

地震動の多点入力による水管橋被害の解析的検討

上仲亮¹・楢田泰子²・竹田周平³

¹学生会員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）

²正会員 博(工) 神戸大学大学院准教授 工学研究科市民工学専攻（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）

³正会員 博(工) 福井工業大学准教授 工学部建築生活環境学科（〒910-8505 福井市学園3-6-1）

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震において、水道施設の一構造物である水管橋に複数被害が発生したことが報告されている¹⁾。著者らは、地震動により支承や伸縮管が被害を受けた水管橋の内、最も口径の大きい那珂川水管橋に着目し、その被害メカニズムの解明を試みてきた。具体的には、常時微動観測により水管橋の振動特性を明らかにするとともに²⁾、水管橋周辺の推定地震動³⁾を用いて一様入力による地震応答解析を行い、実被害の検証を試みた⁴⁾。しかし、秦ら³⁾によると本水管橋周辺では、堤内地と堤外地の表層地盤の増幅特性が異なることが示されている。本震時における当該水管橋の応答をより精緻に把握するためにも堤内地と堤外地の異なる地震動を用いて多点入力による地震応答解析を行う必要がある。

多点入力による地震応答解析の研究事例としては、大保ら⁵⁾が実在する長大PC斜張橋での地震観測波形を入力として、模型実験並びに解析モデルで時刻歴応答解析を行い、多点入力の影響評価を行っている。その結果、一様入力に対する多点入力の応答比は、構造物の加速度応答で0.7～1.3倍程度、曲げモーメントで0.7～1.1倍程度となることが確認された。これらの傾向は入力する地震動の周期特性や位相特性によって異なるといえる。

そこで本研究は、多点入力による地震応答解析から本水管橋の堤内地・堤外地における入力地震動の差異による応答への影響を明らかにすることを目的とする。

2. 那珂川水管橋の概要と被害状況

(1) 那珂川水管橋の概要

那珂川水管橋は、水戸市下国井町と同市飯富町の間を流れる那珂川を横断する橋梁である。1994年に竣工され、形式は3径間連続斜張橋トラスの両側に単純トラスが連結した複合形式の橋梁であり、その全長は492mに及ぶ（図-1⁶⁾）。

送水管は口径914.4mmで水管橋に2条敷設されており、トラスの下弦材の役割も果たしている。支承は全て鋼製支承であり、伸縮管はA-1、A-2橋台、P-1、P-4橋脚に設置されている。また、本水管橋はレベル2地震動導入以前の耐震設計基準⁷⁾に基づいて設計されたものであり、斜張橋形式の水管橋としては国内最大規模である⁸⁾。

(2) 東北地方太平洋沖地震における被害状況

東北地方太平洋沖地震による本水管橋の被害は支承と伸縮管で発生した¹⁾。支承の被害は、単純トラスでは確認されておらず、いずれも連続斜張橋トラスで発生した。支承の損傷状況は、アンカーボルトの破断や、可動支承のローラー部分の破損である。そして、単純トラスと連続斜張橋トラスの中継橋脚であるP-1、P-4橋脚に設置されている伸縮管で2条とも漏水した。図-1に被害地点を併せて示す。

3. 那珂川水管橋周辺の地震動特性

本水管橋から周囲3kmには(独)防災科学技術研究所K-NET、気象庁、首都圏強震動総合ネットワークSK-netなどの既存の強震観測点がなく、本水管橋と周辺観測点の地形・地質も異なるため、本水管橋に

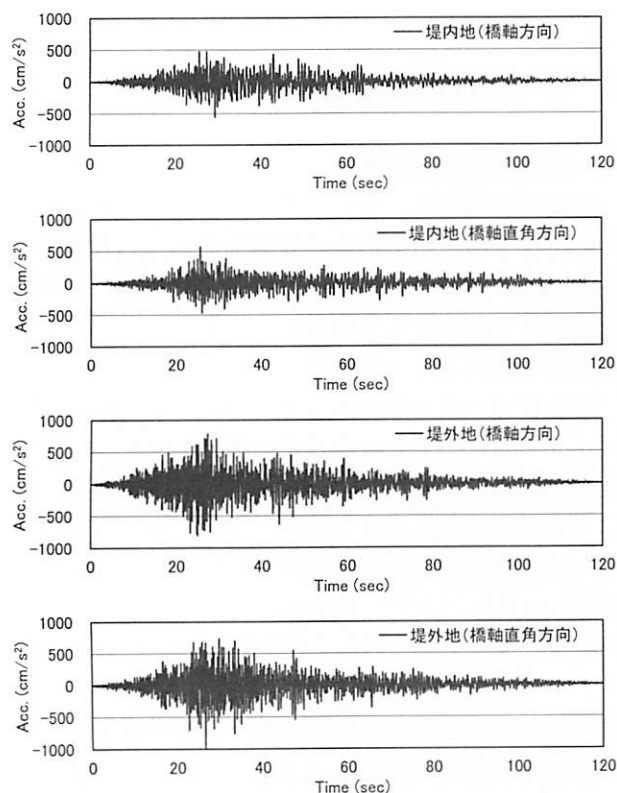
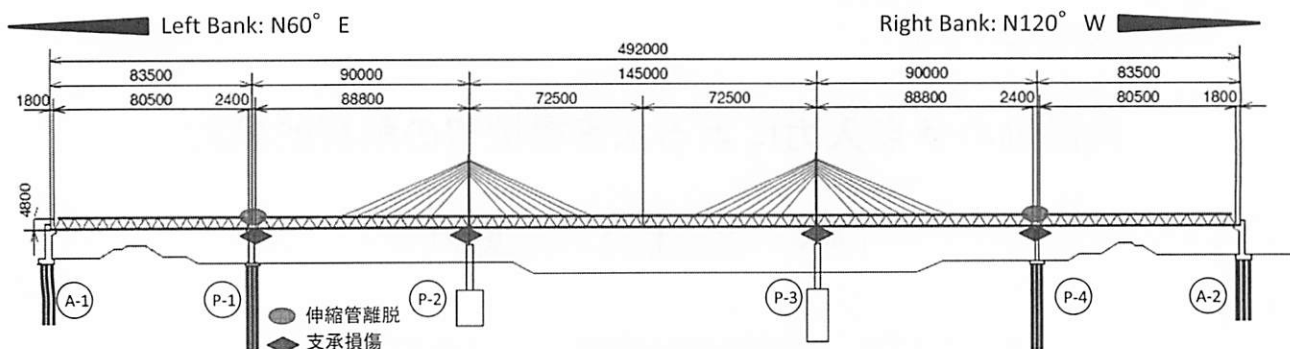


図-2 那珂川水管橋の推定地震動³⁾

作用した地震動が明らかではない。秦ら³⁾は水管橋橋脚近傍で高密度の余震アレー観測を行い、サイト特性置換手法を用いて本震の推定地震動評価している。この手法⁹⁾は、推定点周辺の強震観測点で得られた本震記録のフーリエ振幅に、サイト増幅特性の補正をした推定点の本震時の地震動のフーリエ振幅と、推定点で観測された余震のフーリエ位相を用いて、推定点における本震時の地震動を推定する手法である。

この余震アレー観測によって、堤内地（A-1、A-2）の2地点は遠方地点同士であるにも関わらず、フーリエスペクトルの比率が概ね1.0付近で推移していることが明らかにされており、地盤震動特性の類

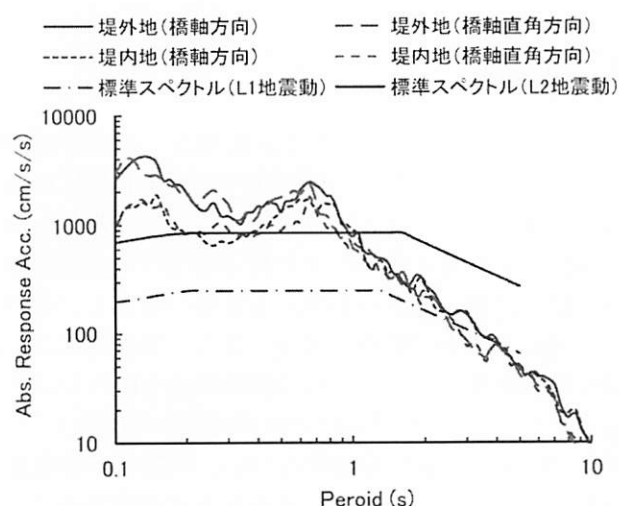


図-3 絶対加速度応答スペクトル (5%減衰)³⁾

似性が確認されている。一方で、A-1地点に対する堤外地（P-1、P-2、P-3、P-4）地点のフーリエスペクトルの比率は、0.7Hzより高周波帯域において比率が連続的に1.0を上回っていることが明らかにされている。したがって、那珂川水管橋サイトでは、堤内地と堤外地において主に0.7Hz以上の周波数帯域における地盤震動特性が大幅に異なっているものと推察され、那珂川水管橋における地表面での地震動を堤内地と堤外地の2カ所で評価している。

図-2は、那珂川水管橋の推定地震動の加速度波形を示したものである。堤内地と堤外地での推定地震を比較すると、両地点でのサイト位相特性などの違いにより形状に差異が生じているだけでなく、両地点でのサイト増幅特性などの違いに起因して堤外地のほうがはるかに大きな加速度振幅を示していることが分かる。

また、那珂川水管橋の堤内地と堤外地における推定地震動の絶対加速度応答スペクトル(5%減衰)と道路橋示方書・同解説(H24)¹⁰⁾によるレベル1地震

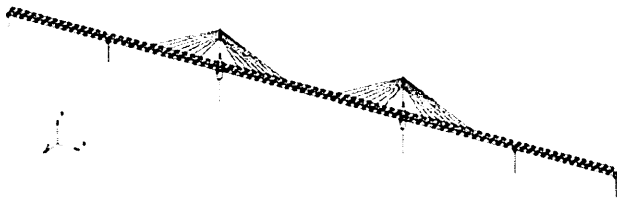


図-4 解析モデル

表-2 固有値解析結果

固有モード	振動数 (Hz)	有効質量比		
		X	Y	Z
1次	0.54	0.000	0.000	0.026
2次	0.69	0.003	0.019	0.000
3次	0.99	0.000	0.000	0.003
4次	1.02	0.000	0.000	0.076
5次	1.05	0.117	0.001	0.000
6次	1.09	0.000	0.000	0.022
7次	1.09	0.000	0.000	0.024
8次	1.31	0.003	0.000	0.000
9次	1.35	0.000	0.000	0.000
10次	1.36	0.000	0.000	0.000

動およびレベル2地震動(タイプI地震)の標準スペクトル(ともにII種地盤)を図-3に示すように比較すると、本水管橋における本震時の推定地震動は、堤内地・堤外地ともに1-2秒の周期帯においてレベル2地震動の標準設計値を上回るほどの地震動ではないことが明らかである。しかしながら、レベル2地震動の標準スペクトルに対して、堤内地および堤外地ともに1秒よりも短周期帯域において概ね同等、もしくは周期帯によっては上回っており、とりわけ、短周期帯域において堤内地側と堤外地側において地震動特性が異なることが分かる。茨城県沖に短周期の強震動生成域があったことから、本水管橋域周辺の地震計ではいずれも1秒以下の成分が卓越しており推定地震動のスペクトル形状とも類似しているが、表層地盤の違いで数100m離れた比較的狭い範囲においても地震動が異なっている。

水管橋には少なくとも堤内地、堤外地で異なる地震動が入力されていることから、この地震動特性の違いが本水管橋の地震時の応答にも少なからず影響が現れるものと考えられる。

4. 解析の概要

(1) 解析モデル

解析には、地震応答解析の汎用ソフトである、DYNA2E¹¹⁾を使用した。数値積分法はNewmark β 法 (β

表-1 解析ケース

解析ケース	入力地震動	入力方法
CASE1	推定地震動 (堤内地)	一様入力
CASE2	推定地震動 (堤外地)	一様入力
CASE3	推定地震動 (堤内地・堤外地)	多点入力

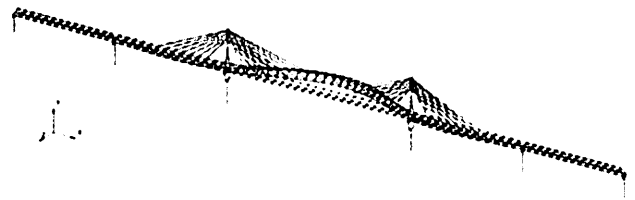


図-5 1次モード

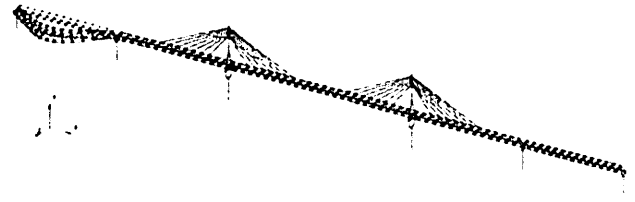


図-6 6次モード

$=1/4$) を用い、数値積分間隔は0.002秒、減衰モデルにはRayleigh減衰 ($\alpha=4.434 \times 10^{-4}$, $\beta=1.2565$) を使用した。

解析対象である那珂川水管橋の全体系を図-4に示すように三次元骨組み構造でモデル化した。上部構造の上下弦材、斜材、主塔、下部構造は線形の梁要素、ケーブルについては軸力要素でモデル化した。支承構造については、固定支承は回転のみを自由とし、可動支承は橋軸方向への移動を許容するモデルとした。伸縮管はモデル化せず、自由に動く状態とした。地盤及び基礎は完全固定とした。また、質量は各節点に集中質量として与えた。

(2) 入力地震動と解析ケース

入力地震動としては、サイト特性置換手法を用いて評価した図-2の推定地震動³⁾を用いた。

解析ケースを表-1に示す。加振方向は全て橋軸直角方向の単一加振である。CASE1、CASE2では堤内地、堤外地の推定地震動を全ての橋台、橋脚下の基盤に一様入力した。多点入力を行うCASE3においては、堤内地 (A-1、A-2) には堤内地の推定地震動 (橋軸直角方向) を、堤外地 (P-1、P-2、P-3、P-4) には堤外地の推定地震動を入力した。

なお、本研究では、入力地震動の多点入力による水管橋の応答への影響を把握することに主眼を置いているため、多点加速度入力による線形の時刻歴解析を行った。

表-3 解析結果（各部の最大応答加速度と最大支承せん断力）

CASE				CASE1	CASE2	CASE3	応答比率		
入力地震波				一様入力 (堤内地)	一様入力 (堤外地)	多点入力	CASE2/ CASE1	CASE3/ CASE1	CASE3/ CASE2
最大 応答加速度 (cm/s ²)	上部工	左トラス（下）		1,031	1,834	1,598	1.78	1.55	0.87
		左トラス（上）		893	2,245	2,900	2.51	3.25	1.29
		斜張橋（下）		1,754	3,890	3,821	2.22	2.18	0.98
		斜張橋（上）		2,280	4,867	4,756	2.13	2.09	0.98
		右トラス（下）		1,056	1,766	1,655	1.67	1.57	0.94
		右トラス（上）		1,385	2,236	2,998	1.61	2.16	1.34
	下部工	堤内	A-1上端	595	1,091	582	1.83	0.98	0.53
		堤外	P-1上端	1,041	1,722	1,722	1.65	1.65	1.00
			P-2上端	727	1,289	1,301	1.77	1.79	1.01
			P-3上端	687	1,281	1,299	1.86	1.89	1.01
			P-4上端	1,051	1,680	1,659	1.60	1.58	0.99
		堤内	A-2上端	647	1,290	618	1.99	0.96	0.48
	主塔	主塔P-2		1,753	4,661	4,552	2.66	2.60	0.98
		主塔P-3		1,695	4,709	4,604	2.78	2.72	0.98
支承せん断力 (橋軸直角) (kN)	トラス	A-1		194	300	292	1.55	1.51	0.97
		P-1		222	328	288	1.48	1.30	0.88
	斜張橋			196	340	338	1.73	1.72	0.99
		P-2		394	689	681	1.75	1.73	0.99
		P-3		396	695	688	1.76	1.74	0.99
		P-4		200	339	332	1.70	1.66	0.98
	トラス			220	341	289	1.55	1.31	0.85
		A-2		198	287	273	1.45	1.38	0.95

表-4 支承耐力

支承 設置場所	A-1	P-1	P-2	P-3	P-4	A-2
	トラス	斜張橋			トラス	
支承の耐力 (kN/個)	356	356	192	192	192	356

(3) 固有値解析

固有値解析結果を表-2に示す。全体の1次モード（図-5）は0.54Hzで橋軸直角方向（Z方向）の対象1次モードであり、全体の2次モードは0.69Hzの鉛直方向（Y方向）の対象1次モードである。低次の振動モードは連続斜張橋トラスの振動モードであり、これらの橋脚は全て堤外地にある。一方、堤内地と堤外地の異なる地盤に橋台、橋脚があるのは左右の単純トラスとなる。左右単純トラスの対象1次モード（橋軸直角方向）は1.09Hzで全体の6次（図-6）、7次モードである。

5. 地震応答解析

地震応答解析では、那珂川水管橋における推定地震動を用いて表-1に示す3ケースの解析を実施した。解析結果として各部の最大応答加速度、支承せん断

力をまとめたものを表-3に示す。また、各ケースの応答値の比較のため応答比率を併せて示す。表中の値は全て最大値である。最大応答加速度（橋軸直角方向）の着目点として、斜張橋トラス及び単純トラスの上・下弦材スパン中央、下部工上端、主塔部の上端の節点に着目した。そして、被害状況から、支承のせん断力（橋軸直角方向）についても着目した。また、本研究は線形解析であるが、参考のため支承の耐力を表-4に示す。

(1) 一様入力による解析結果

表-3より、一様入力による上部工の最大応答加速度は、左側単純トラスにおいて、CASE1では下弦材で1,031 cm/s^2 、上弦材で893 cm/s^2 、CASE2では下弦材で1,834 cm/s^2 、上弦材で2,245 cm/s^2 であった。斜張橋トラスにおいては、CASE1では下弦材で1,754 cm/s^2 、上弦材で2,280 cm/s^2 、CASE2では下弦材で3,890 cm/s^2 、上弦材で4,867 cm/s^2 であった。また、主塔上端においては、CASE1ではP-2で1,753 cm/s^2 、P-3で1,695 cm/s^2 、CASE2ではP-2で4,661 cm/s^2 、P-3で4,709 cm/s^2 であった。堤内地の地震動（CASE1）に比べて堤外地の地震動（CASE2）では、応答が1.6～2.8倍近く大きくなることがわかる。低次モードの振動数での地震動のスペクトルでは堤内地、堤外地の差

異は大きくないが、刺激係数の大きい高振動数の影響でCASE2の応答が大きくなったものと考えられる。

支承のせん断力に着目すると、CASE1、CASE2ともに、単純トラスではいずれも支承の耐力を超えるような値は発生していないが、斜張橋トラスにおいて支承の損傷に至る応答が出ている。最大応答加速度並びに支承のせん断力については、入力地震波の大きさの違いがそのまま表れた結果となっている。

(2) 多点入力による解析結果

表-3より、CASE3の下部工上端の最大応答加速度に着目すると、堤内地（A-1、A-2）ではCASE1と、堤外地（P-1、P-2、P-3、P-4）においてはCASE2と同等の値が発生しており、それぞれの入力地震動に応じた応答が生じていることが分かる。また、多点入力の影響が大きいと考えられる斜張橋トラスの上部工及び主塔上端部分では、堤外地の推定地震動を入力したCASE2と同等の応答が発生している。しかし、橋台、橋脚の基盤でそれぞれ入力異なる単純トラス部に着目すると、トラスの下弦材の応答はCASE1とCASE2の応答の間の値となっているが、上弦材はCASE2よりも大きな応答が生じている。

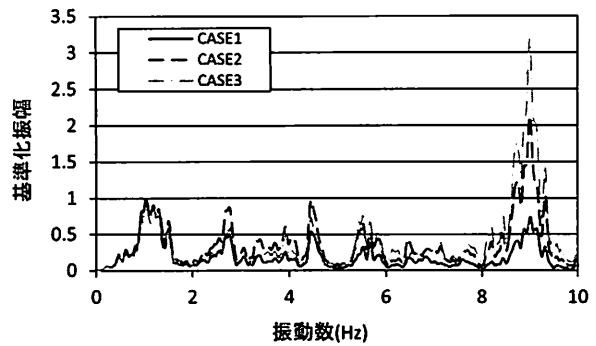
支承のせん断力に着目すると、CASE1、CASE2と同様に単純トラスでは支承の耐力を超えるような値は発生しておらず、斜張橋トラスにおいては支承の損傷に至る応答が発生した。

(3) 一様入力と多点入力のスペクトルの比較

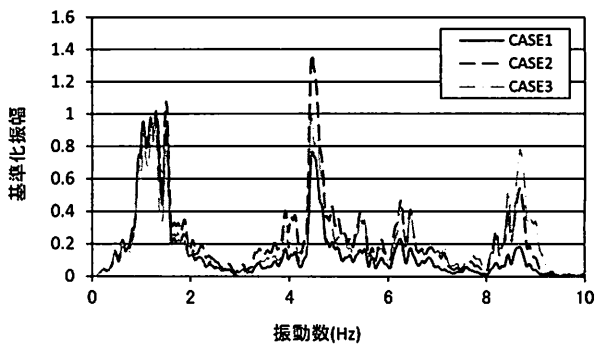
多点入力の影響を比較するため、各ケースにおける単純トラスの加速度応答波形（橋軸直角方向）からフーリエスペクトルを求めた（図-7）。ここでは、左側の単純トラスのみについて比較する。図の振幅はCASE1の最大振幅を1となるように基準化したものである。

図-7より、CASE1では、上弦材、下弦材ともに単純トラスの一次モード（1.09Hz）の応答が最も大きいことが分かる。一方、CASE2では、CASE1と比較して一次モードでは応答はほぼ同じで、より高次の振動モードでは応答が大きい。堤内地と堤外地の地震動の0.1-0.2sの周期帯での差異が橋脚、橋台の応答に影響し、単純トラスの振動にも影響したものと考えられる。

多点入力を行ったCASE3では、大部分の振動数でCASE1とCASE2の振幅の間に位置することがわかった。しかし、いくつかの振動数ではCASE3の振幅はCASE1とCASE2の間に入っていないものもある。とくに上弦材で9Hz程度の高次のモードが卓越してい



(a) 上弦材



(b) 下弦材

図-7 左単純トラスの加速度波形のフーリエスペクトル（橋軸直角方向）

る。堤内地と堤外地で入力地震動の振幅の違いだけでなく、位相にも違いがあるために、振幅が大きくなったと考えられる。

以上のことから、那珂川水管橋とその推定地震動の場合、単純トラスの一次振動モードの振動数では多点入力の地震動のスペクトル特性に大きな差異がなく、応答にもそれらの差異が顕著に表れなかった。しかし、振動数によっては位相差により多点入力の方が一様入力の応答よりも大きくなることが分かった。ただし、多点入力によって支承の被害に至る程度の応答ではなく、実際の被害状況とも同じであった。

本稿では右側の単純トラスの応答は示していないが、左側の単純トラスと同様な傾向を示していた。

6. まとめ

本研究では、東北地方太平洋沖地震で被災した那珂川水管橋を対象とし、多点入力による地震応答解析から本水管橋の堤内地・堤外地における入力地震動の差異による応答への影響を検討した。以下に本

論文の結論をまとめて示す。

- ・ 水管橋の低次の振動モードの振動数域では、堤内地、堤外地の地震動のスペクトル特性に大きな差異はないが、1s以下の周期帯では堤外地のスペクトルが大きいいため、一様入力でも応答が1.6～2.8倍近く大きくなることがわかった。
- ・ 橋脚基部が全て堤外地にある斜張橋トラスの応答は、一様入力と多点入力ではほぼ同等で、堤内地、堤外地による多点入力の影響はほとんどないといえる。
- ・ 橋台と橋脚基部で異なる地震動を同時入力した場合、振動数によっては地震動の位相差による影響で両地震動の応答よりも大きくなることが分かった。

今後の課題としては、多点入力による非線形応答解析を行い、支承損傷後の挙動を明らかにする予定である。

謝辞：本研究の遂行にあたり、茨城県企業局から貴重な資料を提供して頂きました。また、本研究の一部は、科学研究費補助金（若手研究（B）24760363）の支援により実施された。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 日本水道鋼管協会：東日本大震災における水道鋼管の被害分析ならびに復旧・復興にむけた提言（要旨），

2011.9.

- 2) 上仲亮，鉄田泰子：微動観測による水戸市那珂川水管橋の振動特性，建設工学研究所論文報告集，第54号，pp.111-122，2012.11.
- 3) 秦吉弥，鉄田泰子，野津厚：経験的サイト増幅特性を考慮した2011年東北地方太平洋沖地震における那珂川水管橋での地震動の評価，日本地震工学会論文集，第12巻，第4号（特集号），pp.374-393，2012.
- 4) 上仲亮，鉄田泰子，竹田周平：東北地方太平洋沖地震における那珂川水管橋の被害メカニズム，土木学会論文集A1，Vol.69，No.4，pp.I_171-181，2013.
- 5) 大保直人，山野辺慎一，上野健治，南浩郎：斜張橋の地震応答に及ぼす多点入力の影響評価，鹿島技術年報，第46号，1998.9.
- 6) 茨城県企業局那珂川水道事務所：那珂川水管橋詳細設計設計図，1991.3.
- 7) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説（1979年版），1979.
- 8) 日本水道鋼管協会：製品紹介 (<http://www.wsp.gr.jp/suikankyo.htm>)，（最終閲覧2012.9.14）
- 9) Hata, Y., Nozu, A. and Ichii, K.: A practical method to estimate strong ground motions after an earthquake based on site amplification and phase characteristics, Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA), Vol.101, No.2, pp.688-700, 2011.
- 10) (社)日本道路協会：道路橋示方書，V 耐震設計編，丸善，2012.3.
- 11) 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社：DYNA2E.