

# スラブ軌道におけるロングレールの敷設範囲拡大

西宮 裕騎\* 片岡 宏夫\* 平出 壮司\*

Expansion of the Application Range of the Continuous Welded Rail in the Slab Track

Yuki NISHINOMIYA Hiroo KATAOKA Soji HIRAIDE

Additional rail axial force by the thermal expansion of girders occurs in slab tracks on a viaduct. Hence, the limit value of rail compressive axial force and the value of rail gaps caused by rail breakage are examined when designing a continuous welded rail. For the expansion of the applicable range of the continuous welded rail, the consideration of these limit values is necessary. In this study, the stability in the lateral direction in slab tracks were analyzed using a finite element method and its results showed that the limit of the value of rail compressive axial force can be eased. In addition, a vehicle dynamics simulation on rail gaps was developed, and case studies at the time of a vehicle passing rail gaps were carried out to evaluate the dynamic effect of the track and vehicle. As a result of the case studies, we estimate that safety problems will not occur under the conditions included in this study, and results shows the limit of the value of rail gaps of rail breakage can be eased.

キーワード：スラブ軌道，ロングレール，レール軸力，レール破断時開口量，走行シミュレーション

## 1. はじめに

スラブ軌道等の直結系軌道を高架橋上に敷設すると、温度変化による桁の伸縮に伴いレールと桁との間にレール長さ方向の力が作用し、レールに付加軸力が発生する。このため、ロングレール化にあたっては、レール軸力分布を計算し、温度上昇時の圧縮側の最大レール軸力と低温時のレール破断時開口量の照査を行うこととされている<sup>1)</sup>。

新幹線の高架橋上のスラブ軌道では、バラスト軌道の座屈安定性の検討を参考に、圧縮側レール軸力の限度値を980kNとしてロングレール化が行われてきた<sup>1)</sup>。これに対し、過去に在来線における急曲線のスラブ軌道の横方向安定性について、温度上昇時の半円突起への作用力を用いて評価した例があり<sup>2)</sup>、新幹線においても同様の考え方により許容レール軸力を緩和できると考えられる。

一方、レール破断時開口量の限度値については、過去に直線に開口部を設定した走行試験による検証<sup>3)</sup>や車輪の乗り移りに関する基礎的検討<sup>4)</sup>から、一般に70mmが用いられている<sup>1) 3)</sup>。これに対し、過去の走行試験<sup>3)</sup>では直線区間において開口量100mmで通過した例があり、拡大の余地が残されている。また、近年では急曲線に開口部を設定した走行試験<sup>5) 6)</sup>による開口量の検証が行われている。

伸縮継目を撤去してロングレール敷設範囲を拡大するためには、これらの限度値を再検討する必要がある。そ

こで、本研究では一般的な新幹線のスラブ軌道を対象として、構造検討を実施し、レール軸力とレール破断時開口量の限度値の見直しを検討した。

## 2. 軌道横方向安定性の評価

スラブ軌道の横方向安定性については、バラスト軌道と同等の荷重に耐えられるように突起の設計を行っている。しかし、突起が破壊されない限り、著大なレール左右変位は生じないと考えられ、相当大きなレール軸力に至るまで横方向安定性は確保されるものと推定される。そこで、FEM解析を用いて突起・軌道スラブ等に作用する横方向の力を算出し、部材強度に対して照査することで、横方向安定性の検討を行った。

### 2.1 解析条件

解析モデルを図1に、解析条件を表1、2に示す。ロングレールの不動区間を模擬するため、図1(a)に示す通り解析モデルのレール長は700mとし、中央の100mを軌道スラブのモデルとした。図1(b)(c)に示す通り、軌道スラブをシェル要素、レールを梁要素、レール締結装置をばね要素でモデル化した。突起は固定点とし、充填材を模擬したばね要素で軌道スラブに接続することにより、突起にかかる作用力を求めた。

解析ケースとして、軌道スラブと路盤コンクリート間の摩擦抵抗を考慮しないケースと、摩擦抵抗力をばね要素でモデル化するケースの2通りを設定した。初期不整

\* 軌道技術研究部 軌道構造研究室

特集：軌道技術

として波長と波高を変えた通り変位の形状を想定し、その初期通り変位の中央位置が軌道スラブ中央および端部に位置する場合を設定した。

表1に各解析ケースで設定した曲線半径およびレール初期通り変位形状を示す。表2に各解析ケースに用いた物性値を示す。レール種別はJIS 60kgレールである。レール締結装置のレール長さ方向ばね特性は、両解析ケースともスラブ軌道で一般に設定されるレール単位長さ当たりのふく進抵抗(5kN/m/レール)から求められる1締結あたりのおく進抵抗を用いた。表2以外の物性値と非線

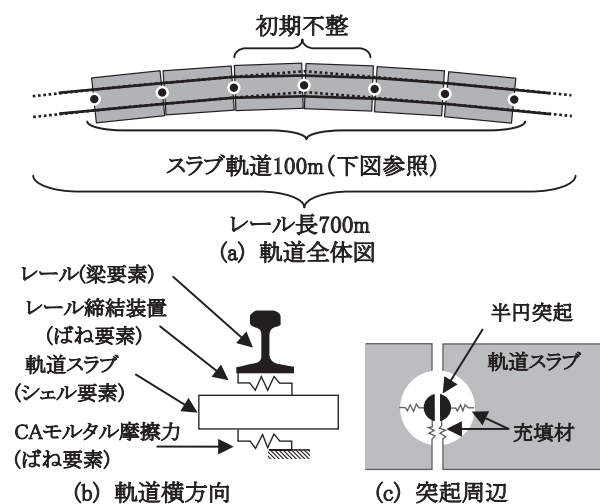


図1 軌道横方向安定性のFEM解析モデル

表1 解析ケース

項目	値	
	解析ケース1	解析ケース2
軌道スラブ/路盤間 摩擦抵抗力	考慮しない	考慮する
曲線半径	2500,4000m	700,1000, 2500m
初期通り 変位波長	第I波形	6,10m
	第II波形	12,15m
初期通り変位波高	0~13mm	0~13mm

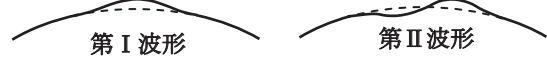


表2 解析モデルのばね定数

部位	項目	値	
解析 ケース 1	突起・軌道 スラブ間	レール長さ方向	69 kN/mm
		レール横方向	122 kN/mm
	レール締結 装置	レール長さ方向	最大 3.2 kN*
		レール横方向	186 kN/mm*
解析 ケース 2	突起・軌道 スラブ間	レール長さ方向	32.2 kN/mm
		レール横方向	16.1 kN/mm
	軌道スラブ・ 路盤間	レール長さ方向	最大 60 kN*
		レール横方向	
レール締結 装置	レール長さ方向	最大 3.2 kN*	
	レール横方向	44 kN/mm*	

\*実験から得られた非線形特性を設定<sup>7)</sup>

形特性は直結8型レール締結装置を対象とした島津らの実験結果<sup>7)</sup>より得た特性を用いた。軌道スラブ・路盤ばね特性は、CAモルタルをはく離させ、突起が抵抗しない条件での試験より求めたものであり、レール長さ方向と横方向にそれぞれ与えた。

解析ケース1では、レールに70、50、40℃の3ケースの温度荷重を与えた。同様に解析ケース2では、72℃(軸力1300kN相当)、55℃(軸力1000kN相当)の2ケースの温度荷重を与えた。高架橋はモデル化の対象外とし、大きな温度上昇量を与えることにより、高架橋の伸縮に伴う付加軸力を模擬することとした。レール端の長さ方向の拘束条件は自由端とした。レール・軌道スラブとも、鉛直方向の変位は考慮せず、二次元の平面問題として拘束条件を設定した。解析ソルバーにはNASTRANを用いて、非線形静解析を行った。

2.2 解析結果および考察

解析で得られたレール横変位、レール締結装置への作用力、突起への作用力について、曲線半径、温度上昇量(レール軸力)ごとに最大値を整理したものを表3に示す。レール横変位は0.3mm以下となり、極めて小さかった。レール締結装置への作用力は、1締結あたり最大7.7kNであった。軌道スラブからの突起への作用力は21.0kN以下であった。

直結8形レール締結装置の設計においては、タイプレートの水平抵抗力は50kN程度としており、解析から得られた7.5kNに比べて十分な余裕がある<sup>8)</sup>。軌道スラブの突起の設計においては、道床横抵抗力相当分の軌道横方向の荷重は1軌道あたり10kN/mで、軌道スラブ長5mに換算すると50kNとなり、半円突起においては25kNとなる<sup>2)</sup>。解析から得られた値はこれらの想定荷重を下回っていた。解析ケース1ではCAモルタルの抵抗力がないことを想定したが、解析ケース2においてこの抵抗力を設定した場合には、突起への作用力は2.2kNと小さく、設計荷重の1/10程度となった。

突起への作用力が設計上の想定荷重を下回ることを考慮すると、想定した範囲内においては十分なレール横方向の安定性が確保できると考えられる。本解析では曲線部におけるレールの初期の弾性変形や初期不整を発生させるための初期抵抗力については考慮しておらず、試験によって得られたばね特性にもばらつきがあるが、以上の結果より部材強度に対して十分に余裕があると考えられる。曲線半径が700m以上のスラブ軌道にロングレールを敷設した場合に、温度上昇に伴うレール軸力は1250~1300kN程度まで許容しても問題はないと推定される。

なお、実軌道への適用に際しては、横方向への作用力の増加に伴う軌道への影響、レールのふく進を注視する

表3 解析結果

解析ケース	解析ケース1						解析ケース2					
	レール温度上昇量 (°C)	70		50		40		72			55	
レール軸力 (kN)	1274		910		728		1300			1000		
曲線半径 (m)	4000	2500	4000	2500	4000	2500	2500	1000	700	2500	1000	700
レール横変位 (mm)	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2
レール締結装置への横方向作用力 (kN)	7.4	7.5	5.3	5.3	4.2	4.3	6.7	7.3	7.7	5.1	5.5	5.9
突起への横方向作用力 (kN)	20.1	21.0	14.4	15.0	11.5	12.0	1.5	1.7	2.2	1.1	1.3	1.4

とともに、レール締結装置の水平抵抗力、特にタイプレートの定着を確保するよう注意が必要である。

### 3. レール破断時開口量の評価

レール破断時開口量の限度値を検討するため、開口部の車両通過を模擬可能なFEMによる走行シミュレーション手法を構築し、過去に実施した実験や他の解析手法との比較検証を行い、妥当性を確認した。構築した手法を用いて、ケーススタディを実施し、レール開口量と走行速度が車両および軌道に与える影響を調べた。

#### 3.1 走行シミュレーション手法

開口部の走行シミュレーションモデルを図2に示す。軌道はレール・まくらぎ・下部構造を梁要素とばね要素でモデル化した。車両は図2(b)に示す通り車体・台車・輪軸を剛体でモデル化し、それらをばね・ダンパで結合した三次元モデルとした。各剛体の質量・慣性半径、各ばね・ダンパの特性は車両諸元に基づき設定した。

開口部の車輪・レール間の接触は非線形性が強い現象であるため、安定的に解析する目的で、時間積分に陽解法を用いた三次元並列有限要素解析手法を採用した。車輪・レール間の接触判定は、図2(c)に示す通りレール梁要素に結合した断面形状を模擬する剛体要素の節点と、車輪表面のソリッド要素表面間で行う。接触アルゴリズムにはペナルティー法を用いた。この手法では三次元で接触判定を行い、レール断面方向の多点接触やレール長手方向の多点接触、および非接触状態を表現可能である。よって、開口部通過時の複雑な接触状態の変化を評価可能である。

#### 3.2 妥当性の検証

##### 3.2.1 クリープ力の検証

車輪・レール間の接触モデルは計算精度の観点から本シミュレーションで最も重要である。そこで、過去に実施した実物輪軸によるクリープ力特性試験<sup>9)</sup>を再現する解析を実施して検証を行った。解析モデルを図3に、解析条件を表4に示す。摩擦係数は実験結果から0.6に設

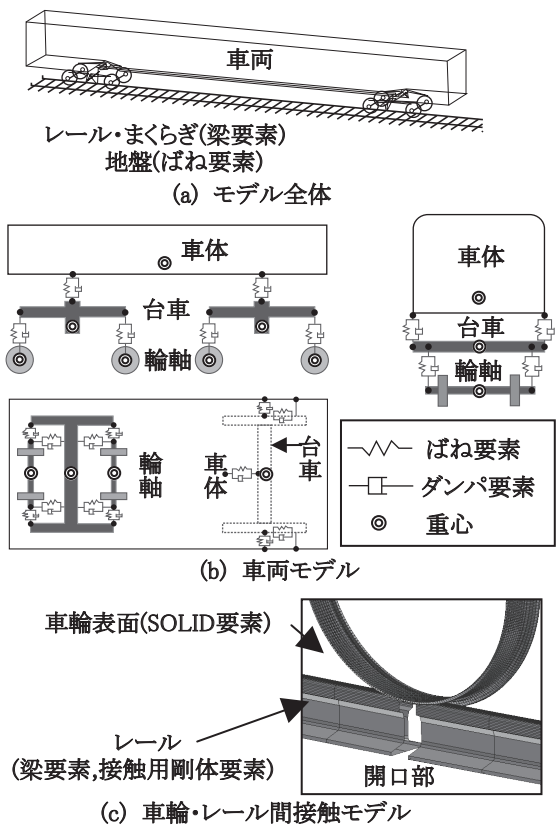


図2 開口部走行シミュレーションモデル

定した。試験と同様に測定輪軸と軌条輪をモデル化し、接触部は前節のモデルと同様に設定した。

解析は、予めアタック角を設定したモデルでフランジ部が接触した状態から開始し、所定の輪重となるよう測定輪軸両端に鉛直荷重を作用させた後、軌条輪を回転させ、接触力が安定した状態におけるクリープ力を求めた。

解析結果と、過去の実験結果およびカルカーの単純化理論による計算結果<sup>9)</sup>を図4に示す。実験結果は車輪上昇量5mmまでの結果を示しており、横クリープ力特性の飽和特性を用いることで安全側の評価を行うことができる。解析によるクリープ力特性は外軌横クリープ力の飽和特性の傾向を再現しており、理論計算結果とも良好に一致しているため、構築した車輪・レール間接触モデルは妥当であると考えられる。

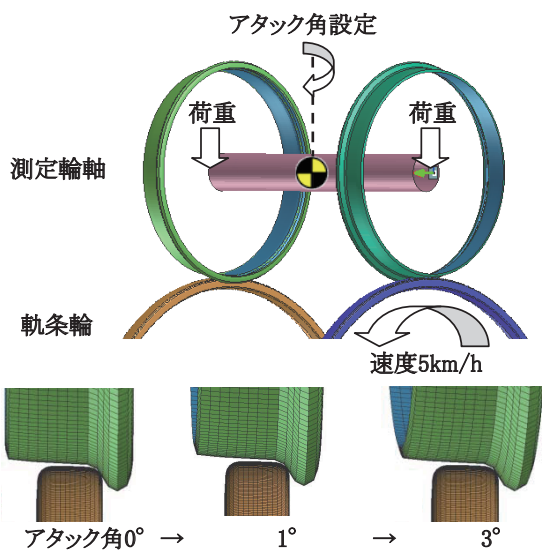
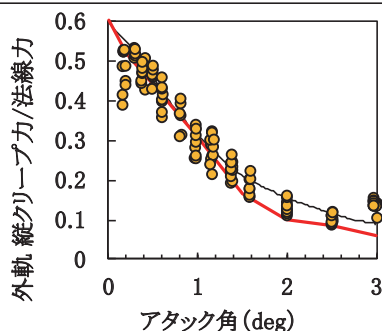
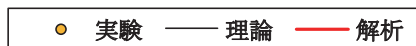


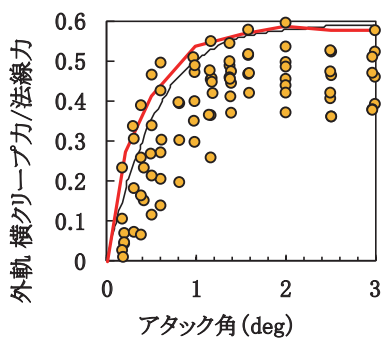
図3 クリープ力特性試験の再現解析モデル

表4 クリープ力特性試験の再現解析条件

項目	諸元
軌間	1067mm
車輪踏面	在来線基本踏面
軌条輪頭面	60kg レール (1/40 勾配付)
走行速度	5km/h
軸重	60kN
摩擦係数	0.6
アタック角	0° ~ 3°
車輪上昇量	3mm



(a) 外軌の縦クリープ力



(b) 外軌の横クリープ力

図4 クリープ力の再現解析結果

### 3.2.2 新幹線車両モデルの動特性の検証

新幹線の曲線区間の定常走行における本車両モデルの妥当性を確認するため、過去に開発された走行シミュレーション手法<sup>10)</sup>(以下「VDS」と称す。)との比較を行った。レール開口部がない曲線区間の定常走行における妥当性を確認するため、新幹線の曲線区間を高速走行する条件で解析を行い、結果を比較した。解析条件を表5に、解析結果を図5に示す。図5より、速度に伴う輪重・横圧の増減は、2つの手法で差異が見られなかった。よって、提案手法を用いて、曲線区間の定常走行時の輪重・横圧を適切に解析可能であることを確認した。

表5 解析条件

項目	諸元
車両	新幹線車両
走行速度	180 ~ 320km/h
曲線半径	4000m
カント	200mm
レール	60kg レール
軌道パッドばね定数	60MN/m
レール支持間隔	600mm

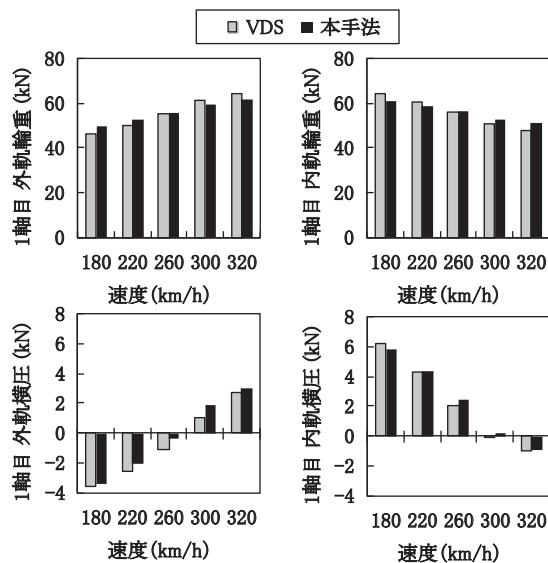


図5 高速走行時の車両モデルの検証結果

### 3.3 ケーススタディによる影響評価

構築した走行シミュレーション手法を用いてケーススタディを実施し、曲線半径、レール開口量、走行速度が車両と軌道に与える影響を調べた。解析条件は前節の表5と同一である。レール開口部は、列車進行方向の受け側のまくらぎに近い位置とした。

#### 3.3.1 直線区間の検証

直線区間のケーススタディの結果を図6に示す。なお、輪重とレール圧力については1kHzのローパスフィルタを適用した。200km/hを越える速度域では、レール開口量が輪重やレール圧力および変位に与える影響が小さい傾向がみられた。

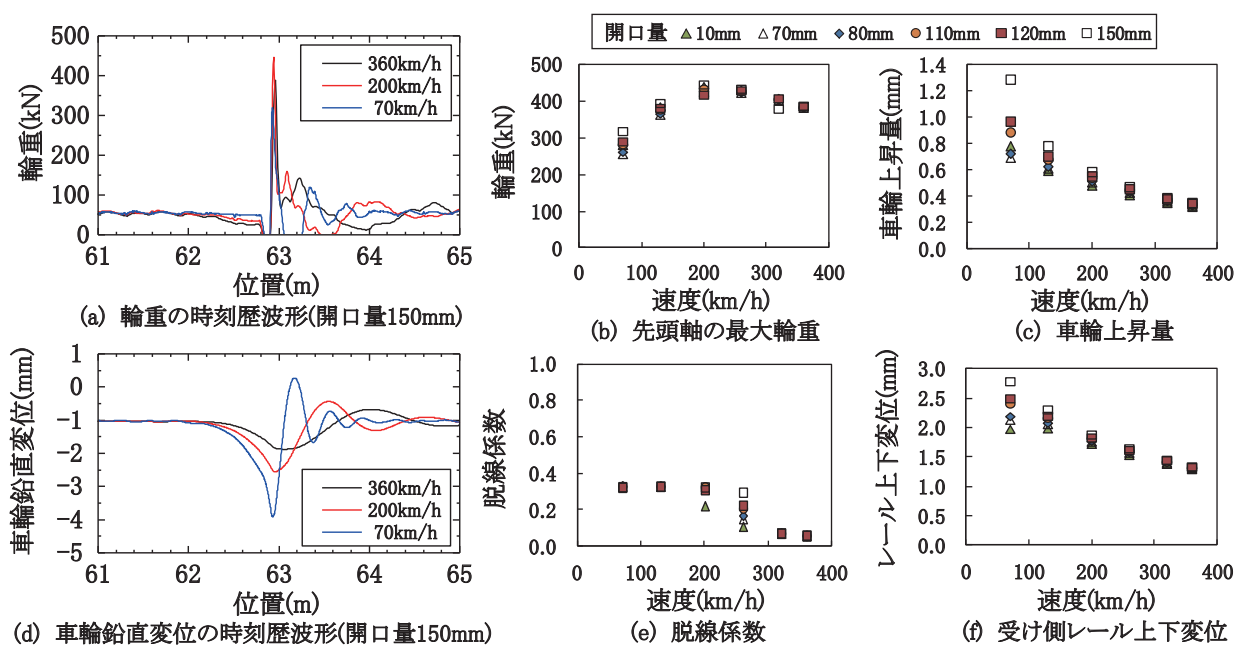


図6 直線区間のケーススタディ結果

200km/h以下の速度域では、レール開口量の増加に伴い、レール変位や車輪上昇量がわずかに増加する傾向がみられた。また、輪重は70～200km/hの速度域では速度に伴い増加するものの、それ以上の速度域では大きく変わらなかった。脱線係数は全体的に小さく、最大値は0.33であり、速度200km/hを境に減少する傾向がみられた。

### 3.3.2 曲線区間の検証

曲線区間のレール開口部についても同様に検討を行った。曲線諸元と速度は表6の通りとし、開口量は70mm, 100mm, 150mmを対象とした。得られた脱線係数の目安値超過時間を図7に示す。検討した範囲で脱線係数が0.8を超過する継続時間が最も長い条件は、ケース⑤、開口量150mmのケースであった。これは主に開口部通過後の輪重減少に起因するものである。この条件下で軌道変位による輪重変動を生じた場合の安全性を確認するため、開口部付近に水準変位を設けた解析を実施した。水準変位は最大10mmとし、コサイン波形の全振幅として与えた。また、正負の水準変位を設定し、それぞれ著大輪重と輪重抜けを生ずる2条件で検討を行った。解析した外軌第1軸の時刻歴波形を図8に示す。水準変位がない場合と比べて輪重抜けの傾向にほとんど差はなかった。脱線係数が0.8を超過する継続時間は最大10msec程度であり、水準変位が0mmの場合と±10mmの場合は同程度であった。去り側レール左右変位は最大1.3mm、受け側レール左右変位は最大1.7mm、受け側レール上下変位は最大2.6mmと小さかった。

### 3.3.3 考察

直線区間の検証結果から、速度増加に伴って輪重が増加するのは200km/h程度までであり、それ以上の高速

表6 曲線区間のケーススタディ条件

ケース No.	①	②	③	④	⑤
曲線半径 (m)	4000	4000	3500	2000	800
カント (mm)	200	200	175	70	175
速度 (km/h)	300	360	275	120	120
水準変位 (mm)	0	0	0	0	0

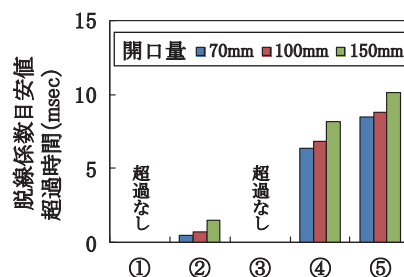


図7 曲線区間のケーススタディ結果

域では増加しないと推定される。

また、開口量の増加に伴う輪重の増加がみられるのは、200km/h程度までであり、それ以上の高速域では開口量の影響は軽微であると推定される。曲線区間の解析結果から、レール上下変位量、レール頭部左右変位量および車輪変位量は全体的に小さかった。過去の研究から、脱線係数  $Q/P$  が目安値0.8を超過する時間が15msec以内であれば車輪上昇量が小さく、走行安全上の問題は生じない<sup>11)</sup>。検討した範囲で脱線係数が目安値0.8を超過する時間が最も長い条件は、曲線半径800m、開口量150mmの水準変位を設けたケースで10msecであった。さらに、同条件下の開口量70mmのケースからの目安値超過時間の増加は2msec未満であり、相対的に小さかった。よって、本解析の範囲内では走行安全上の問題は生じないと考えられる。

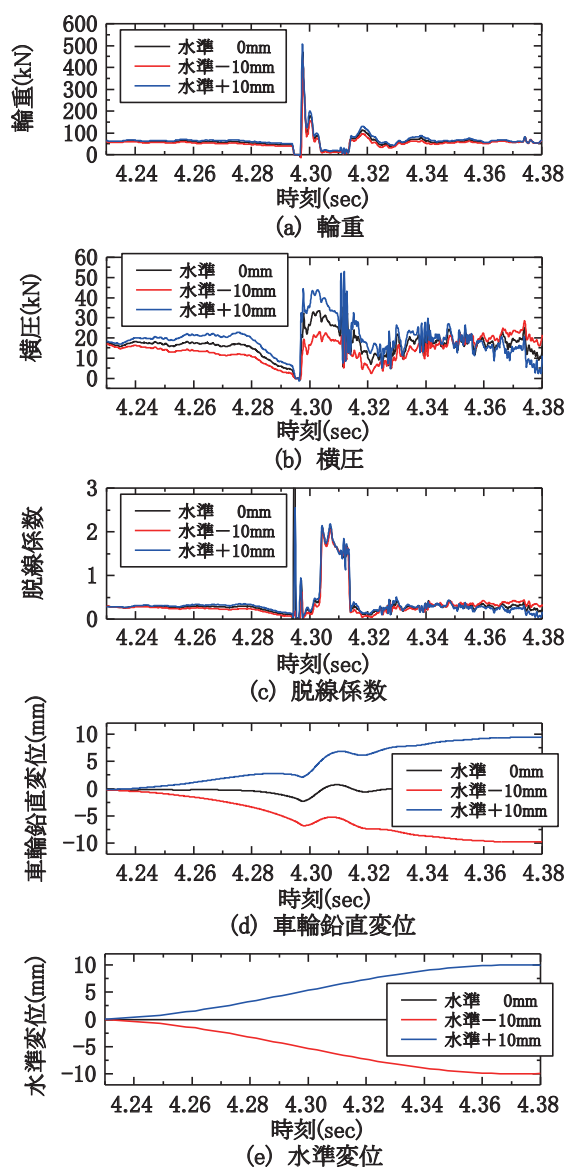


図8 レール開口部通過時の波形（開口量 150mm）

#### 4. おわりに

スラブ軌道におけるロングレールの敷設範囲の拡大を目的とし、限度値の緩和の可能性を検討した。その結果は以下の通りである。

- (1) 温度上昇時のスラブ軌道の横方向安定性を検討した結果、曲線半径 700m 以上のスラブ軌道にロングレールを敷設する場合、温度上昇に伴うレール軸力は 1250 ~ 1300kN 程度まで許容しても問題はないと推定される。
- (2) レール開口部の走行シミュレーション手法による検討を実施した結果、検討した軌道条件の開口量 150mm までの範囲では 70mm と比較して高速域での影響が小さく、かつ脱線係数が目安値 0.8 を超過する時間は最大 10msec であったため、過去の研究

結果から走行安全上の問題は生じないと考えられる。

これらの結果から、スラブ軌道等の直結系軌道において、ロングレールの敷設範囲を従来よりも拡大することが可能となる。なお、低速域では、輪重やレール変位が開口量に依存して増加する傾向が見られたため、車両や軌道の不整等を考慮し、適切な安全率を考慮して設計する必要がある。

#### 謝辞

本研究は東日本旅客鉄道株式会社、独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構の協力を得て実施したものであり、関係者の方々に感謝申し上げます。

#### 文献

- 1) 公益財団法人鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説－軌道構造，丸善出版株式会社，pp.173-186, 2012
- 2) 三浦重，柳川秀明：急曲線へのロングレールの適用，鉄道総研報告，Vol.6, No.1, pp.25-32, 1992
- 3) 椎名公一，平田五十：軌道モーターカーによるレール開口部走行試験，鉄道線路，Vol.33, No.6, pp.23-27, 1985
- 4) 佐藤吉彦，梅原利之編：線路工学，日本鉄道施設協会，pp.301-304, 1987
- 5) 西宮裕騎，平出壮司，片岡宏夫：試験線におけるレール開口部走行試験，第 21 回鉄道技術連合シンポジウム J-RAIL2014, S2-1-3, 2014
- 6) 戸矢真琴，堀山功，堀雄一郎：曲線部におけるレール開口部走行試験，第 20 回鉄道技術連合シンポジウム J-RAIL2013, S2-6-4, pp.493-496, 2013
- 7) 島津健，手代木卓也，堀雄一郎，片岡宏夫，西宮裕騎：高架橋上における伸縮継目の撤去に関する研究，鉄道工学シンポジウム論文集，No.15, pp.108-111, 2011
- 8) 長藤敬晴，熊崎弘，阿部則次，若月修，御船直人，石田誠：レール締結装置の機能向上，鉄道総研報告，Vol.6, No.11, pp.19-28, 1992
- 9) 石田弘明，宮本岳史，前橋栄一，土井久代，飯田浩平，古川敦：急曲線低速走行時の乗り上がり脱線に対する安全性評価手法，鉄道総研報告，Vol.18, No.8, pp.5-10, 2004
- 10) 宮本岳史，石田弘明，松尾雅樹：地震時の鉄道車両の挙動解析（上下，左右に振動する軌道上の車両運動シミュレーション），日本機械学会論文集 C 編，64(626), pp.3928-3935, 1998
- 11) 石田弘明，松尾雅樹，藤岡健彦：鉄道車両の高周波輪重変動下における走行安全性評価に関する研究，日本機械学会論文集（C 編），Vol.71, No.702, pp.454-461, 2005