

不整形地盤におけるコンクリートラーメン橋の 非線形地震応答挙動

松尾 聡一郎¹・吉澤 努¹・川神 雅秀²

¹工修 大日本コンサルタント(株) 技術本部耐震技術室 (〒170-0003 東京都豊島区駒込 3-23-1)

²工博 大日本コンサルタント(株) 技術本部耐震技術室 (〒170-0003 東京都豊島区駒込 3-23-1)

1. はじめに

山岳部の橋りょうのように地形の起伏や断層破碎帯などにより地盤の不整形性が大きい場合、各橋脚基部への入力地震動は同一レベルとは限らない。このため、本研究では山岳地形を跨ぐ5径間連続コンクリートラーメン橋を対象に、多点入力による時刻歴動的解析を行い、地盤の不整形性が橋に及ぼす影響を検討した。

2. 解析モデル

(1) 橋梁のモデル化

本解析では、対象とする5径間連続コンクリートラーメン橋の全体構造系を、図-1に示す2次元骨組み構造でモデル化した。また、橋脚躯体については、非線形性を考慮した弾塑性梁要素とし、躯体断面の曲げモーメント-曲率関係（ $M-\phi$ 関係）は、ひび割れ時と降伏時に剛性が変化するトリリニア型とし、履歴ループは剛性低下型の武田モデルとした。

(2) 地盤-構造系のモデル化

多点入力に用いる入力地震動は、対象橋梁周辺の地盤を図-2に示す2次元FEMモデルでモデル化し算出した。解析で採用した地質構造は花こう岩主体であり、谷部の幅は約400mである。また、谷部の表層地質は、軟岩（D級）と硬岩（CL級）であり、中央付近には、傾斜角約40°で断層破碎帯が土砂化して存在する。ここでは、軟岩（D級）および断層破碎帯の分布を考慮し、両者に対して、地盤のせん断ひずみ（ γ ）に依存するせん断剛性（ G ）の低下と減衰（ h ）の関係を考慮した。

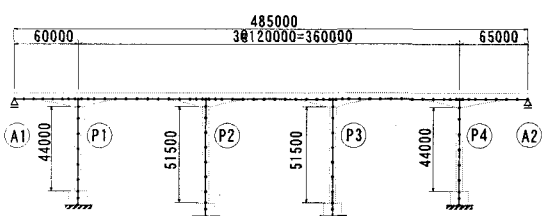


図-1 対象橋梁の2次元骨組み構造モデル

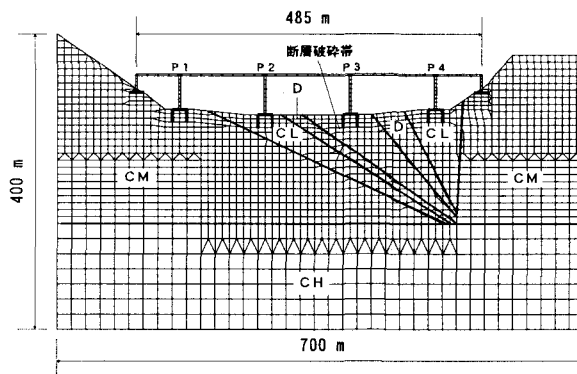


図-2 地盤-構造系の2次元FEMモデル

3. 解析手法

本解析においては、まず多点入力に用いる各橋脚基部への入力地震動を算出するために、対象橋梁周辺地盤（図-2参照）を平面ひずみで仮定して2次元FEM解析を行った。モデルの動的応答は、複素応答法による周波数領域で解析した。解析プログラムは、(株)構造計画研究所のSuper-Flush/2Dを用いた。

軟岩（D級）および断層破碎帯の地盤剛性および減衰に対するひずみ依存性は、等価線形化法にて考慮した。側方のモデル化領域は700mとし、境界条件は、地盤の連続性を考慮するため、モデル側面はエネルギー

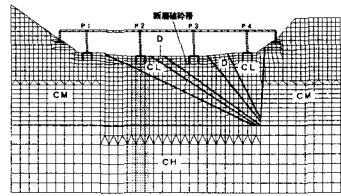


図-3 モデル底面の入力地震動の概念図

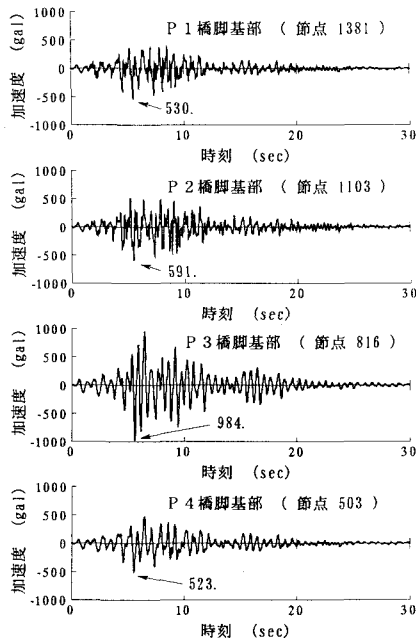
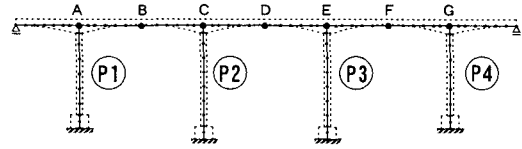


図-4 各橋脚基部の応答加速度波

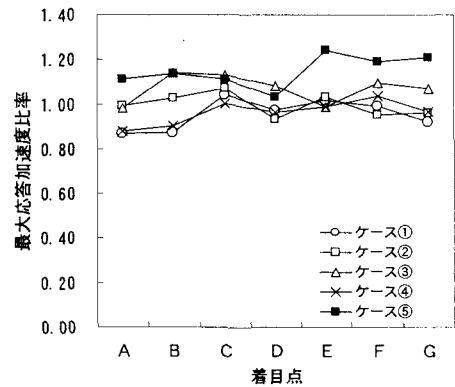
伝達境界とした。深さ方向については、断層破碎帯の深さと同程度の深さを確保するため、全体で400mとし、底面には粘性境界を設定した。

FEM解析に用いる入力地震動は、モデル底面における上昇波を求めるため、P2橋脚基部近傍の地盤を自由地盤としてモデル化し、地表面から文献¹⁾の標準波を入力し、重複反射理論により地震動の引き戻し計算を行った(図-3参照)。

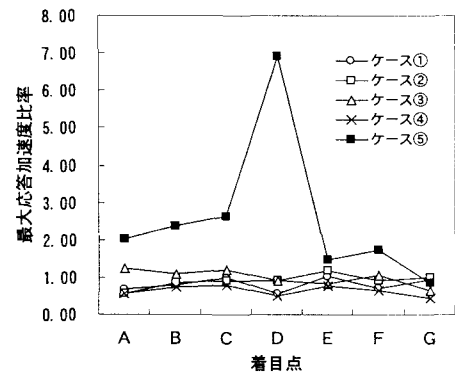
次に前述の手法で算出した各橋脚基部への応答加速度波(図-4参照)を用いて対象とする橋梁に対して多点入力による時刻歴応答解析を実施した。時刻歴応



(a) 上部構造の着目点



(b) 水平成分



(c) 鉛直成分

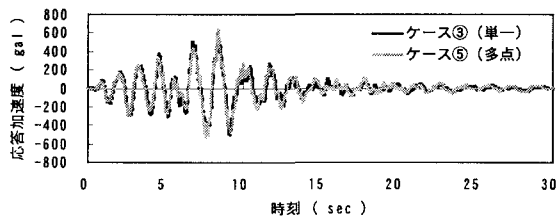
図-5 各着目点における最大応答加速度比率

答の計算手法は、Newmarkの β 法($\beta=1/4$)による直接積分とし、積分時間間隔は1/1000秒とした。減衰はReyleigh減衰を用いた。また、各部材要素の減衰定数は参考文献²⁾に従い、以下で仮定した。

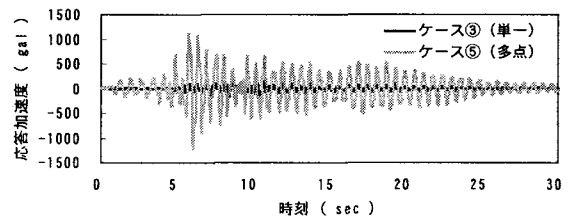
- ・上部構造 : 3%
- ・下部構造(弾性部材) : 5%
- ・下部構造(弾塑性部材) : 2%

前述の2次元FEM解析により求めた各橋脚基部の応答波を用いて、以下に示す5ケースで時刻歴応答解析を実施し比較を行った。

- ケース①: P1橋脚基部の応答波を単一入力
- ケース②: P2橋脚基部の応答波を単一入力
- ケース③: P3橋脚基部の応答波を単一入力

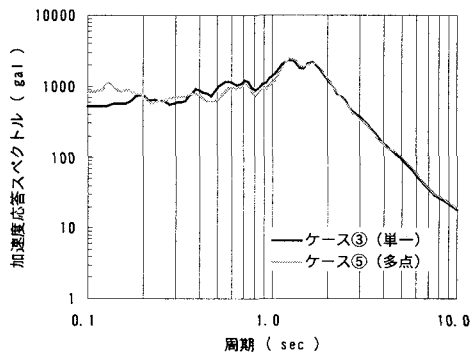


(a) E点における水平方向応答加速度

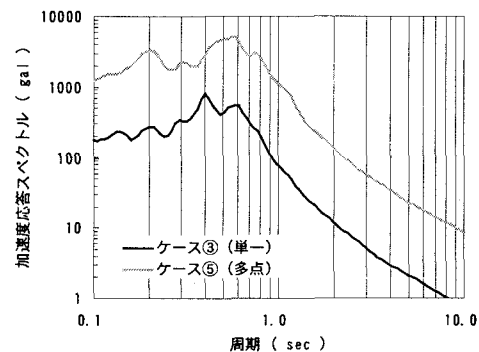


(b) D点における鉛直方向応答加速度

図-6 上部構造の時刻歴加速度応答



(a) E点における水平方向応答加速度



(b) D点における鉛直方向応答加速度

図-7 上部構造の加速度応答スペクトル

ケース④：P 4 橋脚基部の応答波を単一入力

ケース⑤：各橋脚基部の応答波を多点入力

ここで、入力する応答加速度波には、地盤-構造物系の動的相互作用が考慮されていることから、橋脚基部は固定とした。

4. 解析結果

(1) 上部構造の応答加速度

図-5は、ケース①～⑤の地震動を入力した場合の上部構造の各着目点における最大応答加速度を文献¹⁾の標準波を単一入力した場合の各着目点における応答値に対する比率で示したものである。

図-5 (b) より、水平成分の応答値は単一入力では、各ケースともばらつきは少なく各着目点における最大応答値の増減は±10%程度である。多点入力(ケース⑤)では、単一入力に比べてP 3 橋脚位置のE点において応答が24%程度大きく、多点入力と単一入力による応答値の差が生じているのが分かる。これは、多点入力の場合、主げたの軸方向の伸縮が増幅されたことが考えられる。

鉛直成分の応答値は、図-5 (c) より、単一入力

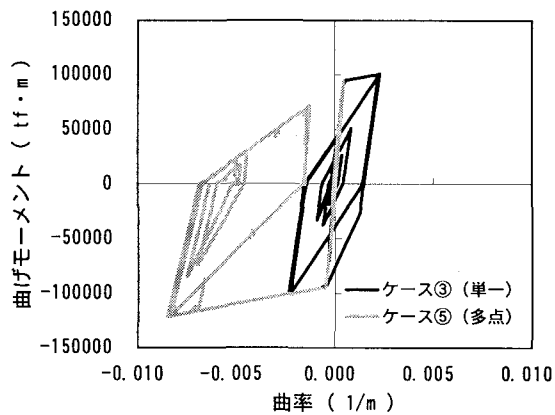
においては各ケースともばらつきがないのが分かる。多点入力においては、各着目点において応答値にばらつきが見られる。特に、上部構造D点において応答が増幅しているのが分かる。これは、多点入力の場合、各橋脚基部に入力される地震動が橋脚ごとに異なっているため、橋脚間に相対変位が生じ、上部構造がこれを拘束しようとするため、鉛直曲げが発生し、主げたの鉛直たわみ振動が誘発されるもの推定される。

図-6には、単一入力と多点入力において、標準波の単一入力に対する最大加速度応答値の比率(図-5参照)の差が最も大きい、着目点E点(水平成分)とD点(鉛直成分)の応答加速度波形を示す。また、図-7に、その応答加速度スペクトルを示す。図-7 (a) はE点の水平加速度応答スペクトルであり、ケース③および⑤共に、周期1.2秒近傍でピークを示す。鉛直成分は、図-6 (b) および図-7 (b) より、応答値に顕著な差が生じているのがわかる。

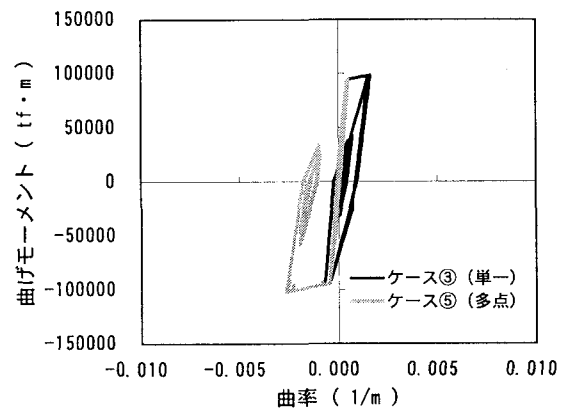
図-7 (b) で示すように、ケース③は周期0.6秒近傍で、ケース⑤は、0.4秒近傍でピークとなり卓越周期に差異も生じている。この原因は、多点入力における各橋脚部の不等変位による影響と考えられる。

(2) 橋脚躯体基部の応答履歴

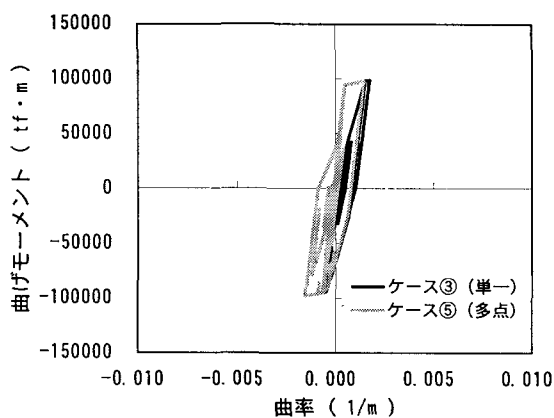
図-8に、ケース③およびケース⑤に対する橋脚柱基



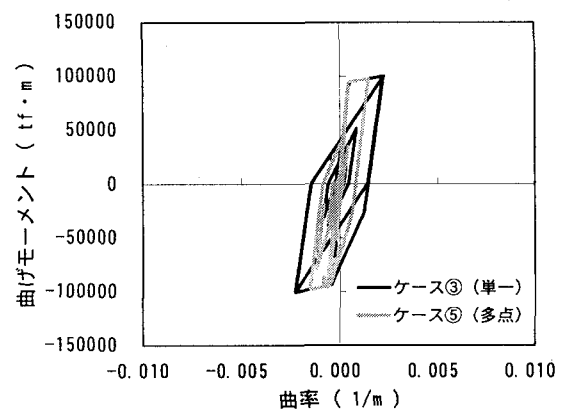
(a) P1橋脚



(b) P2橋脚



(c) P3橋脚



(d) P4橋脚

図-8 橋脚柱基部のM-φ履歴

部のM-φ応答履歴を示す。図-8より、入力波形の違いによる応答差が顕著に表れているのが分かる。ケース③(単一入力)の応答値に着目すると、P1橋脚とP4橋脚、P2橋脚とP3橋脚ともにほぼ同じ応答履歴を示している。これは、すべての橋脚に対して同じ加速度波が入力され、さらに本解析で使用したモデル橋がほぼ左右対称構造であることによる。これに対してケース⑤(多点入力)では、各橋脚ごとに応答履歴が大きく異なることが分かる。これは、各橋脚基部に入力する地震波の相対変位の違いによる影響と考えられる。

4. おわりに

本研究では、山岳地形を代表とする不整形地盤上に建設されるコンクリートラーメン橋の地震応答について検討した。以下、ここで得られた知見を参考に今後の課題を示す。

① 断層破碎帯など地質構造が傾斜している場合、水平成分よりも鉛直成分の応答が卓越する可能性がある。今後は、鉛直地震動による多点入力を実施し、橋脚躯体部の軸力と曲げモーメントの相関関係も併せて考慮した検討が必要である。

② 不整形地盤における地震応答において、設計上考慮する活断層が極近傍でかつ浅い位置に存在する場合は、鉛直下方からの波動伝播に対して、位相差入力が卓越することが考えられる。この場合は、入力地震動の位相差に対する検討も今後必要である。

③ 多点入力における動的解析では、入力地震動(絶対加速度波形・絶対速度波形・絶対変位波形)の波形処理が十分でない場合、解が不安定となり注意を要する。

今後は、解析事例を蓄積し、これらの課題について、さらに詳細な検討を行って行く予定である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997. 3
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震計編，1996. 12