

# 近年の国内で発生した地震動による水管橋の地震時動的挙動

竹田周平<sup>1</sup>，北浦 勝<sup>2</sup>，宮島昌克<sup>2</sup>

Syuhei TAKEDA<sup>1</sup> and Masaru KITaura<sup>2</sup> and Masakatsu MIYAJIMA<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 金沢大学大学院 自然科学研究科

<sup>2</sup> 教授 金沢大学大学院 自然科学研究科

1995年の兵庫県南部地震以降，国内では2004年の新潟県中越地震を始め多くの強地震動が発生し，土木構造物に被害をもたらした．その後これらの被害を検証するために，橋梁等の被害解明を明らかにすることを目的とした研究が行われている．これらの研究では鉄道橋や道路橋を中心としたものが主であり，水管橋に対する研究を行った事例は少ない．また既往の研究では，水管橋の減衰定数は同形式の道路橋に比較し小さいという知見を得ている．本研究では汎用的なトラス形式水管橋に着目し，近年国内で発生した強地震動を基に地震応答解析を行い，これらの強地震動による動的応答性状について検討を試みた．

## 1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以降，日本国内においていくつかの強地震動が観測された．これらの地震動において，橋梁等の構造物では支承の損傷や桁端部とパラベットの衝突による損傷，また橋脚の断落し部の損傷などが確認された．その後，道路橋や鉄道橋においては，近年国内で発生した強地震動を基に被害を受けた橋梁の損傷解明を目的とした研究が行われているが，水管橋についてはこれらの地震動に基づく検討事例は見当たらない．特に近年の研究において，水田ら<sup>1)</sup>は斜張橋をはじめいくつかの独立水管橋に着目し常時微動，自由振動，強制振動を計測して固有振動モードや減衰定数を求め，減衰定数が同形式の道路橋に比べ小さいと新たな知見を得ている．また竹内ら<sup>2)3)</sup>は，三角形トラス及びランガー形式水管橋に着目し，いくつかの強地震動による地震応答解析を行い支承部に損傷が発生し易いことを検討している．更に大塚ら<sup>4)</sup>はこれまでの水管橋の耐震上の問題に対し，伸縮可撓管と支承部を改良することによる免震効果により，耐震性が向上することを導いている．また著者ら<sup>5)</sup>も同様にトラス型水管橋に着目し振動実験を行い，水管橋の減衰定数は道路橋の基準<sup>6)</sup>で定められている減衰定数に対して小さいことを確認した．しかしながら，水管橋の動的挙動を検討した事例は未だ少なく定量的な考察を述べるに至っていない．本研究では代表的な水管橋を対象に，近年国内で発生した強地震動を基に動的応答解析を行い，これらの応答特性について把握することを目的とした．

## 2. 解析対象とする強地震動

### (1) 強震記録と橋梁の被害概要

2003年以降我が国において，2003年に三陸南地震，宮

城県北部地震や十勝沖地震，更に2004年には新潟県中越地震が発生している．これらの地震では，(独)防災科学技術研究所の強震ネットワークK-NET，基盤強震観測網KiK-net，気象庁強震ネットワーク等により多くの強震記録が得られている．

2003年の三陸南地震においては，牡鹿観測点(K-NET)等で水平最大加速度1112galと1000galを超過する記録が得られている．道路橋の被害では，岩手県宮守村の船渡橋において鋼製支承のアンカーボルトの変形が生じたが，それ以外の橋梁では橋台取付部の沈下により段差が発生した程度であり，構造的に影響のある損傷は少なかった．

2003年の宮城県北部地震では，鹿島台町観測点においてパルス的な応答ではあるが，水平最大加速度として1606galが記録されている．橋梁の被害では，宮城県の県道河南鳴瀬線の小野橋が被災を受けた．被災状況としては支承が破損して桁が移動したが，PCケーブル連結装置により落橋を防止することができ被災を最小限に留めることができた．それ以外では，三陸南地震動と同様に橋台取付部の沈下により段差が発生した程度であり，構造的に影響のある損傷は少なかった．

2003年の十勝沖地震では，広尾観測点において水平最大加速度が970galの強震記録が得られている．橋梁の被害として，十勝河口橋では上部構造が橋軸直角方向に60cm以上移動し，支承部に大きな損傷が発生した．千代田大橋では支承部と橋脚に曲げ破壊による被害が発生した．さらに歴舟橋でも支承部に損傷が確認されている．

2004年の新潟県中越地震では，川口観測点において水平最大加速度が1670gal，また小千谷観測点においては1496galと大きな値が得られている．橋梁の被害として，鉄道橋では第一和南津R2高架橋のせん断破壊及び重度の斜めひび割れの発生や，魚野川橋梁の段落とし部の曲げ破壊が確認された．また道路橋では，小千谷大橋の橋

脚で曲げ破壊，芋川橋では橋脚の斜めひび割れが発生，鋼製支承のローラー逸脱による破損等が確認された。

(2) 解析対象の強地震動選定

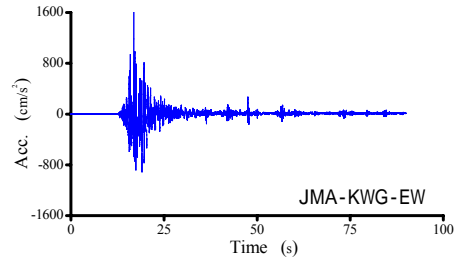
近年の国内で発生した地震は，1995年の兵庫県南部地震で観測された最大加速度よりも大きな記録が得られている。但しこれらの最大値と橋梁の被害規模の関係は必ずしも一致していない。そこで本研究では，比較的橋梁の被害が多く発生した2003年の十勝沖地震と2004年の新潟県中越地震に着目することとした。

解析で用いる強震記録の時刻歴波形を図-1に示す。図-1の(a)は十勝沖地震で観測された広尾観測点のデータ，(b)は池田観測点のデータである。また(c)～(f)は新潟県中越地震で観測されたものであり，それぞれ川口町観測点EW及びNS方向，小千谷観測点EWとNS方向である。

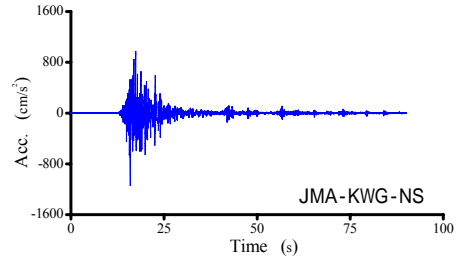
3. 水管橋の概要とモデル化

(1) 解析対象橋梁の概要

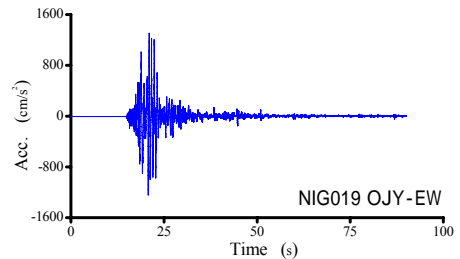
本解析で対象とした橋梁は，支間長  $L=35.1\text{m}$  の斜角を有する単純逆三角形ワーレントラス補剛形式の水管橋である。図-2に水管橋の概要図を示す。この水管橋の構造について，上弦材水平間隔は  $B=2.5\text{m}$ ，上下弦材の鉛直間隔は  $H=2.8\text{m}$ ，外径は  $318.5\text{mm}$  である。また下弦材は送水管を兼用しており，上部構造端部にはクローザー型の伸縮可撓管が設置されている。更に橋梁には，点検用の歩廊が全区間に渡り設置されている。支承構造は固定可動型の鋼製支承であり，杭基礎により支持されている。



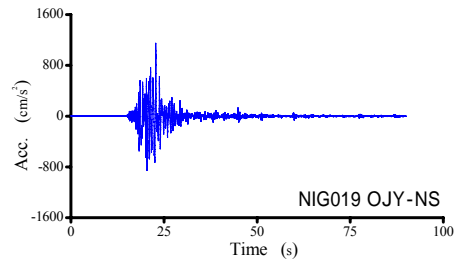
(c) 新潟県中越地震 川口町観測点 (EW)



(d) 新潟県中越地震 川口町観測点 (NS)

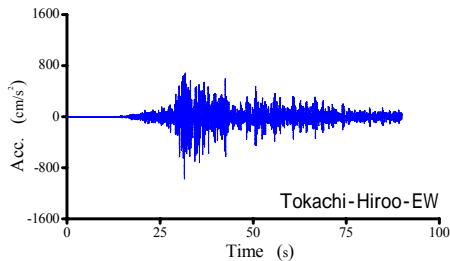


(e) 新潟県中越地震 小千谷観測点 (EW)

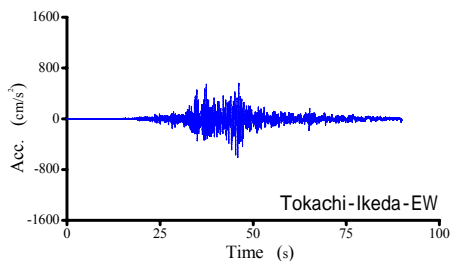


(f) 新潟県中越地震 小千谷観測点 (NS)

図-1 強震記録の時刻歴波形



(a) 十勝沖地震 広尾観測点



(b) 十勝沖地震 池田観測点

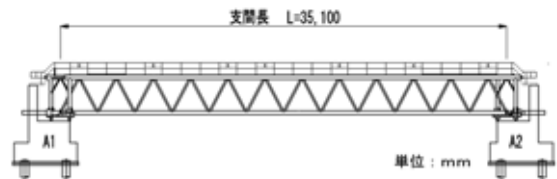


図-2 水管橋の概要図

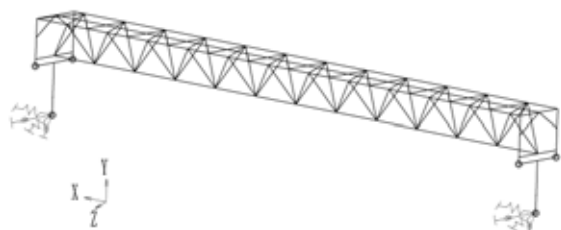


図-3 解析モデル

表-1 減衰定数

部材	上部	橋台	杭基礎
減衰定数	0.6%	5%	20%

表-2 SR パネ定数

	$A_{xx}=A_{zz}$	$A_{xr}$	$A_{rr}$	$A_{zr}$	$A_{rr}$
単位	kN/m	kN/rad	kN・m/rad	kN/rad	kN・m/rad
A1	$6.80 \times 10^5$	$1.04 \times 10^6$	$7.21 \times 10^6$	$-1.04 \times 10^6$	$8.25 \times 10^6$
A2	$6.44 \times 10^5$	$1.02 \times 10^6$	$7.23 \times 10^6$	$-1.02 \times 10^6$	$8.26 \times 10^6$

表-3 解析ケース

ケース	入力地震動	入力方向
Case-1	十勝沖地震 広尾 EW	水平方向
Case-2	十勝沖地震 池田 EW	水平方向
Case-3	新潟県中越地震 川口 EW	水平方向
Case-4	新潟県中越地震 川口 NS	水平方向
Case-5	新潟県中越地震 小千谷 EW	水平方向
Case-6	新潟県中越地震 小千谷 NS	水平方向

## (2) 解析条件と解析モデル

数値積分法としては Newmark 法 ( $\gamma=1/4$ ) を用い、積分時間間隔は  $\Delta t=0.002s$ 、減衰モデルは Rayleigh 型とした。ここでモード減衰を算定するための各部材における減衰定数を表-1 に示す。本解析における上部構造の減衰定数は、著者ら<sup>5)</sup>の振動実験で得られた値を用いた。解析モデルを図-3 に示す。解析モデルでは橋梁全体を 3次元で表し、上下部構造部材は、梁及び軸力要素でモデル化した。支承構造については、固定側は回転のみ自由とし、可動側は橋軸方向に移動を許容するモデルとしたが、移動制限による変位拘束は考慮していない。基礎構造については SR パネでモデル化し、橋軸方向及び橋軸直角方向それぞれ独立した要素として与えた。表-2 に SR パネ定数を示す。今回の解析では、配水管の内部の水重と歩廊の鉛直剛性は考慮したが、伸縮可撓管はモデル化していない。一般的に設置されているクローザ型伸縮可撓管は摩擦による減衰特性を有していると考えられるが、力学的特性が不明確なため本解析では考慮しないものとした。なお時刻歴応答解析には汎用ソフトである DYNAGE<sup>7)</sup>を使用した。

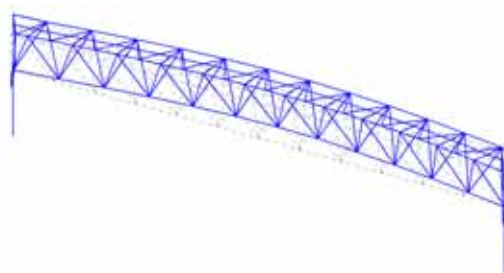


図-4 モード図 (全体系 1次)

表-4 固有値解析結果

Mode	振動数 $f(Hz)$	周期 T(s)	有効質量比			減衰比 h
			X	Y	Z	
1	3.14	0.318			0.199	0.039
2	4.08	0.245	0.049	0.050		0.018
3	4.77	0.209	0.422	0.009		0.151
4	5.22	0.192	0.195		0.007	0.191
5	5.26	0.190	0.214		0.004	0.195
6	5.63	0.178	0.004		0.554	0.140
7	6.33	0.158	0.005		0.153	0.037
8	10.38	0.096	0.003	0.001		0.019
9	11.33	0.088	0.027	0.004		0.026
10	12.35	0.081	0.002			0.011

## (3) 解析ケース

解析ケースを表-3 に示す。本モデルは後述する固有値解析の結果より水平方向の振動が卓越しているため、水平方向の単一加振とした。解析時間は、Case-1 と 2 では 80 秒、Case-3 ~ 6 では 30 秒とした。

## (4) 固有値解析と解析結果

固有値解析では Householder 法を用い、有効質量比の合計が 100% になる全次数まで解析を行った。固有値解析結果を表-4 に示す。また代表的なモードを図-4 に示す。解析結果は、全体 1 次モードが  $f=3.14Hz$  で水平方向の対称 1 次モードであり、全体系 2 次モードが  $f=4.08Hz$  で鉛直方向の対称 1 次モードであった。

## 4. 解析結果と考察

### (1) 時刻歴応答値

時刻歴応答については、上部構造の支間中央付近と橋台の天端位置に着目した。表-5 に上部構造の最大応答加速度、速度及び変位を示す。また表-6 に橋台天端位置の最大値を示す。さらに代表的な時刻歴応答図を図-5,6 に示す。上部構造の最大応答値について、加速度では Case-1 が  $111m/s^2$ 、Case-3 が  $122m/s^2$  と非常に大きな応答となっている。また速度と変位においても同様に Case-1 と Case-3 が大きなものとなっている。さらに下部構造から上部構造の増幅比 (上部応答 ÷ 下部応答) に着目すると、Case-1 以外では 2.0 ~ 2.5 倍であるのに対し、Case-1

は 5.7 倍と大きなものとなっている。

このように Case-1 が他に比較し大きな応答値になったのは、上部構造の卓越振動数と入力値の卓越振動数が近似して共振したからであると考えられる。

但し今回の検討モデルにおいて、上部構造の部材は弾性要素としてモデル化しているが、実際はこのように大きな応答に至る前に支承等が損傷し応答が低減されると考えられる。これらについては、支承の破壊を考慮した非線形モデルで再検討する予定である。

(2) 上部構造の発生断面力

上部構造の発生断面力については、発生断面力と許容耐力の関係に着目した。表-7 に上部構造の損傷度を示す。ここで表中に示す損傷率は、着目する部材数に対して降伏した部材数の率を示す。

表-5 上部構造の最大応答値

	加速度 (m/s <sup>2</sup> )	速度 (m/s)	変位 (m)
Case-1	111.8	5.1	0.223
Case-2	49.6	2.2	0.094
Case-3	122.9	3.2	0.136
Case-4	73.3	2.3	0.088
Case-5	68.4	2.4	0.107
Case-6	51.1	2.0	0.121

表-6 下部構造の最大応答値

	加速度 (m/s <sup>2</sup> )	速度 (m/s)	変位 (m)
Case-1	19.6	0.46	0.018
Case-2	22.7	0.46	0.017
Case-3	55.8	1.41	0.035
Case-4	29.0	0.71	0.018
Case-5	37.0	0.80	0.029
Case-6	26.5	0.53	0.019

表-7 上部構造の損傷度

Case No.	主部材			副部材	
	上弦材	下弦材	斜材	横支材	横綾材
Case-1	56.8%	-	43.7%	-	50.0%
	0.572	-	0.688	-	0.542
Case-2	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-
Case-3	29.6%	-	45.8%	-	70.8%
	0.800	-	0.584	-	0.448
Case-4	-	-	-	-	12.5%
	-	-	-	-	0.874
Case-5	-	-	-	-	25.0%
	-	-	-	-	0.873
Case-6	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-

上段：損傷率，下段：最低安全率，- は弾性域を示す。

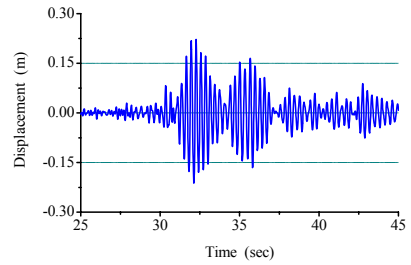
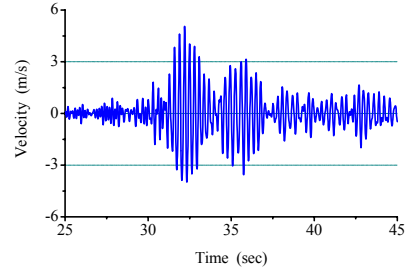
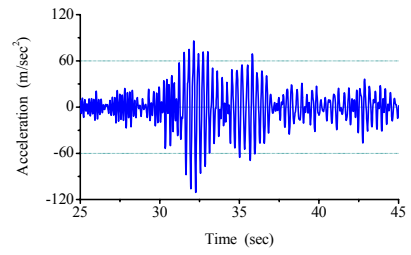


図-5 Case-1 の時刻歴応答図

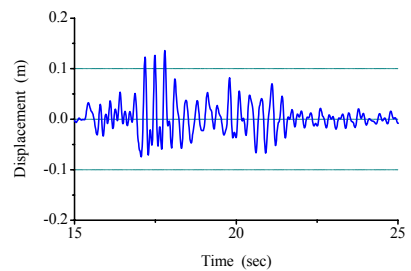
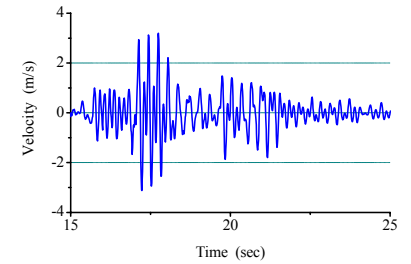
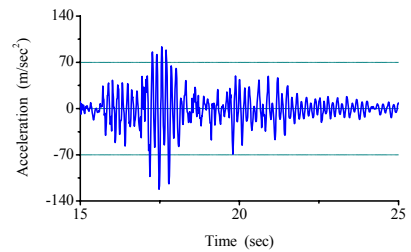


図-6 Case-3 の時刻歴応答図

また表中の最低安全率  $n$  は式[1]により求めた．ここに  $N$  は発生断面力， $N_a$  は許容耐力を示す．

$$n = \frac{N_a}{N} \quad [1]$$

表より主部材に着目すると，Case-1 及び 3 では上弦材及び斜材で塑性化が確認されている．特に Case-1 については，上弦材で部材数の 57%と半数以上が塑性化している．また最低安全率は 0.572 であることから，部材の耐力に対して 2 倍近い作用力が発生していることになる．一方下弦材は，いずれのケースにおいても塑性化していない．また副部材に着目すると，Case-2 及び 6 以外の横綾材で塑性化が確認された．特に Case-3 においては部材数の 70%が塑性化している．一方横支材は，いずれのケースにおいても塑性化していない．

### (3) 支承反力

支承の反力については，鋼製支承に作用する上揚力に着目した．表-8 に各解析ケースにおける応答の最大値を示す．また図-8 に Case-1 における時刻歴反力図を，図-9 に Case-3 の時刻歴反力図を示す．図中の要素番号のうち，5000 番台は A1 橋台側，6000 番台は A2 橋台側を示している．なお表中の反力は，支承 1 個あたりの値である．表よりいずれの検討ケースにおいても，死荷重反力  $R_d$  (65kN/支承 1 個) を上回る上揚力が発生している．これらの  $R_d$  に対する倍率では，Case-1 の A2 橋台側で約 9.8 倍，Case-3 の A2 橋台側で約 10.4 倍，また最も応答が小さい Case-2 においても約 3.1 倍となっている．このように大きな上揚力が発生した要因は，水管橋の自重が軽いことに加え，上部構造の水平方向に大きな地震力が作用し，支承付近において管軸に対して回転するような挙動となり，その結果支承部に大きな上揚力が発生したものと考えられる．

### (4) 考察

時刻歴応答値に注目すると，Case-1,3 では加速度，速度及び変位共に大きな応答となっている．特に Case-1 では構造物の卓越振動数と強震記録の卓越振動が近似していることで共振し，大きく増幅したものと考えられる．

表-8 支承の反力 (kN)

Case No.	符号	A1		A2	
		5007	5010	6007	6010
Case-1	(+)	556.5	806.2	648.0	745.5
	(-)	612.7	453.1	641.9	462.4
Case-2	(+)	327.0	387.4	399.3	334.5
	(-)	224.1	201.9	200.7	230.0
Case-3	(+)	589.3	827.7	712.0	795.5
	(-)	642.3	463.2	679.0	550.6
Case-4	(+)	416.3	438.2	515.3	412.2
	(-)	274.7	288.9	275.6	349.1
Case-5	(+)	361.4	479.6	449.5	435.3
	(-)	301.0	238.4	317.0	276.6
Case-6	(+)	334.3	404.2	417.6	351.5
	(-)	241.8	208.1	224.6	252.3

符号の + は鉛直力，- は上揚力を示す．

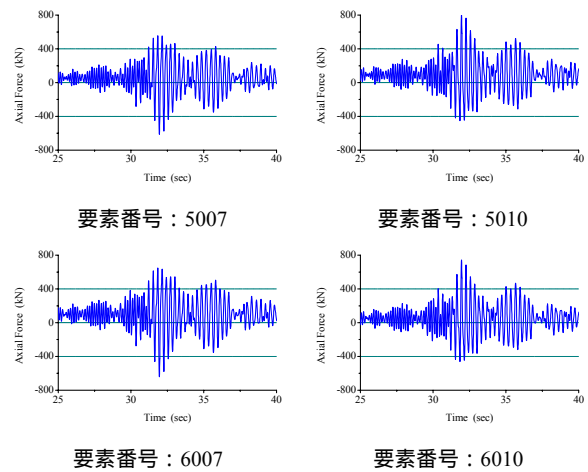


図-8 Case-1 の支承部の時刻歴反力図

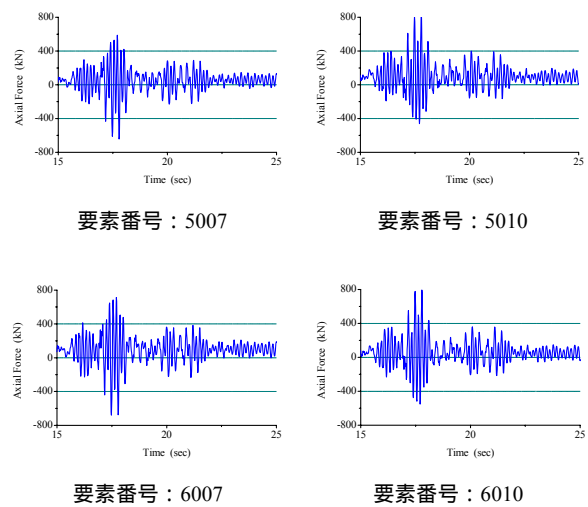


図-9 Case-3 の支承部の時刻歴反力図

今回は振動実験で得られた減衰定数を用いたが，これらの振動実験で得られた値は微小変形レベルの減衰定数であり，今回のように大変形域における解析での適用性については今後検討する必要がある．

上部構造の発生断面力に注目すると，応答が大きい Case-1 と 3 で主部材が塑性化する結果となり，また塑性化した部材数も 50%前後と多い．すなわち，主構造が多く損傷することはトラスとしての構造系に影響し，地震後大規模な補修が必要となることも予測される．一方，副部材にも多くの損傷が発生しているが，これらについては構造系に大きく影響を及ぼさないため多少の損傷は許容できる．しかしながら，Case-3 においては 70%と多くの部材が損傷する結果となった．

支承反力に着目すると，いずれのケースにおいても死荷重反力  $R_d$  をはるかに上回る上揚力が発生している．これらの  $R_d$  に対する倍率は 3.1 倍～10.4 倍と大きな応答となっている．これは死荷重反力が小さいことに加え，水平方向に大きな地震力が作用し，管軸方向に対して回転するような挙動となったこと，また上部構造の減衰定数が小さいことも影響していると考えられる．しかしながら実際の挙動では，ある一定の上揚力でアンカーボルト

が破断したり、また下部構造側からアンカーボルトが抜け出すような損傷が予測される。以上より、支承の破損を考慮した動的挙動を把握することが今後の課題である。

## 5. まとめ

本研究では、近年国内で発生したいくつかの強地震動に着目し、逆三角トラス補剛形式水管橋を対象に地震応答解析を行って動的応答性状について検討を行った。基礎的な知見を得るために、非線形性を考慮していないことや、振動実験で得られた減衰定数の適用性についての課題は残っているが、本解析で得られた結果を以下にまとめる。

- ・ 時刻歴応答値について、解析で得られた上部構造の最大加速度は  $122\text{m/s}^2$ 、最大速度は  $5.1\text{m/s}$ 、最大変位は  $0.223\text{m}$  と非常に大きな応答となった。
- ・ 上部構造に発生する断面力について、主部材では最大で半数以上の部材が塑性化し、このときの断面力は耐力の約 2 倍程度発生している。また、副部材においても最大で 70% の部材が塑性化する結果となった。
- ・ 支承への作用力について、死荷重反力をはるかに上回る 3.1 倍 ~ 10.4 倍の上揚力が発生する結果となった。

## 6. 今後の課題

今回対象としている水管橋は比較的多く供用されている形式、すなわち汎用的な構造を対象としている。2003 年三陸南地震から 2004 年の新潟県中越地震の度重なる強地震が発生した。本研究では、これらの観測記録を基にいくつかのケースの解析を試み多くの部材で塑性化する結果を得たが、実際にこれらの強地震により水管橋に致命的な被害が発生した報告は見当たらない。また水管橋は道路橋や鉄道橋に比較すると橋梁数が相対的に少ないため大きな被害に至らなかった可能性もあるが、解析におけるいくつかの仮定条件も大きく影響していると考えられる。以上を踏まえ、今後は下記に示す項目に対し検

討することが課題である。

- ・ 振動実験で得られた減衰定数について、常時微動、自由振動及び強制振動の微小変形レベルの減衰定数であり、大地震のような変形を再現したものではない。すなわち、大変形時における減衰定数の設定について実験等を行い検証することが今後の課題である。
- ・ 今回の解析で考慮していないクローザー型の伸縮可撓管について、動的特性を検討した事例は見当たらない。しかしながら大塚ら<sup>4)</sup>の研究では、ペローズ型に着目しこれらの動的特性について実験を行い免震効果が期待できることを導いている。すなわち、クローザー型の伸縮可撓管の動的特性を把握し解析で考慮していくことも今後の課題である。

謝辞：本研究を行うにあたり、強震ネットワーク K-NET や気象庁強震ネットワークのデータを利用した。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 水田洋司，白地哲也，金子英孝，山田顕彦，竹内貴司，川口周作：水管橋の振動実験，土木構造・材料論文集第 15 号，1999.12。
- 2) 竹内貴司，川口周作，水田洋司，大塚久哲：三角トラス，ランガー形式水管橋の地震時動的挙動，構造工学論文集，Vol.46A，pp.997-1004，2000.3。
- 3) 竹内貴司，川口周作，水田洋司，大塚久哲：斜張形式水管橋の地震時動的挙動，構造工学論文集 Vol.47A，pp.861-871，2001.3。
- 4) 大塚久哲，竹内貴司，山内邦博，栗木茂幸：ペローズ型伸縮可撓管と免震支承を利用した水管橋の免震効果に関する考察，構造工学論文集 Vol.48A，pp.875-885，2002.3。
- 5) 竹田周平，林友弥，北浦勝，池本敏和，宮島昌克：水管橋の動的振動特性に関する実験的研究：第 9 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.273-278，2006.2。
- 6) 道路橋示方書・同解説，日本道路協会，2002.4。
- 7) 株式会社 CRC ソリューションズ：DYNA2E。