

論文 柱を嵌合接合とした高架構造の地震時応答性状に関する基礎研究

小林 薫^{*1}・鈴木 雄大^{*2}

要旨：柱を嵌合接合し、柱周辺部に弾性体を配置する嵌合接合構造を用いた高架構造は、高架下建物等への列車走行時の振動伝播低減に一定の効果を有する。本接合構造を用いた高架構造は、地震時の変形挙動として、柱部材の変形とともに接合部内の弾性体の変形に伴う柱の剛体変位も生じるため、柱剛結とした高架構造と比較すると、柱部材の変形を抑制するとともに、弾性体の諸元を適切に設定することによって損傷低減も可能になると思われる。本研究では、本接合構造に用いる弾性体のバネ定数や履歴特性を変化させた地震応答解析から、本高架構造の地震時応答性状について検討を行ったものである。

キーワード：地震応答, 高架構造, 嵌合接合, 損傷レベル

1. はじめに

都市部では、高架下を店舗や事務所で用いている場合が多い。このような個所では、列車走行に伴う高架下建物の騒音や振動をできるだけ低く抑え、高架下環境を良好な状態にすることが望まれている。このような要求に対して、筆者らは、柱・梁接合部に弾性体を配置する嵌合接合構造の高架構造の検討^{1)~3)}を行ってきた。

本接合構造を用いた高架構造は、地震時の変形特性として、柱部材の変形とともに、嵌合接合部内の弾性体の変形に伴う柱部材の剛体変位も生じる。このことから、通常の剛結構造の高架構造と同じ応答変位の場合、本接合構造の高架構造では、柱部材自体の変形が抑制され、剛結構造より損傷を軽減でき可能性がある。また、柱部材において、剛結構造と同じ損傷レベルまで応答を許容するとした場合、剛結構造と同一の構造諸元であっても、さらに大きな入力地震動に耐えることが可能な高耐震性能高架構造を実現できる可能性もある。

以上から、本研究では、嵌合接合構造に用いる弾性体の履歴性状に着目し、履歴性状の違いが本高架構造の地震時応答性状に与える影響について基礎的な検討を行った。本検討では、嵌合接合構造に用いる弾性体の履歴特性やバネ定数を変化させた震応答解析を行った。さらに、基準とした入力地震動の振幅を1.0~1.3倍大きくし、本接合構造を有する高架構造の柱部材の損傷レベルについても検討を行った。

2. 弾性体を挿入した嵌合接合構造の概要

図-1に、柱・梁接合部における弾性体を挿入した嵌合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込む嵌合構造となっている。

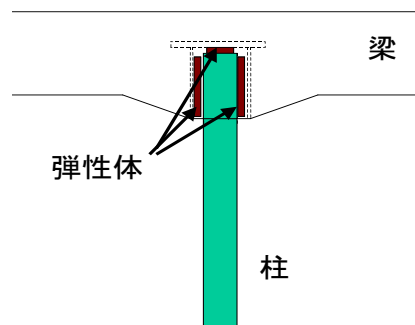


図-1 嵌合接合構造の概要
(柱上端部での例)

柱上下端部には、列車走行時の振動伝播を低減するための弾性体を配置する。嵌合内での柱周面の弾性体は、列車走行時の振動低減に直接寄与しないが、弾性体のバネ定数や履歴性状を適切にすることによって高架構造の固有周期の調節や地震時の応答特性を制御できる可能性がある。

3. 検討対象高架構造の概要

(1) 高架構造の構造諸元

本検討において、検討対象とした高架構造の一般形状を図-2に示す。本高架構造は、起点側、終点側ともにゲルバー桁による接続形式を想定した。柱間隔は10mを標準とし、線路方向7径間、線路直角方向1径間の複線構造とした。フーチング上端からスラブ上端までの高さを約8.0m程度とした。

柱断面は、800mm×800mmで、軸方向鉄筋量はD32が24本配置を標準とし、このときの高架構造モデルの降伏震度は0.38となっている。なお、本検討では、降伏震度を基準構造の1.25倍とした降伏震度0.48となる高架構

*1 東日本旅客鉄道(株) 研究開発センターフロンティアサービス研究所 課長 博(工)(正会員)

*2 東日本旅客鉄道(株) 研究開発センターフロンティアサービス研究所 課員 (正会員)

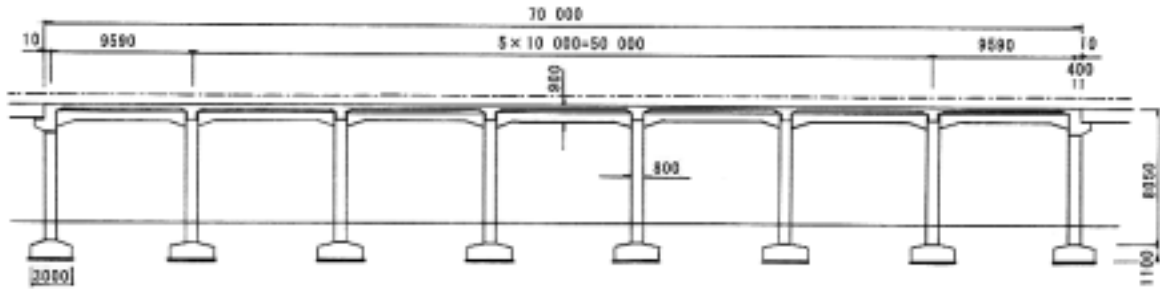


図-2 解析対象高架橋の一般形状

造モデルも設定した。なお、現行耐震基準⁴⁾に準拠したRCラーメン高架橋の耐震設計例⁵⁾における降伏震度は、0.55程度となっており、本検討では耐震設計例より降伏震度を若干小さく設定した。

(2) 柱部材に用いた復元力特性の概要

高架構造の解析モデルとしては、構造全体系を線材による骨組みモデルとした。柱部材に用いた部材の復元力特性は、曲げモーメント (M) と部材回転角 (θ) 関係における既往の検証事例⁶⁾を参考に、骨格曲線として最大荷重以降の荷重低下を表現可能なテトラリニアモデルとし、履歴特性は除荷時の剛性劣化を考慮した Takeda モデルを用いた。質量配置は、柱質量を上層、フーチング部に振り分け、上層部は節点間隔に応じた質量を節点に与えた。

(3) 嵌合接合部の構造モデル概要²⁾

嵌合接合構造の解析モデルについては、著者らによる既往の研究²⁾に示しているものと同じ構成とした。図-3に、嵌合接合部の構造モデルの概要を示す。嵌合接合部の構造モデルは、嵌合部に柱部材を挿入し、その周辺に弾性体を表現するバネ要素を配置した。嵌合部は剛体とし、バネ要素は柱部材と嵌合部との相対変位、回転変位に応じて反力が発生する。本検討では、嵌合接合部に配置するバネ要素のバネ定数や履歴特性を変化させた。設定したバネ要素に関しては、次章で詳述する。

4. 地震応答解析の概要

4.1 解析条件

(1) 解析用入力地震動

解析に用いた地震波は、鉄道の耐震標準⁴⁾で普通地盤の地表面地震動として定義されている G3 地盤の地震動を基準波として用いた。図-4に、解析に用いた基準の地震波形を示す。G3 地盤は、地盤の卓越周期が 0.25~0.5 秒未満の範囲で普通地盤として定義されている。この地盤の地表面の地震動は、弾性加速度応答スペクトルで周

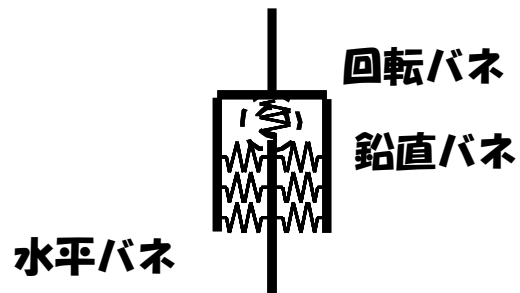


図-3 嵌合接合部の構造モデル概要

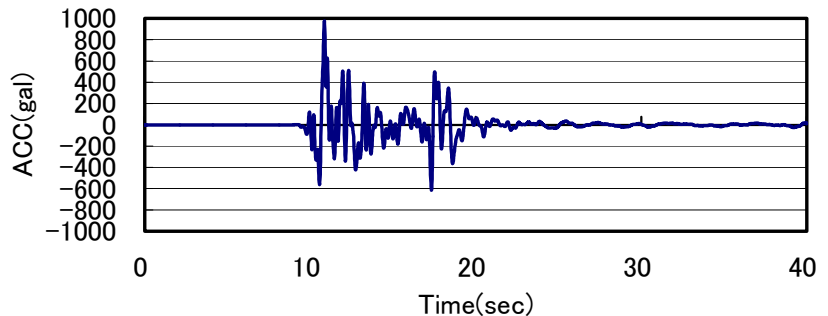


図-4 解析用地震波形 (G3 地盤)

期 0.3~1.0 秒間で 1800gal の応答にフィッティングした地震動となっている

(2) 嵌合部バネ要素の履歴特性

本接合構造は、柱周辺に弾性体を配置する。ここでは、嵌合接合部に配置するバネ要素の履歴特性 (初期バネ定数・履歴性状) を変化させた地震応答解析から、高架構造の応答性状の検討を行うことにした。本検討で設定したバネ要素の履歴性状を図-5に示す。

設定したバネ要素の履歴特性としては、弾性、逆行型 (軟化型・硬化型)、標準型バイリニアの4種類である。バネ要素の着目点としては、バネ要素の剛性変化の有無と履歴減衰の有無である。履歴減衰が発生しないバネ要素として逆行型を設定した。

バネ要素の初期剛性については、市販の橋梁用ゴムシユーの圧縮特性試験²⁾から得られた初期バネ定数 $k=16\text{kN/mm}$ を基準に、1.0 倍 (基準の値)、2.0 倍 ($k=32\text{kN/mm}$)、3.0 倍 ($k=48\text{kN/mm}$) の3種類設定した。

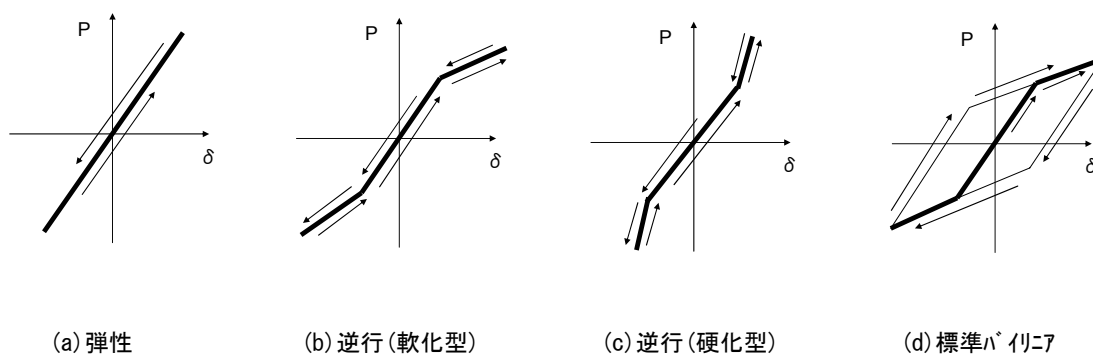


図-5 嵌合接合部に用いたバネ要素の履歴特性

表-1 バネ要素の各履歴特性における最大層間変形角

初期剛性 k(kN/mm)	弾性	逆行(軟化型)	逆行(硬化型)	標準バリエーション
16	0.1839	0.2012	0.1478	0.1764
32	0.1076	0.1304	-0.0978	0.1086
48	-0.1002	-0.1014	-0.1000	-0.0986

なお、ここでの検討は、降伏震度 0.38 とした高架構造モデルを用いた。この理由は、できるだけ高架構造の地震時の応答値を大きくし、バネ要素の履歴性状の違いが顕著となるようにしたためである。

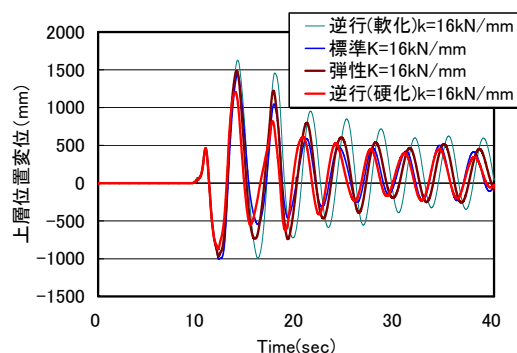
(3) 柱部材における地震時損傷レベルに対する検討用地震入力動

ここでは、柱部材の損傷レベル低減を視野に入れた高耐震高架構造への可能性を探る目的で、入力地震動の振幅を順次増加する地震応答解析を行う。本検討では、降伏震度を 0.48 とした高架構造モデルとし、より実構造に近い構造諸元で検討を行うことにした。嵌合接合部の弾性体は、市販のゴムシューを用いることを想定した。市販のゴムシューを用いた嵌合接合構造の高架構造モデルについては、既往の研究²⁾においてハードニングを考慮した R-O モデルにより荷重・変位曲線等で実験との適合性について検討が行われている。検討用入力地震動は、G3 地盤用の地震波を基準とし、その振幅を 1.0~1.3 倍に増幅して用いた。入力地震波の振幅を 1.3 倍したものは、弾性応答加速度で 2340gal 程度の地震波となる。

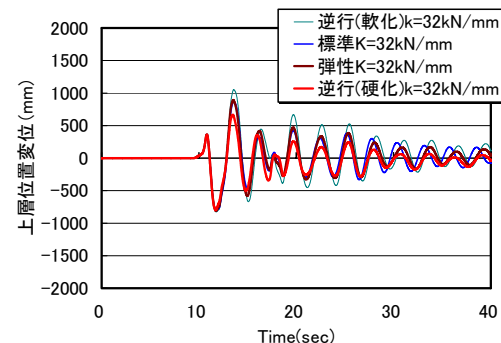
5. 地震応答解析結果の概要

(1) 最大層間変形角・上層位置の最大応答加速度

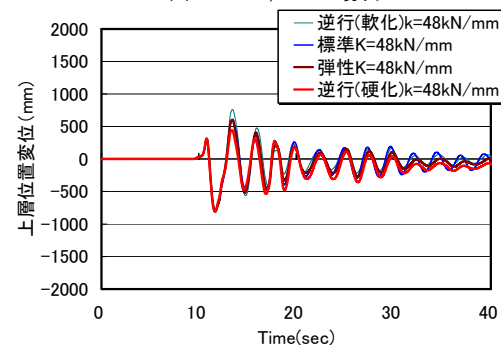
表-1 は、嵌合接合部に設定したバネ要素の履歴特性毎の上層位置における最大応答変位を地中梁天端から上層梁天端までの高さで除して層間変形角としてまとめたものである。図-6(a)~(c)に、バネ要素の初期バネ定数毎に上層位置での応答変位波形を示す。図-7(a)~(d)に、各バネ要素の履歴性状を示す。バネ要素の応答値の



(a) k=16kN/mm の場合



(b) k=32kN/mm の場合



(c) k=48kN/mm の場合

図-6 上層位置の応答変位波形

出力は、柱上端部の嵌合接合部の最下段位置に配置したものを選定した。バネ要素の反力は、履歴タイプに応じて若干の相違は見られるが、初期バネ定数に応じて、ほ

表-2 バネ要素の各履歴特性における最大応答加速度

(単位：gal)

初期剛性 k(kN/mm)	弾性	逆行(軟化型)	逆行(硬化型)	標準バイリニア
16	-406	-390	-420	-369
32	-415	-393	-396	-367
48	438	384	432	380

ほぼ同程度の値となっていた。

層間変形角の検討結果では、バネ要素の初期バネ定数が16kN/mmと32kN/mmの場合で、硬化型逆行タイプが他の履歴特性よりも層間変形角が小さくなる結果となった。初期バネ定数が48kN/mmの場合は、履歴特性の影響は顕著とはならず、同程度の最大層間変形角となった。初期バネ定数が比較的小さい範囲では、硬化型逆行タイプで応答変位が小さくなる傾向を示したが、これはバネ要素の変形量が他の履歴特性のものより小さく、柱の剛体変形分が他の履歴特性よりも小さいことが理由と考えられる。

表-2は、嵌合接合部に設定したバネ要素の履歴特性毎の上層位置における最大応答加速度値をまとめたものである。上層位置での応答加速度の最大値は、400gal前後となっており、高架構造モデルに設定した降伏震度を考えると概ね妥当な解析結果と思われる。

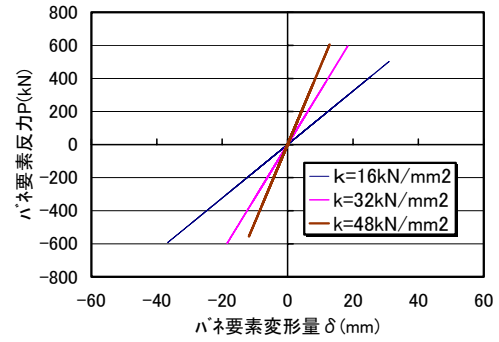
(2) 柱部材変形角の検討結果

図-8(a)～(c)に、柱部材の曲げモーメントと回転角の応答値をバネ要素の初期剛性毎に整理した結果を示す。なお、着目した柱部材は端部柱上端位置である。

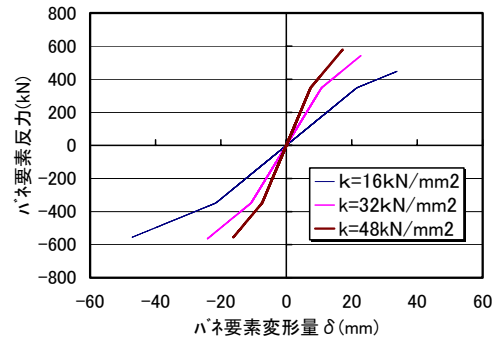
柱部材の曲げモーメントと回転角の応答値として、初期バネ定数が16kN/mmの場合は主に第一象限で応答しているが、初期バネ定数を48kN/mmとした場合は主に第3象限での応答となっている。初期バネ定数を32kN/mmとした場合は、概ね第1象限と第3象限で同程度の応答を示した。このように、同一地震動で、かつ、降伏震度も同じ条件の解析であるが、バネ要素の初期バネ定数によって、柱部材の曲げモーメント・回転角の応答性状が異なっている。この結果は、限定した入力地震動での解析結果ではあるが、嵌合内に配置する弾性体の履歴特性を適切にすることで、柱部材の履歴応答を制御できる可能性もあると考えられる。なお、柱部材の上端位置の回転角の最大応答値は、初期バネ定数を48kN/mmとした硬化型逆行タイプで生じていた。

(3) 柱部材の損傷レベルに関する検討結果

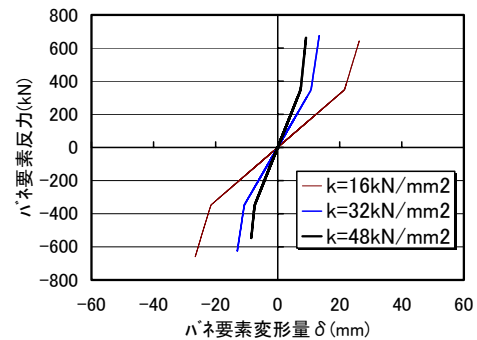
本高架構造は、柱の剛体変位と柱部材の変形の両方の合計によって、上層位置での応答変位が定まる。図-6および図-8から、定性的ではあるが柱部材の剛体変位と部材変形量の割合を嵌合接合部に配置する弾性体の履歴特性に応じて変化させることの可能性を有している。



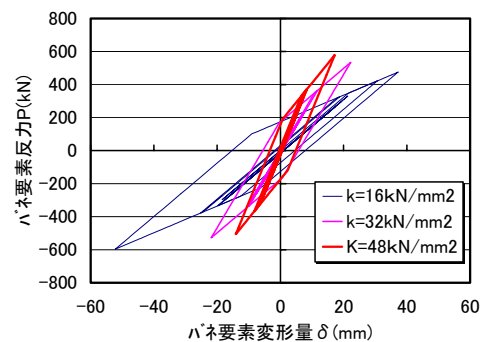
(a) 弾性の場合



(b) 逆行(軟化型)の場合



(c) 逆行(硬化型)の場合



(d) 標準バイリニアの場合

図-7 バネ要素の履歴応答

このことは、上層位置での応答変位を、柱部材の剛体変形量を大きくし、損傷をある一定限度内に抑制できる高架構造の可能性がある。

本検討結果から、柱部材の損傷について考察を行う。

部材の損傷レベルに関しては、現行耐震基準⁴⁾において部材に設定する骨格曲線と損傷レベルが定義つけられている。図-9に、部材の骨格曲線と損傷レベルの関係を示す。これによると、最大荷重点付近の損傷は、コンクリートのひび割れや剥離、降伏荷重点を維持する付近になるとかぶりコンクリートの剥落や軸方向鉄筋の座屈が生じる損傷になると評価できる。

解析結果として、図-10に上層位置での応答変位を、図-11に代表的な解析ケースにおける柱部材の回転角と曲げモーメントの履歴図をそれぞれ示す。参考として、降伏震度が同一の剛結構造モデルで基準地震動での解析結果もあわせて示す。

上層位置での応答変位は、入力地震動の増大に伴い大きくなっていくが、基準波の1.3倍とした場合の層間変形角は1/8程度であった。残留変位については、基準波で解析を行った剛結構造と基準波の1.3倍で解析を行った嵌合接合構造を比較すると、入力地震動が大きいかかわらず嵌合接合構造が小さくなり、剛結構造の1/4程度であった。

柱部材における曲げモーメントと回転角の応答値については、剛結構造が基準波の解析で最大荷重点を超えた領域まで変形が進むのに対して、本接合構造を用いた高架構造では基準波の1.3倍の入力地震動でも最大荷重点にも到達していない。

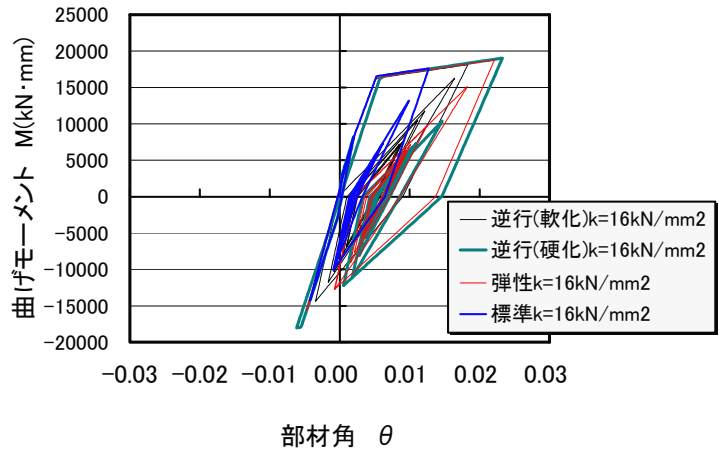
このことから、本解析結果では、限定された入力地震動ではあるが、現行耐震標準G3地盤地表面地震動の1.3倍入力でも柱部材ではかぶりコンクリートの剥落は発生しない損傷に抑制されていた。

6. まとめ

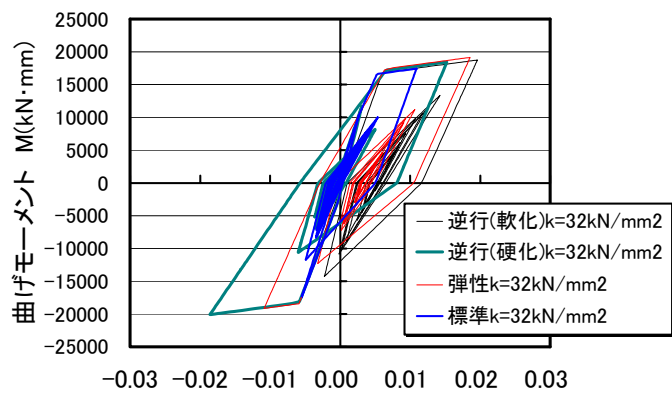
柱部材を嵌合接合構造とし、嵌合接合部内の弾性体の履歴特性を変化させた地震応答解析を実施した。また、入力地震動を基準1.3倍まで大きくした解析から本高架構造における柱部材の損傷レベルに着目した解析を実施した。

本検討結果を以下にまとめる。

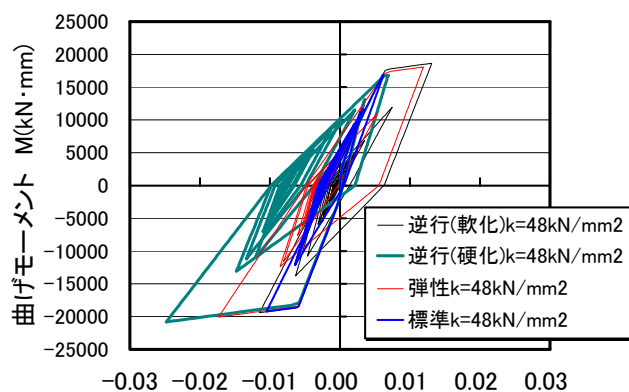
- (1) 層間変形角は、バネ要素の初期剛性の値で特定の履歴特性で小さくなる傾向があったが、今回解析で設定した一番大きな初期剛性では、各履



(a) $k=16\text{kN/mm}$ の場合



(b) $k=32\text{kN/mm}$ の場合



(c) $k=48\text{kN/mm}$ の場合

図-8 柱部材の曲げモーメントと部材角の応答値

歴特性ではほぼ同程度の層間変形角となり、履歴特性の影響は小さかった。

- (2) 柱部材の曲げモーメントと回転角の応答値は、バネ要素の初期バネ定数に応じて、応答が生じる方向が異なっていた。

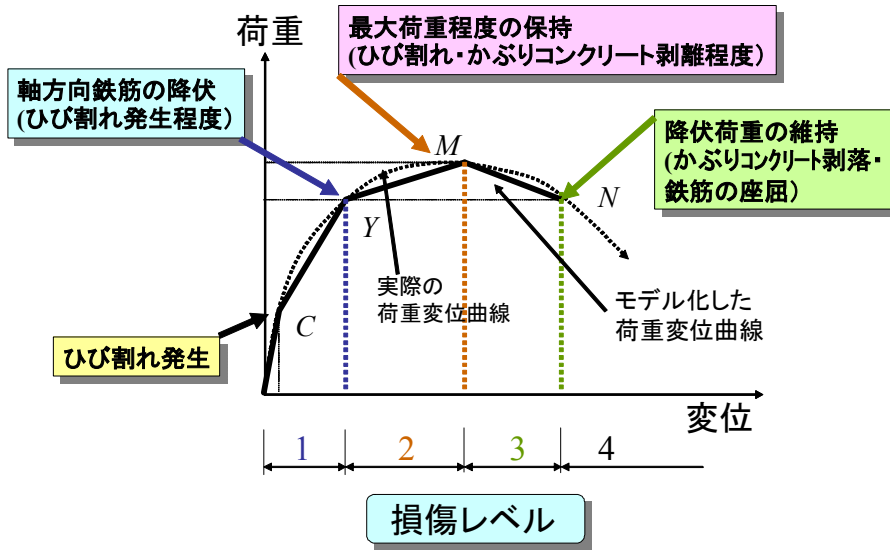


図-9 部材の骨格曲線と損傷レベルの関係

(3) 今回用いた地震動のみの検討結果ではあるが、降伏震度 0.48 の嵌合弾性接合を用いた高架構造は、入力地震動の振幅値を 1.3 倍にしても柱部材はコンクリートの剥落は発生しない損傷に抑制される結果を得た。

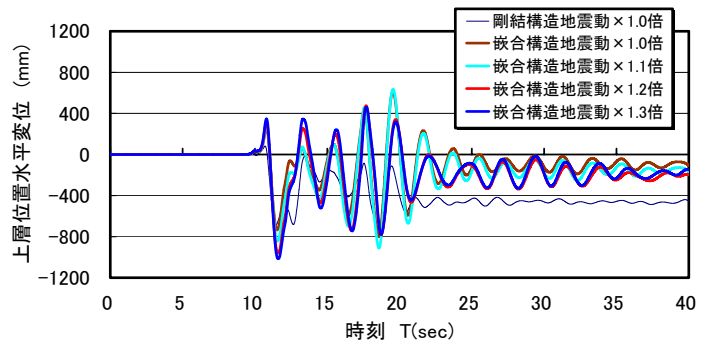


図-10 入力地震動の振幅を大きくした場合の上層位置応答変位

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, No. 2, pp. 301-306, 2005. 7
- 2) 小林薫, 杉崎向秀: 嵌合接合部に弾性体を挿入したラーメン構造の変形挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文集 Vol. 28, No. 2, pp. 13-18, 2006. 7
- 3) 小林薫, 杉崎向秀: 鉄道 RC 高架橋における列車走行振動特性の解析的検討に関する一考察, コンクリート工学年次論文集 Vol. 29, No. 3, pp. 7-12, 2007. 7
- 4) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・耐震設計編, 丸善, 1999.10
- 5) (財)鉄道総合技術研究所: 耐震設計標準による設計計算例 RC ラーメン高架橋, 2000.6
- 6) 鉄道総合技術研究所: 鉄道総研報告(特集: 耐震(3)-橋梁の耐震設計-, 第 13 巻第 4 号, 1999.4

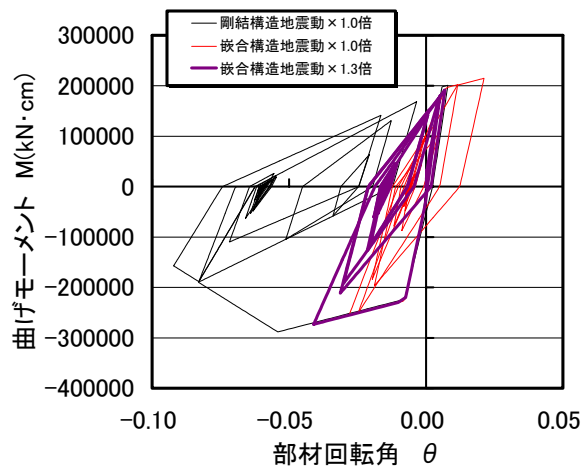


図-11 代表ケースにおける入力地震動の振幅を大きくした場合の柱部材曲げモーメントと部材角の応答