高架下環境を快適にする新高架形式の開発

小林　薫*　　杉崎　向秀*

本報告は、高架下環境を従来構造よりも高めた新しい高架形式に関するものである。振動低減型の高架構造として、柱・梁接合部に弾性体を挿入し、梁から柱に伝播する振動を低減する方式を考えた。本接合構造は、柱を嵌合することによって、従来高架構造と同様な耐荷性能を発揮させることが可能である。本開発では、低振動効果の確認を列車走行解析から行い、従来構造と比べて、30～60Hz帯の振動加速度レベルを20～25dB程度低減可能となることを確認した。耐震性能に関しては嵌合接合した柱試験体、門形試験体の交番載荷実験、構造モデルの構築、地震応答解析を行い、上層位置の応答変位は従来構造よりも増加するものの柱の損傷を低減する効果を有す構造であることも確認した。

●キーワード：低振動、嵌合接合構造、交番載荷実験、地震応答解析

1. はじめに

図1は、振動や静粛性などを指標として、空間の利用形態を表したものである。列車走行時に生じる振動が抑えられ静粛性が向上すると、ホテルや住宅など、よりグレードの高い使い方が可能となる。一方、列車走行時の振動や静粛性が劣る空間では、駐車場、駐輪場、倉庫等に限定した使い方となっている。高架下空間をより高度に活用するためには、列車走行時の振動や騒音を低減し、より良質の空間とする必要がある。

本開発では、上記の背景をもとに、列車走行時の高架下環境を快適にする新しい高架形式について検討を行ったものである。

鉄道の高架構造としては、RC構造のビームスラブ形式のラーメン高架橋が多く用いられている。ラーメン高架橋は、柱・梁の接合が剛結構造となっており、列車走行時の振動はスラブ・梁・柱を伝播する。この振動の伝播が、高架下環境を悪化させる原因となっている。そこで、列車走行時の振動が、高架下へ伝播するのをできるだけ低減するため、柱・梁接合部に弾性体を挿入する接合構造を考案し、その接合構造を用いた高架橋について検討を行った。

本接合構造を用いた高架橋の開発では、列車走行時の振動加速度レベル低減効果について列車走行時の構造物挙動シミュレーション解析から検討を行った。また、本高架橋には、所要の耐震性能も要求される。これに関しては、模型試験体による交番載荷実験、実高架橋をモデルにした地震時の応答性状から検討を行った。

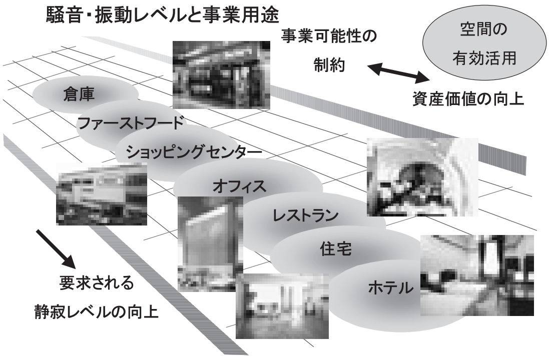


図1　振動・静寂レベルによる空間の利用形態

本文では、高架下環境を快適にする新しい高架形式の検討概要を報告する。

2. 弾性体を挿入した柱・梁接合構造の概要

列車走行時の高架下環境を快適にするためには、列車走行時に生じる振動を高架下にできるだけ伝播させないようにする必要がある。これを実現するために、柱と梁、柱と基礎の接合部にゴムなどの弾性体を挿入し、振動の伝播をできるだけ低減する構造を考案した。図2に、柱・梁接合部に弾性体を挿入し、柱を嵌合した接合構造の概要を示す。本接合構造は、梁あるいはフーチングに柱を嵌合させるための箱抜きを施工しておき、その中に柱を所定の長さ嵌め

* JR東日本研究開発センター　フロンティアサービス研究所

込む構造となっている。柱上下端部には、列車走行時の振動レベルを低減するための弾性体を配置し、嵌合内での柱側面にも必要に応じて弾性体を配置する。柱側面の弾性体は、列車走行時の振動低減への寄与度は小さいと考えられる。しかしながら、構造物の耐震性能を考えた場合、柱側面に弾性体を配置しバネ定数を任意に設定することによって、構造物の固有周期の調節が可能で、地震時の応答制御にも適用できる可能性がある。このことから、本検討では柱側面に弾性体を考慮することを基本とした。

3. 列車走行解析による振動発生性状の検討

3.1 解析方法の概要

図3に、解析手法の概要を示す。列車走行解析では、走行車両を表現する力学モデルと構造物を表現する力学モデルで構成され、それぞれをサブストラクチャーと定義する。両力学モデルは、解析スタートからの時間で結合節点が定義され、ある時刻t時における変形・力がそれぞれの力学モデルに伝達され、それぞれの力学モデルが変形・力の適合条件を満足するように逐次計算を行うものである。

列車走行は、両力学モデルを結びつける結合節点が解析開始から時事刻々と変化することで、列車が設定スピードで走行した現象を再現する。

3.2 列車走行解析の概要

(1) 力学モデルの概要

(a) 走行車両

走行車両の力学モデル(以下「列車モデル」という)は、標準活荷重のひとつであるM荷重と同じ軸配置になるように設定した。M荷重は、電車または内燃動車の荷重における標準列車荷重をモデル化したものである。図4に、列車モデルのイメージを示す。

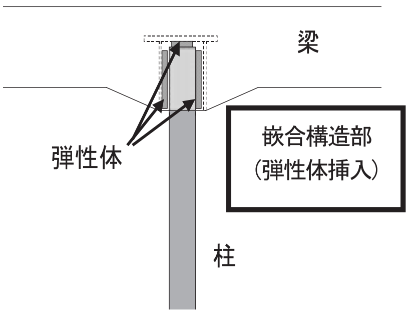


図2 嵌合接合構造の概要(柱上端部での例)

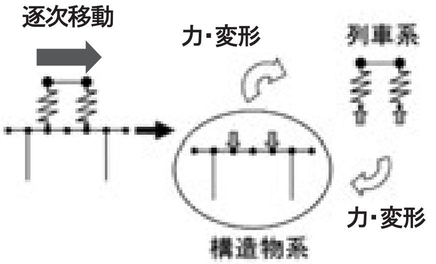


図3 列車走行解析の概要

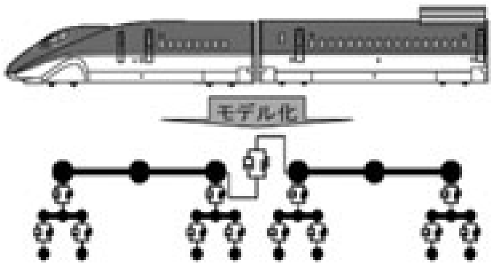


図4 列車モデルのイメージ

列車モデルは、走行車両と同数の車両を連結して設定した。列車モデルには、車体と台車そして車軸をモデル化した節点および梁要素と、車体～台車間、台車～車軸間の振動特性と減衰特性を表現するためにバネ要素、ダンパー要素を配置した。また、各車両間は上下方向のバネ要素、ダンパー要素で結び、車両間の連結条件も考慮した。

(b) 構造物

解析対象とした高架橋の一般図を図5に示す。解析対象に設定した高架橋は、起点側、終点側ともにゲルバー桁による接続形式とした。柱間隔は10mを標準とし、線路方向7径間、フ

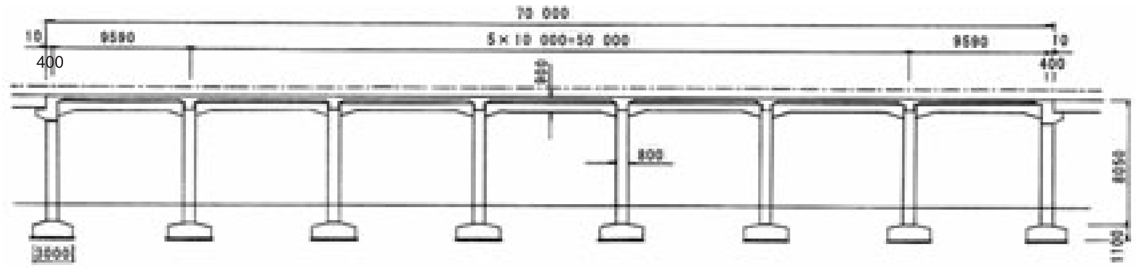


図5 解析対象とした高架橋の一般形状

ーチング上端からスラブ上端までの高さが約8.0mである。

構造物の力学モデル(以下「構造モデル」という)としては、高架橋の柱・梁部材を線材に置換したモデルとした。構造モデルでは、柱・梁接合部に弾性体の力学挙動を表現するバネ要素を挿入することで嵌合接合部をモデル化した。構造モデルの各節点には、各部材の固定死荷重、上層梁では軌道などの付加死荷重の質量を節点数で等分した値を設定した。

(2) 解析パラメータ

列車走行時に高架橋柱の振動性状に影響を及ぼすと考えられるパラメータは、高架橋の柱間隔、柱・梁接合部に配置する弾性体のバネ定数、列車走行速度などである。このため、これらパラメータを変化させて検討を行うことにした。表1に、解析パラメータの概要を示す。

4. 列車走行解析による振動発生性状の検討結果

(1) 柱上下端のバネ定数を変化させた場合

柱上下端に挿入した弾性体のバネ定数の影響として、高架橋柱上端の振動加速度レベルに着目して検討を行った。本検討では、列車の走行速度を60km/hに一定とし、弾性体のバネ定数を変化させて解析を行った。図6に、柱上端部の振動加速度レベルを示す。

図6は、振動加速度レベルを列車走行解析から得られる柱上端位置の振動加速度を式(1)から算出し、従来形式の高架橋の接合状態(「剛結」と表示)と新形式高架橋で柱上下端のバネ定数を3kN/mm、30kN/mm、300kN/mmを代表例として整理した結果を示したものである。

バネ定数による柱上端の振動加速度レベルは、バネ定数3kN/mmの場合に10Hz以下の低振動数領域で80dBを超える振動加速度レベルの発生が確認された。従来形式の高架橋で振動加速度レベルが卓越する31.5Hz前後で比較を行うと30kN/mm程度のバネ定数を有する弾性体を柱接合部に挿入することで20~25dB程度振動加速度レベルが低減される結果となった。

$$Lv=20Log(a/a_0) \quad (1)$$

ここに、Lv:振動加速度レベル(dB)

a :振動感覚補正を行った振動加速度の実効値

a_0:加速度基準値($10^{-5}m/s^2$)

(2) 列車走行速度の影響

図7に、柱上下端の弾性体バネ定数を60kN/mmと一定にし、列車の走行速度を40、80、120、160km/hに変化した場合の検討結果を示す。

柱上端位置での振動加速度レベルは、列車の走行速度が速くなると大きくなる傾向を示すが、80km/h以上の走行速度では振動加速度レベルに顕著な差が見られなかった。

表1 列車走行解析での解析パラメータの概要

解析ケース
①スパン:10m, 15m→2種類
②柱上下バネ定数:k=3~5000kN/mm, 剛結→26種類
③速度:V=30~160km/h→6種類
④走行列車:軸配置M荷重(E3の列車モデル)→1種類
⑤全解析数:220ケース

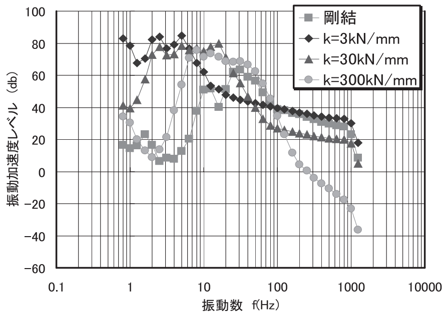


図6 柱上端バネ定数と振動加速度レベルの関係
(柱間隔10mの高架橋の場合)

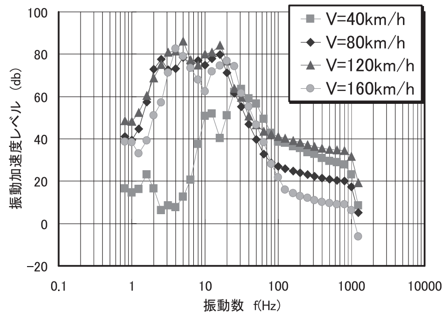


図7 列車速度と振動加速度レベルの関係

5. 模型試験体による交番載荷実験の概要[1)2)]

列車走行時の振動低減のため、柱・梁の結合を一体化しないで弾性体を挿入することは、従来の高架構造と大きく相違する。本高架構造には、振動低減となる性能とともに、耐震に対する性能も要求される。耐震性能の検証を行うためには、本高架構造の変形挙動を把握する必要がある。このため、本接合構造を用いた柱試験体、門形試験体による交番載荷実験を行った。以下に、門形試験体による交番載荷実験の概要を述べる。

5.1 門形試験体による交番載荷実験の概要[2)]

(1) 試験体概要

図8に、実験に用いた試験体形状の一例を示す。試験体形状は、実高架橋の1径間分を取出した門形形式（以下「門形試験体」という）とした。門形試験体では、柱を2本配置し、柱間に梁を渡した。

門形試験体は、柱、梁、フーチングの各部材をそれぞれ個別に製作し、組立て用架台を用いて組み立てた。試験体の組立ては、柱の両端に所定の弾性体を貼付け、クレーンを使ってフーチングの嵌合部に柱を落し込んだ。所定位置に各部材がセットされたあとに嵌合接合部の空隙の充填作業を行った。空隙の充填は、高強度のグラウト材を用いた。

(2) 実験概要

試験体への荷重載荷は、載荷用水平アクチュエータの載荷板を梁の両端に高強度のPC鋼材で挟み込んで取付けた。その後、静的に水平交番載荷を行った。載荷ステップは、試験体の柱の軸方向鉄筋が降伏する変位を1δ_yとし、それを基準変位として、1δ_yの整数倍の水平変位を順次漸増させた交番載荷を行った。

(3) 実験結果の概要

門形試験体の交番載荷実験結果として、載荷点における荷重-変位曲線を図9に示す。なお、図9には、後述する解析結果も併記している。

柱に発生したひび割れの状況は、従来形の高架橋柱と同様になることを確認した。柱側面に配置した弾性体は、圧縮を受ける面で大きく圧縮変形するのが確認されたが、ずれや脱落などはなかった。

6. 振動低減型高架橋の耐震性能に関する検討

本高架橋では、要求される耐震性能も満足する必要がある。耐震性能に対する検討を行うためには、本構造の変形挙動を的確に表現可能な構造モデルを構築することが必要となる。

構築した構造モデルに関しては、門型試験体による交番載荷結果からの検討、および精度の検証を行った。さらに、構築した構造モデルを実構造物レベルに拡張し、実高架橋の大規模地震に対する解析から本高架橋の地震時挙動に関する検討を行った。以下に、検討概要を述べる。

6.1 門形試験体の試験結果に基づく検討

本接合部に用いた構造モデルは、剛な接合部に柱部材をはめ込み、その周辺に弾性体を表現するバネ要素を配置した。図10に、嵌合接合部の構造モデルの概要を示す。考慮したバネ要素の構成は、柱軸方向の端部に鉛直バネと回転バネを、柱側面には水平バネをそれぞれ配置した。図11に、門形試験体の解析モデルを示す。解析は、交番載荷実験時の載荷ステップと一致させて行った。解析結果を図9に示す。荷重変位関係に関しては、実験結果と解析結果は比較的精度よく一致した。

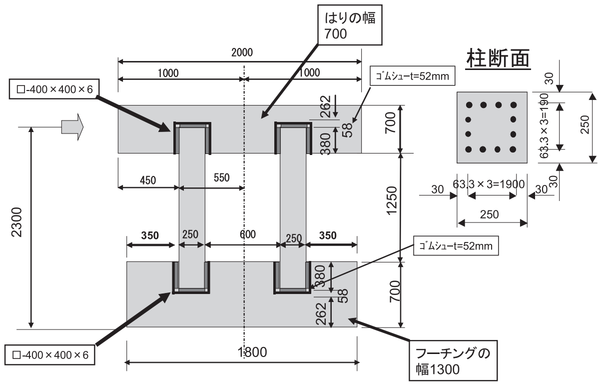


図8 門形試験体の形状

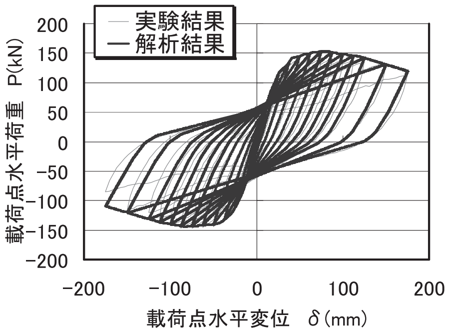


図9 門形試験体の荷重変位曲線

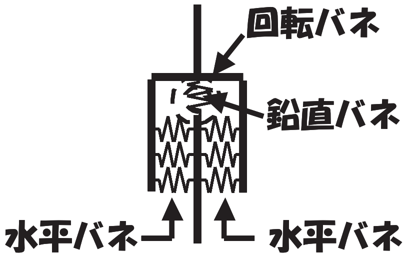


図10 嵌合接合部の構造モデル概要

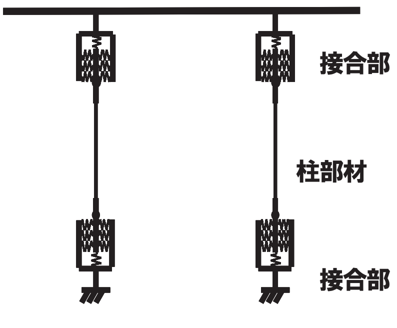
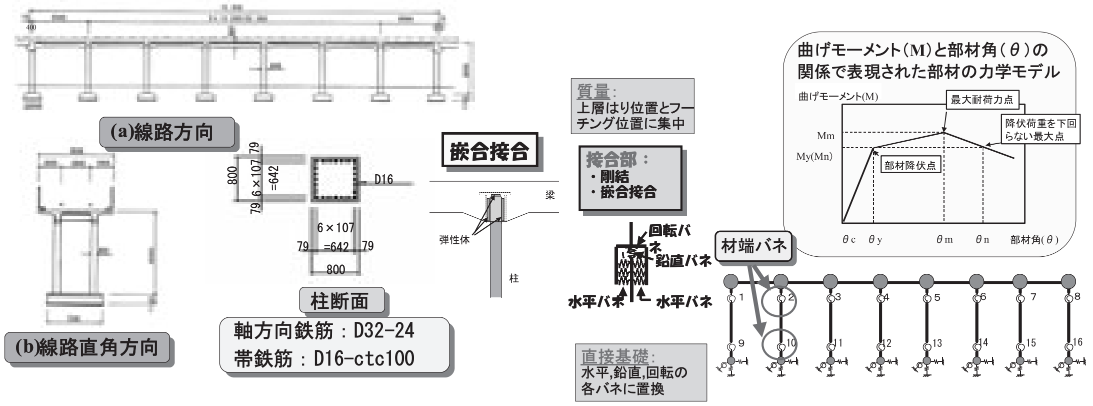


図11 門形試験体の解析モデル概要



(a)高架橋の構造概要　　(b)構造解析モデル

図12　解析対象高架橋と解析モデル

6.2　実高架橋を想定した地震時挙動の検討

(1)　解析対象高架橋の構造概要

解析は、柱間隔10m、線路方向7径間、高さが約8.0mの高架橋を想定して行った。図12(a)(b)に、解析対象高架橋の構造概要と解析モデルを示す。柱の接合部には弾性体を考慮する嵌合接合構造となっている。なお、検討は、本高架橋との比較を行うため同じ構造諸元で柱の接合構造が剛結構造である従来高架橋についても行った。解析に用いた地震波は、現行耐震基準[3]で規定されている地震波とした。

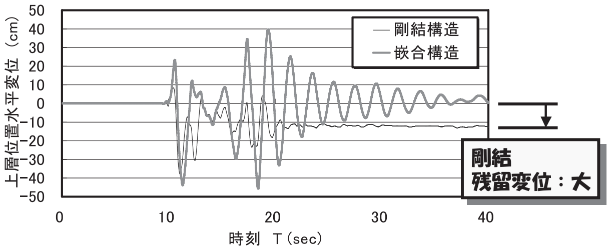
(2)　解析結果の概要

従来高架橋は「剛結構造」、振動低減型高架橋は「嵌合構造」とし、解析結果の一例を図13(a)(b)に示す。なお、図13(a)は、上層位置の変位波形を、図13(b)は柱に生じる曲げモーメントと部材回転角の応答結果を示す。X軸の柱の部材回転角は柱の変形の度合いを表していて、数値が大きくなるほどより変形が大きいことを意味している。

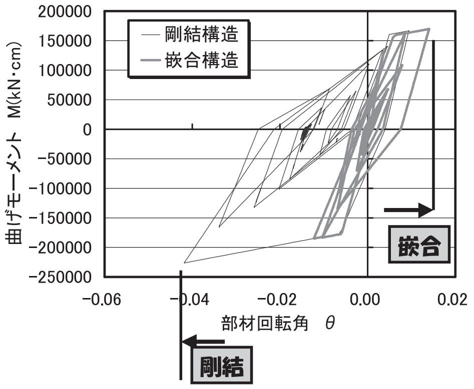
上層位置での水平方向の変位量は、柱接合部の弾性体によって従来高架橋よりも水平方向の剛性が低下するため水平変位が大きくなる傾向を示す。しかしながら、地震が終了した時点の残留変位量は、従来高架橋よりも小さくなる傾向となった。この理由は、上層位置の水平変位には弾性体の変形分も加算されており、柱自体の塑性変形は従来高架橋の柱よりも小さくなるためと考えられる。

7.　おわりに

列車走行時の高架下環境を快適にする新しい高架形式の検討概要を報告した。今後は、設計法の提案に向けてさらに検討を深めていきたいと考えている。



(a)上層位置の応答変位



(b)柱部材の変形性状(M－θ履歴)

図13　解析結果の一例

参考文献

1)　小林薫、竹市八重子：嵌合接合に弾性体を挿入した柱構造の変形挙動に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集Vol.27、No2、pp301-306、2005.7

2)　小林薫、杉崎向秀：柱・梁嵌合弾性接合ラーメン構造の交番載荷実験、土木学会第60回年次学術講演会、pp917-918、2005.9

3)　(財) 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、pp68、68、1999.10