

斜杭基礎高架橋の地震応答算定における 静的解析法の適用性

本山 紘希¹・仲秋 秀祐¹・室野 剛隆²・西岡 英俊²
森野 達也³・陶山 雄介³・青木 一二三⁴

¹正会員 工修 公益財団法人鉄道総合技術研究所（〒185-0034 東京都国分寺市光町2-8-38）

²正会員 工博 公益財団法人鉄道総合技術研究所（〒185-0034 東京都国分寺市光町2-8-38）

³正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構（〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1）

⁴正会員 株式会社レールウェイエンジニアリング（〒105-0012 東京都港区芝大門1-3-8）

1. はじめに

鉄道高架橋の耐震設計では、応答値の算定において、動的解析法を用いることを原則としているが、設計実務においては、動的解析法と同程度の精度で応答値を算定できることを確認した上で、静的解析法を用いることが多い¹⁾。一般的な高架橋に対して用いられる静的解析手法としては、非線形応答スペクトル法と応答変位法がある。非線形応答スペクトル法は、プッシュ・オーバー解析と合わせて用いることで、慣性力の影響による構造物の応答を評価する手法である。また、応答変位法は、慣性力の影響と地盤変位の影響を組合せた静的な地震作用を設定して、地盤と構造物の相互作用を考慮した応答値を算定する手法である。直杭基礎高架橋においては、これらの解析の適用性は十分に確認されており^{2,3)}、鉄道構造物の耐震設計では、この2つの手法を組合せて、構造物の地震時の応答を評価する。

斜杭基礎高架橋においても、同様の手法により応答値の算定を行えることが望ましいが、現状、斜杭基礎高架橋においては、非線形応答スペクトル法や応答変位法について、適用性が十分に確認されていない。特に、非線形応答スペクトル法による慣性力の評価においては、直杭基礎高架橋を前提として作成された非線形応答スペクトル（所要降伏震度スペクトル）を用いると、慣性力を過大に評価してしまう可能性が懸念される。これは、斜杭基礎高架橋で発生する、水平振動と逆向きの回転振動（逆ロッキング動^{4,5)}）によるものであり、この逆ロッキング動により構造物の地震時応答が低減される効果が通常の非線形応答スペクトル法では考慮できないため

ある。

以上を踏まえ、本研究では、詳細な動的解析法による応答値と比較することで、斜杭基礎高架橋における非線形応答スペクトル法と応答変位法の適用性の検討を行った。非線形応答スペクトル法を用いた慣性力の評価については、逆ロッキング動の影響を考慮した構造物の振動を表現できるモデルを提案し、それに基づいた検討を行った。

2. 検討構造物と詳細な解析モデルの作成

本検討では基本構造物として鉄道構造物の耐震設計におけるG4地盤（普通～軟弱地盤）¹⁾において実際に設計されたRCラーメン高架橋（直杭形式）を用いており、基本構造物の杭に対して線路直角方向（橋軸直角方向）に5度の射角を与えることで斜杭基礎高架橋を作成している。解析法の適用性について、直杭基礎高架橋との比較により議論を行う必要があるため、直杭基礎高架橋についてもモデル化を行うこととした。

基本構造物の検討断面における概形を図1に示す。線路直角方向には1スパンの構造となっており、杭には鋼管杭が用いられている。柱高さは10.3m、基礎は杭径1m、杭長28mである。斜杭基礎高架橋を作成するには、杭を直杭基礎と同じ深さまで根入れさせるため、杭長は斜杭基礎の方が約0.1m長いものとなる。

地盤条件の違いについても検討するため、上記G4地盤に加えて、各層のN値を変更することにより、G3地盤（普通地盤）相当の地盤を作成した。図2に土質柱状図および両地盤のN値の深度方向分布を示

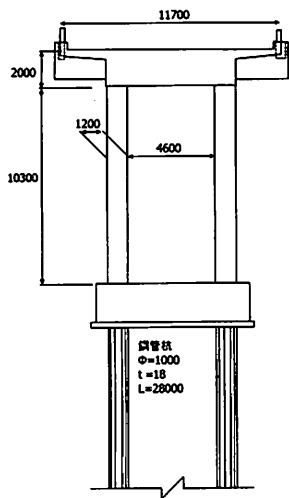


図1 基本構造物の検討断面

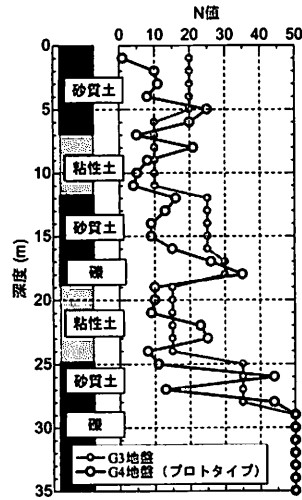
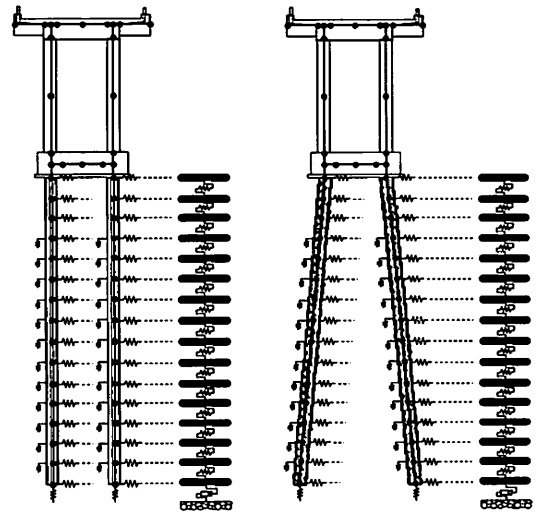


図2 土質柱状図
(G3・G4地盤)



(a) 直杭形式 (b) 斜杭形式

図3 動的解析モデルの概要

す。

以上により、構造物2種類（直杭・斜杭）、地盤2種類（G3地盤・G4地盤）を組合せた計4種類の検討対象構造物を作成した。

これに対し、構造物の応答を詳細に求めるための、動的解析モデルを作成する。ここでは、図3に示すように、部材を梁要素、地盤をばね要素でモデル化した質点系モデルを作成した。本モデルは自由地盤系と構造系を一体とした解析モデルとなっており、基盤位置への地震動の時刻歴波形の入力を想定した解析モデルとなっている。なお、斜杭に対する地盤ばねの設定方向については、事前に、水平方向・鉛直方向のばねの組合せ（直杭と同様の地盤ばね）と、杭に直角方向・平行方向のばねの組合せについて感度解析を実施し、応答に変化がないことを確認した上で、水平方向・鉛直方向のばねの組合せ（直杭と同様の地盤ばね）を用いることとした。

3. 静的解析法の適用性の検討

(1) 概要

斜杭基礎高架橋における非線形応答スペクトル法と応答変位法の適用性を検討する。このうち、非線形応答スペクトル法による慣性力の影響の評価については、逆ロッキング動の影響を受けることが想定されるため、構造物の振動メカニズムを踏まえた振動モデルを提案し、動的解析法との比較を行った。応答変位法については、非線形応答スペクトル法で評価された慣性力の影響と詳細な地盤の応答解析により評価された地盤変位の影響を組合せて解析を行い、動的解析法による応答値と比較することによ

て適用性の検討を行った。

(1) 非線形応答スペクトル法の適用性

a) 概要

一般的な非線形応答スペクトルは、周期をパラメータに1自由度解析を実施し、縦軸に非線形応答を図示したものである。所要降伏震度スペクトルも、横軸に周期、縦軸に降伏震度をとって、目標塑性率毎に構造物の等価固有周期と降伏震度の関係を図化したものであり、周期および降伏震度をパラメータとした1自由度系の解析を多数実施することで作成する。

このため、非線形応答スペクトル法の適用には、構造物の振動が、等価固有周期と降伏震度をパラメータとする1自由度系の振動として表現できることが前提条件となる。逆に、この前提条件が満足されれば、適切な所要降伏震度スペクトルを設定することで、構造物の等価固有周期・降伏震度に対して、慣性力の影響による応答を評価できることになる。通常の直杭基礎形式の高架橋では、構造物の振動を1自由度系の振動で表現できることが確認されている²⁾。ここでも、文献2)の検討と同様、詳細モデルによる構造物の振動と1自由度系の振動を比較することにより、斜杭基礎高架橋における非線形応答スペクトル法の適用性の検討を行う。

b) 1自由度系の振動モデルの作成

通常の構造物における1自由度系の運動方程式を次に示す。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{u}_{eff} \quad (1)$$

ここで、 m 、 c 、 k はそれぞれ質量、粘性、剛性を表し、 x は1自由度系の応答を表す。また、 $\ddot{u}_{eff}$ は

構造物に対する有効入力動であり、構造物に実際に入射される地震動と定義され、図3に示す解析モデルにおいて、上部構造物の荷重を取り除き、地盤変位の影響のみを考慮した動的解析を行った時の基礎頂部（この場合は地中梁の位置）での地震応答として算定される。文献4)にあるように、直杭基礎高架橋においては、有効入力動として発生するのはほぼ水平振動のみであるが、斜杭基礎高架橋においては、有効入力動に回転成分が発生する。このため、斜杭基礎高架橋では入力に対して回転成分の影響を考慮する必要があることが分かる。ここでは、これを図4のようにモデル化した。対応する運動方程式としては、次式を提案する。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m(\ddot{u}_{eff} - L\ddot{\theta}_{eff}) \quad (2)$$

ここで、 $\ddot{\theta}_{eff}$ は構造物における有効入力動の回転成分であり、 L は構造物高さである。図4に示すように、慣性力が働く位置で構造物高さを考慮した回転振動 $L\ddot{\theta}_{eff}$ 分の低減を考慮することで、あたかも入力地震動が $L\ddot{\theta}_{eff}$ だけ低減されたような運動方程式が立式されることになる。ここでは、この低減された入力 $\ddot{u}_{eff} - L\ddot{\theta}_{eff}$ を回転成分を考慮した「見かけの有効入力動」と呼称する。なお、この時の回転成分の座標系は図4中に示す座標系である。G4地盤の斜杭において、有効入力動の水平成分 $\ddot{u}_{eff}$ と見かけの有効入力動 $\ddot{u}_{eff} - L\ddot{\theta}_{eff}$ の比較を図5に示した。

c) 詳細モデルと1自由度系モデルの比較

構造物の詳細モデルによる応答と1自由度系モデルによる応答を比較する。まずは、1自由度系のモデルで用いる復元力特性を設定する。復元力特性の設定については、文献2)の手法に従い、構造物のプッシュ・オーバー解析から得られる荷重－変位関係を再現できる骨格曲線を設定し、clough型の履歴則を与える。ここでは、図6に示すように、トリリニア型の骨格曲線を用いることで、適切に荷重－変位関係を表現できることが分かったため、骨格曲線としてはトリリニア型を採用した。

構造物の詳細モデルにおける構造物天端の加速度応答と、1自由度系モデルにおける加速度応答を比較する。なお、1自由度系モデルにおいては、有効入力動の水平成分を入力地震動としたもの(式(1))および見かけの有効入力動を入力地震動としたもの(式(2))の感度についても検討を行う。解析結果に

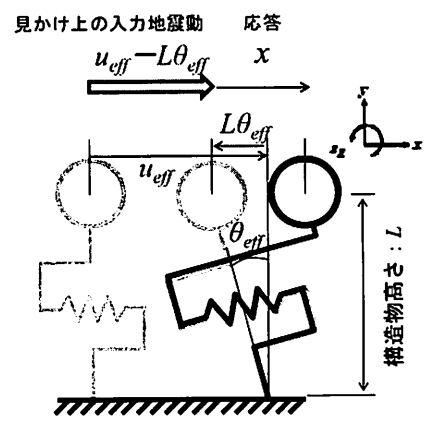


図4 回転成分の影響を考慮した1自由度系振動モデル

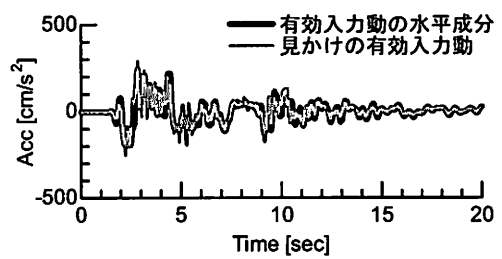


図5 有効入力動の水平成分と斜杭基礎高架橋における見かけの有効入力動の比較

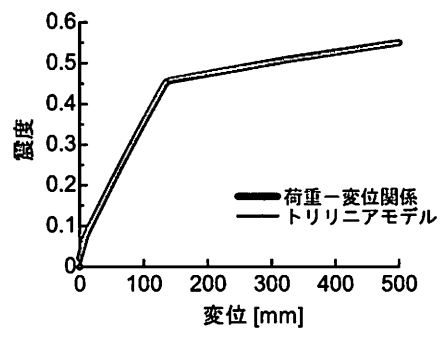


図6 G3地盤・斜杭基礎高架橋の荷重－変位関係とトリリニア型による1自由度系のモデル化

ついて、5秒間の加速度応答を抜き出し、図7に示す。直杭のケースにおいては、有効入力動の回転成分がほぼゼロであることから、回転成分の考慮の有無にかかわらず、詳細モデルによる解析の結果は1自由度系の解析により表現されている。一方、斜杭のケースにおいては、1自由度系の解析で、回転成分を考慮したものとしていないものの違いは、特にG4地盤の検討で顕著に現れており、見かけの有効入力動を考慮した場合の方が、詳細モデルの解析結果を適切に表現できている。このことから、見かけの有効入力動を考慮した運動方程式を考えると、構造物の詳細な応答を1自由度系の振動で表現できることが

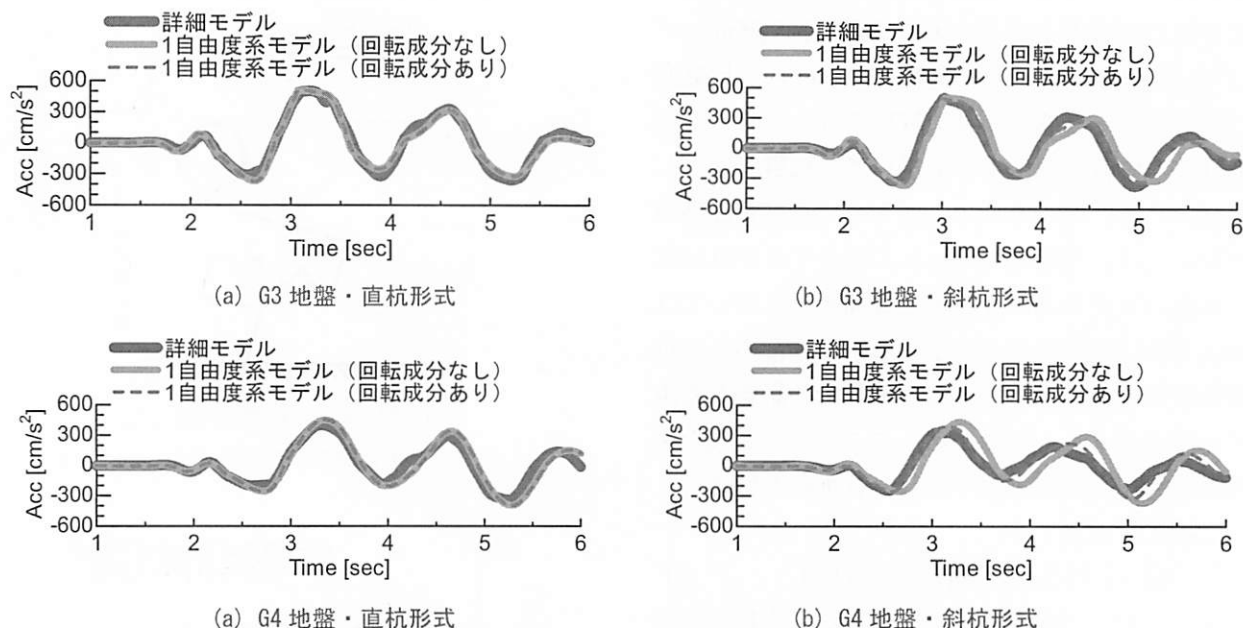


図7 詳細モデルと1自由度モデルの解析結果の比較

分かる。このことから、見かけの有効入力動に対応した所要降伏震度スペクトルを作成することで、斜杭基礎高架橋についても、非線形応答スペクトル法の適用が可能であることが分かる。

(2) 応答変位法の適用性

a) 概要

応答変位法では、入力として、静的に慣性力と地盤変位を与える。慣性力と地盤変位の組合せ R_t については、概念的に以下の式で表現される。

$$\text{慣性力主体} \quad R_t = 1.0 \times R_a + \nu \times f(z) \quad (3)$$

$$\text{地盤変位主体} \quad R_t = \nu \times R_a + 1.0 \times f(z) \quad (4)$$

ここで、 R_a が慣性力、 $f(z)$ が地盤変位 (z は地表面からの深さ) を表し、 ν は慣性力と地盤変位を組み合わせるための補正係数を表す。慣性力と地盤変位を組合せて作用させるイメージを図8に示す。

この補正係数 ν は、地盤の固有周期と構造物の等価固有周期の関係から設定される値であり、上限値と下限値を考慮する。この慣性力の影響と地盤変位の影響の組合せについては、一般の杭基礎高架橋に対して設定されたものである⁵⁾。ここでは、斜杭基礎高架橋においても、同様の作用の組合せによって、構造物の応答を表現できるかを検討する。検討におけるポイントは、慣性力の影響の評価において、上述の非線形応答スペクトル法の検討で用いた見かけ

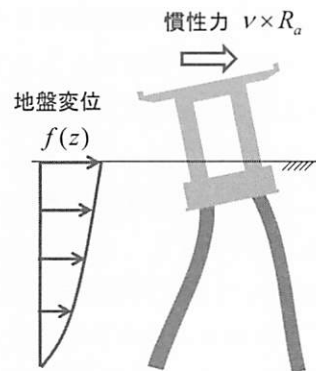


図8 応答変位法による作用の組合せイメージ

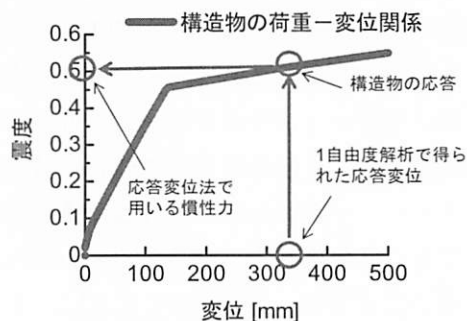


図9 構造物の応答変位と荷重-変位関係から慣性力を算定する方法

表1 慣性力と地盤変位を組み合わせるための補正係数

ケース	補正係数	
	上限値	下限値
G3地盤・直杭	0.3	-0.7
G3地盤・斜杭	0.3	-0.7
G4地盤・直杭	0.456	-0.544
G4地盤・斜杭	0.601	-0.399

の有効入力動を考慮した慣性力を用いる点である。

b) 作用の算定

ここでは、慣性力と地盤変位の影響を詳細な手法で算定する。このうち、地盤変位の影響は、自由地盤のみの動的解析を行い、地表面の変位応答が最大となる時刻の地盤変位分布として算定した。詳細な慣性力の算定においては、見かけの有効入力動を考慮した1自由度解析から算定した。具体的には、図9に示すように、1自由度系の解析で得られた応答変位を荷重-変位関係上にプロットし、それに対応する震度を読み取って慣性力を算定した。また、4つの解析ケース（G3地盤・G4地盤、直杭・斜杭の組合せ）について、慣性力と地盤変位を組み合わせるための補正係数を算定すると、表1にまとめる結果となった。

c) 動的解析と応答変位法の比較

解析結果として、図10に杭に発生する曲げモーメントを示す。動的解析では、最大曲げモーメント分布を示した。応答変位法においては、慣性力を主体としたケースおよび地盤変位を主体としたケースについて、それぞれ表1に示す上限値・下限値を考慮したケースの解析を実施し、各構造物について4ケースの曲げモーメント分布を示した。

動的解析の結果について、直杭と斜杭の発生断面力の違いに注目すると、G3地盤・G4地盤ともに杭頭付近で、斜杭に発生する曲げモーメントが大きくなっている。これは既往の研究とも整合する結果である⁶⁾。斜杭において、動的解析の結果と応答変位法の結果を比較すると、応答変位法でも地盤変位主体のケースにおいて、動的解析で見られる杭頭付近で発生断面力が大きくなる傾向を適切に表現できていることが分かる。一方、直杭においては、杭頭付近および深度-5m~-10mの範囲で、発生曲げモーメントおよびその分布形状に着目すると、動的解析の結果と整合する結果が慣性力主体の応答変位法で得られている。これらの結果の違いは、斜杭基礎および直杭基礎と地盤との相互作用の違いを明確に表現しており、興味深い結果である。また、地盤の深い位置では、G3地盤・G4地盤、直杭・斜杭に関係なく、地盤変位主体のケースが動的解析法と整合する結果となった。

次に、斜杭基礎高架橋において、上部構造物の曲

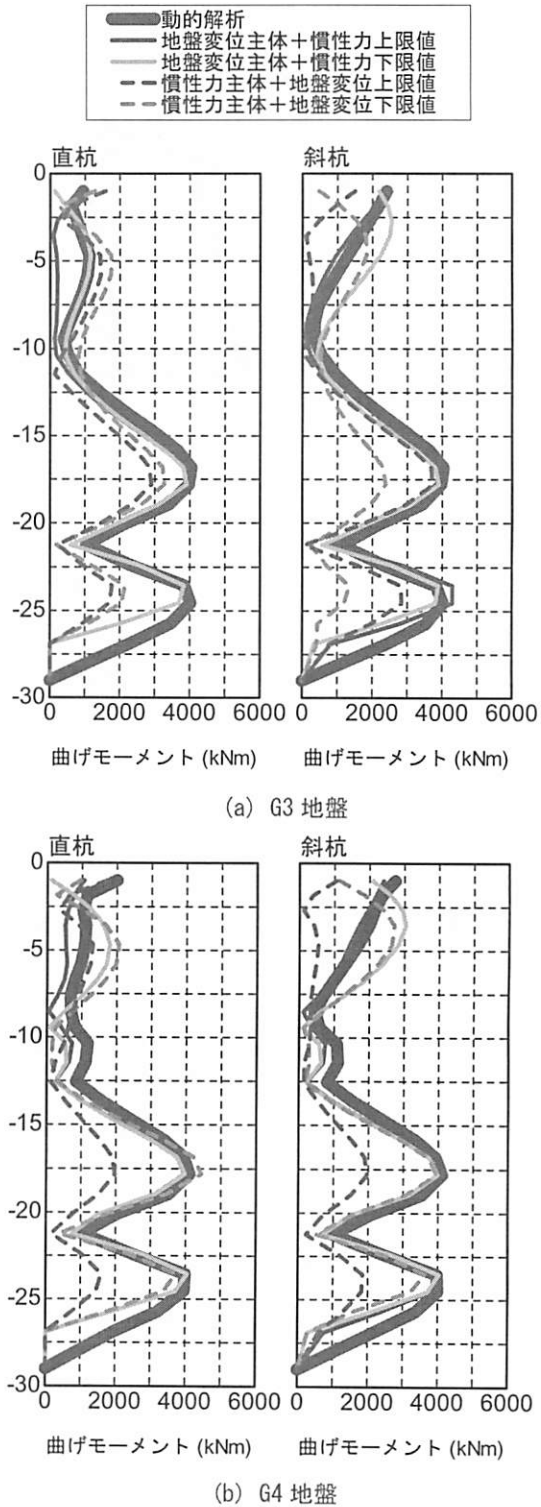


図 10 動的解析法と応答変位法による杭の曲げモーメント分布の比較

げモーメント分布を図11に示す。ここでは、斜杭基礎高架橋において、慣性力主体の応答変位法を実施したケースについてのみ示し、上部構造物においても、発生曲げモーメント分布が適切に表現できていることを確認するに留める。

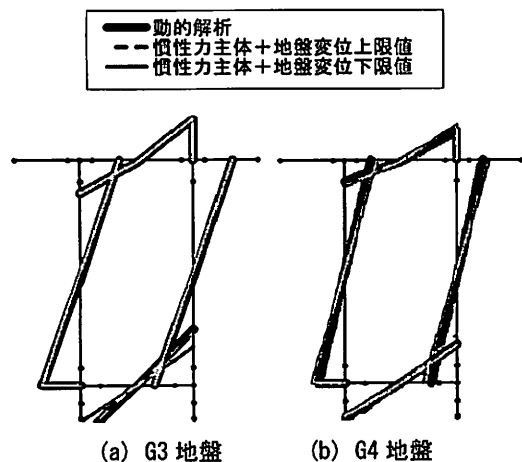


図 11 動的解析法と応答変位法による上部構造物の
曲げモーメント分布の比較

以上により、適切に慣性力を算定し、それを用いた応答変位法を実施することで、斜杭基礎においても、動的解析法と整合する結果が得られることが分かった。

5. まとめ

斜杭基礎高架橋における静的解析法の適用性の検討として、非線形応答スペクトル法と応答変位法の適用性について検討を行った。

非線形応答スペクトル法の適用性の検討においては、構造物の詳細モデルによる振動を1自由度系モデルの振動で表現できることを示した。この時、1自由度系モデルの解析においては、有効入力動の回転成分を考慮した見かけの有効入力動を用いた振動モデルを提案した。

応答変位法の適用性の検討については、上述の非線形応答スペクトル法により評価された慣性力を用いることで、直杭形式と同様の作用の組合せにより、

構造物の動的応答が表現できることが分かった。

以上の検討により、高架橋の耐震設計において、設計実務で用いる静的解析法の適用性が確かめられた。

今後、本解析手法を実務に展開していくためには、所要降伏震度スペクトルの簡易な評価方法が必要になると考えられる。これについても、著者らのグループで、別途手法の提案を行なっている⁷⁾。

参考文献

- 1) 国土交通省鉄道局監修，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），2012.9
- 2) 本山紘希，室野剛隆，仲秋秀祐，西岡英俊，米澤豊司，森野達也，青木一二三：斜杭基礎を有する構造物での有効入力，第67回土木学会年次学術講演会講演概要集，2012.
- 3) 森野達也，米澤豊司，西岡英俊，青木一二三，佐名川太亮：斜杭基礎の制振効果に関する模型振動実験，第67回土木学会年次学術講演会講演概要集，2012.
- 4) 室野剛隆，佐藤勉：構造物の損傷を考慮した非線形応答スペクトル法の適用，土木学会地震工学論文集，29巻，pp520-528，2007.8.
- 5) 室野剛隆，西村昭彦：地盤と構造物の動的相互作用を考慮した応答変位法，鉄道総研報告，Vol.13，No.2，pp.41-46，1999.2.
- 6) 出羽利行，西岡英俊，神田政幸，山崎貴之，丸山修，青木一二三：斜杭基礎の水平抵抗特性と地震時動的挙動に関する解析・実験，鉄道総研報告，Vol.22，No.3，2008.5.
- 7) 仲秋秀祐，本山紘希，室野剛隆，西岡英俊，森野達也，陶山雄介，青木一二三：斜杭基礎高架橋における地震時慣性力の評価手法の提案，第16回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2013.7.（投稿中）