

論文 FEM解析ツールを用いた 実物大軌道座屈試験の再現解析

玉川 新悟¹・西宮 裕騎²

¹正会員 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 軌道構造 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: tamagawa.shingo.15@rtri.or.jp

²正会員 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 軌道構造 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: nishinomiya.yuki.78@rtri.or.jp

現在、地域鉄道を対象とした低コストな軌道構造の強化対策として、バラスト軌道の木まくらぎを部分的にPCまくらぎに置き換え、ロングレール化する検討を行っている。新規の構造を有するロングレール軌道の開発では、座屈に対する検討が重要となる。そこで、実物大軌道座屈試験を行うとともに、座屈強度の評価を行うためのFEM解析ツールの開発を行っている。

本研究では、開発したFEM解析ツールの妥当性を検証するため、実物大軌道座屈試験の再現解析を行い、解析結果と試験結果を比較するとともに、各パラメータが解析結果に及ぼす影響を検証した。結果として、開発した解析ツールは、座屈強度を評価する上で有効なツールであることを確認した。また、本再現解析において、解析結果と試験結果の差は、概ね道床横抵抗力の設定値に起因することを確認した。

Key Words : FEM, buckling test of full size track, regional railway, continuous welded rail

1. はじめに

地域鉄道のような閑散線区では、軌道の弱点であるレールの継目部の保守に苦慮しており、少ない改良費で効果の高い軌道構造の強化対策が望まれている。これに対して、従来のロングレールは、基幹線区向けに設計されており、導入コストが高いため、地域鉄道への適用は困難である。

そこで著者らは、バラスト軌道の定尺レール区間を低コストでロングレール化するための研究開発を行っている¹⁾。過去の検討では、延長11m程度(断面積の縮尺が約1/11)の模型座屈試験とこれを補間する一連のFEM解析を行うことで、座屈安定性の観点から、ロングレール化が成立する条件を整理している¹⁾。結果として、木まくらぎを4本に1本、もしくは3本に1本の割合でPCまくらぎに置き換え、道床横抵抗力を2~4倍程度に増強する対策を施すことで、ロングレール化が可能であることを示している。また、道床横抵抗力を増強する対策として、細粒土が混入したバラストにセメントを添加したセメント安定処理土による工法の開発が進められている²⁾。

上記の検討に引き続き、提案した軌道構造を対象とした実物大軌道座屈試験を行うとともに、FEM解析ツールを開発し、その妥当性の検証として本座屈試験の再現解

析を行った。なお、座屈試験との比較を行ったFEM解析としては、過去に浅沼ら³⁾による検討が見られるものの、本研究で対象としたロングレール軌道を想定した解析ではないため、当該軌道を構成する部材のパラメータは不明である。そこで本研究では、実物大試験軌道を構成する各部材のパラメータを試験で取得したうえで、座屈試験の再現解析を行った。

本稿では、実物大軌道座屈試験について概説したうえで、座屈試験の解析結果と試験結果を比較し、FEM解析ツールの妥当性を検証した結果を示す。また、各パラメータが解析結果に及ぼす影響に関する検討結果を示す。

2. 実物大軌道座屈試験の再現解析モデル

(1) 実物大軌道座屈試験について

図-1と図-2に実物大試験軌道の全体図と写真を、表-1に基本的な諸元を示す。レールは50kgNレールとし、ガス圧接により溶接した全長65mのものを使用した。まくらぎの配列は木まくらぎを3本に1本の割合でPCまくらぎに置き換えている。本試験軌道は4級線の直線区間を想定し、まくらぎ間隔を675mm、道床肩幅を350mm(PCまくらぎ区間は450mm)とした。PCまくらぎは、低廉

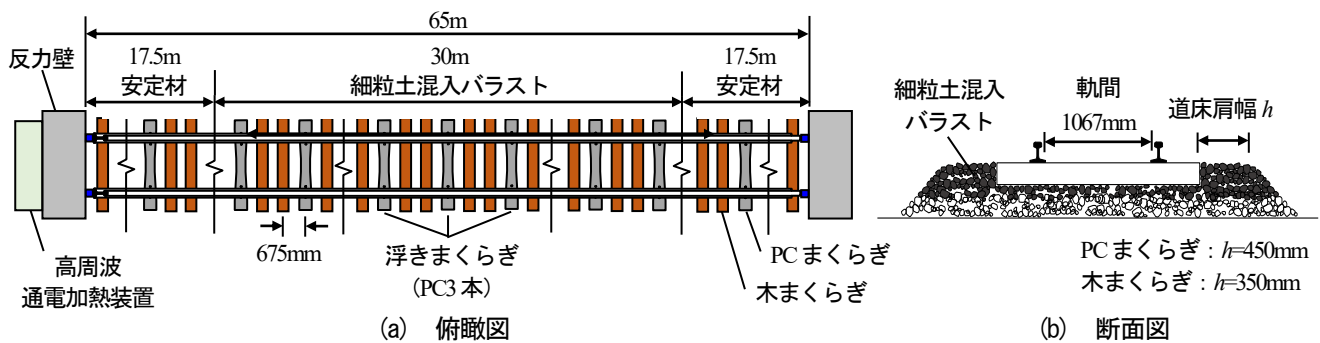


図-1 実物大試験軌道の全体図



図-2 実物大試験軌道の写真

表-1 実物大試験軌道の諸元

項 目		内 容
線 形		直線
全区間 共通	レール種別	50kgN レール
	まくらぎ配列	木まくらぎ区間を3本に1本の割合でPCまくらぎ化
	まくらぎ間隔	675mm (25mあたり37本)
	レール締結装置	PCまくらぎ：線ばね 木まくらぎ：犬くぎ (アンチクリーパ使用)
中央30m 区間	木まくらぎ	犬くぎによる締結なし (アンチクリーパ使用)
	浮きまくらぎ	中央3本のPCまくらぎに約5mm
	道床状態	細粒度混入バラスト
	初期通り変位	波長10m, 波高30mm (目標値)

化PCまくらぎとし、PCまくらぎ用レール締結装置は線ばね形締結装置（線ばね）を使用した。木まくらぎ用のレール締結装置は犬くぎとし、アンチクリーパを木まくらぎ1本につき4体設置した。なお、アンチクリーパの設置は、当該軌道に必要なふく進抵抗力を安価に確保するための方法として提案されたものである⁴⁾。

試験軌道の中央30mの区間は、閑散線区の悪条件を想定し、レールと木まくらぎは犬くぎで締結せず、アンチクリーパのみを使用したうえ、細粒土が混入したバラストとしている。また、中央の3本のPCまくらぎとレールとの間には5mm程度の隙間を設定し、浮きまくらぎの状態を模擬した。これに加え、試験軌道の中央には、波長10m、波高30mmの初期通り変位を設定した。中央の30mより外側の範囲については、道床安定剤を散布し、当該範囲で座屈が発生しないようにしている。

本試験軌道を用いた座屈試験では、高周波通電加熱装置を用いてレールを加熱することでレールに軸力を付加し、軌道が座屈する際の挙動を把握している。

(2) 解析ツール

実物大軌道座屈試験の再現解析に用いた解析ツールは、本研究で開発した静的座屈解析プログラムである。本解析ツールでは、梁要素とばね要素で構成したFEM解析モデルに対して、温度荷重を与えた際のつり合い経路を増分法により求めている。

梁要素は、レールやまくらぎをモデル化するためのもので、Euler梁要素とした。ばね要素は、道床やレール締結装置の抵抗力をモデル化するためのもので、1節点ばね要素と2節点ばね要素とし、いずれも非線形弾性を考慮できるものとした。なお、1節点ばね要素とは、1つの節点に対して定義される要素であり、節点の初期位置からの変位にばね定数を乗じた力が当該節点に働くように作用するものである。また、2節点ばね要素とは、2つの節点間で定義される要素であり、2つの節点の変位差にばね定数を乗じた力が当該節点に作用するものである。

また、幾何学的非線形性として、有限変位（微小ひずみ）を考慮している。非線形平衡方程式の解法には、Newton-Raphson法による荷重増分法と弧長増分法を併用し、解析初期の安定時には前者を、座屈直前からの不安定時には後者を用いている。

(3) 解析モデル

前述の解析ツールに基づき、実物大試験軌道の解析モデルを作成した。図-3に解析モデルを示す。レールとまくらぎは梁要素でモデル化し、レール締結装置の横抵抗力、ふく進抵抗力および回転抵抗力は2節点ばね要素でモデル化した。また、PCまくらぎと木まくらぎの道床縦抵抗力と道床横抵抗力は、浮きまくらぎ区間、一般区間と安定剤散布区間にわけ、1節点ばね要素でモデル化した。さらに、レールの両端部は、試験軌道における拘

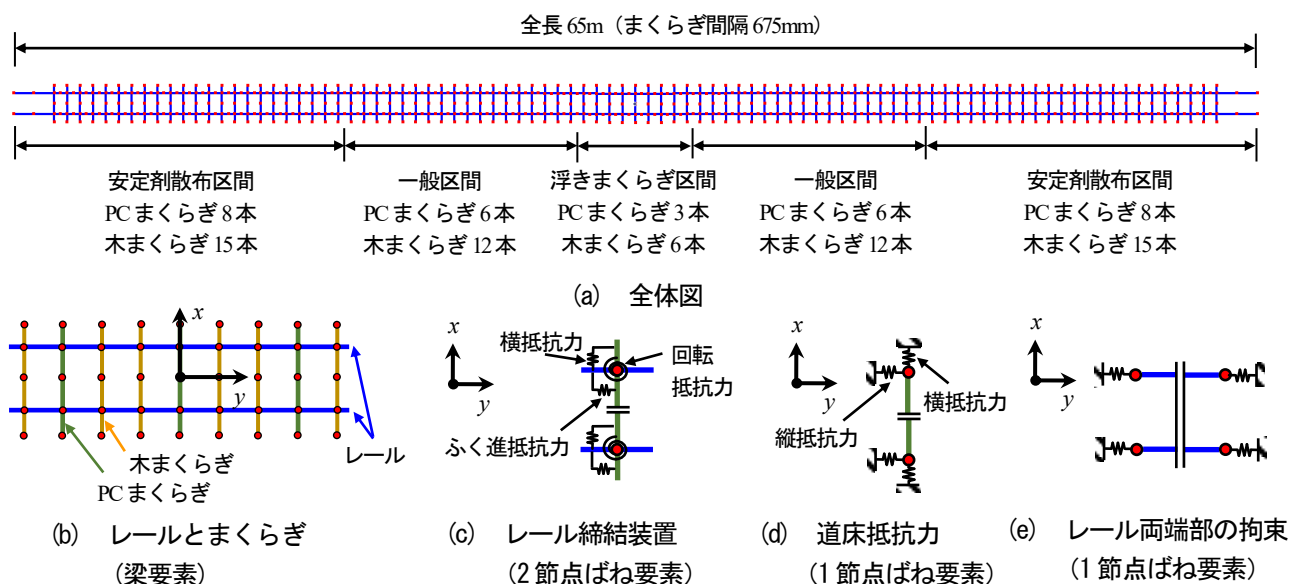


図-3 実物大試験軌道の解析モデル

束を模擬するために1節点ばね要素を設置した。なお、浮きまくらぎ区間とは、前述のPCまくらぎの浮きを設定した区間であり、木まくらぎについては浮きがないため、一般区間と同じである。

拘束条件は、全節点で z 軸方向の並進変位、 x 軸周りの回転変位、 y 軸周りの回転変位を拘束し、レール両端部の節点は、上記に加え、 x 軸方向の並進変位を拘束した。

(4) パラメータの決定

本解析のパラメータは、一般的に使用される値に加え、要素試験を行うことで取得した。

a) レールとまくらぎ

解析に用いたレールとまくらぎのパラメータを表-2に示す。レールの断面特性は、50kgNレールの標準的な値とし、ヤング率、ポアソン比および線膨張係数はレール鋼で標準的に用いられている値とした。また、まくらぎはPCまくらぎを想定した値とした。なお、まくらぎの変形は本解析結果に寄与しないため、木まくらぎの特性はPCまくらぎと同値を採用している。温度上昇はレールにのみ与えるため、まくらぎの線膨張係数は設定していない。

b) レール締結装置

解析に用いたPCまくらぎ用レール締結装置（線ばね）と木まくらぎ用レール締結装置（犬くぎ）のパラメータを表-3に示す。

各パラメータは、図-4に示すような試験を行い取得した。線ばねの横抵抗力は、当該レール締結装置1組を組み立てた状態でレールをレール直角方向に水平載荷し、荷重と水平変位の関係を取得することで求めた。なお、犬くぎの横抵抗力については、過去に佐藤⁹が実施した犬くぎの水平載荷試験結果に基づき設定した。線ばねと

表-2 レールとまくらぎの解析諸元

項目		単位	値
50kgN レール	断面積	mm ²	6.42×10 ³
	断面2次モーメント (弱軸)	mm ⁴	3.22×10 ⁶
	ヤング率	N/mm ²	2.058×10 ⁵
	ポアソン比	-	0.3
	線膨張係数	/°C	1.14×10 ⁻⁵
まくらぎ (共通)	断面積	mm ²	2.84×10 ⁴
	断面2次モーメント (弱軸)	mm ⁴	1.14×10 ⁸
	ヤング率	N/mm ²	2.2×10 ⁴
	ポアソン比	-	0.2

表-3 レール締結装置の解析諸元

項目		記号	単位	値
線ばね	横抵抗力	H	N/mm	7.0×10 ⁴
	ふく進抵抗力	τ	N	$\tau = k \times \sqrt{y}$ $k = 1.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^{1/2}$ $ y > 3 \text{ mm}$ で一定
	回転抵抗力	R	Nmm/rad	2.0×10 ⁷
犬くぎ	横抵抗力	H_w	N/mm	4.0×10 ⁵
	ふく進抵抗力	τ_w	N	$\tau_w = k_w \times \sqrt{y}$ $k_w = 1.3 \times 10^4 \text{ N/mm}^{1/2}$ $ y > 0.3 \text{ mm}$ で一定
	回転抵抗力	R_w	Nmm/rad	6.0×10 ⁷

犬くぎのふく進抵抗力は、ふく進抵抗試験⁹⁾に則り、レール締結装置1組を組み立てた状態でレールをレール長手方向へ載荷し、レールが滑り出すまでの荷重と変位の関係を取得することで求めた。さらに、両レール締結装置の回転抵抗力は、レール締結装置1組を組み立てた状態で、締結ばねを軸としてレールを左右反対方向に水平載荷し、モーメントと回転角の関係をj取得することで求めた。



図-4 レール締結装置の抵抗力の測定状況（線ばね）

表-4 道床横抵抗力和道床縦抵抗力の解析諸元

項目		記号	単位	値
安定剤散布区間	PCまくらぎ	横	h_1	N $h_1 = k/2 \times x/(x-a_0)$ $k=1.0 \times 10^3 N, a_0=1.0mm$
		縦	g_1	N $g_1 = g_2$
	木まくらぎ	横	h_{1w}	N $h_{1w} = k_w/2 \times x/(x-a_0)$ $k_w=1.0 \times 10^3 N, a_0=1.0mm$
		縦	g_{1w}	N $g_{1w} = g_{2w}$
一般区間	PCまくらぎ	横	h_2	N $h_2 = k/2 \times x/(x-a_0)$ $k=5.5 \times 10^3 N$ (標準) $k=4.0 \times 10^3 N$ (最小) $k=6.0 \times 10^3 N$ (最大) $a_0=1.0mm$
		縦	g_2	N $g_2 = 2 \times h_2$
	木まくらぎ	横	h_{2w}	N $h_{2w} = k_w/2 \times x/(x-a_0)$ $k_w=2.7 \times 10^3 N$ (標準) $k_w=2.43 \times 10^3 N$ (0.9倍) $k_w=2.16 \times 10^3 N$ (0.8倍) $a_0=1.0mm$
		縦	g_{2w}	N $g_{2w} = 2 \times h_{2w}$
浮きまくらぎ区間	PCまくらぎ	横	h_3	N $h_3 = 2/3 \times h_2$
		縦	g_3	N $g_3 = 2 \times h_3$
	木まくらぎ	横	h_{3w}	N $h_{3w} = h_{2w}$
		縦	g_{3w}	N $g_{3w} = 2 \times h_{3w}$

※上記はすべてばね1本あたりの値



図-5 道床横抵抗力の測定状況

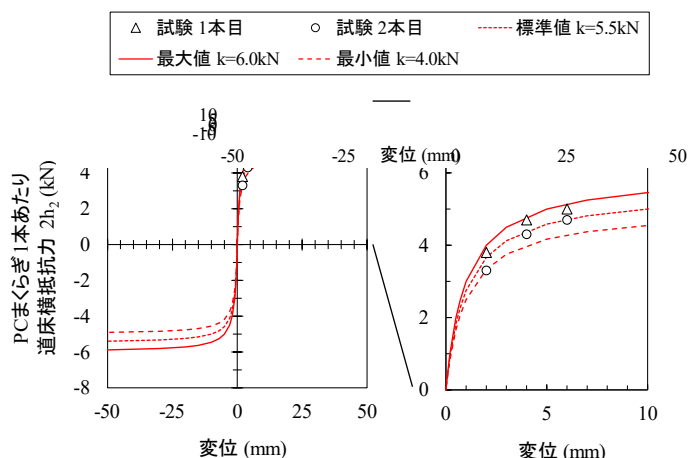


図-6 一般区間の道床横抵抗力

c) 道床横抵抗力和道床縦抵抗力

解析に用いた道床横抵抗力和道床縦抵抗力のパラメータを表-4に示す。

安定剤散布区間の道床横抵抗力については、PCまくらぎ、木まくらぎともに一般区間と比較して大きな剛性があるため不動点と考え、十分な剛性を有するものとした。当該区間の道床縦抵抗力は、PCまくらぎ、木まくらぎともに一般区間の道床縦抵抗力と同じ値とした。

一般区間のPCまくらぎの道床横抵抗力は、図-5に示すように実物大試験軌道のPCまくらぎ1本をレール直角方向に引き抜く試験を2本分行い、荷重と変位の関係から算定した。図-6にPCまくらぎの引き抜き試験結果と解析に用いた道床横抵抗力を示す。ここでは、試験結果の平均を通る場合を標準値とし、これに加えて最小値と最大値を通る場合を設定した。道床横抵抗力の近似式は、

過去の研究⁷⁾で提案された式を用いた。

一般区間の木まくらぎの道床横抵抗力は、湿潤状態で締固めを行った木まくらぎの引き抜き試験結果が2.7kN/本であったことを踏まえ、これを前述の式で近似したものを標準値とした。一般区間と浮きまくらぎ区間では、犬くぎを使用していないものの、アンチクリーパにより木まくらぎとレールが締結されている。このため、実物大軌道座屈試験時には、レールの変位に伴いアンチクリーパが木まくらぎに食い込み、木まくらぎの移動が見られた。このため、本解析では木まくらぎの道床横抵抗力を考慮することとし、座屈試験で軌道中央の木まくらぎ8本のうち7本に顕著な移動が見られたことから、前述の引き抜き試験結果2.7kN/本を標準値としたうえで、これの0.9倍と0.8倍を仮定したケースを設け、座屈強度に与

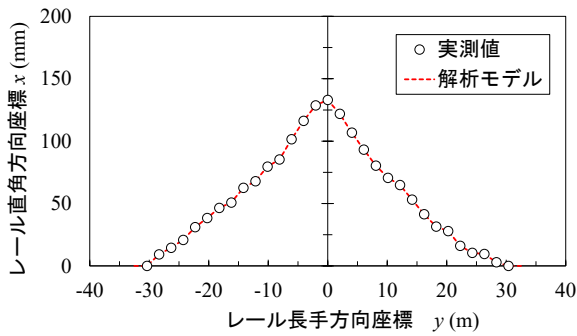


図-7 初期通り変位の設定

える影響を検討することとした。一般区間の道床縦抵抗力は、PCまくらぎ、木まくらぎともに、一般区間の道床横抵抗力の2倍とした。なお、実物大軌道座屈試験におけるレールの初期通り変位は、レールベンダによる曲げ加工により与えているため、本解析では、レールの初期通り変位に伴う道床横抵抗力と道床縦抵抗力の変化は考慮していない。

浮きまくらぎ区間のPCまくらぎの道床横抵抗力は、過去の文献⁹⁾を参考とし、まくらぎ底面がまくらぎの移動に対して抵抗しないものとし、一般区間のPCまくらぎの道床横抵抗力の2/3倍とした。なお、浮きまくらぎは、実物大軌道座屈試験においてPCまくらぎのみに設定しているため、当該区間の木まくらぎの道床横抵抗力は、一般区間の木まくらぎの道床横抵抗力と同じ値とした。浮きまくらぎ区間の道床縦抵抗力は、PCまくらぎ、木まくらぎともに当該区間の道床横抵抗力の2倍とした。

d) レール端部の拘束条件

実物大軌道座屈試験におけるレールの両端部は、レールが伸びる方向に対してはコンクリートの反力壁で拘束され、縮む方向に対しては拘束しない条件である。本条件を解析で模擬するため、レール両端部に設けた1節点ばねのばね特性は、レールが伸びる方向に対しては十分な剛性 ($1.0 \times 10^{10} \text{N/mm}$) を有し、縮む方向に対しては拘束しない設定とした。

e) 初期通り変位

解析モデルに与えたレールの初期通り変位は、図-7に示すように、実物大軌道座屈試験の直前に実測した値に基づき設定した。なお、座屈試験では直線軌道を想定したものの、施工精度の影響を受けるため、図-7に示す線形であった。軌道中央の初期通り変位量は、10m弦正矢量で29mm程度であった。

3. 再現解析結果とパラメータが及ぼす影響

(1) 再現解析結果

前章に示す解析ツールと解析モデルを用いて、FEM解析を実施した。表-5に解析条件を、表-6に解析ケースを

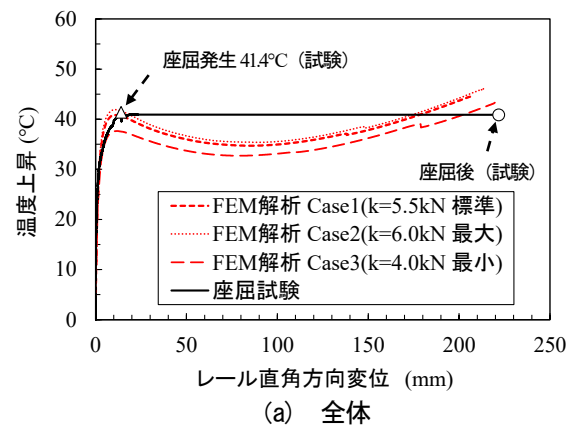
表-5 解析条件

項目	内容
荷重増分	荷重増分幅 $1.0^\circ\text{C} \times 11$ 回 (弧長増分前)
弧長増分	弧長増分幅 0.1 制御節点 レール中央節点の x 方向変位
収束までの反復回数	最大 200 回 (収束不可の場合は解析終了)

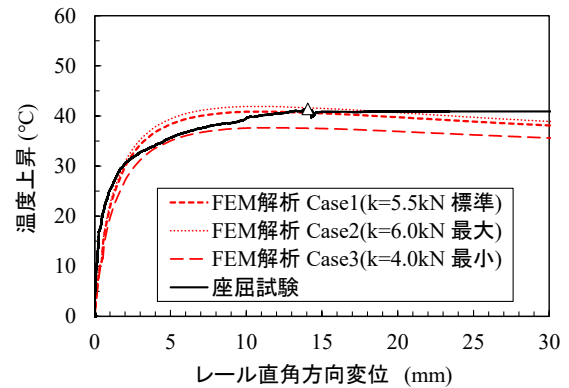
表-6 解析ケース

項目	一般区間のPCまくらぎ 道床横抵抗力	一般区間の木まくらぎ 道床横抵抗力
Case1	$k=5.5 \text{ kN}$ (標準)	$k_w=2.7 \text{ kN}$ (標準)
Case2	$k=6.0 \text{ kN}$ (最大)	
Case3	$k=4.0 \text{ kN}$ (最小)	
Case4	$k=5.5 \text{ kN}$ (標準)	$k_w=2.43 \text{ kN}$ (0.9 倍)
Case5		$k_w=2.16 \text{ kN}$ (0.8 倍)

※上記以外のパラメータは表-2~4の値



(a) 全体



(b) 座屈点近傍

図-8 温度上昇とレール中央のレール直角方向変位 (PCまくらぎの道床横抵抗力 $k=4.0 \text{ kN}$, 5.5 kN , 6.0 kN)

示す。解析ケースは、PCまくらぎと木まくらぎの道床横抵抗力を変化させたケースを設定した。

図-8と図-9にCase1~Case5のFEM解析と実物大軌道座屈試験における温度上昇とレール中央のレール直角方向 (x 軸方向) 変位の関係を示す。

PCまくらぎと木まくらぎの道床横抵抗力を標準的な値としたCase1の座屈発生時の温度上昇量 (以下、「座屈温度 Δt 」という) は 40.8°C であり、座屈試験の座屈温度 41.4°C と同程度であった。また、Case1における座屈前

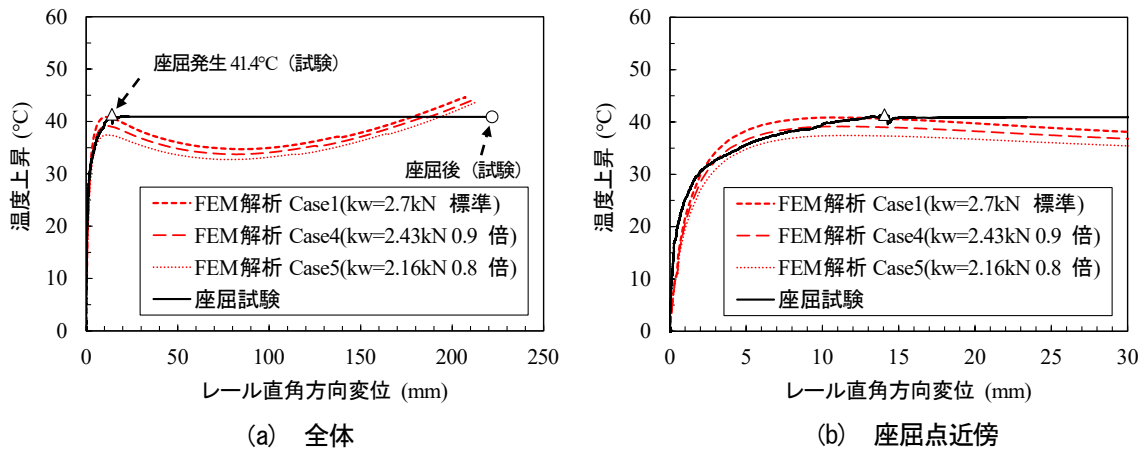


図-9 温度上昇とレール中央のレール直角方向変位
(木まくらぎの道床横抵抗力 $k_w=2.16\text{kN}$, 2.43kN , 2.7kN)

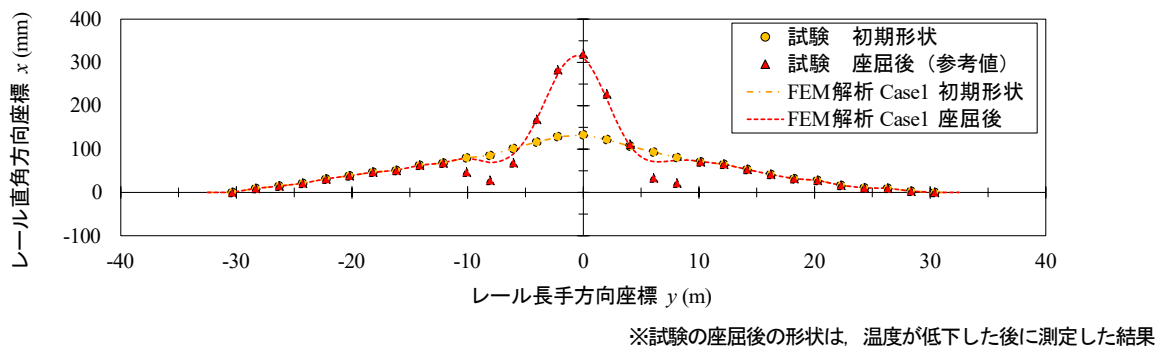


図-10 座屈後のレールの直角方向位置

の最大温度時のレール直角方向変位は10.4mmであり、座屈試験における13.9mmの0.7倍程度であった。Case1の座屈後のレール直角方向変位は178mmであり、座屈試験における222mmの0.8倍程度であった。

PCまくらぎの道床横抵抗力をまくらぎの引き抜き試験結果の最大値と最小値としたCase2とCase3の座屈温度 Δt は、41.9℃と37.6℃であり、座屈試験結果の0.91倍～1.01倍であった。

木まくらぎの道床横抵抗力を標準値の0.9倍と0.8倍したCase4とCase5の座屈温度 Δt は、39.1℃と37.4℃であり、座屈試験結果の0.90倍～0.94倍であった。

図-10にCase1の座屈後におけるレールの直角方向の位置を示す。本測定結果は、座屈直後から時間が経過し、レール温度が下がった状態で測定した参考値である。図-10より、FEM解析における座屈波形は、レール中央でレール直角方向変位が最大となり、その前後で反対方向の波形が現れる形状となっており、座屈試験の結果と同様の傾向を示している。

(2) パラメータが解析結果に与える影響

前節では、PCまくらぎと木まくらぎの道床横抵抗力を変化させたケースを設定し、座屈試験結果と比較した。本節では、道床横抵抗力以外のパラメータがFEM解析結

果に与える影響について検討した。ここでは、表-2～表-4に示した値を標準値とし、パラメータ毎に値を変更してFEM解析を行い、解析結果を標準値の場合と比較した。なお、道床横抵抗力はCase1の値を用いた。また、あるパラメータの値を変更する際に、その他のパラメータはすべて標準値とした。解析条件は表-5に示したものと同じである。なお、初期通り変位については座屈試験の実測値とし、初期通り変位が座屈温度 Δt に及ぼす影響については検討の対象外としている。

a) レール締結装置

PCまくらぎ用レール締結装置（線ばね）と木まくらぎ用レール締結装置（犬くぎ）の横抵抗力、ふく進抵抗力および回転抵抗力を標準値（ H , τ , R , H_w , τ_w , R_w ）の2倍にした場合と0.5倍にした場合の座屈温度 Δt を計算した。図-11と図-12に解析結果を示す。図中には、解析結果を直線回帰した式と線を併記している。

図-11と図-12より、横抵抗力とふく進抵抗力を標準値の0.5倍～2倍の範囲で変化させた場合の座屈温度 Δt は、40.8～40.9℃であり、有意な変化はみられない。

図-11(c)と図-12(c)より、回転抵抗力を変化させた場合の座屈温度 Δt の変化率は、線ばねで0.013℃/(kNm/rad)、犬くぎで0.026℃/(kNm/rad)であった。ここで、両レール締結装置の回転抵抗力の測定結果を図-13に示す。解析

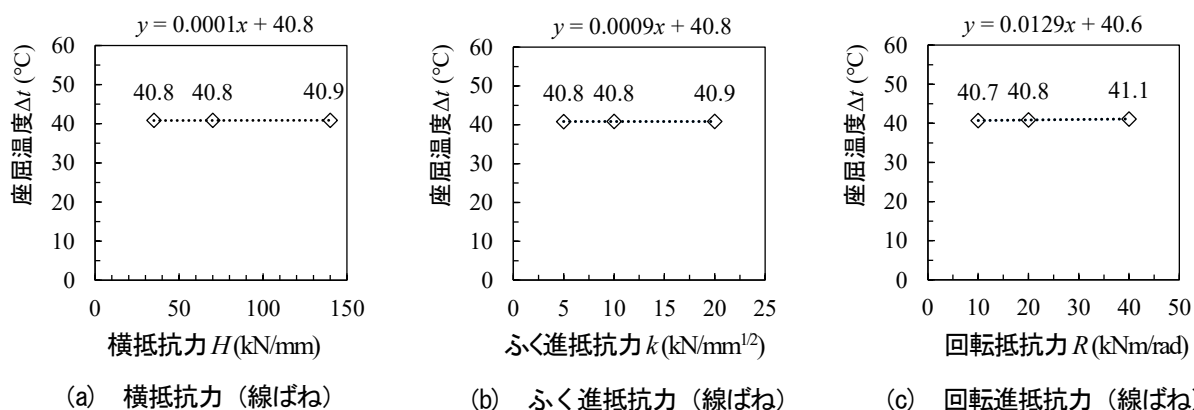


図-11 PC まくらぎ用レール締結装置(線ばね)の特性を変化させた場合の座屈発生温度の変化

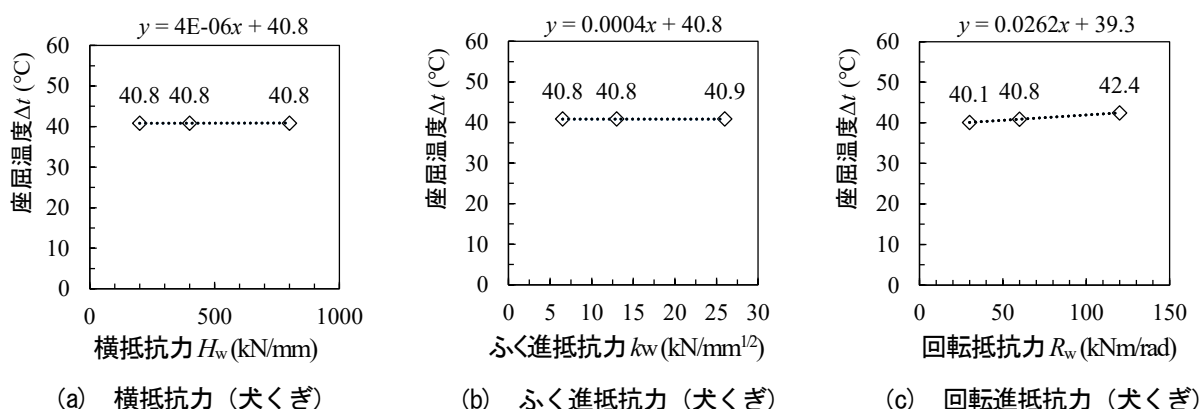


図-12 木まくらぎ用レール締結装置(犬くぎ)の特性を変化させた場合の座屈温度 ΔT の変化

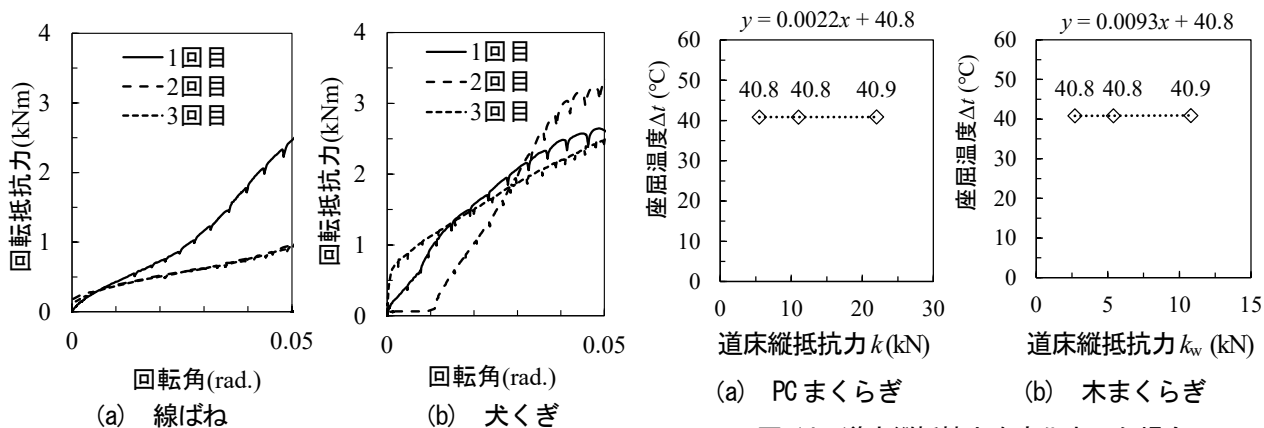


図-13 回転抵抗力の測定結果

図-14 道床縦抵抗力を変化させた場合の座屈温度 ΔT の変化

における座屈時の最大回転角は0.05rad程度であり、この範囲における回転抵抗力の測定結果の最大値と最小値の差は、図-13より、線ばねで25kNm/rad程度（25～50kNm/radの範囲）であり、上記の変化率より、この範囲における座屈温度 ΔT の差は0.3℃となる。同様に、犬くぎにおいて、回転抵抗力の測定結果の最大値と最小値の差は15kNm/rad程度（50～65kNm/radの範囲）であり、この範囲における座屈温度 ΔT の差は0.4℃となり、いずれも座屈温度 ΔT の1%程度である。

以上より、レール締結装置のパラメータの設定が座屈

温度 ΔT の解析結果に与える影響は小さいことがわかる。

b) 道床縦抵抗力

全区間のPCまくらぎと木まくらぎの道床縦抵抗力を標準値 ($g_{1\sim3}$, $g_{w1\sim3}$) の2倍にした場合と0.5倍にした場合の座屈温度 ΔT を計算した。

図-14に解析結果を示す。PCまくらぎと木まくらぎの道床縦抵抗力を標準値の0.5倍～2倍で変化させた場合の座屈温度 ΔT は、40.8～40.9℃であり、有意な変化は見られない。このため、道床縦抵抗力の設定が座屈温度 ΔT の解析結果に与える影響は小さいことがわかる。

(3) 解析結果のまとめ

3章1節の結果より、想定される道床横抵抗力の範囲において、本解析ツールは、座屈試験の座屈温度 Δt を高い精度で再現することを確認した。このため、本解析ツールは、座屈に対する軌道の強度を評価するうえで有効なツールであると考えられる。ただし、解析結果は、座屈直後のレール直角方向変位について、試験結果との間に差が見られた。両者の差は、まくらぎが数十～数百mm変位した際の道床横抵抗力の設定値に起因する可能性が挙げられるものの、その影響に関する検討は不十分である。また、アンチクリーパでレールに締結された木まくらぎの道床横抵抗力は、通常の木まくらぎの抵抗力の0.8倍～1.0倍と仮定したものの、座屈試験で木まくらぎが移動した結果から推定したものであり、十分な論拠は示せず、これらについては今後の検討課題としたい。

3章2節の結果より、本再現解析において、レール締結装置の横抵抗力、ふく進抵抗力、回転抵抗力および道床縦抵抗力が座屈温度 Δt に及ぼす影響は小さいことを確認した。このため、FEM解析結果と試験結果との差は、概ね道床横抵抗力の設定値に起因している。

4. まとめ

本研究では、開発したFEM解析ツールの妥当性を検証するため、実物大軌道座屈試験の再現解析を行い、解析結果と試験結果を比較するとともに、各パラメータが解析結果に及ぼす影響を検証した。結果は以下の通りである。

- (1) レール締結装置の横抵抗力、ふく進抵抗力、回転抵抗力および道床横抵抗力を試験で把握した結果に基づき、座屈試験の再現解析に用いる標準的なパラメータを決定した。
- (2) 開発したFEM解析ツールは、想定される道床横抵抗力の範囲において、座屈試験の座屈発生時

の温度上昇量を高い精度で再現しており、座屈に対する軌道の強度を把握するうえで有効なツールであることを確認した。

- (3) 本再現解析において、レール締結装置の横抵抗力、ふく進抵抗力、回転抵抗力および道床縦抵抗力が座屈発生時の温度上昇量に及ぼす影響は小さく、FEM解析結果と試験結果との差は、概ね道床横抵抗力の設定値に起因することを確認した。

本研究は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

参考文献

- 1) 西宮裕騎, 片岡宏夫, 杉野満: 低廉な軌道部材を用いたロングレール化に関する基礎的検討, 第23回鉄道技術連合シンポジウム, 2016.
- 2) 村本勝己: 軌道を診る, RRR, Vol.76, No.2, pp.4-7, 2019.
- 3) 浅沼潔, 富田耕司, 曾我部正道: 弾塑性有限変位解析によるバラスト軌道の座屈温度特性値に関する検討, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.68, No.1, pp.78-91, 2012.
- 4) 本村裕基, 西宮裕騎, 片岡宏夫: 低廉なロングレール軌道構造におけるふく進抵抗力について, 第25回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2018), 2018.
- 5) 佐藤裕: 横圧に対する軌道強度の研究, 日本国有鉄道 鉄道技術研究所, 鉄道技術研究報告, No.110, 1960.
- 6) 玉川新悟, 杉野満, 片岡宏夫: レール締結装置のふく進抵抗試験法の適正化, 第20回鉄工学シンポジウム論文集, pp.17-23, 2016.
- 7) 宮井徹, 飯田啓善, 細川岳洋, 浜崎郷広: 営業線における道床横抵抗力試験, 日本国有鉄道 鉄道技術研究所, 鉄道技術研究所速報, No.82, 1982.
- 8) 佐藤吉彦, 梅原利之: 線路工学, 日本鉄道施設協会, 1987.

(2019.4.5 受付)

FEM SIMULATION OF BUCKLING TEST OF FULL SIZE TRACK

Shingo TAMAGAWA and Yuki NISHINOMIYA

In recent years, authors have been developing the low cost structures of continuous welded rail (CWR) for regional railways. In the process, the buckling test of full size track was performed and FEM program was developed for the estimation of a buckling strength of the CWR.

In this paper, the buckling test of full size track was simulated by the FEM program in order to verify its validity. As a result, the buckling temperature obtained by the program was in good agreement with that obtained by the buckling test. It was clarified that the FEM program can be an appropriate tool for estimating the buckling strength of the CWR. In addition, it was appeared that the difference between the FEM results and the test results was caused by the setting of the lateral resistance of the ballast, and parameters other than the lateral resistance have small influence on the buckling temperature.