

# 施設研究 ニュース

No. 307 2016.3. 1

公益財団法人 鉄道総合技術研究所 施設研究ニュース編集委員会

## バラスト軌道の鉛直方向に関する固有振動特性

### 1. はじめに

大規模並列構造解析プログラム FrontISTR を用いて、バラスト軌道の鉛直方向の固有振動モードを解析的に同定しました。図1は、バラスト軌道で発生する可能性がある鉛直方向の振動モードの特徴を示したものです。図中の剛体振動とは、バラスト層のばね作用により、まくらぎ等の質量が剛体的に上下方向に跳ね上がる振動であり、弾性振動とは、バラスト層全体が上下方向に弾性的に伸縮する振動です。

### 2. 実測値によるバラストのリニアスペクトル

図2は現場測定値より求めたまくらぎ直下10cm位置でのバラストの変位と加速度のリニアスペクトルです。別途実施した実物大模型の加振実験結果より、図中の100Hz付近の応答はバラスト層の剛体振動モードであることがわかりました。一方300Hz近傍のピークについてその運動の特徴を調べたところ、まくらぎとバラスト層がほぼ同位相で上下方向に伸縮する振動モードであることがわかりました。

### 3. 衝撃载荷実験による剛体振動モード

図3はバラスト軌道の実物大模型を用いた落錘衝撃载荷実験の結果です。約4000回の载荷に関するまくらぎの鉛直変位(平均曲線)を示します。荷重値は左右レール合計で217kNです。図より、衝撃荷重が加わると、バラスト層は瞬間的に弾性圧縮・復元し、その後まくらぎが跳ね上がるのがわかります。

### 4. 大規模有限要素モデルの構築

図4は、実軌道構造を模擬したまくらぎ-バラスト系の大規模有限要素モデルです。本モデルは、バラストの多面体モデルをDEMで締固め、その接触構造を維持したまま、バラスト1個を約1000個の四面体2次要素に分割したものです。モデル内の接触点については、引張力も作用する共有節点(MPC)と、引張力が作用しない非引張ばねの2種類のモデル化を行いました。モデルの規模は約2100万自由度です。本モデルのレール位置に、実軌道でのレール圧力の実測波形と矩形インパルス波形(左右合計で100kN)を入力して、直接法ソルバーMUMPSを用いたFrontISTRによる過渡応答解析を実施しました。

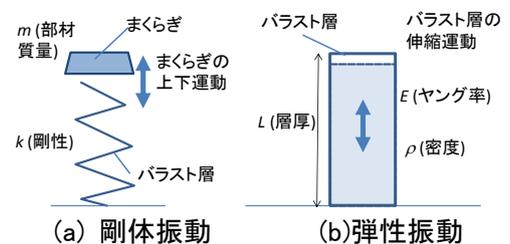


図1 鉛直方向の固有振動モードの特徴

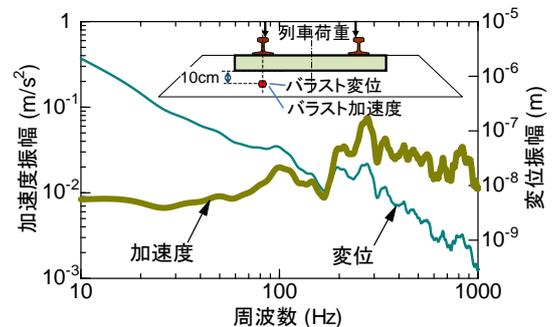


図2 バラストのリニアスペクトル

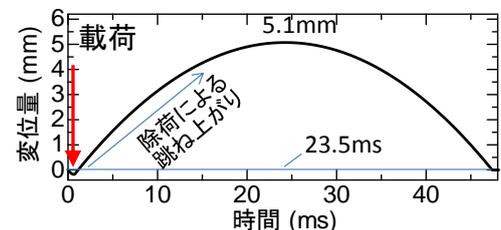


図3 衝撃载荷後のまくらぎ変位(落錘試験)

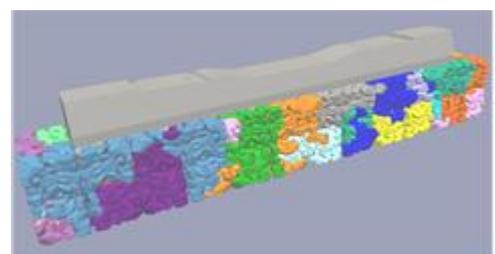


図4 バラスト軌道の大規模モデル

### 5. 共有節点で接続したモデルの応答解析

図5は、共有節点のモデルに実測荷重を入力したときの、左レール直下のミーゼス応力です。本解析では45 ms時点で第1軸が測点直上を通過します。図より、第1軸通過時点から300~400 Hzの大きな振動が発生し、また、バラスト層の深い地点ほど応力値が減少する傾向がわかります。またバラスト層全体での最大応力値は80 MPaであり、碎石の一軸圧縮強度にほぼ近い応力値です。このことより、通常の走行条件であっても、バラスト内部において、微細な規模の破碎や摩耗などが発生する可能性があるといえます。図6は、矩形波入力時のまくらぎ鉛直変位のリニアスペクトルです。本解析では310 Hzで弾性振動モードが発生しました。この値は上述の現場測定値にほぼ一致しており、現場で観測された約300 Hzのピークは、バラスト層の弾性振動モードによるものと判断できます。

### 6. 非引張ばねで接続したモデルの応答解析

まくらぎとバラストとの間に引張応力が作用しないモデルを用いて同様の過渡応答解析を実施しました。図7および図8は矩形波荷重を入力した時の、まくらぎ鉛直変位の時刻歴応答とリニアスペクトルです。接触点において引張力が作用しないモデルでは約120 Hzで鉛直方向の剛体振動が発生し、図7に示すように荷重除荷時に剛体振動によるまくらぎの跳ね上がり挙動が発生しました。これは衝撃載荷実験でも確認された挙動に整合しています。なお、別途実施した実物大加振実験では剛体振動モードは98 Hzで発生しましたが、本解析の結果と20%ほどの差があります。これは、本解析では、碎石の物性値について、現場の値では無く一般的な値を用いたことが原因していると思われる。しかし、解析値は概ね実測値に符合しており、また、弾性振動モードの約1/3の周波数にて、剛体振動モードが発生することが数値解析的に確認できました。

### 7. まとめ

本研究では、接触点に関して共有節点と非引張ばねによる2つのモデル化を行い、バラスト層の振動モードを再現しました。解析結果より、接触点において接触を維持できるか否か剛体振動の発生に大きく影響し、また、弾性振動のおよそ1/3の周波数で剛体振動が発生することがわかりました。本結果より、まくらぎ近傍の接触構造の改善が、バラスト劣化現象の低減に大きく貢献するものと推察されます。

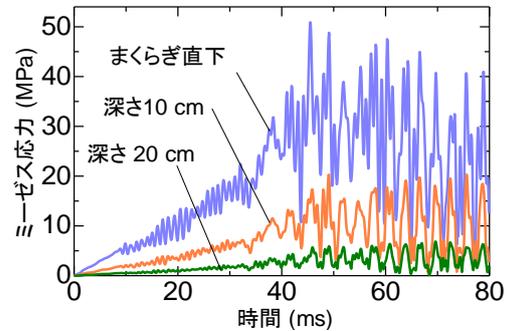


図5 バラスト稜角部のミーゼス応力(共有節点)

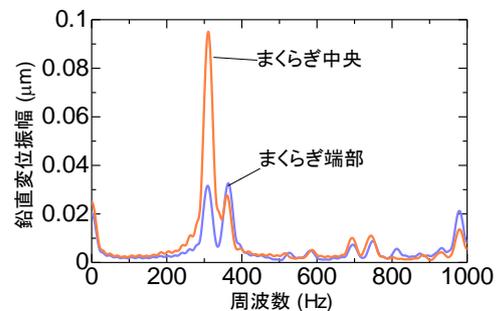


図6 まくらぎ変位のリニアスペクトル(共有節点)

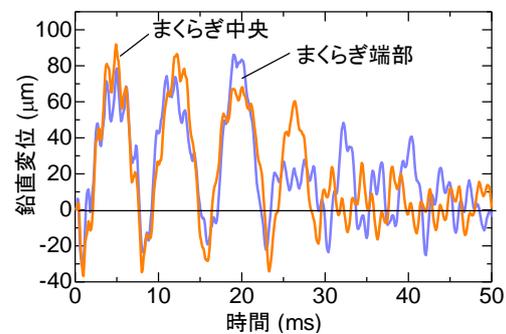


図7 矩形波入力時のまくらぎ変位(非引張)

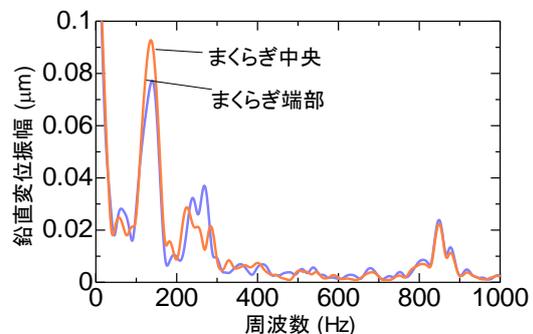


図8 まくらぎ変位のリニアスペクトル(非引張)

執筆者：鉄道力学研究部 軌道力学研究室 相川 明

# 経年 PC まくらぎの摩耗性状

## 1. はじめに

プレストレストコンクリート製のまくらぎ（以下、PCまくらぎという）は、列車通過時の動的作用によってバラストとの相対運動が発生することにより、特にその底面が摩耗します。PCまくらぎが摩耗した場合、断面減少に伴う曲げ保証荷重や曲げ破壊荷重の減少だけではなく、PC鋼材やポストテンション式PCまくらぎにおける定着板や定着具の露出、プレストレス力の伝達不良などが懸念されます。本研究では、営業線に敷設されていた経年PCまくらぎを対象に摩耗量と累積通過トン数（以下、累積通トンという）及び経年の関係、摩耗パターンなどについて概観したので報告します。

## 2. PCまくらぎの摩耗メカニズムと対象PCまくらぎ

表1に作用要素と相対運動に着目したコンクリートの摩耗の分類を示します。PCまくらぎの摩耗は、PCまくらぎ（コンクリート）とバラスト（岩石）との相対運動で生じますが、その要因は、列車通過時の動的作用に加えて、車輪フラットやレール凹凸などに起因する衝撃力も含まれます。したがって、PCまくらぎの摩耗は、表1に示す固体/コンクリートの相対運動の複合で生じますが、特に衝撃摩耗、フレッティング摩耗が支配的であると考えられます。

図1に本研究で対象としたJIS-3号PCまくらぎの概要を示します。営業線に敷設されていた約200本のまくらぎを対象として調査しました。なお、PCまくらぎの形状は同じであるため、プレテンションとポストテンションの緊張方式の違いは区別せずに取り扱うこととした。

図2にPCまくらぎの摩耗量の簡易測定断面を示します。摩耗量の測定は、図中の11断面において幅方向3か所についてノギスと定規によって測定しました（以下、簡易法という）。また、専用の治具を用いてPCまくらぎ底面をデジカメで2cmピッチで撮影し、得られた画像を画像解析することにより摩耗量を取得する方法（以下、詳細法）も併せて実施しました。

## 3. PCまくらぎの摩耗に関する調査結果

①摩耗量の測定結果 図3に詳細法による摩耗量測定結果の一例を示します。レール中心位置付近のまくらぎ側面側において30mm程度、中央では数mm～10mm程度の摩耗量であることがわかります。また、図3にはPCまくらぎの中心線における詳細法と簡易法の比較を示しますが、簡易法は局所的な値が欠落する場合がありますが、概ね詳細法をトレースできていることがわかります。そこで、以降の検討では簡易法の結果を用いて分析を実施することとしました。

### ②最大摩耗量と経年および累積通トンとの関係

図4、図5にPCまくらぎの最大摩耗量と累積通トン及び経年の関係をそれぞれ示します。最大摩耗量は簡易法で得られた摩耗量の最大値を採

表1 コンクリートの摩耗の分類<sup>1), 2)</sup>

作用要素	摩耗名称	相対運動
固体/ コンクリート	すべり摩耗	すべり
	転がり摩耗	転がり
	衝撃摩耗	衝撃・衝突
	フレッティング摩耗	振動
液体/ コンクリート	キャビテーション摩耗	流れ
液体+固体/ コンクリート	エロージョン摩耗	流れ

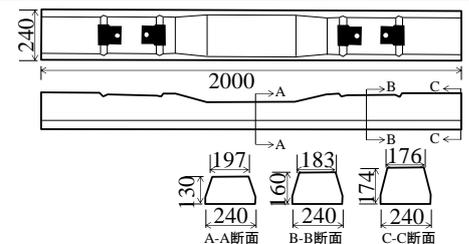


図1 対象PCまくらぎの概要(JIS-3号)

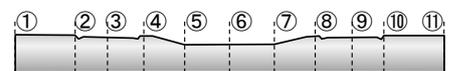


図2 PCまくらぎの摩耗量簡易測定断面

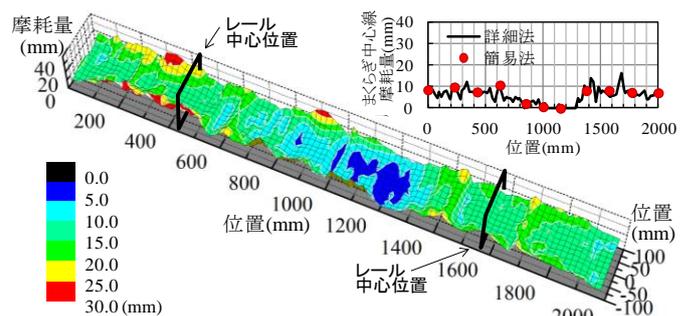


図3 PCまくらぎの摩耗量の詳細測定結果の一例

用しました.同図より,概ね累積通トンが 10 億トン程度,あるいは経年 30 年程度になると,最大摩耗量が 20mm 程度となるとともに,PC 鋼棒および定着具

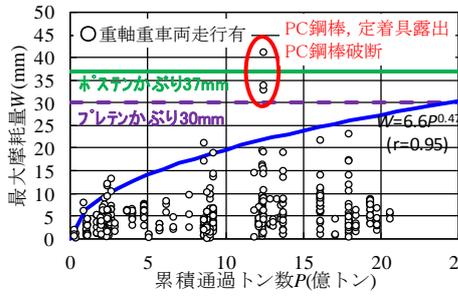


図4 最大摩耗量と累積通トンの関係

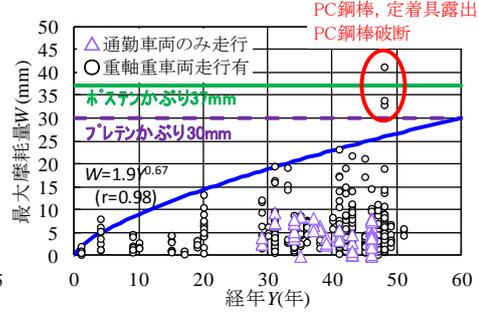


図5 最大摩耗量と経年の関係

のも生じる可能性が高くなることを確認されました.なお,図5には通勤車両のみが走行する線区の結果も併せて示しますが,経年30~50年において,通勤車両のみが走行する線区とそうでない線区を比較すると,前者の最大摩耗量は10mm程度以内となっていることがわかります.

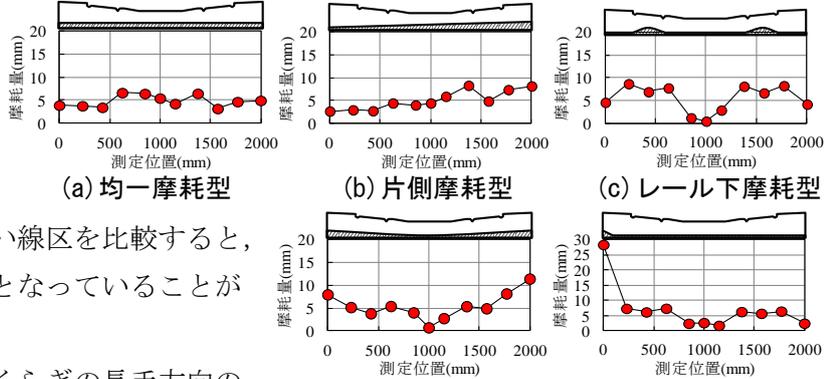


図6 PCまくらぎの摩耗パターン分類

③摩耗パターンの分類 図6にPCまくらぎの長手方向の摩耗パターンの分類および代表的な摩耗形状を示します.摩耗パターンとしては,均一摩耗型,片側摩耗型,レール下摩耗型,両端摩耗型,欠損型の概ね5つのパターンに分類できることがわかりました.

④摩耗進展メカニズムの概観 累積通トンおよび経年ごとの摩耗パターンは,図7,図8に示すように,累積通トン1億トン未満では均一摩耗型の割合が90%程度,経年5年未満では均一摩耗型の割合が100%でした.その後,累積通トンおよび経年の増加とともにその他の摩耗パターンの割合が増えていくことがわかります.PCまくらぎの底面の摩耗進展メカニズムとしては,まず均一摩耗型の摩耗パターンから始まり,その後PCまくらぎの敷設環境に応じてその他のパターンに進展するものと推測されます.

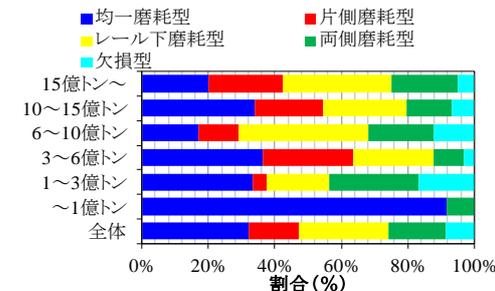


図7 累積通トンごとの摩耗パターンの分類

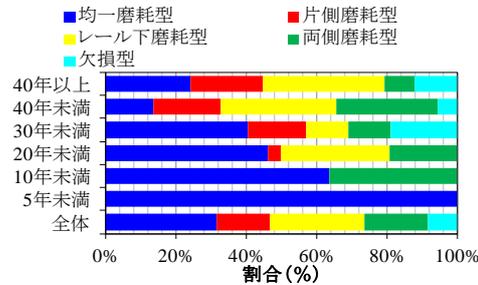


図8 経年ごとの摩耗パターンの分類

4. まとめ

- (1)PCまくらぎ約200本のサンプルより,PCまくらぎ底面の最大摩耗量と累積通トン及び経年との関係を整理しました.
- (2)通勤車両のみが走行する線区では重軸重車両が走行する線区に比べて最大摩耗量が小さく,経年30~50年でも10mm程度以内であることがわかりました.
- (3)PCまくらぎ底面の摩耗形態を5つのパターンに分類しました.
- (4)PCまくらぎ底面の摩耗は均一摩耗型から始まり,累積通トンや経年の増加とともにその他の摩耗パターンに進展していくというメカニズムを概観しました.

今後はPCまくらぎの摩耗進展メカニズムの深度化,PCまくらぎの耐力低下やPCまくらぎの固有振動数変化に及ぼす影響等について検討を進める予定です.

執筆者: 鉄道力学研究部 構造力学研究室 渡辺 勉  
 担当者: 鉄道力学研究部 構造力学研究室 箕浦 慎太郎

# 中層梁挿入によるラーメン高架橋の耐震補強

## 1. はじめに

兵庫県南部地震以降、RC ラーメン高架橋の耐震補強が順次実施されています。最近では、駅部など高架下での施工上の制約条件がある場合が散見され、これらに対する耐震補強工法の開発が求められています。そこで、部分的な補強により耐震補強が可能となる工法の開発を行いました。具体的には、図1に示すように、橋軸直角方向の柱間に中層梁を挿入し、構造物全体系の剛性および耐荷力を向上させる工法（以下、中層梁挿入工法）です。また、挿入する中層梁をプレキャスト化することで施工性を向上させ、中層梁の取り替えが可能な接合構造とすることで復旧性の向上を図ることが可能となります。本稿では、提案した工法の特徴や補強効果を数値解析および実験により明らかにしましたので、その結果について報告します。

## 2. 数値解析による補強効果の検討

図2に示す三次元の骨組みモデルによる時刻歴動的解析を実施しました。解析では、図2の中層梁の挿入位置と中層梁諸元をパラメータとして与えました。図3に、中層梁の挿入位置をパラメータとしたケース1、ケース2および中層梁を挿入しないケースでのC1柱天端の橋軸直角方向の時刻歴応答変位結果を示します。解析結果より、中層梁を追加することで変位を抑制する結果が得られました。また、ケース1とケース2の比較より、部分的な補強となるケース1であっても、変位抑制効果が得られることが確認できました。

図4に、C1柱の損傷レベル<sup>1)</sup>に着目した結果を示します。横軸は中層梁の曲げ耐力、縦軸は柱の損傷レベル3限界点に対する照査値（応答値/限界値）です。照査値が1.0を超えると部材の取り替えが必要となる損傷が発生することになります。解析結果より、中層梁の曲げ耐力の上昇に伴い照査値が減少していることが確認できます。このことから、本工法が中層梁の曲げ耐力によって柱の損傷を制御することが可能な工法であることがいえます。また、ケースの比較より、中層梁の追加箇所を増やすことで中層梁による柱の損傷抑制効果が増加することがいえます。

なお、本工法は、ブレース工法などの部材を追加する工法などと同様に、基礎の負担が大きくなると考えられます。そのため、本工法を用いる場合、基礎への影響を含めた検討を実施する必要があります。また、挿入する中層梁の位置を非対称とした場合に、ねじれが発生する可能性があるため、ねじりを考慮した照査を実施するか、ねじりが発生しないように対称配置とするなどの検討が必要となります<sup>2)</sup>。

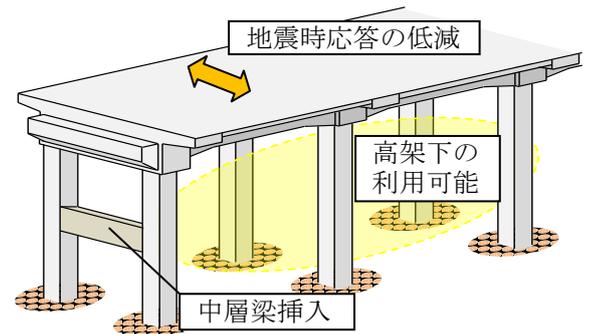


図1 中層梁挿入工法

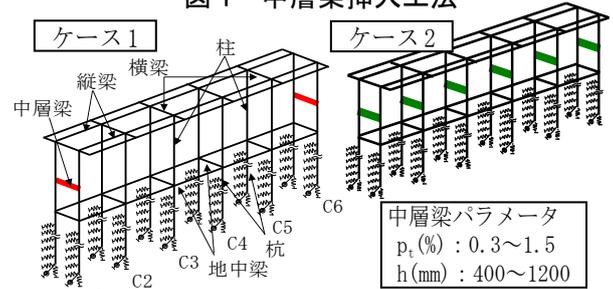


図2 解析モデル

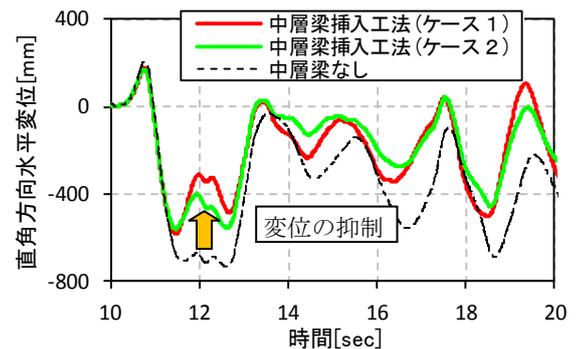


図3 時刻歴応答変位結果

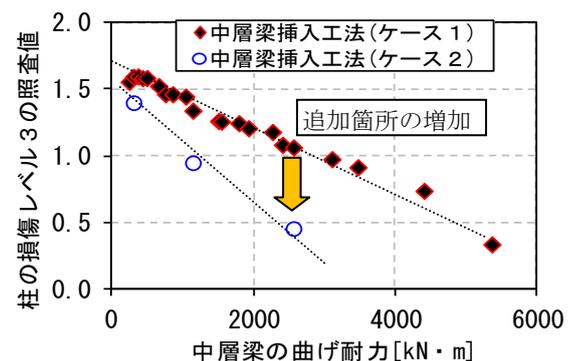


図4 柱の損傷レベルに与える影響

### 3. 中層梁の接合構造検討

取り替え可能な接合構造として、図5、6に示す鋼板とPC鋼棒を用いた構造を提案し、静的正負交番荷重試験を実施しました。提案した接合構造は、鋼板を介してPC鋼棒へのプレストレスによって柱と中層梁を一体化しています。鋼材の寸法およびPC鋼棒の径は、鋼板と柱間の浮き上がりやずれが発生しないこと、中層梁の曲げ破壊時においても全ての鋼材が降伏以内となるように設定しました。

図7に、正負交番荷重試験による水平荷重—水平変位関係を示します。実験結果より、水平変位11.0mm (=1 $\delta_y$ )で中層梁が降伏する結果となりました。その後、4 $\delta_y$ で最大荷重となり、中層梁の軸方向鉄筋の座屈に伴い荷重が低下し、最終的に7 $\delta_y$ まで荷重を行いました。荷重終了時まで、接合部の鋼板とPC鋼材および柱の鉄筋は降伏せず、主に中層梁のみが損傷する結果となり、鋼板の浮き上がりも発生しませんでした。

また、図7に中層梁の水平荷重—水平変位関係の計算結果を併記しました。実験結果と比較すると、最大荷重で実験値が計算値を上回ることを確認しました。また、損傷レベル3の限界変位（降伏荷重を下回らない最大水平変位）については、計算値では55mm、実験値は柱の変形分を考慮して57.2mmとなり、変形量についても実験値が上回り、実験値と計算値が良い整合を示す結果となりました。すなわち、本検討で提案した接合構造により、接合部を剛結とした構造とみなすことができると考えられます。

### 4. おわりに

高架下での制約条件がある場合であっても耐震補強が可能となる工法として、取り替え可能な中層梁を部分的に補強する工法を検討しました。検討の結果、中層梁を挿入することで構造物全体系の耐震性能が向上することを数値検討により確認しました。また、中層梁の取り付けにおいて、中層梁が損傷した場合に取り替えが可能な接合構造として、PC鋼棒と鋼板を用いた接合構造を提案しました。

### 参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），丸善，2012
- 2) 古屋卓稔，中田裕喜，田所敏弥，岡本大：中層梁を増設したRCラーメン高架橋の耐震性能に関する解析的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.2，pp871-876，2014.7

執筆者：構造物技術研究部 コンクリート構造研究室 古屋卓稔

担当者：構造物技術研究部 コンクリート構造研究室 岡本大，中田裕喜，田所敏弥

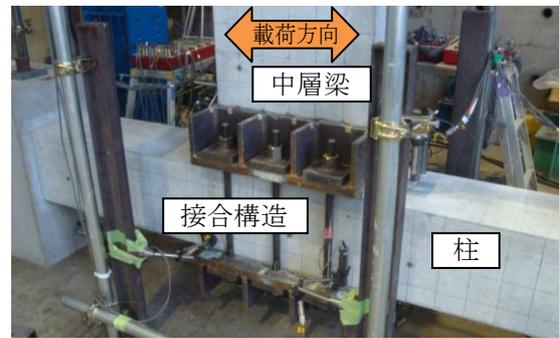


図5 中層梁の接合構造

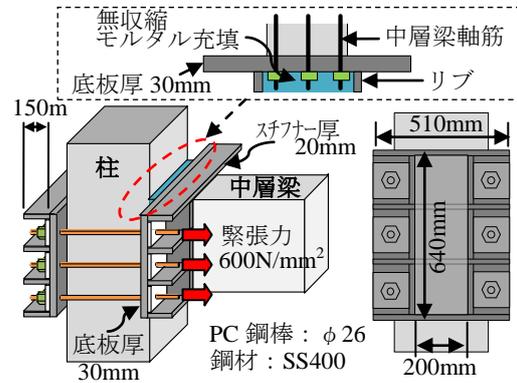


図6 接合構造詳細図

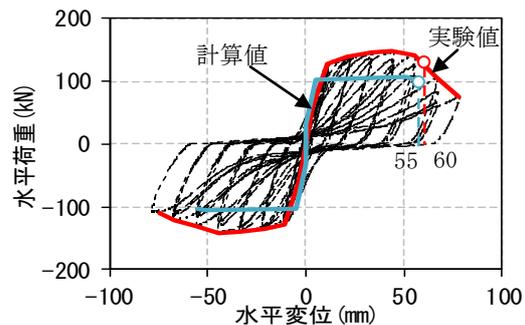


図7 水平荷重—水平変位関係

# 鉄道構造物等の3次元耐震性能照査プログラム

## DARS のバージョンアップのお知らせ

### 1. はじめに

現在、鉄道総研では、(株)構造計画研究所と共同開発した、3次元耐震性能照査プログラムとしてDARSを販売しています。DARSは鉄道RCラーメン高架橋等を3次元の骨組にモデル化し、設計地震動による構造物の応答値を算定するとともに、構造物の線路方向、線路直角方向の耐震性能の照査を行うことができるプログラムであり、不整形な形状に対応することも可能です(図1)。

今回、平成24年度9月に発刊された「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計<sup>1)</sup>」(以下、耐震標準)へ対応する等のバージョンアップをしましたのでお知らせします。

### 2. 耐震標準への主な対応

耐震標準では、一体化モデル(地盤と構造物の相互作用を考慮するモデルとして、自由地盤-構造物系を一体化したモデル)による地震応答解析が推奨されています。これに対応しました(図2)。それ以外にも、鉄筋コンクリート部材の復元力モデルに対応する等のバージョンアップを行いました。

### 3. それ以外の主な対応

鉄道総研では、「鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物)」に準拠した鉄筋コンクリート構造物性能照査支援プログラムVePP-RC/PRC等を別途作成しています。今回のバージョンアップ以降は、DARS内で行う性能照査を上記プログラムの最新バージョンにより行うようにしました。

### 4. おわりに

バージョンアップ版は3月20日にリリース予定です。また、本年2月に発刊された、「鉄道構造物等設計標準・同解説(鋼とコンクリートの複合構造物)」にも、今後対応する予定です。

### 参考文献

- 3) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)，丸善，2012  
 執筆者：構造物技術研究部 コンクリート構造研究室 大野又稔  
 担当者：構造物技術研究部 コンクリート構造研究室 仁平達也，古屋卓稔

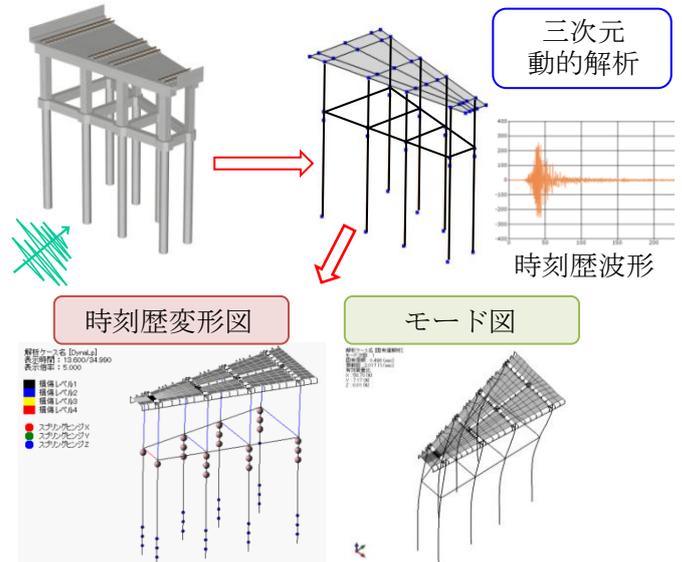


図1 DARSの概要

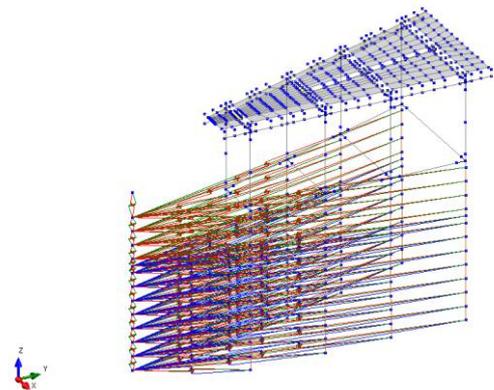


図2 3次元一体化モデルの例

編集委員会からのお知らせ:2014年度より施設研究ニュースのpdfデータを鉄道総研HPに掲載いたします。詳しくは、鉄道総研HPのトップページから【研究開発】⇒【研究ニュース】⇒【施設研究ニュース】([http://www.rtri.or.jp/rd/rd\\_news.html](http://www.rtri.or.jp/rd/rd_news.html))にアクセスしてください。

発行者：布川 修 【(公財)鉄道総合技術研究所 施設研究ニュース編集委員会 委員長】  
 編集者：谷本 早紀 【(公財)鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 気象防災】