

施設研究 ニュース

No. 312 2016. 8. 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

直結系軌道における外軌波状摩耗の発生要因の検討

1. はじめに

レールに発生する波状摩耗は、急曲線の内軌頭頂面に発生するタイプが広く知られておりますが、図1に示すような外軌のゲージコーナー（GC）部に発生するタイプもあります。この種の波状摩耗は、著大な輪重・横圧変動を引き起こすことがわかっており、進行すると締結装置の折損等にもつながります。

ここでは、現地でのレール凹凸測定に基づいた外軌波状摩耗の発生状況の分析結果と、シミュレーションによる外軌波状摩耗の発生要因の検討例を紹介します。



(a) 直結系軌道 (b) バラスト軌道

図1 外軌波状摩耗の例

2. 外軌波状摩耗の発生状況

図2に、ある通勤路線におけるレール凹凸の連続測定結果の一例を示します。この区間では、曲線中で軌道構造が防振まくらぎ直結軌道（RS軌道）から、コイルばね防振軌道（CS軌道）に切り替わっています。同図より、内軌では何れの軌道構造でも波状摩耗が発生していますが、外軌ではCS軌道のみで発生しており、かつGC部に近いほど振幅が大きくなっていることがわかります。なお、CS軌道とは、まくらぎがコンクリートスラブに直接埋め込まれており、それがコイルばねによって弾性支持されている防振軌道です。

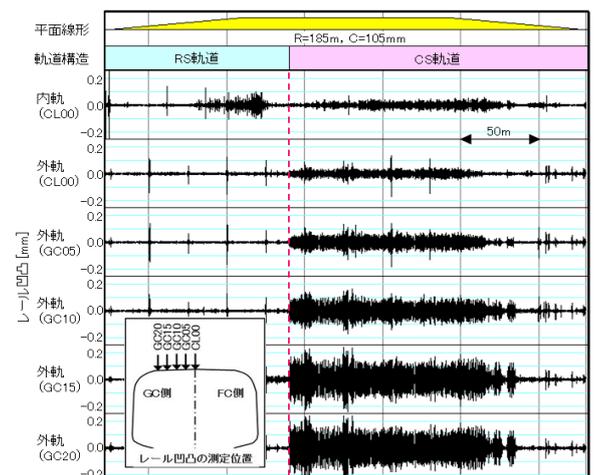


図2 レール凹凸の連続測定結果の一例

この他にも、複数の曲線で同種の測定を実施しており、その結果を表1に示します。同表より、外軌波状摩耗の発生には、軌道の支持剛性、特にまくらぎ直下の弾性の有無が影響している可能性が考えられます。

表1 波状摩耗の発生状況と軌道構造の関係

軌道構造	コイルばね防振軌道	PCまくらぎ直結軌道	防振まくらぎ直結軌道
まくらぎ直下の弾性	弾性無し	弾性無し	弾性あり
曲線半径	185 m	300~311 m	185~250 m
カント	105 mm	40~50 mm	105 mm
均衡速度	48 km/h	38~43 km/h	30~40 km/h
平均通過速度	40 km/h	60 km/h	45~55 km/h
発生状況	内軌	発生	発生
	外軌	発生	発生

3. 構築したシミュレーションモデルの概要

シミュレーションモデルは、汎用のマルチボディダイナミクス（MBD）ツール「SIMPACT」を用いて構築しました。図3に、構築したシミュレーションモデルの概要を示します。車両は一般的な在来線の通勤型車両を、軌道は軌道支持剛性の異なる2種類の直結系軌道（CS軌道、RS軌道）をモデル化しました。本シミュレーションモデルでは、車両モデルの各輪軸の直下に前述の軌道モデルが追従する「移動支持ばねモデル」を採用しており、これによって、支持剛性の異なる軌道とその上を走行する車両との間での動的相互作用の評価を可能としています。このモデルを用いて、軌道・車両間の動的相互作用をシミュレ

ーションすることにより、輪重・横圧変動と相関が高いとされる軸箱加速度を評価指標として、外軌波状摩耗の発生要因を分析することが可能です。また、軌道モデルを改良することによって、様々な軌道構造にも対応することができます。

4. シミュレーション結果の一例

まず、外軌はレール交換直後で顕著なレール凹凸が存在せず、内軌には振幅 0.2mm の波状摩耗が存在するケースを想定してシミュレーションを行いました。図 4 に、台車前軸の外軌側の軸箱加速度の PSD を示します。同図より、内軌に波状摩耗が存在する場合、RS 軌道、CS 軌道ともに、その波長に対応する 125Hz 付近に明確なピークが見られました。一方で、CS 軌道においては、125Hz のピークに加え、軸箱上下加速度の 60Hz 帯域に著しいピークが見られました。この結果は、営業線において外軌のみ交換した直後で内軌に波状摩耗が存在する状態で、営業車両で測定した軸箱加速度の発生状況と概ね一致していました。なお、内軌に波状摩耗が存在しない場合は、このような顕著な PSD の差は確認されませんでした。

次に、図 5 に、CS 軌道において、内軌凹凸の振幅を変化させた際の台車前軸の外軌側の軸箱上下加速度の PSD を示します。同図より、内軌凹凸を平滑化することによって、軸箱上下加速度に見られた 60Hz 帯域のピークが低減し、振幅 0.05mm ではこのピークはほぼ消滅しました。

以上のシミュレーション結果から、外軌波状摩耗は、まくらぎ直下に弾性が付与されていない軌道構造において、内軌にある程度の振幅の波状摩耗が存在する際に励起される 60Hz 帯域の輪重変動によって発生している可能性が高いことがわかりました。

5. まとめ

現地でのレール凹凸測定結果から、外軌波状摩耗の発生には軌道の支持剛性、特にまくらぎ直下の弾性の有無が影響している可能性を明らかにしました。また、それを検証するために、MBD に基づくシミュレーションモデルを構築しました。本シミュレーションモデルで得られる結果は、営業車両で観測された軸箱加速度の傾向と概ね一致しており、内軌にある程度の振幅の波状摩耗が存在する際に励起される 60Hz 帯域の輪重変動によって外軌波状摩耗が発生している可能性が高いことを確認しました。今後は、本シミュレーションモデルを活用し、外軌波状摩耗の抑制に効果的な軌道構造や管理手法等について検討を進めていく予定です。

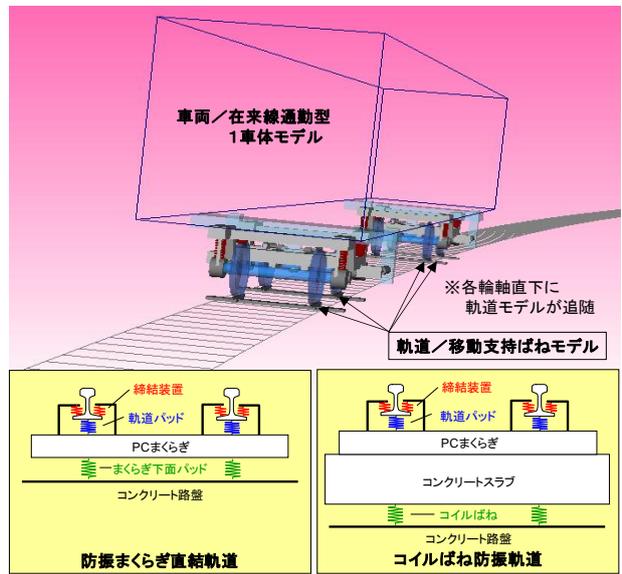
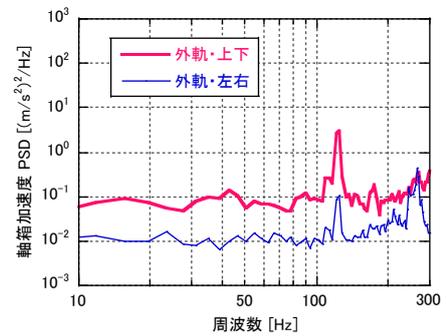
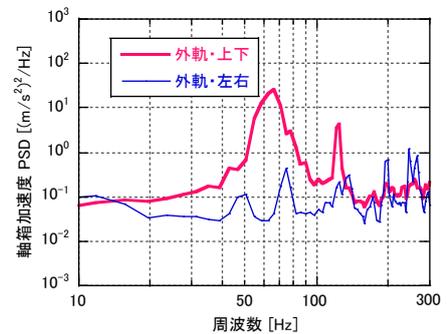


図 3 構築したシミュレーションモデルの概要



(a) RS 軌道



(b) CS 軌道

図 4 内軌に波状摩耗がある場合の軸箱加速度の PSD

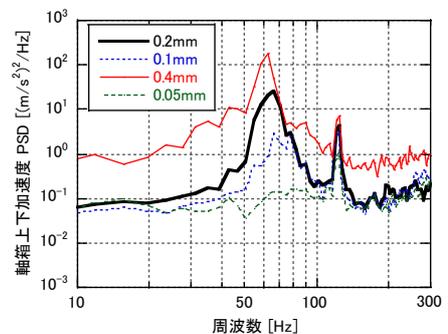


図 5 内軌凹凸の振幅が軸箱上下加速度の PSD に与える影響

執筆者：軌道技術研究部 軌道管理研究室 田中博文
 担当者：軌道技術研究部 軌道構造研究室 細田 充

鉄道沿線における地盤振動の予測手法

1. はじめに

新線の建設や既設線における軌道の大規模改良、新車両の導入の際に、鉄道沿線における振動が変化する場合があります。そのため、鉄道沿線の環境を維持する目的で事前に予測をすることがあります。ここでは参考文献¹⁾の内容を整理し直し加筆した形で、列車走行により沿線に生じる振動(以下、鉄道振動という)の主な予測手法を紹介します。

2. 鉄道振動の予測手法の種類

鉄道振動は列車走行によりレールに与えられる起振力が構造物、地盤を伝わり沿線の建物などを振動させる現象です(図1)。沿線における鉄道振動を事前に予測するためには、“車両がレールに与える起振力”、“構造物の振動特性”、“地盤の伝播特性”をそれぞれ求める必要があります。また、実務における鉄道振動の予測では、構造物直近における地盤の振動を“車両がレールに与える起振力”と“構造物の振動特性”を合わせたもの(以下、“地盤への入力振動”という)として考える場合が多いです。したがって、ここでは“地盤への入力振動”と“地盤の伝播特性”の求め方などにに基づき、予測手法を大きく4つに分類して紹介します(表1)。

1つ目の「過去の統計データ等に基づく予測方法」は、振動レベルと各種影響要因(車両、軌道、構造物、地盤条件等)の関係を統計式等にまとめ、それを利用

する方法です(表1中の1.)。この方法では、大量の測定データを用いて統計式等を作成することが多く“地盤への入力振動”や“地盤の伝播特性”はその統計式に項として取り入れます。代表例として帝都高速度交通営団(現東京地下鉄)によるトンネル上の地表面の振動レベル予測式があります。2つ目の「類似箇所の測定結果に基づく予測方法」は主に2つの方法があります(表1中の2.)。1つは、車両の種類

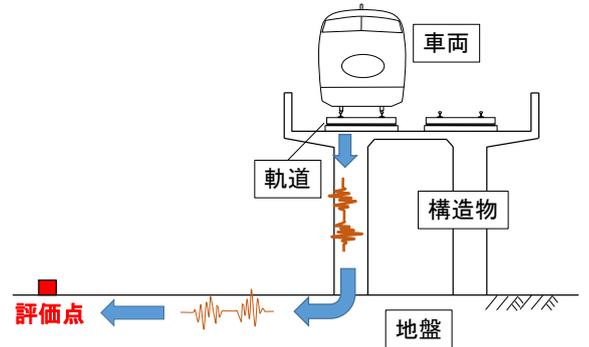


図1 鉄道振動の伝播経路

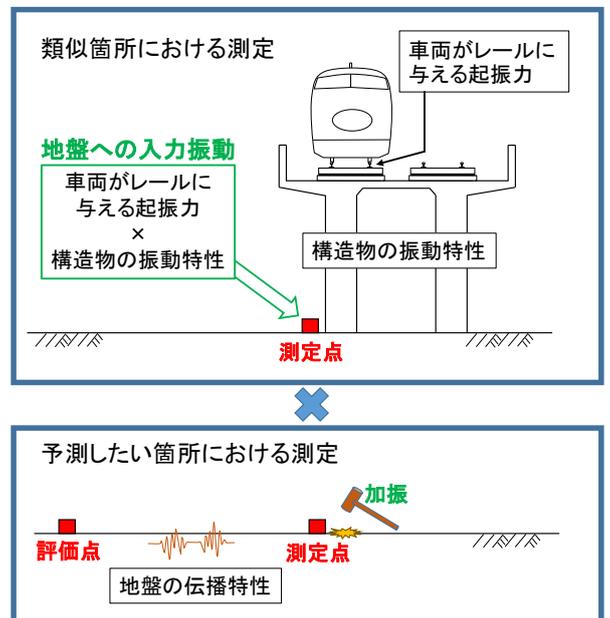


図2 表1中の2-2の手法の測定方法

表1 鉄道振動予測の種類と各要素の求め方

鉄道振動の予測手法	地盤への入力振動の求め方	地盤伝達特性の求め方	
1. 過去の統計データ等に基づく予測方法	統計式	統計式	
2. 類似箇所の測定結果に基づく予測方法	2-1 類似箇所の測定結果をそのまま使用		
	2-2 類似箇所と現地の測定の組み合わせ	類似箇所の測定	予測箇所での測定
3. 測定結果と解析などの組み合わせによる予測方法	3-1 測定と距離減衰式の組み合わせ	類似箇所の測定	距離減衰式(理論式)
	3-2 等価起振力法	類似箇所の測定+数値シミュレーション	
4. 解析のみによる予測方法	数値シミュレーション	数値シミュレーション	

や速度、構造物、地盤が予測したい場所と類似している場合に、その類似箇所の測定結果をそのまま予測値とする方法です(表1中の2-1)。

この方法は一見簡単そうに思えますが、どの程度類似していれば類似箇所と考えてよいかの基準が無いため、類似箇所の選定が難しいという問題があります。また、予測したい箇所と地盤条件のみ異なる場合には、類似する箇所での構造物直近の測定データを“地盤への入力振動”とし、予測したい箇所で求めた“地盤の伝播特性”と掛け合わせることで予測する方法もあります(表1中の2-2, 図2)。

3つ目の「測定結果と解析などの組み合わせによる予測方法」にも主に2つの方法があります(表1中の3.)。1つは、“地盤への入力振動”に類似箇所の測定結果を、“地盤の伝達特性”に距離減衰式を用いる方法です(表1中の3-1)。もう1つは、類似箇所の測定結果と数値シミュレーションの結果を組み合わせた等価起振法で、地盤の地下構造が複雑であり単純な距離減衰式の適用が困難な場合に有効です(表1中の3-2)。

ここまで説明してきた方法は類似箇所の測定結果を使用するため、路線の延伸等には有効ですが、新しい車両や軌道が鉄道振動へ与える影響評価や鉄道振動対策工の評価など、類似した条件の箇所がない場合には適用が困難です。そこで、4つ目の「解析のみによる予測方法」が研究されています(表1中の4.)。この方法は、車両・軌道・構造物・地盤・沿線の建物のモデルを作成し数値シミュレーションをおこなう方法で、鉄道総研をはじめさまざまな機関で研究がおこなわれています。しかし、走行車両から沿線の建物までを一体としておこなう数値シミュレーションは計算量が膨大なため、現状では実務的でないと考えられます。そこで、鉄道総研では現在“走行車両と軌道・構造物の連成振動解析”と“構造物・地盤・建物の3次元振動解析”の2つにわけ、鉄道振動を予測する方法の開発をおこなっています(図3)。

3. おわりに

本記事では鉄道沿線における地盤振動の予測方法について、実務で用いられている方法から鉄道総研で研究をおこなっている最新の方法までの概略を紹介しました。鉄道総研では、今後もこれらの方法を用いた鉄道振動予測・対策に関する研究開発を進めていきたいと考えています。

参考文献

1) 社団法人日本騒音制御工学会編：地域の環境振動, pp.128-143, 技報堂出版, 2001.

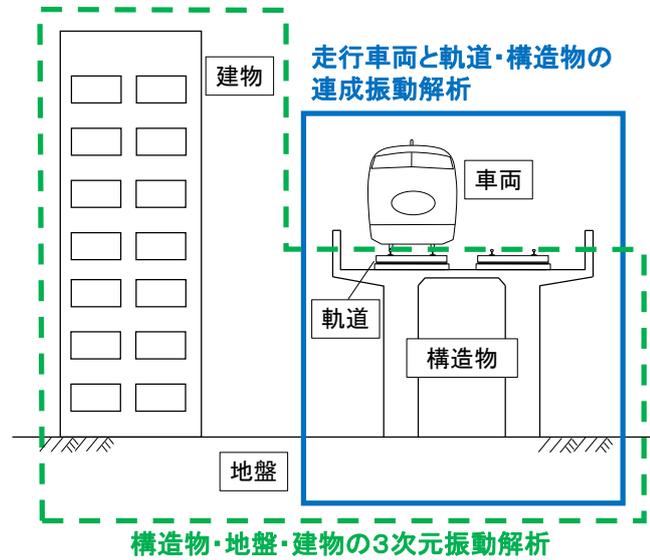


図3 表1中の4.の手法の予測方法の構成

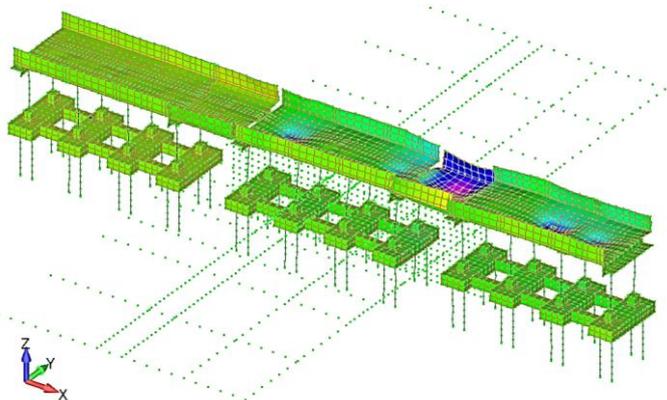


図4 表1中の4.の手法による解析結果例
(変形を5千倍に拡大して表示)

執筆者：防災技術研究部 地質研究室 野寄真徳
担当者：防災技術研究部 地質研究室 横山秀史

構造物診断用非接触振動測定システム

「UドップラーⅡ」

1. はじめに

これまで鉄道総研では、橋りょうや高架橋などの検査を目的とした振動測定作業の効率化・安全化を目指して、構造物診断用非接触振動測定システム「Uドップラー」を開発し、技術の普及を図ってきました。この度、従来のUドップラーⅠに様々な改良を施し、新システムである「UドップラーⅡ」を開発、製品化しましたので、同システムの主な仕様と改良点などを紹介します。

2. Uドップラーとその適用対象

Uドップラーはレーザのドップラー効果を利用して遠隔位置から構造物などの振動を測定できるシステムで、構造物振動測定作業において多大な労力を要する高所や線路近接箇所へのセンサ類の設置・撤去を省略することができます。また、屋外で長距離の非接触測定を実施する場合、風や地盤振動によって非接触センサ自身に揺れが生じて測定精度が低下しますが、Uドップラーはこの自己振動の影響を補正する機能を有しており、屋外環境においても常時微動レベルの微小な振動を非接触で検出できます。2007年に開発・製品化したUドップラーⅠ（図1）は、既に鉄道事業者や大学等研究機関などに導入され、橋桁の動的たわみ測定、高架橋や橋脚の固有振動数推定、防音壁や電車線柱等付帯構造の調査、岩盤斜面の落石危険度評価などに活用されています（図2）。



図1 UドップラーⅠ

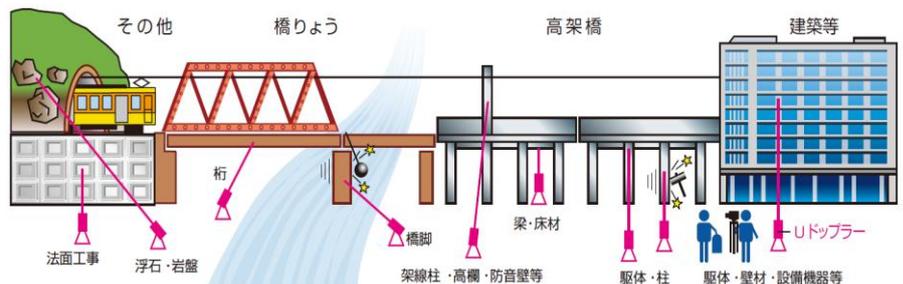


図2 Uドップラーの適用対象

3. 新型システム「UドップラーⅡ」

従来製品の操作性を極力踏襲しつつ、小型軽量化、ワイドレンジ化、無線通信化、自動測定化、ノンターゲット計測距離の長距離化などの改良を施した新システム「UドップラーⅡ」を開発しました。図3にUドップラーⅡのセンサ部を、表1に主な仕様を示します。



図3 UドップラーⅡセンサ

表1 UドップラーⅡの仕様

・寸法	: 102mm×146mm×350mm (突起部含む)
・重量	: センサ部: 3.9kg, バッテリ: 2.7kg, PC: 1.2kg
・電源	: 専用バッテリー駆動 (DC12V, 約10時間)
・レーザ	: He-Neレーザ、波長633nm, クラス2
・速度レンジ	: 0.2μm/s~500mm/s (3レンジ切り替え)
・周波数帯域	: DC~2kHz (補正センサ: DC~1kHz)
・通信方法	: 有線 (USBシリアル), 無線 (WiFi)
・測定距離	: 0.1m~100m (対象の表面状態による)

4. 主な改良点

(1) 小型軽量化

UドップラーⅡでは、小型化したセンサ部にプログラム可能な集積回路 (FPGA) を搭載し、LDV, 補正センサ, GPS の計測データに各種演算を加え、デジタル化, パケット化してレコーダ (ノート PC)

に送信できるよう工夫しました（図4）. この改良により装置構成がシンプルになり、収納ケースも含めた運搬時の重量が従来の約1/3になりました（図5）.

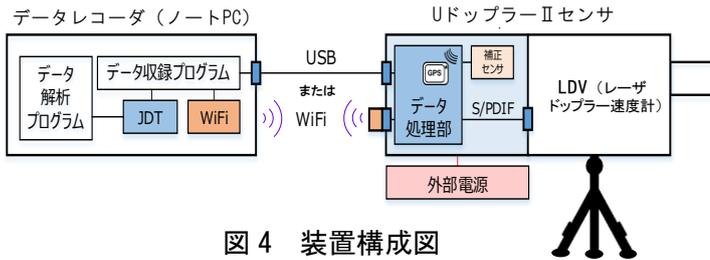


図4 装置構成図



図5 小型軽量化

(2) ワイドレンジ化

従来製品に対して、振幅5倍、周波数4倍のワイドレンジ化を行いました。列車との共振により過大な振動が発生する橋りょうや架線柱などの変形しやすい対象の測定、設備機器やハンマー加振による材料劣化の診断などへの適用性を高めました。

(3) 無線通信化

センサとレコーダ間のデータ送金の無線通信化（図6）によって、センサの取り回しの自由度を高めました。作業効率が向上するとともに、接続ケーブルに由来する振動・電気ノイズも低減できました。

(4) 自動測定化

列車通過時の構造物振動を自動測定できる機能を追加しました。測定対象の振動が事前に設定した閾値を上回ると自動的にデータ収録を開始します。閾値を超える直前のデータも記録できます（図7）。



図6 システムの無線通信化



図7 収録プログラム画面と自動測定機能の説明

(5) ノンターゲット計測距離の長距離化

U ドップラー II では、測定対象に反射材を設置すれば従来同様 100m 超の計測距離を確保できます。また、測定対象に反射材を設置しないノンターゲット計測距離も長距離化できました。

5. おわりに

新型の非接触振動測定システム「U ドップラー II」を紹介しました。今後は、U ドップラー II および同システムを用いた非接触振動測定による構造物検査技術の普及に積極的に取り組みますので、試験現場の提供、適用可能な検査対象の提案などのご協力を賜れば幸いです。

執筆者：鉄道力学研究部 構造力学研究室 上半文昭

担当者：鉄道力学研究部 構造力学研究室 後藤恵一，箕浦慎太郎，松岡弘大

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)にアクセスしてください。

発行者：寺下 善弘 【(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：清水 克将 【(公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 建築】