

# 新しい継ぎ目構造の研究

小山内 政廣

正会員 工学 東日本旅客鉄道株式会社 (〒151-8575 東京都渋谷区代々木2丁目2番2号)

この研究レポートは、いままでの継ぎ目構造の力学的理論等を取り入れて、新工法を研究・開発し、その構造概要及び試験成果等を記述している。多種試験・試行を行なった結果、ほぼ全工法で現行の普通継ぎ目より、保守の軽減が期待されることを確認した。また、その中でも経費・保守面で最も優位な「道床ゴムチップ混合法」を再調査することとした。その調査内容は、ゴムチップの形状とバラストに対する配合割合等の最適化を把握するための室内試験と軌道狂い進みや各振動試験などを営業線内で行った。その結果も良好な結果が得られ、現在では他 JR 社や各私鉄でも「道床ゴムチップ混合法」が本格的に実施されている。

*Key Words* : rail joint, erasticity ballasted track (in tire tips), analysis of maintenance cost

## 1. はじめに

定尺レールの継ぎ目構造は、線路保守の弱点箇所の代表である。線路の破壊はこの継ぎ目から始まると言っても過言ではない。特に、継ぎ目構造が中心の下級線区（ローカル線）において、今後の保守等を考えた場合、重要な課題と言わざるを得ない。因みに、JR 東日本の範囲で見ると、全軌道延長 1000km のうち約 4000km が下級線の継ぎ目区間である。

普通継ぎ目を有する軌道とロングレール構造を比較すると、その狂い進み（図 - 1）は、 $1/2 \sim 1/3$  の破壊量になることが確認されている。

また、杉山氏<sup>1)</sup>の研究でも、通過回数・平均速度・構造係数・継ぎ目の有無そして路盤状態等を考慮した軌道狂い進みの理論式が発表されており、その理論試算でも、その差は約  $1/3$  程度であることが分かっている。その他、継ぎ目部においては保守量の増加、列車動揺から起因する乗り心地の悪化、鉄道沿線に対する騒音及び振動の誘発など、多数の課題を抱えている。また、規制緩和の一環としての「運輸技術審議会」の答申で、今後の鉄道特性の方向性、また線路保守のあり方について提言されている。その中で、「ローカル線の保守」については、運輸省・JR 総研・民鉄関係者（筆者も含む）が中心となって「閑散線区軌道保守検討会」を設置し検討を重ねてきた。この検討会でも、各鉄道事業者から「継ぎ目部の強化」、「軌道構造そのものの強化」、「保守周期の延伸」、「作業の機械化」などに対

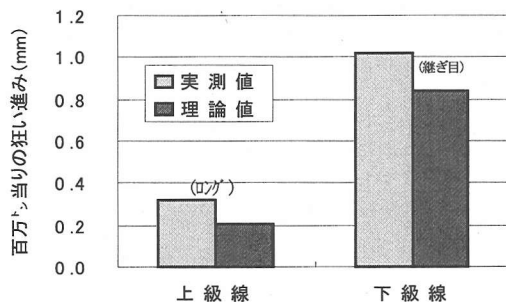


図 - 1 各線級別による軌道狂い進み

する要望、意見が圧倒的に多いものとなっている。

本研究では、これらの状況を踏まえ、この継ぎ目構造を低廉でかつ構造強化を図り、保守量の低減、乗り心地の改善を目指し、各種継ぎ目構造を試験・試行しその論理の構築について検討することとした。以下にその研究概要と最適継ぎ目構造、線区の適用条件、保守の経済性について紹介することとする。

## 2. 現状の継ぎ目構造

一般の継ぎ目構造は、継ぎ目板、継ぎ目ボルトでレー

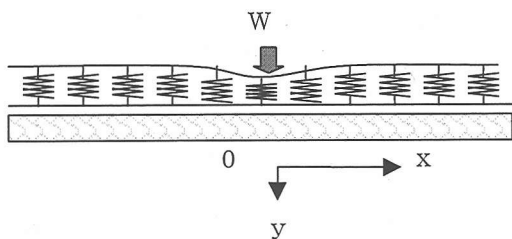


図-2 連続弾性支持モデル

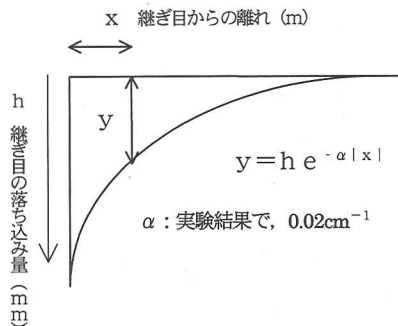


図-3 レール継ぎ目落ちの形状

ル端部が締結されており、レール下は軌道パッド、タイプレート、マクラギ、道床の構成となっている。夏期における軌道の座屈現象を生じさせないために、遊間（レールの伸縮に対応するための隙間）を設定している。継ぎ目は、その剛性(Ix)、レールの段違い、さらには、過大な遊間が継ぎ目落ち等を誘発し、結果として軌道破壊に直結する列車荷重を2倍、3倍にさせていることにある。これまでも、一部の研究で同様のことが指摘されている。

### (1) 継ぎ目部の軌道破壊理論

継ぎ目の変形（バッターからの軌道破壊）は、中間部の約4倍近い沈下が発生するとされている。それは、継ぎ目板そのものの剛性(Ix)が、レール本体に比較して1/3~1/4となっているからであり、同一の構造であれば、中間部軌道部分より大きい沈下が生じるのが当然の結果である。

また沈下（軌道の変位）<sup>2)</sup>は、一般には以下に示す「連続弾性支持モデル」（図-2）で示され、継ぎ目中心に2から3mの範囲にまで影響を及ぼし、保守状態が良好でない箇所、静止輪重50kNの列車が50km/h以下の走行時で輪重が60~70kNに、それ以上の高速走行時では、10MN~15MNに輪重が変化することも確認されている。

さらに遊間の影響で、角折れが発生し、その衝撃でレールに塑性変形が発生（レールバッター）する<sup>3)</sup>。その形状は、一般に $y = h e^{-\alpha |x|}$ （図-3）のモデ

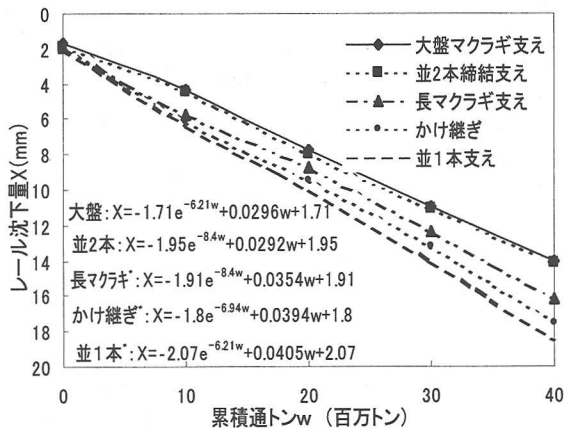


図-4 マクラギ敷設方式によるレール沈下の差異



図-5 新しい継ぎ目構造の考え方

ルで表わされるのが一般的とされている。

### (2) 現行継ぎ目部の構造

現状においても前述のような変形を緩和するために、継ぎ目部の構造は①大判マクラギの使用、②丁繫ぎのマクラギの使用、さらに③継ぎ目を支えるマクラギ配置位置を縮小することによって継ぎ目部強化法が採られている。継ぎ目直下を支える「支え継ぎ」と、継ぎ目板の中央部となるレール端部を避けて、継ぎ目板の両端付近をマクラギで支える「かけ継ぎ」の2方法があり、レール沈下量が小さい「支え継ぎ」工法が主流となっている<sup>4), 5)</sup>（図-4）。しかし、結果的には中間部と比較した場合、継ぎ目軌道の保守上の隘路であることには、変わらないのが実態である。

## 3. 新しい継ぎ目構造へのアプローチ

これまでの研究をもとに、本研究では、2つの視点から「新しい継ぎ目構造」<sup>6)</sup>にアプローチすることと

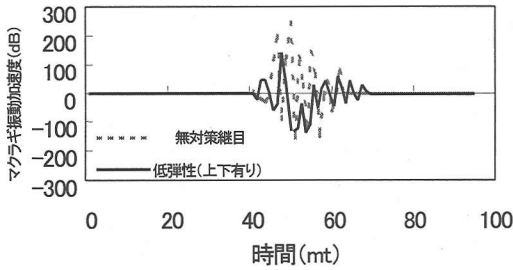


図 - 6 低弾性パッドの有無比較

した。その概要は、継目部を構成している材料及び構造配置等の変更をメインに改良することとした。

改良には軌道狂いに関係する列車荷重を「分散する方法」と「緩衝する方法」の大きく2つに区分して検討(図 - 5)することとし、具体的には16工法を試行することとした。これらの中で、保守性、経済性が優位なものについて、材料の物理試験、また理論的な証明も含めて検討して行うこととした。

ここでは、試行した16種類のうち代表的な例について、その「構造の概略」、「構造仕様」、「経費」を紹介する。

#### 4. 代表的な継目対策工法の紹介

##### (1) 列車荷重の緩衝型

###### a) 低弾性パッド工法 (タイプレートパッドを含む。)

低弾性パッドは、現在使用している軌道パッドのバネ定数  $90\text{MN/m}$  から  $30\sim 50\text{MN/m}$  に変更することで、列車の衝撃荷重を緩衝することを目的とした工法<sup>7)</sup>である。ただ、無闇にパッドのバネ定数を下げても変位が大きく、しかもレールの左右変位(レールが横に傾く、小返り現象が発生)が生じるばかりでなく、パッドの疲労、劣化が進むことになる。試験の結果、 $30\sim 50\text{MN/m}$  のバネが最も有効であった。この適用は、調査の結果から継ぎ目落ちの少なく、しかもバッターの小さい箇所 ( $0.5\text{mm}/30\text{cm}$  以下程度) が望ましい。(図 - 6)

また、低弾性パッド使用にあたっては、レールのアップリフト率が大きくなるため、締結装置もバネ強度の大きいものに交換することが必要である。

さらに、タイプレート下パッドを併用する場合は、バネ定数が  $20\sim 30\text{MN/m}$  タイプを挿入することが望ましい。

###### 仕様の概略

- ・レール下に低弾性パッド ( $30\sim 50\text{MN/m}$ )

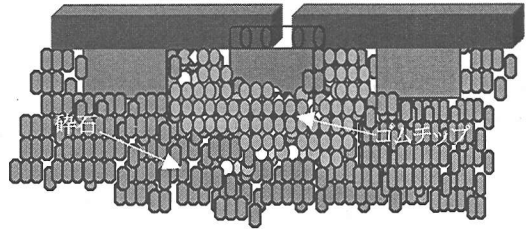


図 - 7 道床ゴムチップ混合工法

挿入を挿入する。

- ・タイプレート下低弾性パッド (バネ定数  $20\sim 30\text{MN/m}$ ) を挿入する。
- ・必要により、継ぎ目削正 ( $0.2\text{mm}/30\text{cm}$  のものはそのまま) をする。
- ・MTT 又は TT で軌道整備を行う。(継ぎ目前後  $3\text{m}$ )
- ・施工経費は、 $21.4$  千円/継目1箇所である。

##### (2) 列車荷重の分散型

###### a) 道床ゴムチップ混合工法

この工法は、継ぎ目部に廃棄されたゴムタイヤのチップを散布し、それをマルチプルタイタンパ (MTT) 又はタイタンパ (TT) によりマクラギ下面につき込む方法である。これにより、かなり土砂混入率の高いバラストも固結することなく弾性を維持し、軌道の塑性変形変位を復元するのに威力を発揮することになる。(図 - 7)

###### 仕様の概略

- ・ゴムチップは、粒径  $20\sim 50\text{mm}$  ( $40\text{kg}$ /箇所) の範囲とし、標準的には粒径  $40\text{mm}$  程度のものを道床全体積に対して  $50\%$  以上を標準に混合する。なお、実用に当たっては、当該箇所のバラスト状態により、ユーザーが混合割合を変えて、その現場に適した、最適なものを選択することとした。
- ・安定剤土砂混入率  $30\%$  以上で道床の悪い場合は、抵抗力維持のため、道床肩部に安定剤散布する。(バラストを固定させる樹脂材)
- ・道床整備は、これまでの施工試験から、つき固め用大型機械である MTT の使用を原則とする。
- ・施工経費は、 $13$  千円/継目1箇所である。

###### b) 接続マクラギ

接続マクラギは、継ぎ目の荷重分散を図る構造で、割合簡単に行うことができる方法である。現行敷設されている隣接の並マクラギ同士、又新規挿入分の並マクラギと既設マクラギとを縫いボルトで一体化する。この場合、マクラギ間隔は現行のままを原則とする。レール及び支持面積が増えることによる荷重分散も図れることになる。

## 仕様の概略

- ・並マクラギ2本をボルトで連結、挿入する。
- ・現行の硬いパッド (90MN/m) から低弾性パッド (30~50MN/m) に交換する。
- ・MTT 又は TT で軌道整備を行う。
- ・施工経費は、18.8 千円/継目1箇所である。

### c) 長マクラギ工法

新幹線用の分岐マクラギ (15cm×24 cm ×270 cm) を継ぎ目部の3本挿入し、列車荷重の分散を目的とした構造である。この場合、マクラギ長さが違うため、施行箇所の道床断面の増加が必要である。マクラギ振動を測定した結果でも、通常の継ぎ目部と比べ約1/2程度減衰しており、構造強度の増加は明白である。

## 仕様の概要

- ・継ぎ目前後に長マクラギ (15cm×24 cm ×270 cm) を挿入する。
- ・前後に取り付け緩衝パッドを挿入する。
- ・MTT 又は TT で軌道整備を行う。
- ・施工経費は、81 千円/継目1箇所である。

## 5. 各種継ぎ目対策の試行結果

前述の各種継目構造について、筆者が保守責任者として勤務した、仙台支社管内を中心において試行を行った。

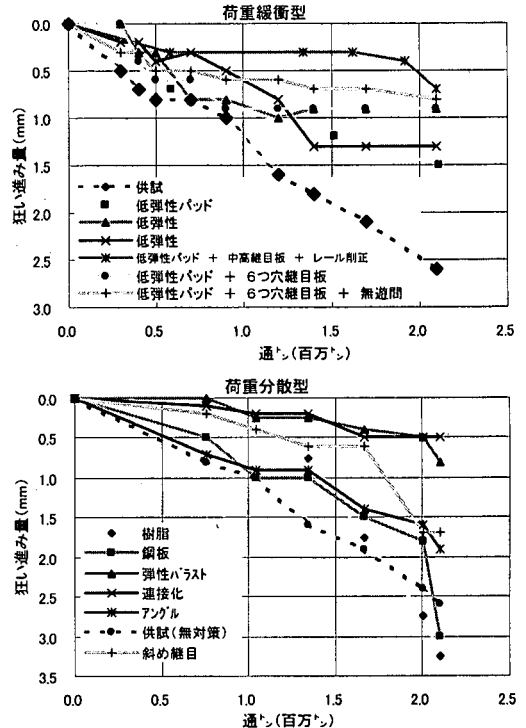
調査は、保守周期を見極めるために、月1回の定期的な軌道狂い調査等を約2年半にわたり行ってきた。その結果は、以下のとおりである。

### (1) 軌道狂い進み比較

ここで試験線区 (仙山・仙石・奥羽線) での各工法の軌道狂い進み<sup>8)</sup> (10m 弦正矢による狂いの変化量) を、初期沈下 (道床つき固め直後に起きる現象) が収束したと思われる時点から約200万ト程度経過した時点でのデータをプロットし比較することとした。(図-8)

これを見ても、「列車荷重分散型」で「無対策継ぎ目」と比較して、約通過回数200万トの断面で、ほぼ全体的に狂い進み抑制効果があることが確認できた。また、「列車荷重緩衝型」では、ほぼ安定した狂い進みで推移することも分かり、これも無対策継ぎ目に比べ、1/3~1/5倍程度、狂い進みが低減することも分かった。

また継目板中央部を2~4mm程度、強制的に加工した「中高継ぎ目板」の試行も行った。この継ぎ目板工法は、レール端部を平滑に衝撃を和らげる効果を期待したものである。その中でも「低弾性パッド+中



※ ここでの通トンは列車の繰返し荷重を言う

図-8 各対策工の軌道狂い進み

高継ぎ目」及び「低弾性パッド+中高継ぎ目+レール削正 (継ぎ目端部のレールバッター除去を目的とした工法)」の組み合わせ工法などは、狂い値そのものが1mm以内に抑えられており、かなり良好な結果が得られた。

しかし、全対策工の中で「マクラギ下鋼板埋め込み工法」と「樹脂材混入バラスト固結工法」の2工法は、道床を大幅に掘削・改良、また道床の落ち着きに問題があり、部分的効果はあったが、最終的には「無対策継ぎ目」よりも狂い進みが大きくなることが確認できた。

### (2) 保守経費比較

狂い進みの分析結果から、ローカル線 (JR 東日本の場合) の保守周期延伸効果を推定し、これに基づいて保守経費を試算することとした。継ぎ目1箇所当たり (軌道延長5mとした) の保守経費の試算は、以下のとおりに試算することとした。

● 通常の継ぎ目: 道床つき固め用のマルタイ経費+その他保守費 (マルタイ以外の保守費全て)

● 継ぎ目対策実施箇所:

[継ぎ目対策に要する経費] + [マルタイ等の経費×影響度合 (直接影響) ×保守周期延伸倍率] + [継ぎ目対策に影響する経費 (間接影響) ×影響度合×作業量減少率]

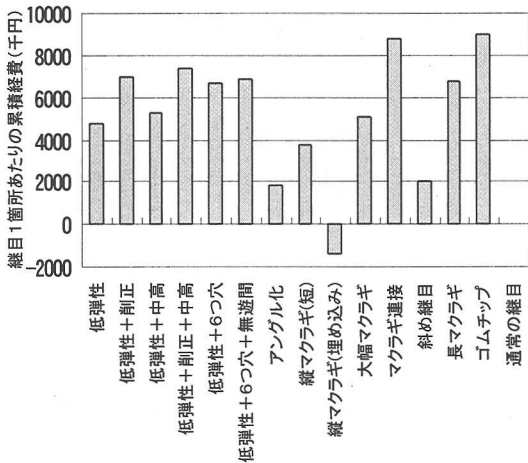


図-9 10年間の累積保守費削減効果の比較

+ [その他継目に影響しない保守費]  
 ここで用いた用語の示す定義は、以下の通りである。

「1km 当たりの基準費」

: MTT を除いた継目対策に有効な工種に対する基準費をいう。(道床交換・総つき固めなど)

「直接影響」

: MTT・TT 施工および道床交換など、継目保守に直接影響する工事費。

「間接影響」

: レール交換・遊間調整・締結装置補修など、継目の構造強度で、変化する工事費。

「影響度合い」

: 直接および間接影響を考慮して、定量的に示した割合値。今回、直接影響は100%、間接影響では無対策継目箇所の実績から、20~30%を計上することとした。

「保守周期延伸倍率」

: 通常の継目を1とした場合の割合値。

又、経費の試算にあたっては、これまでの実績から、年間の経費は、3%づつ上昇すると仮定した。この計算式より、10年後の累積保守経費比較すると、継マクラギ(埋め込み式)を除いて、すべての継目対策工でコストダウンとなっていることが確認できた。

(図-9)

### (3) 各種継目対策の適用

前述の試験並びにコスト分析の結果、「ゴムチップ」、「マクラギ連接」、「低弾性パッド+レール削正」、「低弾性パッド+中高継目+レール削正」の順位でコスト改修年が短いことが分かった。また試算から、これら

表-1 営業線での適用区分

適用のパターン	現地の継目線路状態	
	レール状態	道床状態
Iタイプ ・ゴムチップ工法	○	○
IIタイプ ・ゴムチップ工法+レール削正	×	○
IIIタイプ ・マクラギ連接	○	×
IVタイプ ・低弾性パッド+レール削正 ・マクラギ連接	×	×

の改修年は、3年未満であることも確認できた。その他の工法は、6~10年又はそれ以上であり、実用化には、さらに検討が必要であると判断した。

そこで、営業線での実用化に当っては、今回の分析結果と、さらに軌道状態の良否による影響度合を勘案し、表-1に示す各種継目構造の適用パターンを提案することとした。

軌道状態の良否判定は、これまでの試験結果を参考に、道床状態及びレール状態の2つより判断することとした。

道床状態が「○」印の状態とは、マクラギ下50mm以上の深さまで碎石がある状態の箇所を示し、「×」印はマクラギ下面まで土砂が混入している状態の箇所とした。一方、レール状態の「○」印は、バッテリー2mm未満の箇所を、「×」印はそれ以上の箇所とした。

## 6. 道床ゴムチップ混合工法の実証試験

経費・保守面で最も優位な「道床ゴムチップ混合工法」については、今後の本格施工を考慮して、その耐久性・保守作業への影響等を再調査し、解析することとした。

### (1) 室内試験での道床ゴムチップ混合バラスト敷設試験

#### a) 室内試験における沈下特性試験

バラストとゴムチップの沈下特性の優位性のある粒径及び混入割合等を確認するために、これらの材料的ファクター(3種類)を変え、第1次及び第2次の動的載荷試験を行った。(表-2)

#### 1) 試験内容

沈下特性試験は、表-3に示す試験条件で、列車通過トン数約70万トンに相当する動的載荷を繰り返す「第1次動的載荷試験」と、下級線区の1年間の累積

表 - 2 各ゴムチップの粒径

	50000#	200HN	100HN
ゴムチップの粒径	50mm~	20~30mm	10~20mm

表 - 3 試験条件

種別	試験順序	チップ混入率 (%)	みかけの比重 kg/m <sup>3</sup>	重量 (kg)	
				バラ	ゴム
無対策	1	0	1600	176	0
50000#	2	20	500	140	10
	3	40		105	21
200HN	4	20	480	141	10
	8, 9	30		123	15
	5	40		106	20
100HN	6	20	430	141	9
	7	40		106	18

※チップ混入率は、継目1箇所のバラストに対する体積比である。

列車通過トン数に相当する動的荷重を行い、沈下特性を確認する「第2次動的荷荷試験」を行った。

軌道力学的には、第1次の動的荷荷試験の確認は初期沈下推移を、第2次の動的荷荷試験は一般的な軌道狂い進みに相当する試験である。

## 2) 試験方法

表 - 2に示す試験ケースを用い、営業線試験で想定される諸条件の1.5倍以上の荷重を満足させるため、木製の重錘(14kg)で試験槽下面から50cmの高さから50回落下させた後、荷荷を行った。

荷荷条件は荷重振幅7kN±5kN、加振周波数10Hz、sin波形とし、20時間の繰り返し荷荷を行い、沈下量の経時変化を測定した。

これは現地継ぎ目構造が、列車荷重で繰り返し荷重を道床が受けている状態と比較して、約1.8倍(0.002kN/cm<sup>2</sup>・0.0125kN/cm<sup>2</sup>)の試験条件である。これは、これまでの継ぎ目部保守投入実績を勘案したものである。

## 3) 動的荷荷試験結果

第1次及び2次の沈下量と荷荷試験の関係を以下に示す。ここでバラスト単体のみのケースでは、初期沈下量が約7.4mmで70万トン荷荷終了後の最終沈下量が11.1mm程度となった。これに対し、混入率が20%のケースでは約7.7~11.3mm程度となることが分かった。

「第1次試験」の結果で、良好なゴムチップの混入率が30%、大きさが200HNタイプが良好な結果を

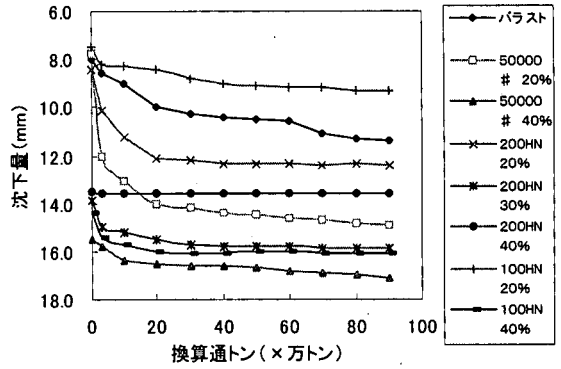


図 - 10 第1次動的荷荷試験結果

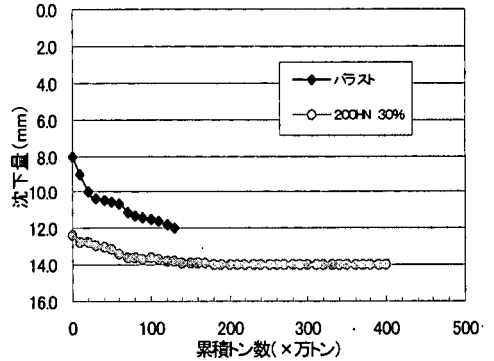


図 - 11 第2次動的荷荷試験結果

得られることが確認され、このタイプで第2次動的荷荷試験を実施した。その結果を図 - 11に示す。

この試験結果では、初期沈下量は12.4mm、60万トン荷荷時では、13.4mmとなり、400万トン荷荷終了後の最終沈下量は14mmとなった。

## 4) 考察

道床の沈下は、一般的に荷荷初期において急激な初期沈下が発生し、その後暫時直線的に進行して行く傾向にある。この関係は、これまでの研究で、一般的に次式<sup>4)</sup>で示される。

$$y = \gamma (1 - e^{-\alpha x}) + \beta x \quad (1)$$

(ここで、 $\gamma$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ は、係数を表わし、 $x$ は換算トン(荷重荷荷繰り返し回数)を表わす。)

この式で、第1項は道床粒間の間隙が密になり平均化される過程を表す。 $\gamma$ は初期の道床圧密の大きさを、 $\alpha$ は初期沈下収束の程度を表す係数、 $\beta$ は沈下進みを表わす係数である。通常、バラスト軌道が破壊されて行く過程を評価するのは $\beta$ であり、軌道保守量を決定する要素となる。ここでは相対的な比較を行うために、沈下勾配 $\beta$ に着目した。(表 - 4・表 - 5)

これらの結果をまとめると、以下のとおりとなる。

- ① 軌道の定常的な沈下勾配は、バラストのみのケ

表-4 第1次動的載荷試験における各供試体の沈下特性

種別	混入率 (%)	沈下勾配 $\beta \times 10^{-2}$ (mm/万トン)	初期沈下量: $\gamma$ (mm)	最終沈下 (mm)	勾配比
バラスト		1.41	7.43	10.57	1
50000#	20	1.33	11.29	14.59	1/1.1
	40	0.56	15.65	16.90	1/2.5
200HN	20	0.53	8.94	12.46	1/2.7
	30	0.47	14.59	15.80	1/3.0
	40	0.25	13.29	13.72	1/5.6
100HN	20	0.62	7.66	9.03	1/2.3
	40	0.36	15.36	15.89	1/3.9

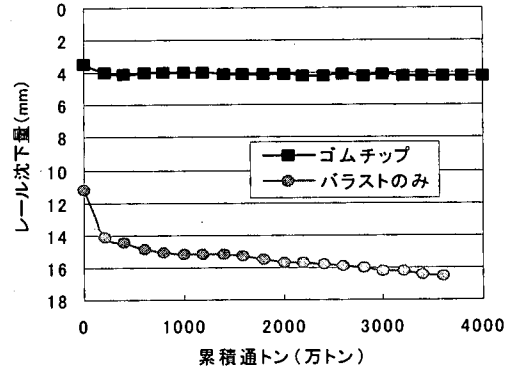


図-12 累積通トンとレール沈下量との関係

表-5 第2次動的載荷試験における各供試体の沈下特性

別	混入率 (%)	沈下勾配 $\beta \times 10^{-2}$ (mm/万トン)	初期沈下量: $\gamma$ (mm)	最終沈下 (mm)	勾配比	備考
バラト		1.41	7.43	10.57	1	20~60万トン
1次200HN	30	0.47	14.59	15.80	1/3.0	20~60万トン
2次200HN	30	0.51	12.39	13.41	1/2.8	20~60万トン
		0.05		13.96	1/28.2	20万トン以降

ースに比べ約1/1.1~1/5.6と小さい値を示しゴムチップの混入率が大きいほど軌道狂い進みに影響する領域において、沈下抑制効果があることが認められた。

- ② ゴムチップの粒径については、単純なボックスケースを用いて載荷試験を実施したところでは、200HN (20~30mm) が最も沈下勾配が小さい。
- ③ 実際の現場で施工可能なものの中で、良好な特性を示した200HNを30%混入したケースについて、累積通過トン数で約400万トン相当(3級線1年間当たりの通過トン数)の動的載荷試験を行った結果、沈下特性は安定することが確認された。

上記結果から、ゴムチップを道床バラストに混入し、かつ混入割合を変えることにより初期沈下もバラストのみとはほぼ同様で、軌道狂い進みに影響する沈下勾配( $\beta$ )が抑制されることが確認できた。

### b) ビプロジール試験

a) の試験により、ゴムチップ混入バラスト軌道の優越性が認められたが、さらに営業線と同種のモデル軌道を敷設し、再度ビプロジール(道床加振機)機で沈下特性を確認することとした。

#### 1) 試験内容

試験は、(財)JR総研内に試験軌道を敷設し、通過トン数4000万トンに相当する動的載荷を行い、試験前後の沈下特性やマクラギ支持ばね係数の測定を実施し

た。

### 2) 試験方法

試験軌道は、土路盤線区を想定して試験ピット内のコンクリート路盤上にバラストマット(A45タイプ)を設置した。軌道の構成については、道床厚250mmとし、60kgレール、3号PCマクラギ、5形改締結装置(軌道パッドばね定数110MN/m)を使用した。この試験の道床バラスト内には、全体積比の約30%のゴムチップが混合してある。

### 3) 試験結果及び考察

ビプロジール試験機による繰り返し数を営業線のトンに対応させることは、営業線における軌道狂い進みを推定する上で重要である。今回の試験では、レール圧力を用いて列車荷重の推定を行った。推定に際し、本軌道のマクラギ間隔は581mm(43本/25m)と仮定した。

軌道負担力計算法により、輪重Wとその作用点直下に働くレール圧力P1は比例関係にあり、軌道構造によって定まる比例定数Cを用いて次式によって表される。

$$P_1 = c \cdot W \quad (2)$$

ただし、

$$c = 1 - e^{-(\beta \cdot a/2)} \cdot \cos(\beta \cdot a/2)$$

$$\beta = 4\sqrt{K/4EIx}$$

$$k = \text{単位長さ辺りのレール支持ばね係数}$$

$$EIx = \text{レール曲げ剛性}$$

$$a = \text{マクラギ間隔}$$

このことから輪重Wは、

$$W = P_1/c \quad (3)$$

と表され、積算通トンは次式で表される。

$$\text{積算通トン数} = \text{輪重}(2W) \times \text{荷重繰り返し数} \quad (4)$$

ここで、本試験軌道に用いた軌道パッドばね定数を

表 - 6 係数の推定結果

	ゴムチップ	一般有道床
$\alpha$	1. 82699	0. 23623
$\beta$	0. 00021	0. 00074
$\gamma$	8. 66868	14. 11942

110MN/m, マクラギ支持ばね係数を 12MN/m, マクラギ間隔 581mm, ビプロジール試験時のレール圧力を 10.2kN, 荷重繰り返し回数 992 万回として式(2)から(4)より約 4000 万トンとなる。

この試験で、通トンとレール沈下量の関係は図-12のとおりであり、これよりゴムチップ軌道の優位性が認められる。又、係数 $\beta$ が沈下狂い進みの早さを分析すると表-6のとおりとなる。

この場合でも、ゴムチップを混入した軌道の係数 $\beta$ は、一般有道床軌道のそれと比較すると、約1/3の値で収まっており、保守量低減に効果があることが確認できた。

C) ゴムチップの耐久試験

ゴムチップ自体の材料劣化及びその耐久性がどの程度であるかを確認するために、バラスト内に体積比で30%のゴムチップを混入した試験軌道に対して、繰返し載荷試験を実施することとした。

この試験軌道は、営業線軌道構造と、ほぼ同等な構造条件とし、試験等を行った。

1) 試験内容及び方法

試験は、(財)JR総研内で行い、試験内容は通過トン数 4000 万トンに相当する動的載荷を行い、試験前後のゴムチップ本体の劣化具合を調べるために、電子てんびんを用い、その試験前後の重量比から摩耗具合を算出する摩耗量測定及び物性試験(硬さ試験・静的ばね定数試験・引張特性試験・動的粘弾性試験)を実施した。

なお、物性試験については、JIS基準に準じて実施した。

2) 試験結果と評価

① ゴムチップの摩耗量変化

換算通トンで約 4000 万トンの繰返し載荷試験では、平均摩耗量が 0.13% で非常に小さく、ゴムチップ混入域を 10mm 四方のメッシュで区切り、マクラギからの上下・左右の離れを隣接度として測定した。

その結果、マクラギからの水平方向の離れあるいはマクラギ底面からの深さと摩耗量との間には、明確な関係が認められなかった。(図-13)

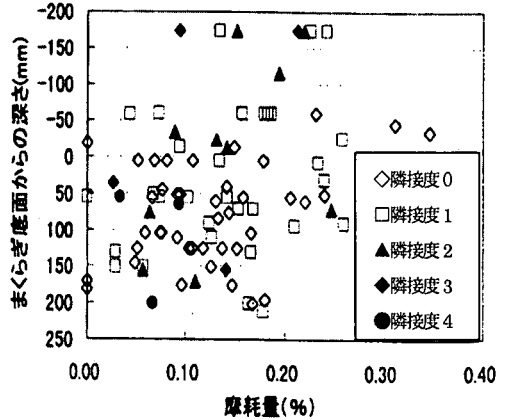


図 - 13 隣接度ごとの摩耗量変化

表 - 7 物性試験の平均値比較

	試験前	試験後	変化率
硬さ	57°	60°	+5%
静的ばね定数	0.36MN/m	0.36MN/m	-3%
引張り強さ	13.8MPa	13.3MPa	-4%
伸び	71%	60%	-12%

② 各物性試験

供試材物性のビプロジール載荷試験前後の変化率は、平均値と比較して硬さでは+5%、静的ばね定数では+3%、引張強さでは+4%といずれも10%以下の小さな範囲であった。

また、伸びに関しては-12%の変化率を示したが、その変化量(-9%)は疲労試験前の標準偏差(62%)以下の範囲であり、顕著な変化とは認められなかった。

(表-7)

また、動的弾性率の温度依存性は、疲労試験前後で近似した傾向を示し、供試材の温度特性の変化も小さいことが分かった。(図-14)

以上のことから、列車の通過を模擬した繰返し載荷でゴムチップの摩耗、供試材の硬さ・静的ばね定数・引張強さなどの各物性に与える影響は少ないということが分かった。

(2) 営業線での敷設試験

数々の室内試験結果を踏まえ、再度、営業線で道床ゴムチップ混合バラスト工法の確認試験<sup>9), 10)</sup>を行うことにした。試験は仙台支社の仙石線で行い、敷設前後の各軌道材料に与える影響度合や各種振動試験を実



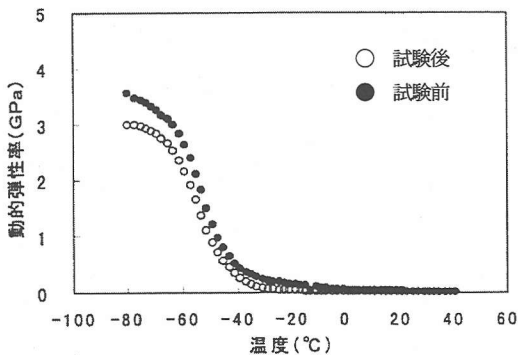


図 - 1 4 動的弾性率試験結果

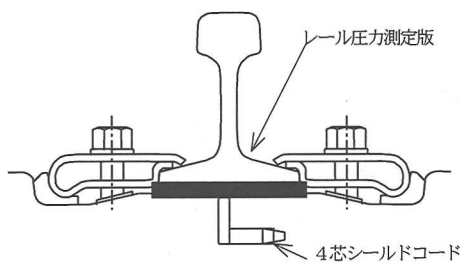


図 - 1 5 レール圧力計取付位置

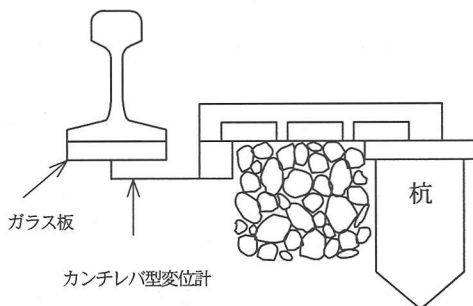


図 - 1 6 レール上下変位計取付位置

施した。

#### a) 試験内容

レール負担度を見極めるためのレール圧力・レール上下変位の各試験，振動では，軌道狂い進みに直接起因する道床振動加速度と環境問題に影響する路盤振動の計4種類の試験を実施した。

#### b) 試験方法

##### ①レール圧力試験

ゴムチップバラストを敷設し有道床軌道の弾性化を図ったことにより，通常の軌道と比べどれだけ変化があるかを調査することとした。

レール圧力計の取付位置を図 - 1 5 に示す。

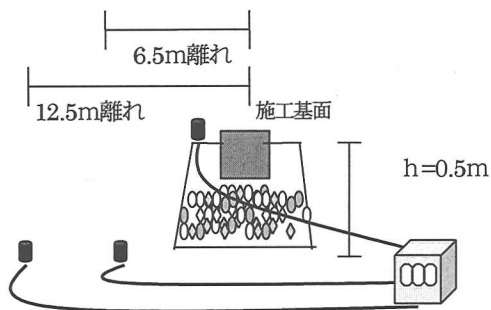


図 - 1 7 路盤振動測定位置図

##### ②レール上下変位測定試験

ゴムチップバラストを敷設し有道床軌道の弾性化を図ったことにより，通常の軌道と比べどれだけ変化があるかを調査することとした。レール上下変位計取付位置を図 - 1 6 に示す。

##### ③道床振動加速度試験

道床振動加速度を，ゴムチップバラスト敷設軌道と，通常の軌道と比べたときに，どれだけ変化があるかを調査した。この効果等の把握には，周波数毎の特徴を見極める必要があり，今回は，バンドパスフィルターを用い，さらに1オクターブを1/3に分割した1/3オクターブ分析で実施した。

##### ④路盤振動加速度試験

1/3オクターブ分析器を用い，1/3オクターブバンドの中心周波数で1~80Hzの間の問題となる周波数を中心に分析した。

ここでは，バラスト内にゴムチップを混入し有道床軌道の弾性化を行うことで，施工基面・軌道中心から6.5m 離れ・12.5m 離れの各路盤に与える振動が，どのように変化するかを調査した。(図 - 1 7)

#### c) 試験結果と評価

##### ①レール圧力試験

供試工（一般継目）と比較しても平均値でゴムチップバラスト工法のほうが約2割程度大きくなることが確認できたが，著大な軌道狂いを発生させる圧力変化ではないことが分かった。(図 - 1 8)

##### ②レール上下変位試験

レール上下変位は，一般的に，弾性能力が大きくなるにつれ，変位量は大きくなることが確認されている。

しかし，今回の試験では，ゴムチップバラスト混合工法の方が，供試工（無対策工）に比べ変位量が小さいことが分かった。

この要因としては，弾性力は増すが，極度なレール変位を発生するまでの作用がないことと，荷重が効果的に分散化されていることが考えられる。(図 - 1 9)

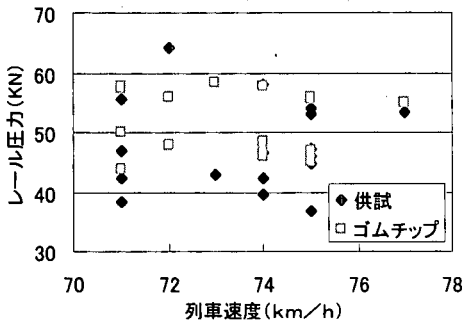


図 - 18 レール圧力の分布結果

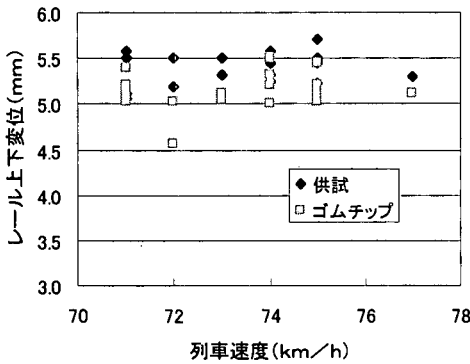


図 - 19 レール上下変位の分布結果

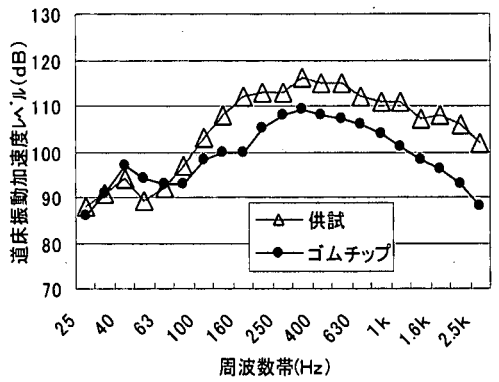


図 - 20 道床振動加速度の周波数分析

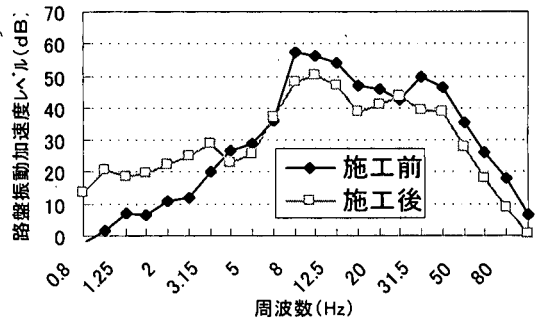


図 - 21 路盤振動加速度の周波数分析 (6.5m離れ)

### ③道床振動加速度

道床振動加速度の最大値及び平均値をみると、ゴムチップバラスト工の方が、供試工（普通継ぎ目）と比べ、平均値比較で約 8 dB も減衰していることが確認できた。

また周波数分析でも全周波数帯で低減していることも分かった。（図 - 2.0）

### ④路盤振動加速度試験

ゴムチップバラスト工の施工前・後で、周波数別に路盤振動レベルを比較してみると、全体的に施工後の方が各測定地点において、路盤振動レベルが抑制されていることが確認できた。（図 - 2.1）

これらの営業線での測定結果を踏まえ、道床ゴムチップ混合バラスト工が、かなりの軌道狂い進み抑制効果があることが分かった。

道床振動加速度の周波数分析でも、軌道狂い進みに効くと言われる数 100Hz 帯が、供試工よりも著しく減衰しており、レール部材に対する影響もかなり少ないことが確認できた。

また、道床ゴムチップ混合バラスト工は路盤振動抑制効果も有ることが分かり、振動対策にも活用できることが証明されたと考える。

## 7. おわりに

わが国で鉄道が開業し約 130 年余り。この間、輸送量の増大、速度の向上など、鉄道技術の発展は目覚ましいものがあつた。ロングレール化・二重弾性化・PC マクラギ化そしてスラブ軌道の開発などの軌道構造の改良・開発、また検査・調査業務のシステム化や保守作業の機械化など、線路保守の近代化は著しい発展をみせ、これらの軌道技術がこれまでの鉄道輸送の安全・安定輸送の一端を担ってきたといっても過言ではないだろう。

しかし、全線区がこのような技術的発展の恩恵を受けているわけではなく、ローカル線区などは、保守費や採算性の問題から、構造耐力が弱い軌道構造となっている箇所が多い。

これら状況を踏まえ、筆者が兼任した仙台支社で「ローカル線の構造検討プロジェクト」を発足させ、今後の保守管理・軌道構造をどのよにするべきかを検討することとなったのである。この研究レポートは平成 5 年から 9 年の約 4 年間で発表された、継ぎ目に関する論文等を取りまとめた集大成であると共に、今後のローカル線軌道の方向性を示している。ここで発表した

研究成果は、現在JR東日本管内の全ローカル線で施工されている。今後さらに、多くの保線現場で施工され、継ぎ目部の保守周期延伸につながれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) 杉原徳平：在来線における軌道狂いの実態調査とその解析，鉄道線路，1978年2月。
- 2) 宮元俊光，渡辺借年：線路，山海堂，1980年7月。
- 3) 佐藤吉彦，梅原利之：線路工学，日本鉄道施設協会，1987年2月。
- 4) 須田征男，長門彰，徳岡研三，三浦重：新しい線路，鉄道現業社，1997年7月。
- 5) 佐藤吉彦：新軌道力学 鉄道現業社，1997年7月。
- 6) 河野和久，木村稔，木村宣幸：下級線の保守管理，日本鉄道施設協会，1996年6月。
- 7) 荒木誠，麻生秀樹，佐々博明：下級線の継目対策，新線路，1997年8月。
- 8) 小山内政廣，佐々博明，伊藤種，鈴木基善，阿部治彦：下級線の継目は，こんなふうに対策したらどうか，日本鉄道施設協会誌，1998年6月。
- 9) 佐々博明，伊藤種：弾性バラストの敷設による一考察，土木学会第53回年次学術講演会。
- 10) JR東日本(株)：継目補強性能確認試験，1998年1月。

(2000. 2. 9 受付)

## RESEARCH ON NEW RAIL JOINT STRUCTURE

Masahiro OSANAI

This paper presents rail joint structures newly developed in order to decrease track maintenance at jointed track. Several kinds of new rail joint structures were designed by applying conventional theory on dynamic deformation of rail joints to practical use, and the effectiveness of these structures was evaluated by field tests. As the results, it was revealed that every new rail joint structures was effective in reducing maintenance costs in comparison with current rail joint structures and railroad ballast mixed with tire chips was the most efficient structure in respect of maintenance costs and ease of maintenance work among all of them. Moreover, general guidelines for the introduction of new rail joint structures to line operated were proposed.