

軌道構造境界部における軌道沈下対策の効果比較

村本 勝己* 櫻井 祐*

Study of the Effect of Track Irregularity Prevention Methods for the Transition Zone between Different Track Structures

Katsumi MURAMOTO Tasuku SAKURAI

At the transition zones between ballastless track and ballast track, it is a common knowledge that track irregularity becomes locally discontinuous; therefore, hanging sleepers are likely to occur. As a countermeasure for local track irregularity, the authors have developed the track structure, which uses automatically irregularity-correcting sleepers as termed AICS. Since the AICS is a sleeper, which itself adds to its height automatically even if ballast deforms, rail subsidence is accordingly preventable. On the other hand, there are some examples that the track irregularity seems to be decreased by installing a certain amount of elastic sleepers at the transition zone in service lines; however, the quantitative effect verification has not been performed. In this paper, the authors performed the cyclic loading tests with full-scale track models, which simulated transition zones. The authors, thereby, clarified that the AICS has superior prevention effect for hanging sleeper and that the elastic sleeper has some degree of the efficacy.

キーワード：構造境界，バラスト，軌道沈下，浮まくらぎ，自動沈下補正まくらぎ，弾性まくらぎ

1. はじめに

バラスト軌道において、無負荷時にまくらぎがバラストに接触せず、レールにぶら下がっている状態を浮まくらぎという。浮まくらぎが発生すると、車両走行時にバラストとまくらぎが衝突し、バラストが破碎したり、噴泥が発生するなどして軌道状態が急速に悪化する。浮まくらぎは、接続軌道取付部も含めた直結軌道／バラスト軌道境界部やレール継目付近等、軌道構造が変化する箇所において発生しやすい。その発生要因には未だ不明な点もあるが、筆者らは、直結軌道／バラスト軌道境界部に発生する浮まくらぎは、以下の要因によって発生すると考えている。

- 1) 沈下の少ない直結軌道に比べると、バラスト軌道の沈下量は相対的に大きく、沈下が不連続になりやすい (図 1a)。
- 2) 局所的な沈下が増大すると、無負荷時にまくらぎがレールにぶら下がり、直結軌道の端部を支持点の1つとして浮まくらぎが発生する (図 1b)。
- 3) さらに、直結軌道／バラスト軌道境界部は軌道補修の際にレールの上げ越し(初期≒即時沈下分を見越して、レールレベルを目標値よりもやや多めに扛上すること)が難しい。そのため、タイタンパーによる軌道補修を行ってもバラストの初期密度が小さく、

浮まくらぎが再発しやすい。

結局のところ、バラストの塑性変形(沈下)を本質的にゼロにすることはできないので、以上の要因を踏まえると、直結軌道／バラスト軌道境界部の浮まくらぎ発生を防止することは極めて困難である。例えば、境界部付近のバラストをセメント等で固めてしまえば、固めた箇所の沈下は防止できるが、境界の位置が移動しただけであり、本質的な解決にならない。

ただし、境界部付近のバラストの沈下が防止できなくても、バラストが沈下した分だけ何らかの調整物を逐次挿入してレールレベルを補正することで、浮まくらぎの発生を防止することは可能である。そこで、筆者らは、同等の作用を自動的に実現する方法として、自動沈下補正

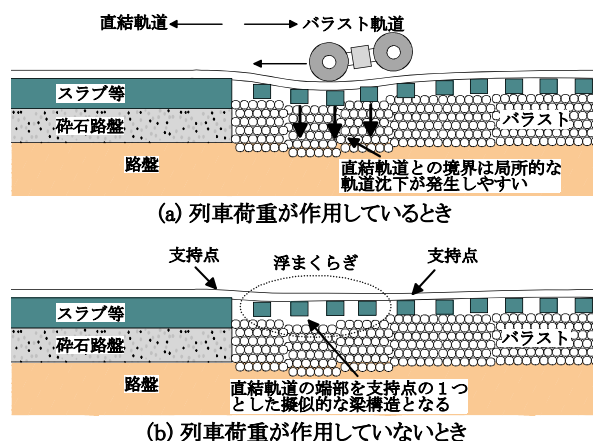


図 1 直結軌道取付部の浮まくらぎ発生概念図

* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室

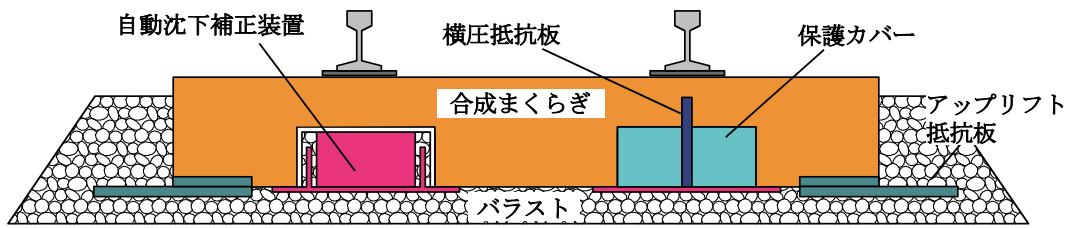


図2 AICS（自動沈下補正まくらぎ）の基本構造



図3 AICS（自動沈下補正まくらぎ）

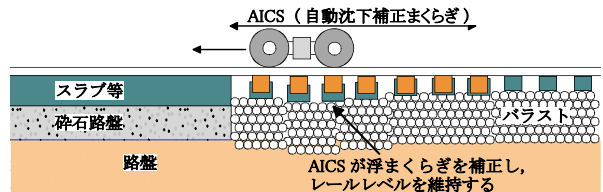


図5 AICSによる浮まくらぎ防止の原理

まくらぎ (Automatically Irregularity Correcting Sleeper, 以下「AICS」という) の開発を行っている^{1), 2)}。これまでに、小型模型を用いた移動荷重載荷試験や、実物大軌道模型を用いた載荷試験によって、AICSを用いた軌道構造には、高い浮まくらぎ防止効果があることを確認している。

一方で、営業線において、連接軌道取付部付近のまくらぎを試験的に弾性まくらぎ(まくらぎ下面にまくらぎパッド=防振ゴムが接着されたまくらぎ)に交換することで軌道沈下が低減したという報告がある。これは、バラストに作用する動的荷重を低減させることを目的として行われたものと考えられるが、効果について客観的な検証はなされていない。

そこで、弾性まくらぎおよびAICSを用いた軌道構造境界部の軌道沈下抑制対策の効果について、実物大軌道模型を用いた載荷試験によって比較検証した。

2. AICS（自動沈下補正まくらぎ）の概要

今回使用したAICSは、実用化段階に近い構造として新たに試作した左右独立補正型(図2, 図3)である。これは、合成まくらぎ(FRP製のまくらぎ)の左右レール

直下に2基の自動沈下補正装置を内蔵しており、それぞれが独立してバラストの沈下を補正するため、左右レールの不同沈下も補正することが可能である。

自動沈下補正装置の保護カバーは、道床横抵抗力を確保するための横圧抵抗板を兼ねており、その効果によってまくらぎ1本あたり10kN程度の横抵抗力を発揮する³⁾。

自動沈下補正装置は、図4に示すように内筒と外筒の二つの箱を入れ子に組み合わせた構造体で、内筒上面はまくらぎ本体を介してレール側と繋がり、外筒底面は底板を介してバラストに接している。内筒の内部には直径約2mmの粒状体が入っており、バラストの沈下に伴って外筒が沈下して内外筒間に隙間が発生すると、内筒底面の粒状体排出口から粒状体が落下して隙間が埋まり、自動沈下補正装置の実質的な高さが増加する。その結果、図5に示すように、バラストの局所的な沈下が進行しても浮まくらぎは発生せず、レールレベルの不整が防止される。

粒状体の材質については、セラミック球や各種金属球について検討を進めている。また、排出口の形状、面積、および粒状体の粒径等の最適値についても検討中である。

3. 試験の概要

図6に実物大軌道模型の概要をAICSケースを例に示す。本軌道模型は、直結軌道とバラスト軌道の軌道構造境界部をまくらぎ11本で模擬したものであり、端部の1

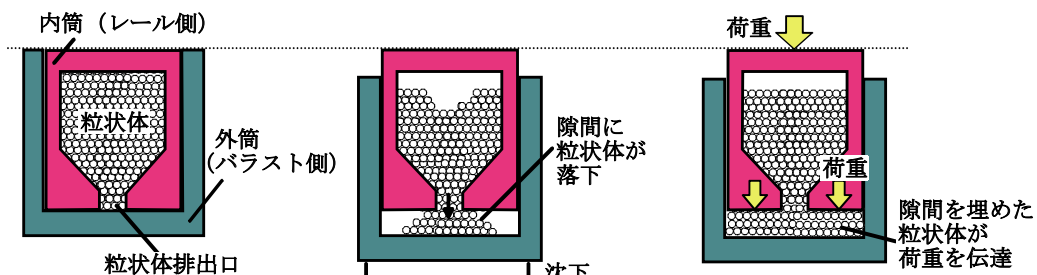


図4 自動沈下補正装置の原理

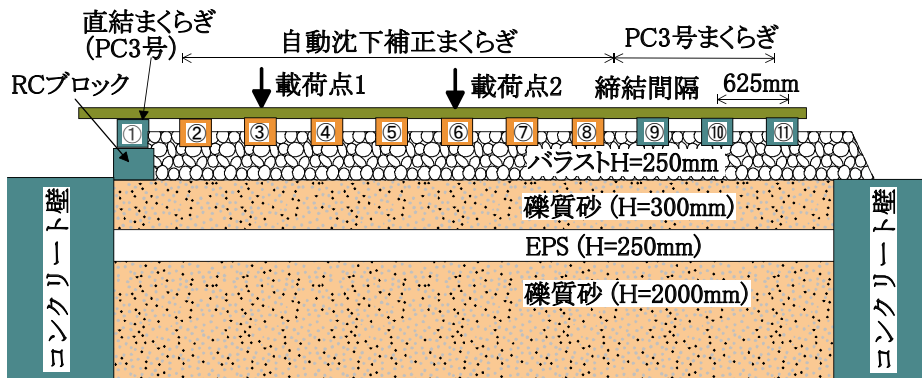


図6 実物大軌道模型の概要 (AICS ケース)

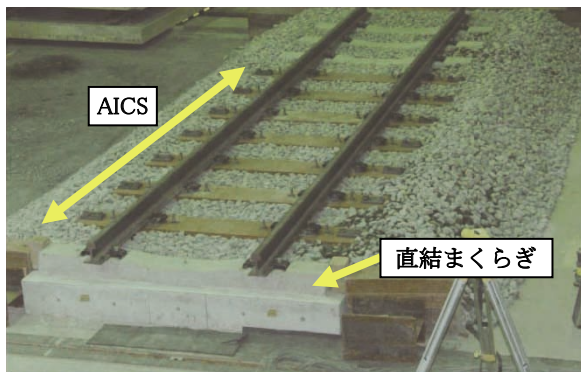


図7 軌道模型 (AICS ケース)

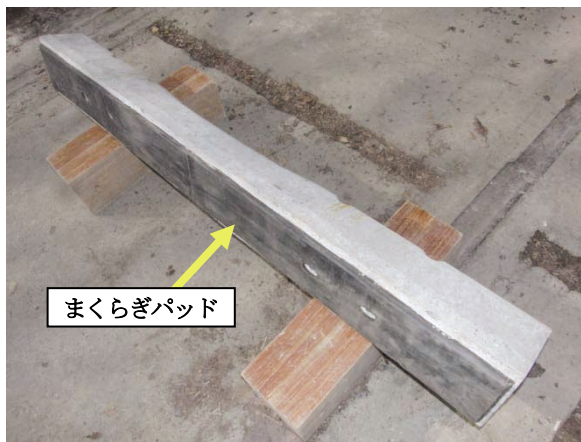


図8 弾性まくらぎ (PC3号)

本のPC3号まくらぎをコンクリートブロック上に固定した直結構造 (図7, 以下直結まくらぎという) とした。路盤は礫質砂とEPSを組合せて作製し, 想定 K_{30} 値 = 50MN/m^3 程度の比較的軟弱な路盤条件とした。バラストは甲州産バラストを用いた。

試験ケースは表1に示す3ケースであり, バラスト軌道のまくらぎ10本全てをPC3号まくらぎとする無対策ケース, 10本すべて弾性まくらぎとする低ばねケース, および直結まくらぎ側にAICSを7本敷設するAICSケースの3ケースである。AICSの設置本数は, 小型模型を用いた移動荷重載荷試験²⁾の結果を基にして定めた。なお, 本試験で使用した弾性まくらぎは, PC3号まくらぎ

表1 試験ケース

無対策ケース	直結まくらぎ×1 + PC3号×10
低ばねケース	直結まくらぎ×1 + 弾性まくらぎ×10
AICS ケース	直結まくらぎ×1 + AICS ×7 + PC3号×3

表2 載荷条件

載荷荷重	軸重0~100kNの正弦波荷重 ×2軸	
載荷周波数	5Hz (最初の1000回は1Hz)	
載荷回数	無対策ケース	2万回
	低ばねケース	40万回
	AICS ケース	100万回

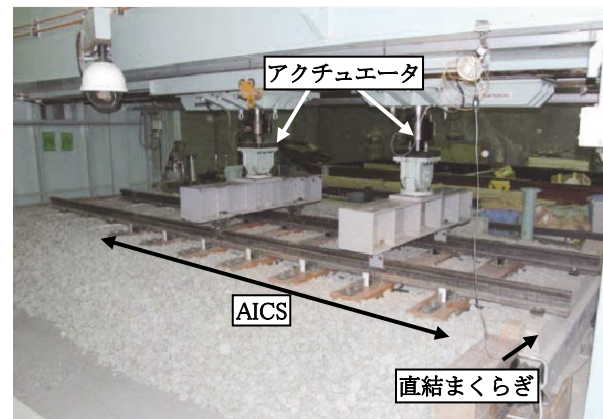


図9 載荷試験の状況 (AICS ケース)

をベースとし, 底面に静的ばね定数=9MN/mのまくらぎパッドが一体化されたものである (図8)。

載荷条件を表2に示す。載荷は図6に示す2点に対する定点繰返し載荷とし, 載荷周波数5Hz (ただし最初の1000回は1Hz) で, 0~100kNの正弦波軸重を最大100万回載荷した。載荷試験の状況を図9に示す。

4. 試験結果

4.1 軌道の沈下形状

図10にレールの沈下形状 (負荷時, 左右レール平均)

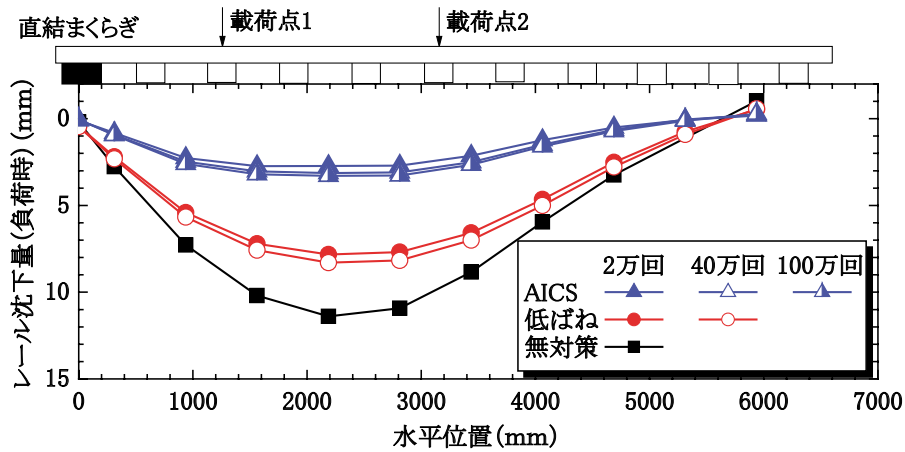


図 10 レールの沈下形状（負荷時，左右レール平均）

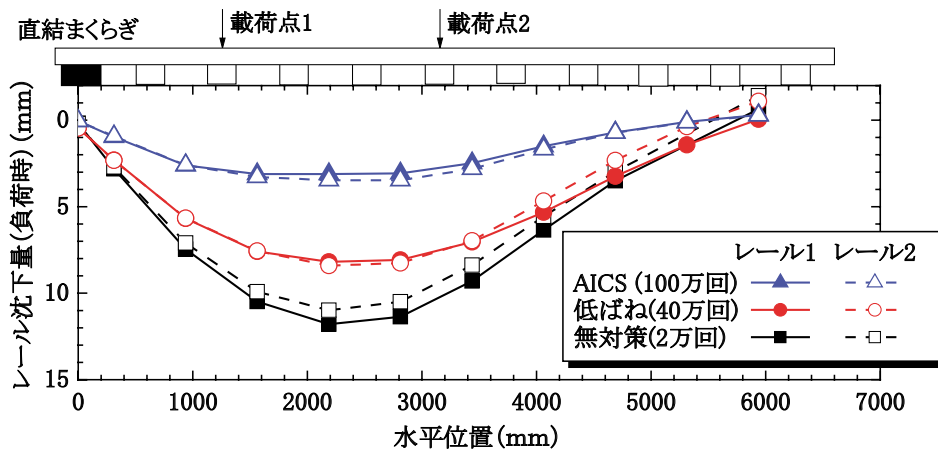


図 11 レールの最終沈下形状（負荷時，左右レール別）

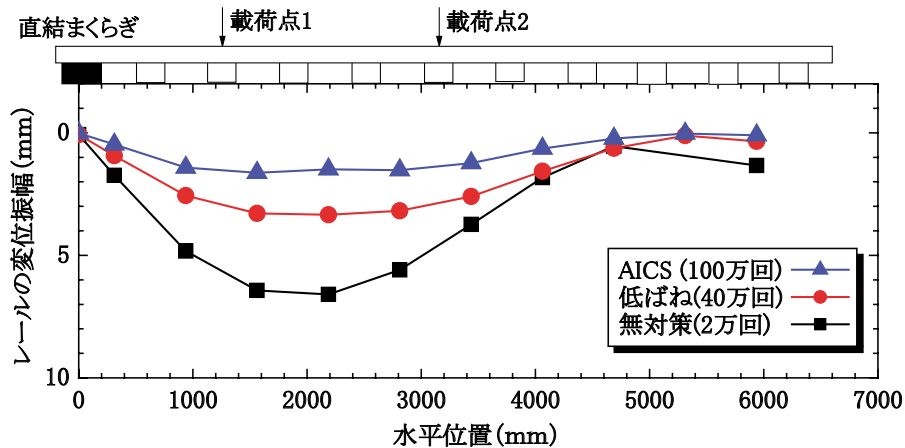


図 12 レールの変位振幅（左右レール平均）

を示す。無対策ケースは载荷直後から急速に沈下が進行し、载荷2万回で最大11mm沈下してなお収束する傾向がみられず、浮まくらぎに伴う振動および衝撃が顕著になったため試験を終了した。低ばねケースについても、载荷直後に载荷点付近で大きく沈下が生じ、载荷2万回で8mmの沈下が発生して浮まくらぎが確認された。しかし、まくらぎ下面の弾性材の効果によってバラストへの衝撃荷重が緩和されるため、初期沈下終了後の沈下の進

行は緩やかであった。AICS ケースの場合、载荷直後に3mm程度の初期沈下が生じたものの、その後100万回までの沈下量は極めて小さく、浮まくらぎの発生は認められなかった。

図 11 に各ケースの最終的なレール沈下形状（負荷時、左右レール別）を示す。無対策ケースは左右レールの沈下量にややばらつきが発生したが、低ばねケースおよび AICS ケースには左右レールの沈下量に差はほとんど見

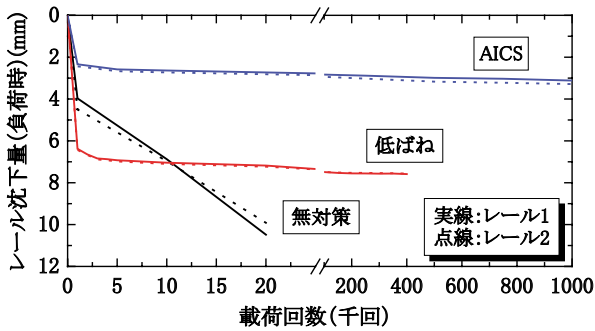


図 13 4～5番まくらぎ間のレールの沈下量（負荷時）

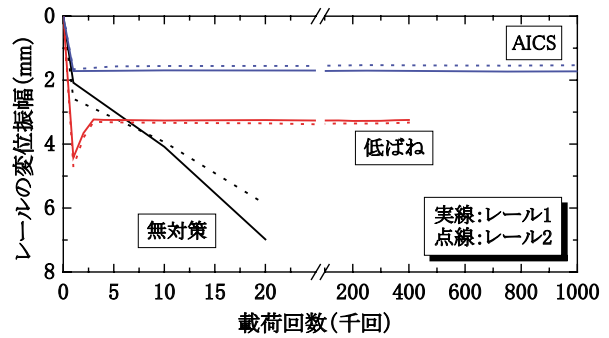


図 14 4～5番まくらぎ間のレールの変位振幅

られなかった。

なお、これらのレールの沈下形状は、荷重点が固定されている定点繰返し荷重条件の下に生じたものであり、実際の列車走行に伴う移動荷重条件下における沈下形状とは必ずしも同様ではない^{2) 4)}。

図12にレールの変位振幅の分布（左右レール平均）を示す。無対策ケースは顕著な浮まくらぎとなった結果、7mm程度の変位振幅が発生している。低ばねケースでは変位振幅は3mm強程度であり、正常な状態に比べればやや大きいものの、まくらぎパッド自身が変形に追従することで完全にまくらぎがバラストから離れてしまうギャップ量は低い値に抑制されているものと推測される。AICSケースについては変位振幅は2mm弱程度であり正常な軌道支持剛性であると考えてよい。

4.2 軌道沈下量の推移

図13にレールの沈下量が最も大きい4～5番まくらぎ間のレール沈下量の推移（左右レール別）を、図14にレールの変位振幅の推移（左右レール別）を示す。荷重開始直後の即時沈下量は低ばねケースが無対策よりも大きい。これは、バラストの圧縮変形に加えて、弾性まくらぎのまくらぎパッドが塑性変形したことによるものと考えられる。

また、低ばねケースの変位振幅は1000回では4.5mm

程度であったのに対して、その後は3.2mm程度で安定しているが、これはまくらぎパッドの粘弾性変形特性によるものと考えられる。すなわち、1000回までは荷重周波数が1Hzであったため、まくらぎパッドの粘性抵抗の影響が小さかったのに対して、それ以降は周波数が5Hzとなったために粘性抵抗の影響が大きくなり、見かけのばね値が大きくなったものと考えられる。

無対策ケースの場合は、即時沈下終了後も急速に沈下が進行しているが、AICSケースの場合は即時沈下終了後は沈下の進行が極めて遅く、変位振幅も安定していることがわかる。

4.3 AICSの沈下補正効果

図15に、85万回荷重後に計測した、AICSに内蔵されている各自動沈下補正装置の補正量（内筒と外筒との相対変位＝バラスト沈下量）の分布を示す。この図から、同じまくらぎであっても、各レール下の補正量は必ずしも均一ではないことがわかる。これは、まくらぎ下のバラスト層の強度や剛性のばらつきに起因するものと考えられる。ただし、図11からわかるように、AICSケースのレールの沈下形状は左右レールにほとんど差がないことから、AICSに内蔵された2基の自動沈下補正装置によって、まくらぎ下のバラストの強度・剛性のばらつきによって生じるはずの不同沈下が緩和されたものと考えられる。

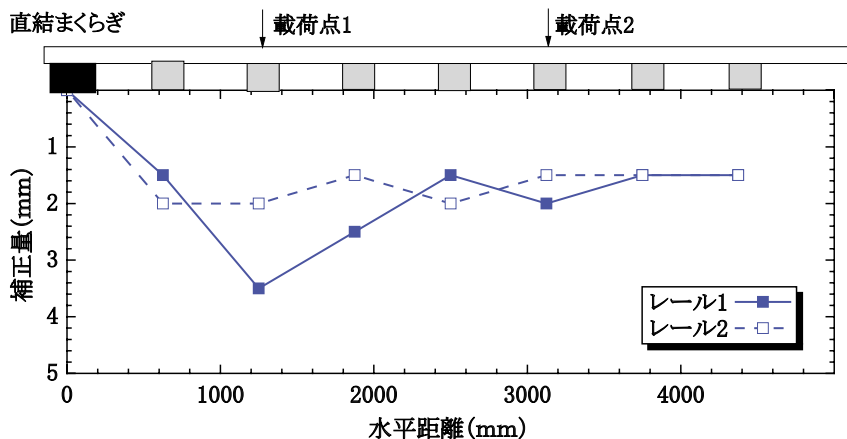


図 15 自動沈下補正装置の沈下補正量の分布（85万回荷重後）

特集：軌道技術

5. まとめ

実物大軌道模型を用いた軌道構造境界部の繰返し载荷試験の結果は、以下のとおりである。

- 1) 路盤が軟弱である軌道構造境界部には浮まくらぎが発生しやすく、浮まくらぎの発生と共に衝撃荷重等によってバラスト軌道が急速に沈下することが確認された。
- 2) 軌道構造境界部に弾性まくらぎを一定本数設置することで、軌道沈下の進行をかなり低減できる可能性が確認された。ただし、浮まくらぎの発生自体を根本的に防止することはできなかった。
- 3) 軌道構造境界部にAICSを7本程度以上設置することで浮まくらぎの発生を防止し、軌道沈下を低減できることが確認された。
- 4) 試作した左右独立補正型のAICSは、バラストの強度・剛性のばらつきに伴う軌道の不同沈下を緩和することが確認された。

6. おわりに

AICSについては、基本構造は概ね開発が終了しており、現在鉄道総研内の試験線に試験敷設され、効果の検証を進めている（図16）。

また、浮まくらぎ防止機能をより低コストに実現するために、既設のまくらぎを撤去せずに、簡易に自動沈下補正機能を既設軌道に付加できる、自動沈下補正補助まくらぎ（Automatically Irregularity Correcting Supplementary-Sleeper、以下AICSSという）の開発も進めている。AICSSとは、自動沈下補正装置のみを独立させて既設のまくらぎ間のレールに取付ける補助まくらぎ（図17）であり、簡易な脱着が可能で、まくらぎ交換工事が不要なため、施工コストの大幅な低減が期待できる。

AICSSについては、軌道構造境界だけでなく、レール継目部への適用（図18）も視野に入れて開発を進めており、近日中に試験施工を行う予定である。

なお、本研究は国土交通省の補助金を受けて実施している。

文献

- 1) 中村貴久, 村本勝己：自動沈下補正まくらぎを用いた浮きまくらぎ防止対策, 日本鉄道施設協会誌, Vol.47, pp. 157-160, 2009.2
- 2) 「自動沈下補正まくらぎによる軌道変位抑制効果のメカニズ

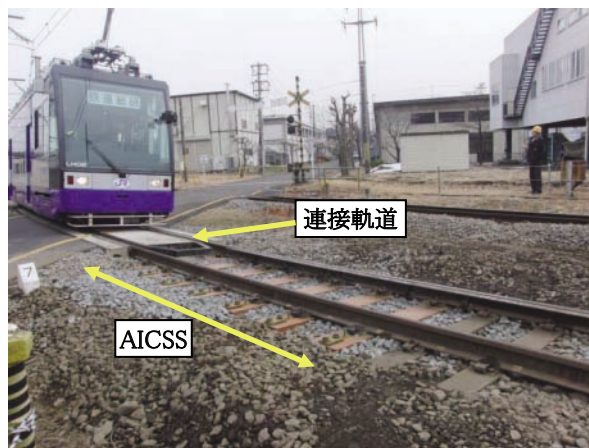


図16 試験線に試験敷設されているAICS

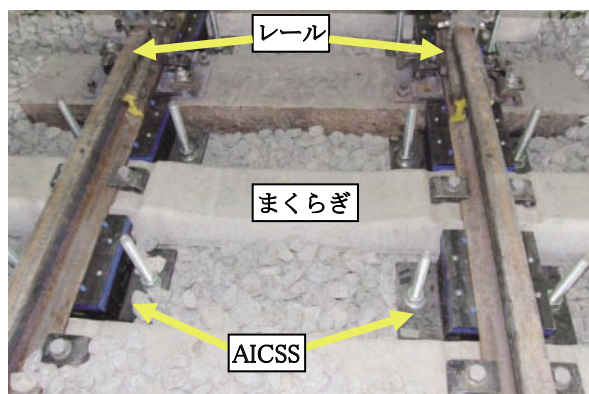


図17 AICSS（自動沈下補正補助まくらぎ）

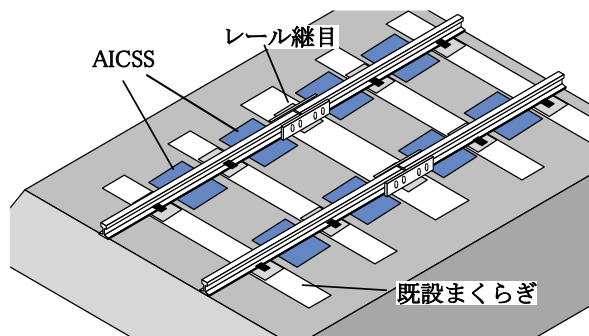


図18 継目部へのAICSSの適用例

- ム」, 村本, 中村, 土木学会第65回年次学術講演会概要集IV, pp.461-462, 2010
- 3) 「左右独立補正型自動沈下補正まくらぎの道床横抵抗力試験」, 櫻井, 村本, 中村, 土木学会第66回年次学術講演会概要集IV, pp.137-138, 2011
- 4) 「軌道模型の繰返し载荷試験における载荷方法の影響」, 村本, 関根, 桃谷, 土木学会第56回年次学術講演会概要集3-A, pp.434-435, 2001