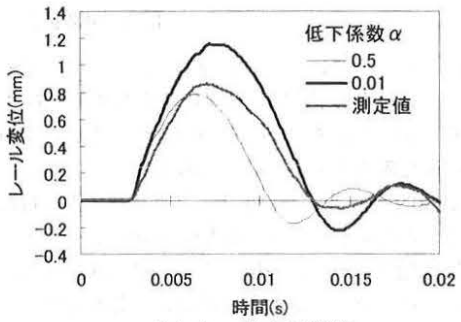
図7 剛性低下区間の要素長および低下係数

用時間（9.5ms）、②荷重－変位直線の傾きとし、これらを同時に満足するようなαが設定できるかを検討した。主な解析条件は、60kg レール、軌道パッドのばね定数・減衰係数はそれぞれ 45MN/m および 20kN・s/m とした。ここで、軌道パッドの各値は、中間部の動的輪重測定値に対して解析値の輪重作用時間、大きさがほぼ一致するように設定した値である。

図6に示す、継目部を模擬する剛性低下区間の要素長（締結中心からの左右範囲）とその低下係数αをパラメータとして解析を行った結果を図7に示す。図 7(b)の縦軸は、輪軸落下位置におけるレール上下変位最大値とその時の輪重値の比（kN/mm）を求め、さらに継目部と中間部との比で表している。図には測定値による結果も合わせて点線で示してある（97.1/106.4=0.91）。図より、要素長 625mm の場合、輪重作用時間を測定値と一致させるためには低下係数αを 0.1 程度とする必要があり、一方で荷重／変位の比を測定値と一致させるためには低下係数αを 0.7 程度とする必要がある。図8に要素長 62.5mm の場合の動的輪重およびレール変位波形を示す。輪重作用時間を大きくするためにはレール曲げ剛性を小さくする必要があるが、これに伴い軌道有効質量および軌道支持剛性は小さくなる[2,3]。そのため、動的輪重の衝撃初期のピーク（P1）は小さくなっていることが分かる。また、理論的には軌道支持剛性が小さくなることでP1後のピーク（P2）は小さくなるが、ここで示した解析結果ではその差は僅かであった。レール上下変位のピークについて見ると、曲げ剛性低下に伴い大きくなり、またピーク到達時間が大きくなっていることが分かる。これより、レール上下変位が主な原因として荷重／変位比が小さくなっていることが分かる。以上より、輪重作用時間と荷重／変位（曲げ剛性を表すパラメータ）を低下係数αおよびその要素長の組合せにより同時に満足させることは困難であることが分かった。



(a) 動的輪重



(b) レール上下変位

図8 解析波形例（剛性低下要素長：62.5mm）

5．おわりに

継目部の曲げ剛性低下に着目し、静的載荷試験および輪軸落下試験により中間部と比較した結果、継目部の曲げ剛性は中間部の約 91%程度であることが分かった。継目部の剛性低下解析モデルを FEM により検討した結果、剛性低下とそのことによる輪重作用時間の増加を同時に満たすようなレール曲げ剛性を設定することが困難であることが分かった。

継目落ち生成の原因として、継目部の剛性低下は中間部の約 91%程度であることからその影響は小さく、むしろ継目部が不連続であることで生じるレール端部の段差や遊間部を車両が通過することにより生じる衝撃荷重の影響の方が大きいように考えられる。今後は、継目部で生じる衝撃荷重について検討を行う予定である。

参考文献

1)佐藤吉彦：新軌道力学、鉄道現業社、1997.
2)H H Jenkins et.al. : The Effect of Track and Vehicle Parameters on Wheel/Rail Vertical Dynamic Forces、REJ、1974.1.
3)佐藤吉彦：軌道高周波振動の理論解析、鉄道技術研究報告、1976.