

道路橋の耐震設計に用いる入力地震動の 位相と非線形応答の関係

臺原 直・矢部正明

正会員（株）長大 構造事業部 構造防災室（〒305-0821 茨城県つくば市春日3-22-6）

1. まえがき

多くの構造物が、非線形動的解析において入力加速度波形振幅の大きさおよび正負方向性に関する特性が時間軸に関して対称な性質を持つとして、最大応答値を評価し、その値を用いて耐震設計が行われている。例えば、道路橋示方書V耐震設計編では、地震動のタイプ毎、地盤種別毎に各3波形の標準加速度波形に対して非線形動的解析を行い、その解析結果を用いて耐震設計を行っている。しかし、偏心橋脚の橋脚躯体、ラーメン橋脚の梁部のようにその配筋が非対称となる場合（構造特性の非対称性）、偏心橋脚や不静定構造のように死荷重によって生じる断面力や変形が非対称となる場合（初期状態の非対称性）、入力

加速度波形振幅の大きさおよび正負方向性に関する特性が時間軸に関して非対称であることが、構造物の応答の方向と大きさに非対称性をもたらすことになる。このような構造特性や初期状態の非対称性を考慮すれば、耐震設計では、各地震動のタイプ毎、地盤種別毎に提示されている標準加速度波形3波の位相の正負を逆転させた非線形動的解析を行う必要がある。しかし、現実には、配筋が非対称になる部材、偏心している構造、非対称な構造系等に対して標準加速度波形の位相の正負を逆転させた非線形動的解析が行われることはほとんどない。

本報告では、橋脚躯体の配筋は対称であるが偏心しているために死荷重によって生じる初期状態が非対称となる偏心RC橋脚と、死荷重によってアーチリブに生じる鉛直

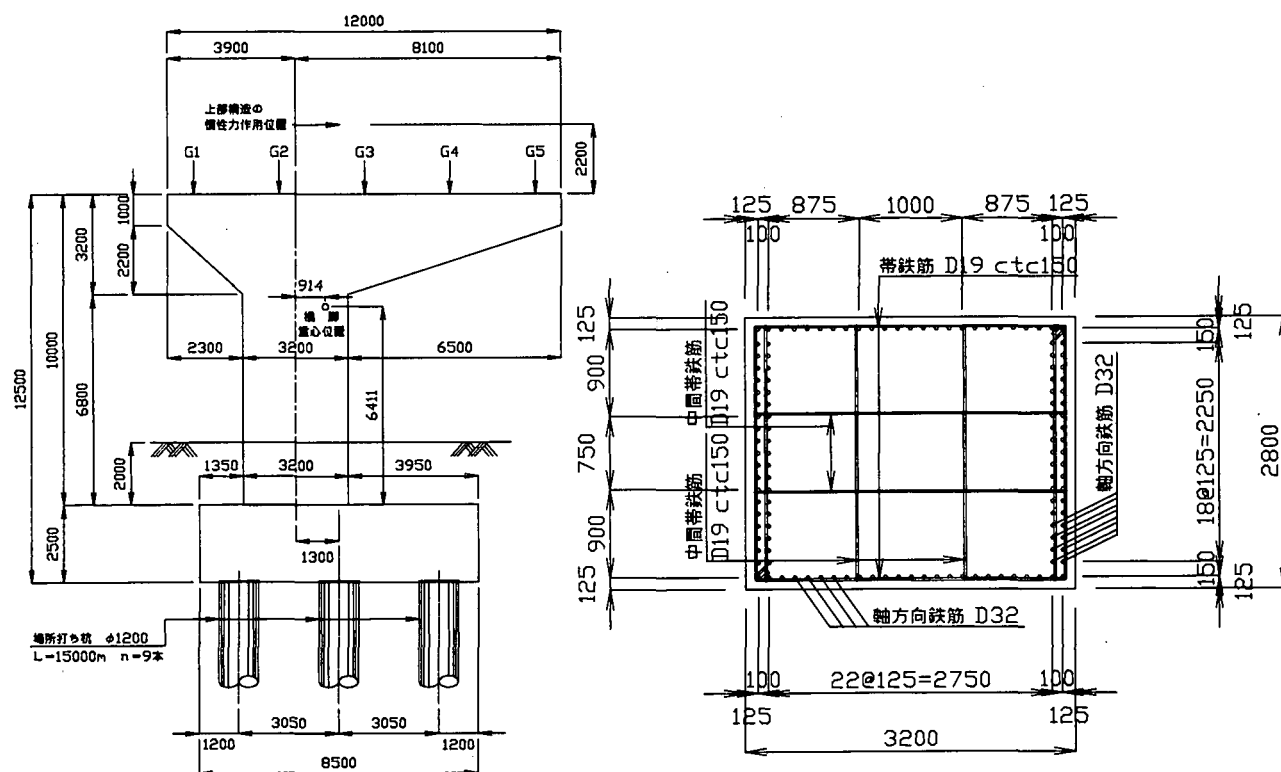


図-1 解析対象橋

(面内) 曲げモーメントがアーチリブ軸線に対して非対称となる鋼アーチ橋を対象に、道路橋示方書Ⅴ耐震設計編に規定された地震時保有耐力法に用いる標準加速度波形の位相の正負を逆転させた非線形動的解析を行い、位相の正負の考慮、非考慮が耐震設計にどの程度の影響を与えるかを解析的に検討したものである。

2. 偏心RC橋脚に対する検討

図-1に示す反力分散支承を有する偏心RC橋脚を対象に地震動を正位相で入力した場合、逆位相で入力した場合の非線形応答値の差について検討を行う。

各部材に与える減衰定数は、ゴム支承2%，橋脚2%，基礎～地盤間ばね20%とし、減衰マトリックスは、Rayleigh型減衰によってモデル化した。非線形動的解析を行う際の橋脚の材料非線形特性は曲げモーメント～曲率関係で定義し、履歴特性は、剛性低下型トリリニアモデル（Takedaモデル）を用いた。入力地震動はタイプⅠ、Ⅱ地震動の標準加速度波形18波とした。この標準加速度波形18波の位相の正負を変化させて（正位相入力・逆位相入力）、非線形動的解析を行い、各標準波形毎の正位相入力と逆位相入力の関係、各地震動タイプ毎、各地盤種別毎（標準加速度波形3波の平均値）の正位相入力と逆位相入力の関係を整理した。入力方向は橋軸直角方向である。なお、図-1に示すような偏心RC橋脚では、 $P \sim \delta$ 効果が橋脚躯体に生じる曲げの非線形応答に影響を及ぼすことがあるので、ここでは上部構造死荷重によって橋脚に生じる初期軸力を考慮した線形化有限変位理論による解析を行った。

着目した応答値は、桁に生じる応答変位、橋脚基部に生じる曲げモーメント、橋脚基部に生じる曲率である。

比較は個々の標準加速度波形の正位相入力と逆位相入力による最大応答値の違い、正位相入力での標準加速度波形3波の平均値と逆位相入力での標準加速度波形3波の平均値を比較した。表-1に最大応答値および標準加速度波形3波の平均値を示す。表-2に正位相入力による応答値と逆位相入力による応答値の差の比率を示す。比率は式(1)によって与えられる。

比率 = $\left(\frac{\text{正位相入力の応答値}}{\text{逆位相入力の応答値}} - 1 \right) \times 100$ (1)

桁に生じる変位は、標準加速度波形Ⅰ-Ⅱ-2、Ⅱ-Ⅲ-1で正位相入力時と逆位相入力時の最大応答値の差が、逆位相入力時の約40%と大きな差が生じている。正位相入力時と逆位相入力時の最大応答値の差が逆位相入力時の10%以上となる標準加速度波形は、18波形中9波形である。このように、個々の標準加速度波形の正位相入力時、逆位相入力時の最大応答値には大きな差が生じるものがある。各地震動のタイプ毎、各地盤種別毎に標準加速

表-1 最大応答値

入力地震動	正位相入力			逆位相入力		
	最大変位 (cm)	基部曲げ モーメント (MN・m)	基部曲率 (1/m×10 ⁻³)	最大変位 (cm)	基部曲げ モーメント (MN・m)	基部曲率 (1/m×10 ⁻³)
Ⅰ-Ⅰ-1	22.0	38.14	4.08	25.4	39.35	4.95
Ⅰ-Ⅰ-2	24.8	37.78	3.81	23.2	37.70	3.76
Ⅰ-Ⅰ-3	25.5	38.90	4.62	20.7	38.32	4.20
平均	24.1	38.27	4.17	23.1	38.45	4.30
Ⅰ-Ⅱ-1	29.2	40.27	5.63	29.1	40.70	5.93
Ⅰ-Ⅱ-2	30.8	40.09	5.50	-22.0	37.87	3.88
Ⅰ-Ⅱ-3	27.8	39.92	5.37	30.6	40.94	6.11
平均	29.3	40.09	5.50	27.3	39.83	5.31
Ⅰ-Ⅲ-1	37.2	43.43	7.92	35.3	44.23	8.51
Ⅰ-Ⅲ-2	41.7	45.21	9.22	35.2	43.85	8.23
Ⅰ-Ⅲ-3	33.0	41.56	6.56	36.5	41.98	6.87
平均	37.3	43.40	7.90	35.7	43.35	7.87
Ⅱ-Ⅰ-1	23.8	37.66	3.72	28.5	39.23	4.87
Ⅱ-Ⅰ-2	28.2	38.62	4.43	25.5	38.08	4.03
Ⅱ-Ⅰ-3	29.2	38.22	4.13	25.9	38.85	4.59
平均	27.0	38.17	4.09	26.6	38.72	4.50
Ⅱ-Ⅱ-1	47.4	45.86	9.69	50.2	45.77	9.63
Ⅱ-Ⅱ-2	47.4	45.16	9.18	49.5	45.93	9.74
Ⅱ-Ⅱ-3	46.9	44.89	8.98	51.1	45.08	9.12
平均	47.2	45.30	9.28	50.3	45.60	9.50
Ⅱ-Ⅲ-1	52.6	46.78	10.36	37.7	42.01	6.89
Ⅱ-Ⅲ-2	46.3	46.28	9.99	44.3	43.60	8.05
Ⅱ-Ⅲ-3	39.1	43.02	7.62	51.1	46.89	10.44
平均	46.0	45.36	9.32	44.4	44.17	8.46

表-2 正位相入力と逆位相入力の比率

入力地震動	比率(%)		
	最大変位	基部曲げ モーメント	基部曲率
Ⅰ-Ⅰ-1	-13.3	-3.1	-17.6
Ⅰ-Ⅰ-2	6.8	0.2	1.3
Ⅰ-Ⅰ-3	23.5	1.5	10.0
平均	4.4	-0.5	-3.1
Ⅰ-Ⅱ-1	0.3	-1.0	-5.1
Ⅰ-Ⅱ-2	39.8	5.9	41.8
Ⅰ-Ⅱ-3	-9.2	-2.5	-12.1
平均	7.4	0.6	3.6
Ⅰ-Ⅲ-1	5.5	-1.8	-6.9
Ⅰ-Ⅲ-2	18.4	3.1	12.0
Ⅰ-Ⅲ-3	-9.6	-1.0	-4.5
平均	4.6	0.1	0.4
Ⅱ-Ⅰ-1	-16.5	-4.0	-23.6
Ⅱ-Ⅰ-2	10.6	1.4	9.9
Ⅱ-Ⅰ-3	12.8	-1.6	-10.0
平均	1.7	-1.4	-9.0
Ⅱ-Ⅱ-1	-5.6	0.2	0.6
Ⅱ-Ⅱ-2	-4.3	-1.7	-5.7
Ⅱ-Ⅱ-3	-8.2	-0.4	-1.5
平均	-6.1	-0.6	-2.2
Ⅱ-Ⅲ-1	39.8	11.3	50.4
Ⅱ-Ⅲ-2	4.5	6.1	24.1
Ⅱ-Ⅲ-3	-23.3	-8.3	-27.0
平均	3.8	2.7	10.2

度波形3波の平均値を算出すると、正位相入力時、逆位相入力時の最大応答値の差は、最も大きいタイプⅠ地震動のⅡ種地盤で約7%となっている。入力地震動が有する不規則性、不確定性に比べれば、非線形応答値での約7%という差は、実用上無視できると考えられる。

橋脚基部に生じる曲げモーメントは、個々の標準加速度波形の正位相入力時、逆位相入力時の最大応答値間に大きな差が生じていない。これは、一般に、RC橋脚の曲げモーメント～曲率関係は、降伏（初降伏）後の剛性が小さいため、降伏後の塑性変形（曲率）が大きくとも、曲げモーメントはそれほど大きくならないからである。

橋脚基部に生じる曲率は、桁に生じる変位と同様な傾向にあり、各地震動のタイプ毎、各地盤種別毎に標準加速度波形3波の平均値を算出すると、正位相入力時、逆位相入力時の最大応答値の差は、最も大きいタイプⅡ地震動のⅠ種地盤で約9%となっている。

図-2は、標準加速度波形Ⅰ-Ⅱ-1、Ⅰ-Ⅱ-2、Ⅱ-Ⅲ-1による桁に生じる変位と橋脚基部に生じる曲げモーメントの時刻歴応答波形である。標準加速度波形Ⅰ-Ⅱ-1の正位相入力時と逆位相入力時の最大応答変位はほぼ同じ値となっているが、最大応答値の発生時刻が正位相入力時では31.65秒、逆位相入力時では23.11秒と異なっている。標準加速度波形Ⅰ-Ⅱ-2によって桁に生じる変位は、正位相入力時と逆位相入力時の最大応答値の応答方向だけでなく、その値も異なるが、最大応答値は、16.80秒と同時刻に発生している。

図-2で注目すべきは、標準加速度波形Ⅰ-Ⅱ-2、Ⅱ-Ⅲ-1によって桁に生じる残留変位である。両標準加速度波形とも、正位相入力時、逆位相入力時とも、上部構造死荷重による偏心曲げモーメントの作用方向に残留変位が生じている。Ⅰ-Ⅱ-2を逆位相で入力した時の残留変位は、正位相で入力した時の約50%、Ⅱ-Ⅲ-1を逆位相で入力した時の残留変位は、正位相で入力した時の約60%と小さくなっている。

図-3は、図-1に示した偏心RC橋脚に作用する偏心曲げモーメントを無視して非線形動的解析を行った結果である。図には、標準加速度波形Ⅰ-Ⅱ-1、Ⅰ-Ⅱ-2、Ⅱ-Ⅲ-1による桁に生じる変位と橋脚基部に生じる曲げモーメントの時刻歴応答波形を示してある。偏心モーメントを無視した場合は、当然、応答値は正負が逆転しているだけでその大きさは同じである。残留変位も、偏心モーメントを無視した場合には、正位相入力と逆位相入力で異なる方向に同じ量だけ生じている。

3. 鋼アーチ橋に対する検討

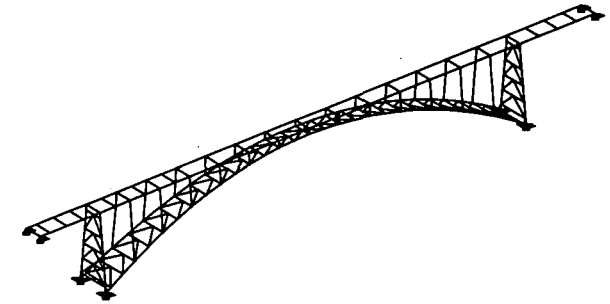


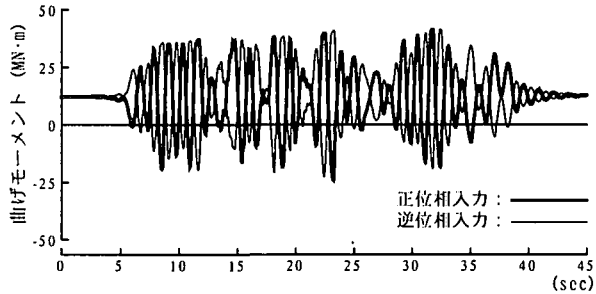
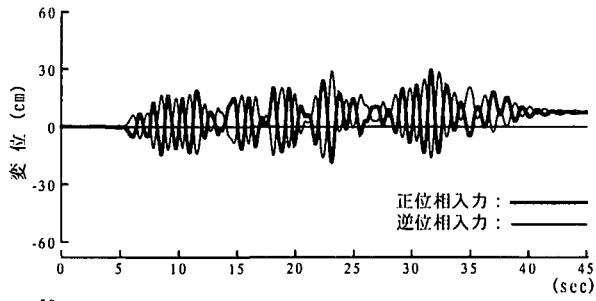
図-4 解析対象とした鋼アーチ橋

図-4に示すような鋼アーチ橋を対象に、地震動を正位相で入力した場合、逆位相で入力した場合の応答値の差について検討を行った。

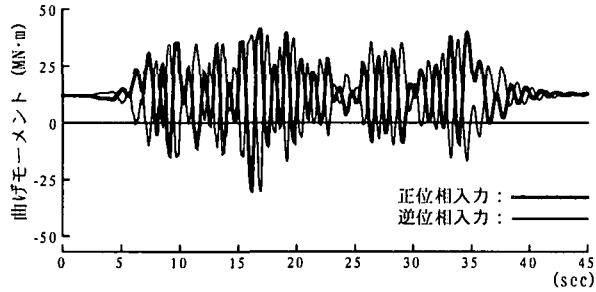
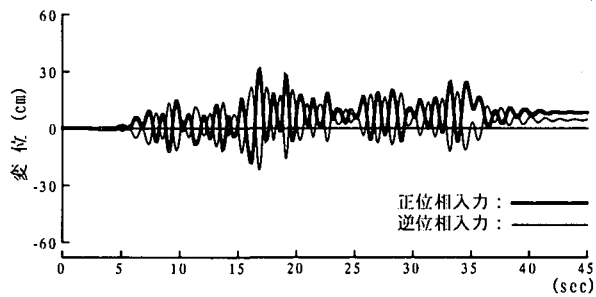
各部材に与える減衰定数は、補剛桁5%、橋脚および鉛直材2%、アーチリブ1%とし、減衰マトリックスは、Rayleigh型減衰によってモデル化した。材料の非線形性を考慮した部材は、橋脚、鉛直材およびアーチリブで、補剛桁は線形部材とした。アーチ橋は、アーチリブに大きな軸力が作用するため、その軸力による幾何剛性がアーチ橋全体系としての剛性に大きく寄与することがあるので、ここでは、軸力による幾何剛性を考慮した線形化有限変位理論と、軸力による幾何剛性を無視した微小変位理論の2種類の解析を行った。入力地震動は、標準加速度波形18波の中

表-3 最大応答値

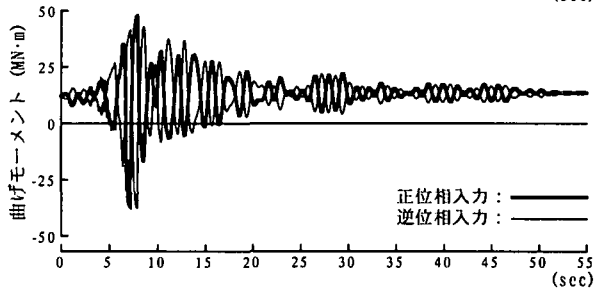
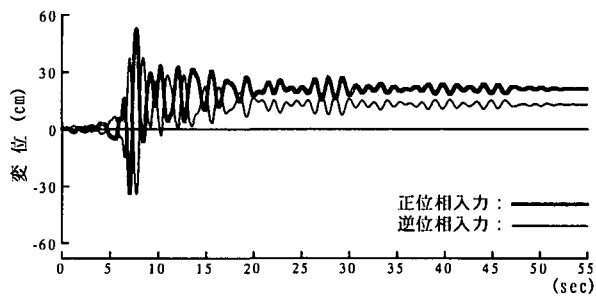
		地震動:タイプⅠ-Ⅲ-1			
		線形化有限変位理論		微小変位理論	
		正位相	逆位相	正位相	逆位相
補剛桁中央変位	(cm)	-19.2	19.3	-18.4	18.5
補剛桁中央加速度	(gal)	-796	796	836	-835
右側アーチリブ基部軸力	(MN)	-10.49	-10.04	-10.37	-10.09
右側アーチリブ基部曲げモーメント	(MN・m)	11.32	11.30	11.30	11.30
右側アーチリブ基部曲率	(1/m × 10 ⁻³)	45.86	41.75	41.89	42.84
右側アーチリブ基部せん断力	(MN)	-1.85	-1.98	-1.95	-2.04
左側アーチリブ基部軸力	(MN)	-10.15	-10.39	-10.16	-10.32
左側アーチリブ基部曲げモーメント	(MN・m)	-10.90	-10.91	-10.91	-10.93
左側アーチリブ基部曲率	(1/m × 10 ⁻³)	-6.28	-4.97	-4.98	-5.84
左側アーチリブ基部せん断力	(MN)	1.37	1.33	1.47	1.44
		地震動:タイプⅡ-Ⅲ-3			
		線形化有限変位理論		微小変位理論	
		正位相	逆位相	正位相	逆位相
補剛桁中央変位	(cm)	19.0	-18.9	17.5	-17.4
補剛桁中央加速度	(gal)	-890	890	-883	884
右側アーチリブ基部軸力	(MN)	-9.99	-10.68	-10.09	-10.49
右側アーチリブ基部曲げモーメント	(MN・m)	11.24	11.23	11.26	11.24
右側アーチリブ基部曲率	(1/m × 10 ⁻³)	24.57	22.18	31.22	26.59
右側アーチリブ基部せん断力	(MN)	-1.94	-1.95	-1.86	-2.04
左側アーチリブ基部軸力	(MN)	-10.65	-10.04	-10.54	-10.12
左側アーチリブ基部曲げモーメント	(MN・m)	-10.90	-10.95	-10.91	-10.97



地震動：タイプ I-II-1

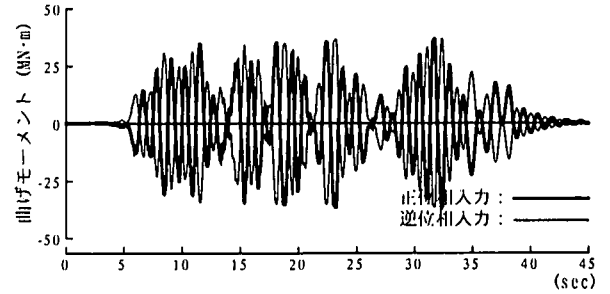
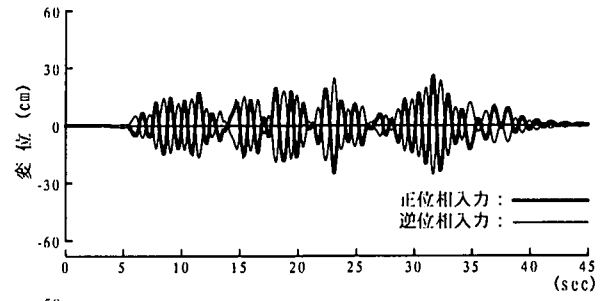


地震動：タイプ I-II-2

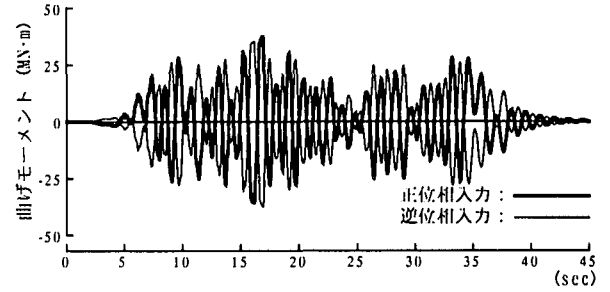
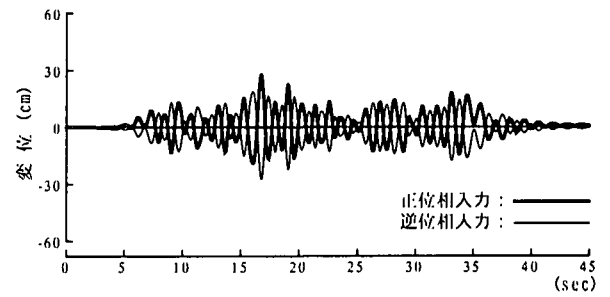


地震動：タイプ II-III-1

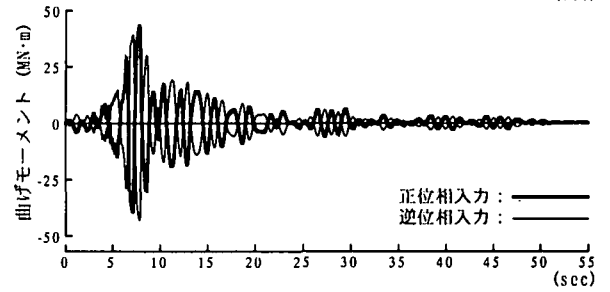
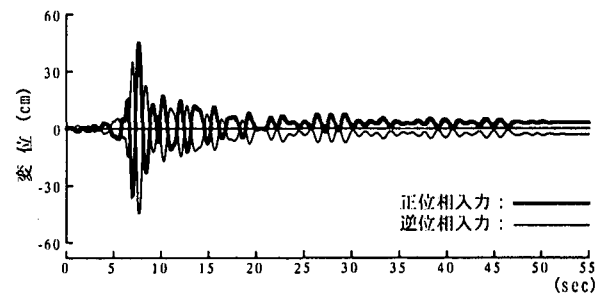
図-2 応答値の時刻歴波形



地震動：タイプ I-II-1



地震動：タイプ I-II-2



地震動：タイプ II-III-1

図-3 応答値の時刻歴波形
(偏心モーメント無視)

表-4 正位相入力と逆位相入力の比率

		地震動:タイプⅠ-Ⅲ-1	
		比率	
		線形化有限変位理論	微小変位理論
補剛桁中央変位	(%)	-0.4	-0.4
補剛桁中央加速度	(%)	0.0	0.1
右側アーチリブ基部軸力	(%)	4.5	2.8
右側アーチリブ基部曲げモーメント	(%)	0.1	0.0
右側アーチリブ基部曲率	(%)	9.8	-2.2
右側アーチリブ基部せん断力	(%)	-6.1	-4.3
左側アーチリブ基部軸力	(%)	-2.3	-1.6
左側アーチリブ基部曲げモーメント	(%)	-0.1	-0.2
左側アーチリブ基部曲率	(%)	26.5	-14.7
左側アーチリブ基部せん断力	(%)	3.1	2.0

		地震動:タイプⅡ-Ⅲ-3	
		比率	
		線形化有限変位理論	微小変位理論
補剛桁中央変位	(%)	0.3	0.4
補剛桁中央加速度	(%)	0.0	-0.1
右側アーチリブ基部軸力	(%)	-6.5	-3.8
右側アーチリブ基部曲げモーメント	(%)	0.1	0.2
右側アーチリブ基部曲率	(%)	10.3	17.4
右側アーチリブ基部せん断力	(%)	-0.6	-8.7
左側アーチリブ基部軸力	(%)	6.1	4.1
左側アーチリブ基部曲げモーメント	(%)	-0.4	-0.6
左側アーチリブ基部曲率	(%)	47.2	11.6
左側アーチリブ基部せん断力	(%)	-1.4	7.8

から、図-4に示した鋼アーチ橋の初期剛性による1次固有周期(基本固有周期)において、弾性加速度応答スペクトルが大きくなる、標準加速度波形Ⅰ-Ⅲ-1とⅡ-Ⅲ-3を採用した。入力方向は橋軸方向である。

表-3は、補剛桁に生じる変位、加速度、アーチリブの軸力、曲げモーメント、曲率の最大応答値である。表-4は、式(1)によって定義した正位相入力時と逆位相入力時の最大応答値の差の比率である。

補剛桁に生じる変位と加速度は、正位相入力時と逆位相入力時の最大応答値の差は小さく、標準加速度波形の位相の違いは無視できる。アーチリブに生じる軸力、曲率、せん断力には、正位相入力時と逆位相入力時の差が現れており、その差は、微小変位理論による結果よりも線形化有限変位理論による結果の方が大きい。アーチリブに生じる軸力の正位相入力時と逆位相入力時の最大応答値の差は、線形化有限変位理論では最大約7%、微小変位理論では最大約4%である。アーチリブに生じる曲率の正位相入力時と逆位相入力時の最大応答値の差は、線形化有限変位理論では最大約50%、微小変位理論では最大約17%である。アーチリブに生じるせん断力の正位相入力時と逆位相入力時の最大応答値の差は、線形化有限変位理論では最大約6%、微小変位理論では最大約8%である。

ここでは、前節の偏心RC橋脚のように、標準加速度波形3波の平均値を求めているが、アーチリブに生じる曲率の差は、線形化有限変位理論、微小変位理論とも非常に大きいことと、アーチ橋では、アーチリブに大きな塑性損傷が生じることは、橋全体系の耐震性を脅かすことにつながる。通常の耐震設計でも、各地震動のタイプ毎、地盤種別毎に提示されている標準加速度波形3波の位相の正負を逆転させた非線形動的解析を行う必要がある。

図-5は、線形化有限変位理論によるアーチリブ基部の曲げモーメントと曲率の応答履歴である。アーチリブ右側基部に生じる曲げモーメントと曲率の応答履歴は、タイプⅠ、Ⅱ地震動とも標準加速度波形の位相を正負で逆転させて入力させているにもかかわらず、同一方向に応答履歴がシフトしている。アーチリブ左側基部に生じる曲げモーメントと曲率の応答履歴は、タイプⅠ地震動では標準加速度波形の位相を正負で逆転させて入力させるとそれに伴い応答履歴のシフト方向も逆になっている。しかし、タイプⅡ地震動では標準加速度波形の位相を正負で逆転させて入力させてもアーチリブ右側の基部と同様に、同一方向に応答履歴がシフトしている。このように、構造系によっては同一箇所でありながら、入力する地震動によって地震動の入力方向と応答の方向の関係が変化するものもある。

4. あとがき

偏心RC橋脚と、鋼アーチ橋を対象に、道路橋示方書V耐震設計編に規定された地震時保有耐力法に用いる標準加速度波形の位相の正負を逆転させた非線形動的解析を行い、位相の正負の考慮、非考慮が耐震設計にどの程度の影響を与えるかを解析的に検討した。検討結果を、以下に示す。

- 1) 偏心RC橋脚の最大応答値は、各地震動のタイプ毎、各地盤種別毎に標準加速度波形3波の平均値を求めれば、正位相入力と逆位相入力による応答の差が実用上無視できる程度に小さくなる。
- 2) 偏心RC橋脚の残留変位は、標準加速度波形を正位相で入力した場合、逆位相で入力した場合ともに、上部構造死荷重による偏心曲げモーメントの作用方向に残留変位が生じている。しかし、その値には、約2倍近い差が生じている。
- 3) 鋼アーチ橋では、アーチリブに生じる曲率に、標準加速度波形の位相を逆転させて入力することの影響が顕著に現れるため、耐震設計では、各地震動のタイプ毎、地盤種別毎に提示されている標準加速度波形3波の位相の正負を逆転させた非線形動的解析を行う必要がある。

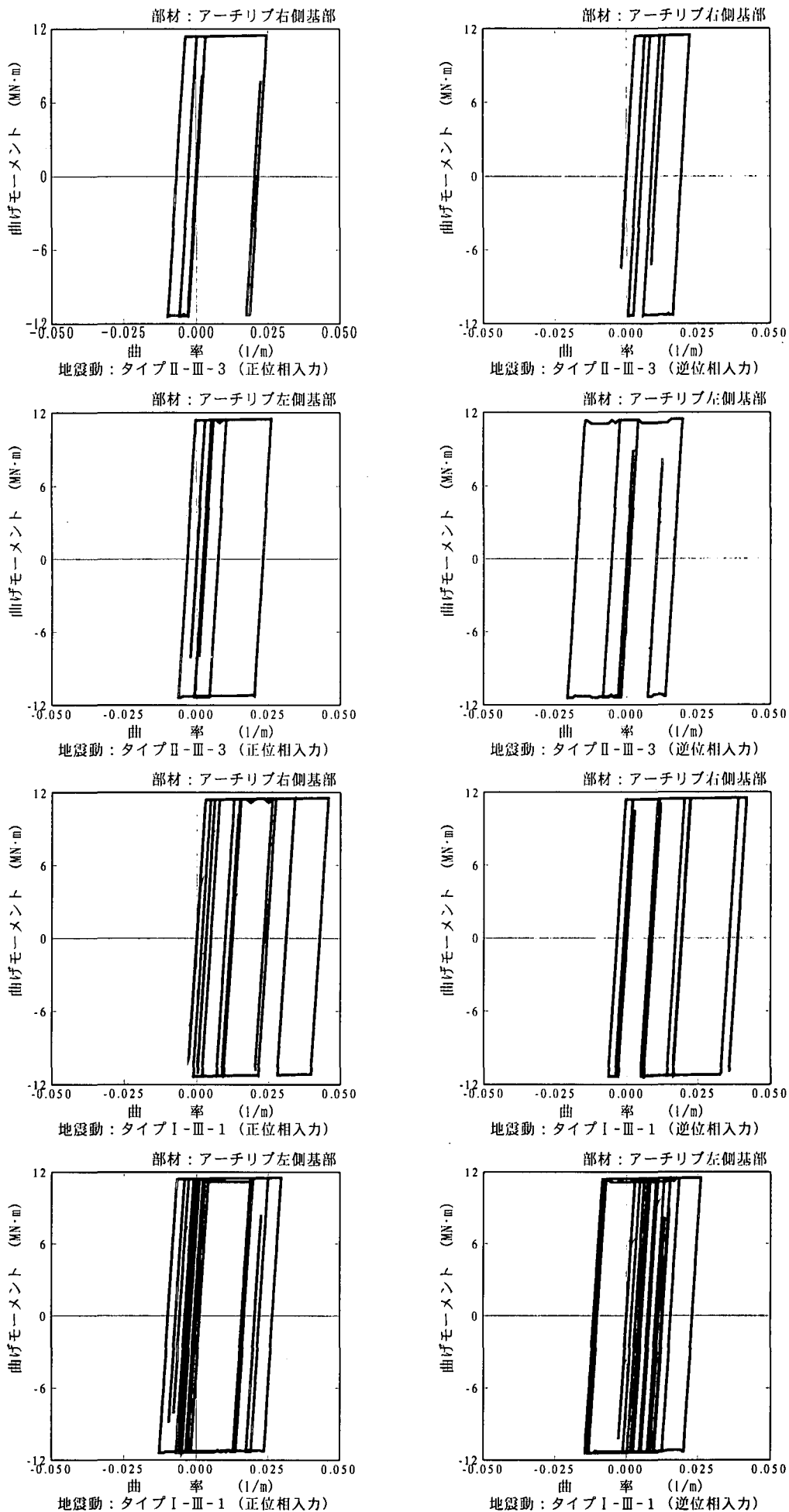


図-5 鋼アーチ橋アーチリブ基部に生じる曲げモーメントと曲率の応答履歴と入力地震動の位相