

地震波の入力方向と履歴モデルの非対称性が応答に及ぼす影響

宇野裕恵¹・松田泰治²・宮本宏一³・長 悟史⁴
柚木浩一⁵・松田 宏⁶・角本 周⁷・松尾龍吾⁸

¹正会員 工修 オイレス工業株式会社 第三事業部(〒105-8584東京都港区浜松町1-30-5)

²正会員 工博 熊本大学大学院教授 自然科学研究科環境共生工学専攻(〒860-8555熊本市黒髪2-39-1)

³正会員 工修 日本技術開発株式会社 九州支社道路・交通部(〒812-0013福岡市博多区博多駅東3-13-21)

⁴正会員 日本技術開発株式会社 九州支社道路・交通部(〒812-0013福岡市博多区博多駅東3-13-21)

⁵正会員 工修 JIPテクノサイエンス株式会社 福岡橋梁技術グループ(〒812-0037福岡市博多区御供所町2-63)

⁶正会員 JIPテクノサイエンス株式会社 東京橋梁技術部(〒103-0025東京都中央区日本橋茅場町1-2-5)

⁷正会員 工博 オリエンタル白石株式会社 福岡施工・技術部(〒810-0001福岡市中央区天神4-2-31)

⁸学生会員 熊本大学大学院 自然科学研究科環境共生工学専攻(〒860-8555熊本市黒髪2-39-1)

1. はじめに

道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編¹⁾では、”7.2 動的解析に用いる地震動”の解説に、「時刻歴応答解析法を用いて部材の塑性化を考慮した耐震性能2または耐震性能3の照査を行う場合には、入力する地震動としては、一般に1波形だけではなく、3波形程度を用いるのがよい」旨、記載されている。さらに、「動的照査法による照査では、その平均値を照査に用いる応答値として扱うのがよい」と平均値で評価することが提案されている。これには、「部材の非線形性を考慮した時刻歴応答解析においては、同じ加速度応答スペクトル特性を有する地震動であっても、位相特性の違い等によって応答解析値に差異が生じるためである。」と解説されている。加えて、地震波の正負の振幅は自ずと異なっており、道路橋示方書のⅡ種地盤におけるタイプⅠおよびタイプⅡの標準地震波の最大加速度は表-1に示すように正負どちらかの方向に大きくなっている。したがって、この影響を受けやすい振動系に対して動的解析を行う場合には、地震波3波それぞれの入力方向や地震波の特性に留意する必要があることは容易に理解できる²⁾。ここでは、加速度の大きい方を主要動方向と定義することとする。

一般に、地震波の入力方向による応答の相違は地震波の主要動方向の影響を受けやすく、非対称な履

歴特性を有する振動系では相対的に脆弱な履歴方向の応答が大きくなりやすい。したがって、非対称な履歴を有する構造物の地震時挙動は、この2つの要因が組み合わさって正負どちらかの方向の応答が大きくなるので、地震波の入力方向を正方向と負方向の2通りで評価するか、あるいは非対称性を逆向きに設定することで最も不利となる応答を評価すればよい。ただし、非対称な履歴を有する場合であっても振動系全体として左右対称なモデルであれば、同じ特性を有する左右の下部構造・支承モデルの応答を併せて考え、最も不利となる応答を評価すれば、地震波を両方向あるいは非対称性を逆に設定したものと等価となる。しかし、振動系全体として対称でないモデルでは、それぞれの下部構造・支承モデルを単独で評価することになるため、地震波を両方向に入力して応答を評価する必要がある。

ここで、履歴に非対称性を有する場合として、以下のようなモデルが考えられる。

- ①温度変化やクリープ等による桁伸縮状態
- ②片側張り出し橋脚を有する橋脚
- ③衝突や土圧の影響を受ける橋台

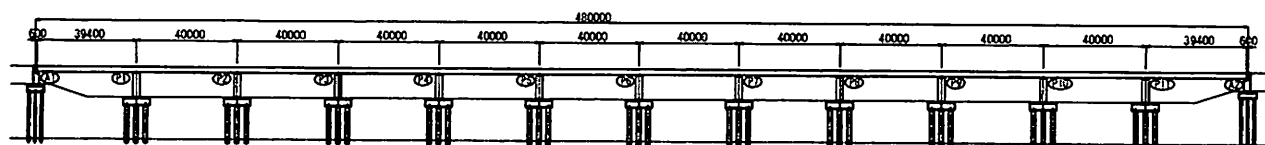
なお、温度変化による桁伸縮状態では、高温時および低温時の両方向を考慮するのであれば地震波を

表-1 Ⅱ種地盤標準地震波の最大加速度

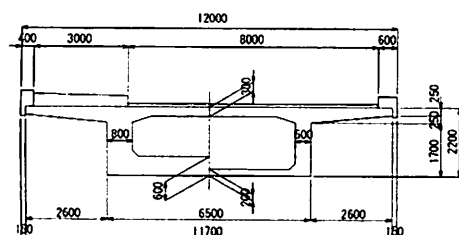
(単位:gal)

	タイプⅠ地震動			タイプⅡ地震動		
	Ⅰ-Ⅱ-1	Ⅰ-Ⅱ-2	Ⅰ-Ⅱ-3	Ⅱ-Ⅱ-1	Ⅱ-Ⅱ-2	Ⅱ-Ⅱ-3
正方向加速度	346	385	346	687	655	736
負方向加速度	-363	-336	-365	-613	-673	-544

注) 大きい方の加速度に着色

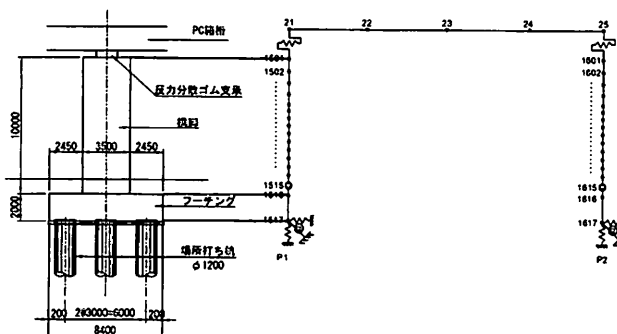


図－１ PC12 径間連続箱桁橋の側面図

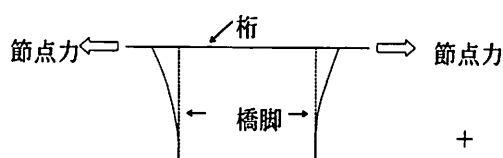


コンクリート強度 $\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$
PC鋼材 12S15.2B

図－２ PC12 径間連続箱桁橋の断面図



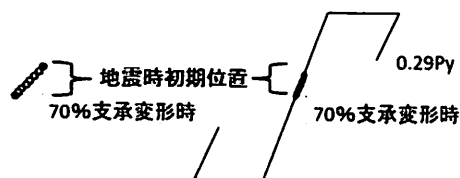
図－３ 解析モデル



図－４ オフセットの設定

表－２ ゴム支承のオフセット量

初期せん断ひずみ	支承せん断変形量 (mm)	支承水平力 H (kN)	橋脚水平耐力 P_{yo} との比 H/P_{yo}
0%	0	0	0
10%	24	629.9	0.042
20%	48	1259.7	0.083
30%	72	1889.6	0.125
40%	96	2519.4	0.166
50%	120	3149.3	0.208
60%	144	3779.1	0.249
70%	168	4409.0	0.291



支承履歴の地震時初期位置 橋脚履歴の地震時初期位置

図－５ 橋脚および支承部の履歴モデル

両方向に入力する必要はない。

２．検証解析モデルと解析手法

本論文では、温度変化による桁伸縮状態を考慮した非線形時刻歴応答解析を行った³⁾⁴⁾。温度変化による桁伸縮状態を用いたのは履歴の非対称性をパラ

メトリックに扱いやすいためである。検討対象とした橋は、Ⅱ種地盤に位置する図－１に示すような地震時水平力分散ゴム支承を適用した PC12 径間連続箱桁橋であり、図－２に示すような桁断面である。解析モデルはこれから単径間を取り出した図－３に示すような左右対称のモデルである。これに、温度変化による桁の伸び量を再現するため図－４に示すように両端に強制変位を与え、ゴム支承のせん断ひずみが表－２に示すように許容せん断ひずみ 70%に達するまで 10%刻みでオフセット量として設定している。ただし、12 径間モデルでは橋脚毎に温度変化の影響は異なるので単径間モデルの挙動とは必然的に異なる³⁾⁴⁾。しかし、本検討では橋の設計を目的としているのではなく、桁伸縮に起因する履歴の非対称性が応答にどのような影響を及ぼすかを定性的に把握することを目的としているので、単径間モデルを用いた方が応答値を定性的に評価しやすいと考えた。なお、本解析モデルでは PC 桁の乾燥収縮・クリープ・弾性変形（以下、不静定量）が終了した状態で分散ゴム支承を標準温度時に直立（せん断変形ない状態）となることを想定している。しかし、実橋でこれらの不静定量を設計に見込む場合にはそれを考慮する必要がある。ただし、不静定量は桁が縮む方向のみへの影響である。

橋脚および支承部のオフセットした履歴の地震時初期位置のイメージを図－５に示す。

３．解析結果

本モデルに対してⅡ種地盤の道路橋示方書の標準

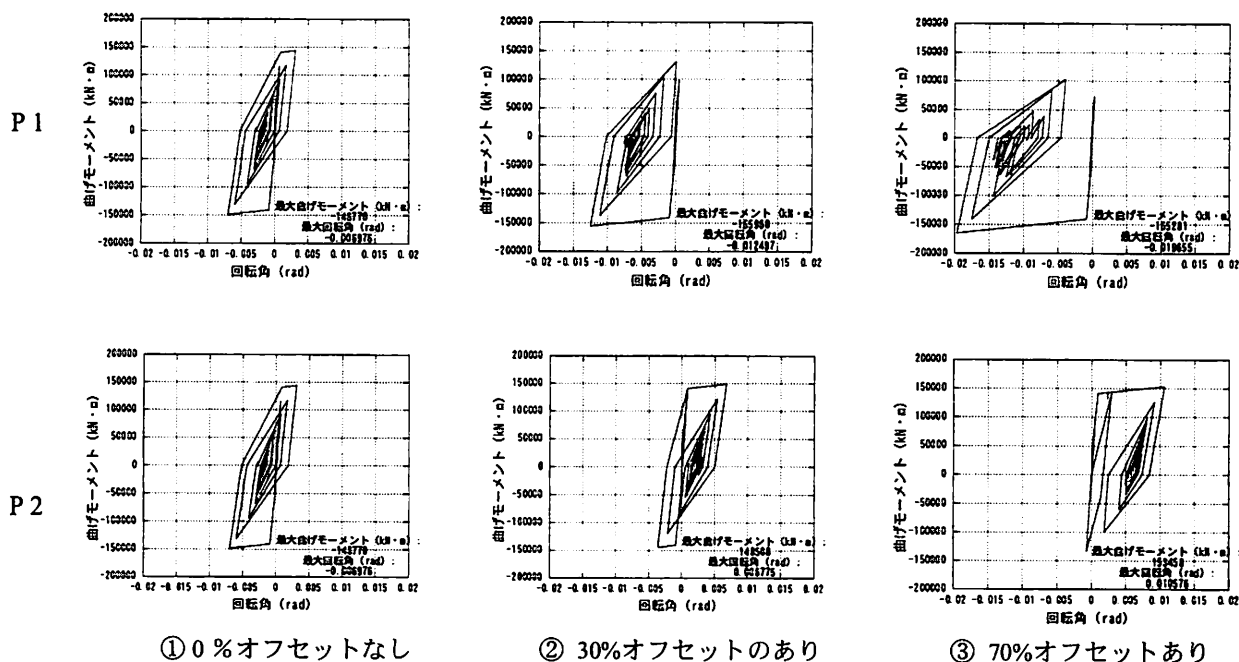


図-6 橋脚の応答履歴 (Ⅱ-Ⅱ-3 地震波)

地震波3波を用いて非線形時刻歴応答解析を実施した。地震波の入力方向は正方向と負方向の2通りである。負方向の解析は正方向の解析結果と逆対称であることを確認し、P1 (P2) の正方向の応答値の符号を逆にしてP2 (P1) の負方向の応答値とした。

オフセットのない状態すなわちゴム支承がせん断変形していない状態の橋脚の履歴は対称であり、この状態で地震力が作用すれば橋脚の応答履歴は図-6の①に示すようにP1とP2では同じである。これに対し、オフセットがある状態、例えばゴム支承が30%、70%のせん断変形している状態で地震力が作用すれば、橋脚の応答履歴は同図②および③に示すようにオフセット量が大きくなるにつれてP1とP2とで大きく異なるようになる。

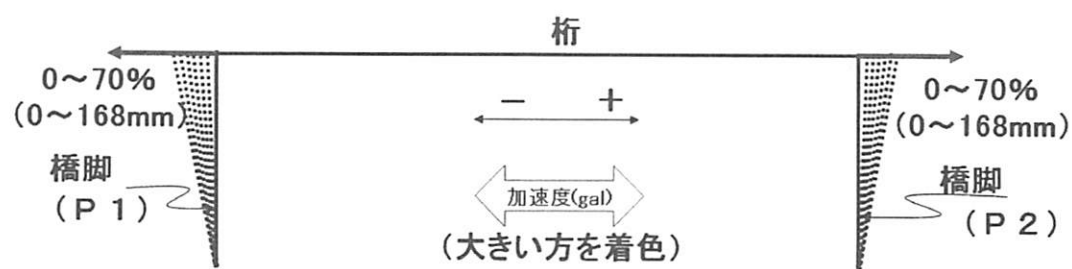
そこで、ゴム支承のせん断変形をパラメータとして、タイプⅠおよびタイプⅡそれぞれの標準地震波3波を両方向に入力した場合のそれぞれの支承の応答変位と橋脚の応答塑性率をそれぞれ図-7および図-8に示す。同図には正負方向の応答値のうち絶対値の大きい方を実線で小さい方を破線で示し、かつP1とP2の応答の内、大きい方の応答値を青線で示している。

同図では、せん断変形0%でのP1とP2の応答は同じであるが、オフセットが大きくなるにつれてそれぞれの応答がオフセット方向に大きくなり、P1とP2の応答が自ずと異なってくる。このように、P1とP2とは同じ橋脚であってもオフセットの方向により応答が異なるため、両橋脚のうち大きい方の応

答で評価する必要があることがわかる。ただし、地震波を負方向にも入力する場合には、P1とP2はそれぞれの正方向と負方向の応答のうち大きい方の応答で評価すればよく、P1とP2の橋脚断面が異なっている場合には地震波を正方向と負方向の両方向に入力する必要がある。

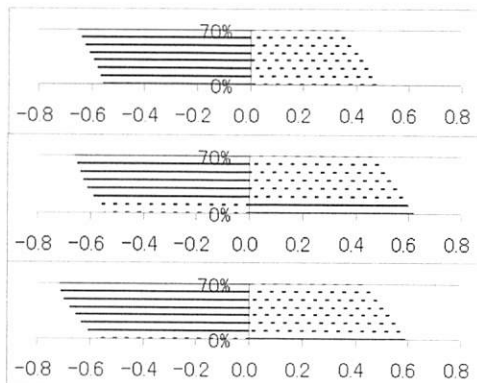
つぎに応答の変動傾向であるが、タイプⅡ地震動では支承の応答変位および橋脚の応答塑性率共に全て地震波の主要動方向と逆の方向に大きくなっている。これは、慣性力が地盤加速度の生じる向きと逆方向に作用することと整合している。一方、タイプⅠ地震動では支承の応答変位は地震波の主要動方向に大きくなっているが、橋脚の応答塑性率は1波目では地震波の主要動方向に大きくなっており、2波目および3波目では地震波の主要動方向と逆の方向に大きくなっている。これは、タイプⅡ地震動では塑性化が進んでいるため長周期化され地盤と逆の位相で振動しやすいのに対し、タイプⅠ地震動では弾性挙動の状態であるため地盤と同じ位相でも応答が大きくなることがあると考えられる。しかし、これらの解析結果だけでは地震波の主要動方向と応答の増大傾向との相関性を明確にできない。

ここで、タイプⅠ地震動の1波目でゴム支承のせん断変形が60%、70%になると橋脚の応答塑性率が急激に大きくなっている。これは橋脚の初期ひび割れが生じる荷重4,330kNに対し、表-2に示したように初期せん断ひずみ60%～70%の間での水平力がその荷重に相当することから、これに上下部構造



支承の応答変位

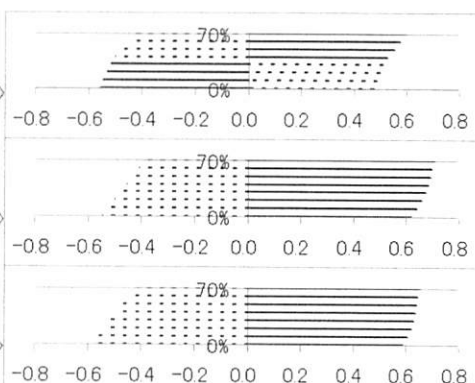
地震波を正方向入力



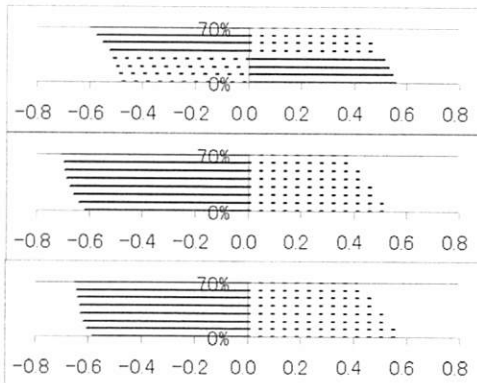
II-II-1正
-613 687

II-II-2正
-673 655

II-II-3正
-544 736



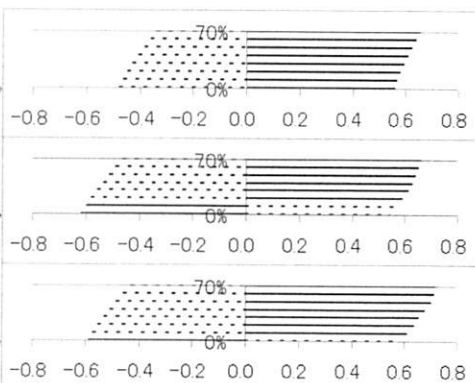
地震波を負方向入力



II-II-1逆
-687 613

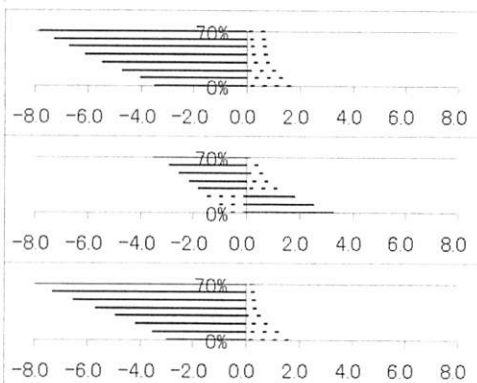
II-II-2逆
-655 673

II-II-3逆
-736 544



橋脚の応答塑性率

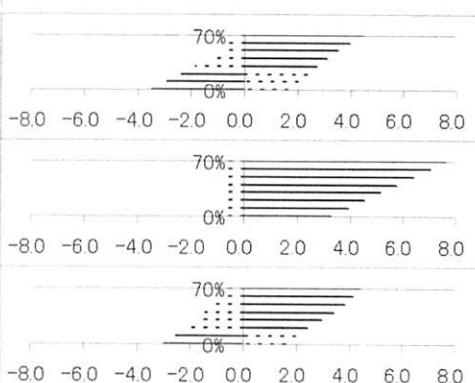
地震波を正方向入力



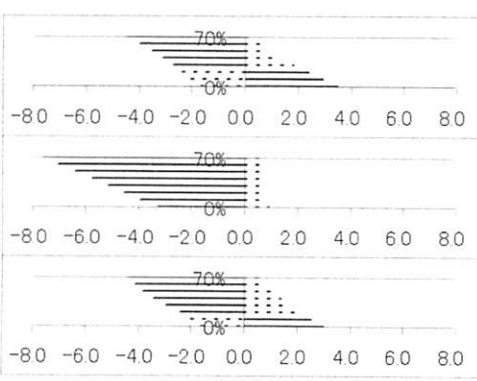
II-II-1正
-613 687

II-II-2正
-673 655

II-II-3正
-544 736



地震波を負方向入力



II-II-1逆
-687 613

II-II-2逆
-655 673

II-II-3逆
-736 544

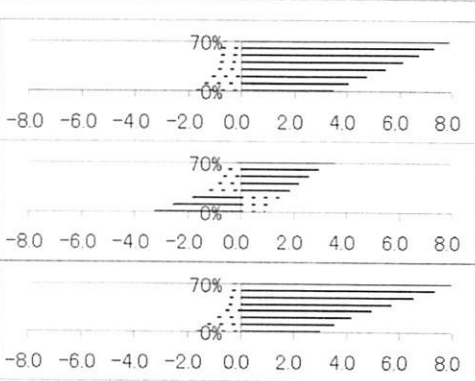


図-8 タイプⅡ地震動における応答

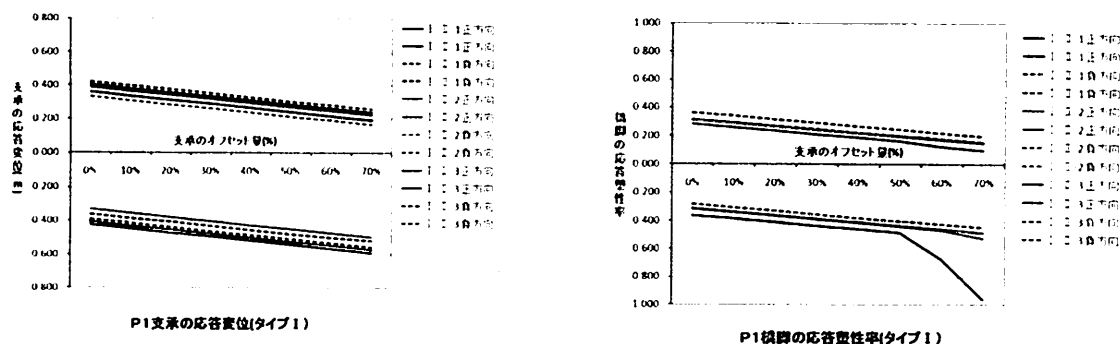


図-9 タイプI地震波両方向入力による応答

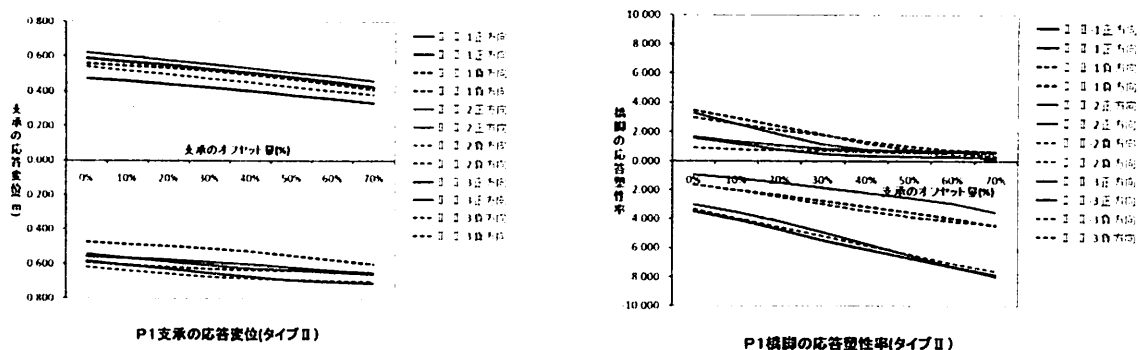


図-10 タイプII地震波両方向入力による応答

間の位相差の影響とが複合して 60%程度以上より橋脚の変形が大きく進行したものと考えられる。このように、特異な現象ではない。

4. 考察

(1) 最大応答値の評価

タイプIおよびタイプIIの標準地震波を正方向および負方向に入力した場合の正負それぞれの支承最大応答変位と橋脚の最大応答塑性率を図-9および図-10に、さらに地震波の入力方向毎に絶対値の大きい値を抽出し図-11および図-12に示す。これらの図はP1の応答であるが、P2は地震波の入力方向が逆であるだけで同じ応答である。

図-9および図-10よりオフセットの変化に対して正側および負側で漸増あるいは漸減していることがわかる。これを評価するために正負の絶対値の大きい方の値を図-11および図-12に示したが、応答は地震波の入力方向の正負どちらかで一旦漸減した後大きくなっている。したがって、地震波を両方向に入力し、大きい方の応答により評価する必要のあることがわかる。

(2) 3波平均による応答評価

単純に地震波を一方向のみに入力した応答を用いて3波平均で評価すると、地震波の入力方向の組み合わせにより図-13～図-14に示すような8と

おりの平均値で評価される。この内、最大応答となる組み合わせは、タイプIの橋脚の応答塑性率では”1波目を正、2波目を正、3波目を負”に入力した場合である。それ以外のタイプIの支承の応答変位およびタイプIIの支承の応答変位・橋脚の応答塑性率では”1波目を正、2波目を負、3波目を正”に入力した場合となり、いずれの場合も正方向あるいは負方向だけの組み合わせとなっていない。したがって、単に正方向入力のための応答で評価すると最大応答を比べて図-15および図-16に示すような過小評価となる。すなわち、3波平均に用いる応答を地震波毎に適切に抽出しなければ過小に評価する可能性があり、特に橋脚が塑性化する場合の応答塑性率は過小評価の度合いが高くなっている。以上より、履歴が非対称となる場合には、地震波の入力方向を両方向で動的解析し、絶対値の大きい方の応答を3波平均する必要のあることがわかる。

5. まとめ

本検討では、作用する荷重や履歴に非対称性を有する場合には、一方向のみに地震波を入力すると応答を過小評価することがあることと、3波平均の評価では入力方向毎に平均するのではなく、各地震波での最大応答を3波平均する必要のあることを示した。例えば、本解析においてオフセット量を20%や30%とした場合の橋脚の応答塑性率を表-3に

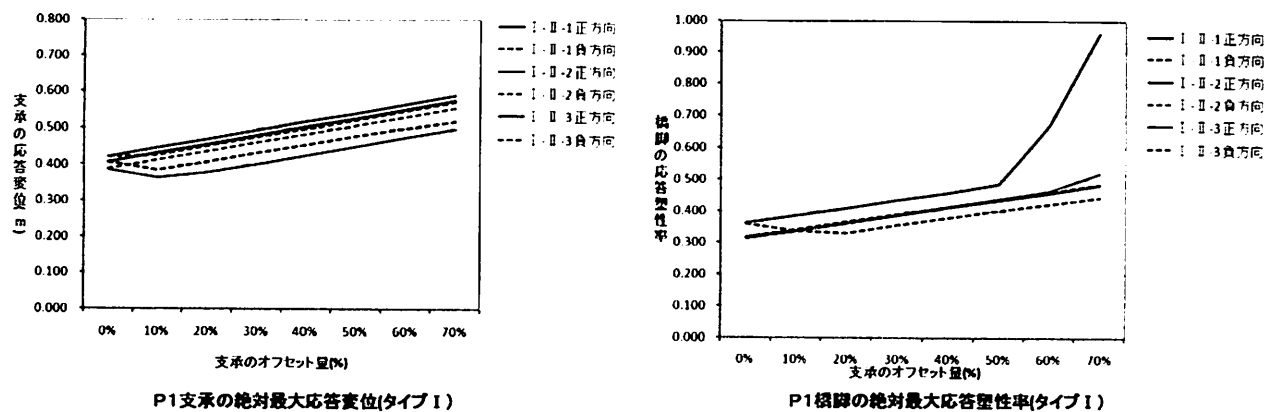


図-1.1 タイプI地震波両方向入力のP1最大応答

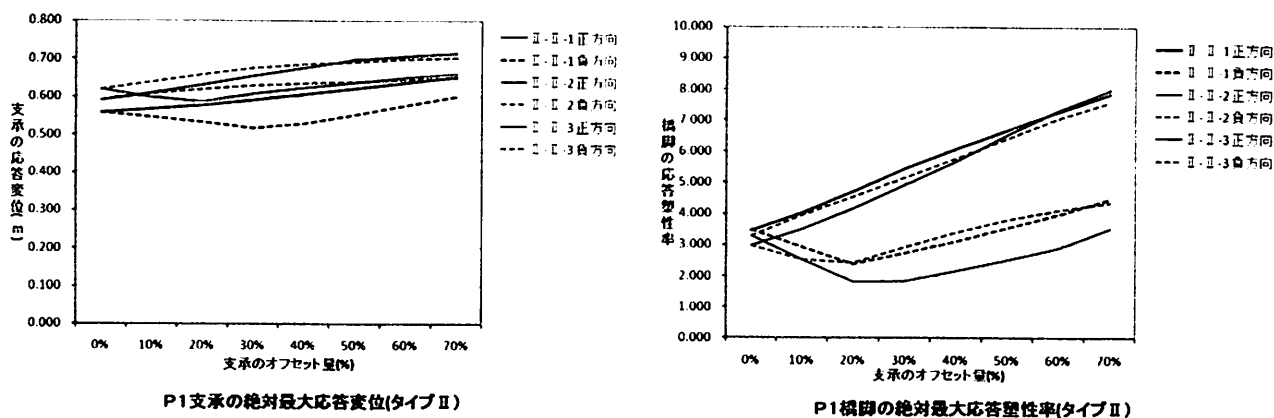


図-1.2 タイプII地震波両方向入力のP1最大応答

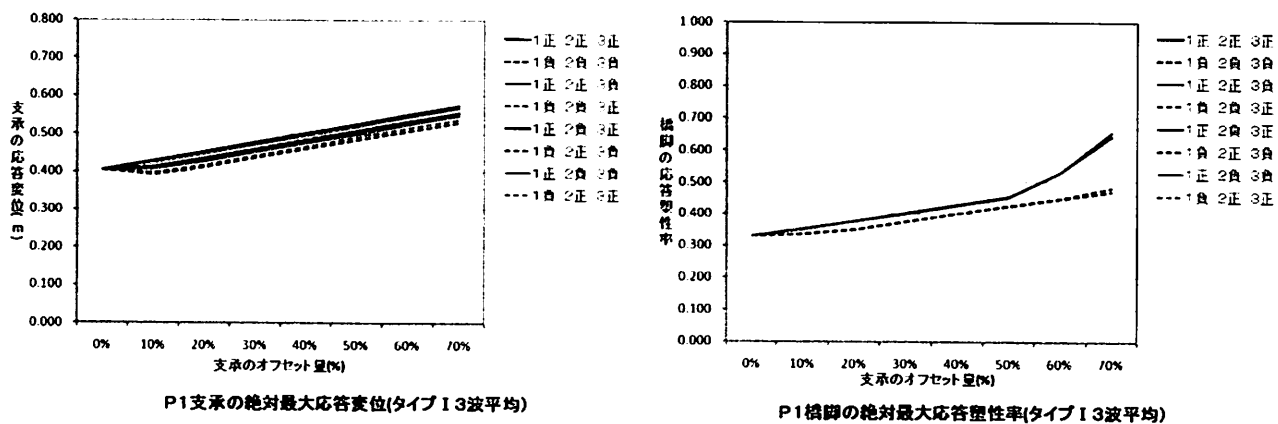


図-1.3 タイプI地震波両方向入力P1最大応答3波平均

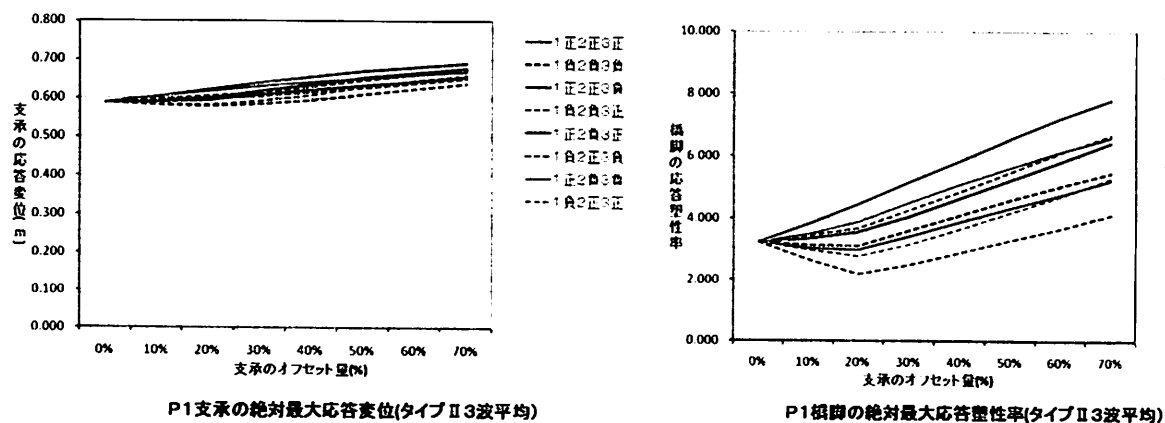
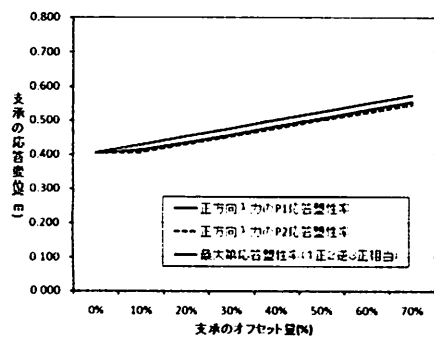
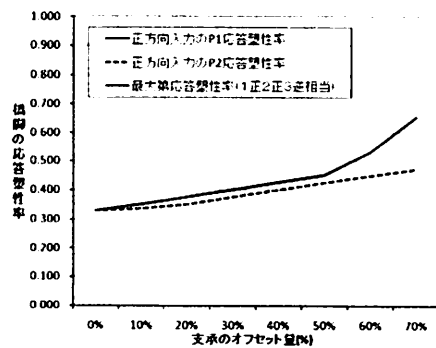


図-1.4 タイプII地震波両方向入力P1最大応答3波平均

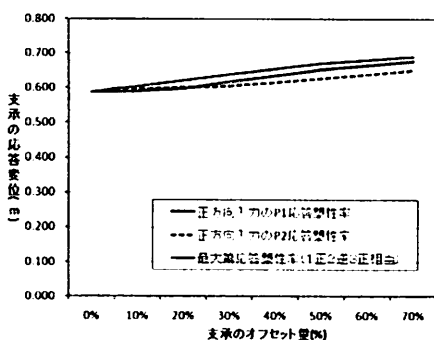


評価方法による支承最大応答率(タイプⅠ3波平均)

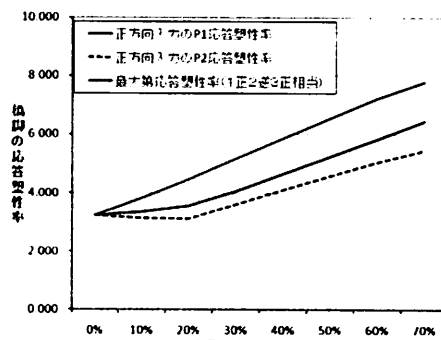


評価方向の相違による最大応答率(タイプⅠ3波平均)

図-15 タイプⅠ地震波の正方向入力と最大応答の3波平均



評価方法の相違による支承最大応答率(タイプⅡ3波平均)



評価方法の相違による最大応答率(タイプⅡ3波平均)

図-16 タイプⅡ地震波の正方向入力と最大応答の3波平均

表-3 橋脚の応答塑性率の評価例

	正方向入力		負方向入力		正に対する負の増減	
	オフセット量		オフセット量		オフセット量	
	20%	30%	20%	30%	20%	30%
Ⅱ-Ⅱ-1	4.72	5.45	2.38	2.74	-2.34	-2.71
Ⅱ-Ⅱ-2	1.81	1.83	4.53	5.15	2.72	3.32
Ⅱ-Ⅱ-3	4.18	4.91	2.44	2.94	-1.74	-1.97
単純平均	3.57	4.06	3.12	3.61	-0.45	-0.46
最大平均	4.48	5.17	4.48	5.17		
単純-最大平均	0.91	1.11	1.36	1.56		
評価誤差率	0.25	0.27	0.44	0.43		

示したが、単純に正方向のみあるいは負方向のみとした橋脚の応答塑性率を評価すると単一の地震波では2～3程度の相違があり、平均で評価すると差異は2程度となる。すなわち、正方向、負方向のそれぞれに入力した最大応答値を抽出して平均で評価するよりも応答塑性率で1以上の過小評価となっており、地震波の入力方向に影響を受けていることがわかる。このような問題点はパラメトリックに検討しなければ明らかにならず、実設計においては解析結果から単に数値のみを取り出して1方向の応答を単純に平均して評価してしまうことが懸念される。この影響は地震波と振動系の特性により様々であるが、設計に当たっては十分に留意しておく必要がある。さらに、任意の構造物に対して動的挙動を評価する検討段階においては、1波のみで評価すること

があり、地震波の入力方向の影響を大きく受けやすいことに留意しておく必要がある。ただし、このような挙動は非対称な荷重と履歴を有する振動系の応答に生じるものであり、ほとんどの解析においては履歴が対称な振動系を対象としていることから、地震波の入力方向を1方向とすることで問題はない。

以上、本論文では非対称な荷重と履歴を有する振動系を動的解析する場合の留意点を示した。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，2002.3
- 2) 宇野裕恵，松田泰治，長悟史，松田宏，宮本宏一，柚木浩一，角本周，松尾龍吾：地震波の入力方向が応答に及ぼす影響，土木学会第63回年次学術講演会，第一部門，pp.265-266，2008.9
- 3) 松田泰治，宇野裕恵，宮本宏一，柚木浩一：温度による桁の伸縮を考慮した橋梁の応答評価に関する一考察，コンクリート工学年次論文，Vol. 30，No. 3，pp. 1039-1044，2008.7
- 4) 松田泰治，宇野裕恵，宮本宏一，柚木浩一，長悟史，松尾龍吾：多径間連続橋の地震時挙動に及ぼす温度荷重の影響に関する研究，土木学会応用力学論文集，Vol.11，pp.1081-1090，2008.8