Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-12-05

経験的サイト増幅・位相特性を考慮した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

秦，吉弥
鍬田，泰子
野津，厚

(Citation)
日本地震工学会論文集,12(4):374-393

(Issue Date)
2012

(Resource Type)
journal article

(Version)
Version of Record

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003287

日本地震工学会論文集　第12巻, 第4号(特集号), 2012

経験的サイト増幅・位相特性を考慮した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

秦吉弥[1)]，鍬田泰子[2)]，野津厚[3)]

1) 正会員　日本工営(株)中央研究所，主任研究員　博(工)
e-mail : hata-ys@n-koei.jp
2) 正会員　神戸大学大学院工学研究科，准教授　博(工)
e-mail : kuwata@kobe-u.ac.jp
3) 正会員　(独)港湾空港技術研究所地震動研究チーム，チームリーダー　博(工)
e-mail : nozu@pari.go.jp

要　約

2011年東北地方太平洋沖地震によって水道施設は数多くの被害を受けた。茨城県水戸市の那珂川水管橋では、大口径管路の伸縮継手が脱管するなどの深刻な被害が発生しており、当該地点における地震動を推定することは非常に重要である。そこで本研究では、那珂川水管橋において高密度の余震アレー観測を実施し、得られた記録に基づいて当該地点におけるサイト増幅・位相特性を評価した。そして、サイト特性置換手法を用いて、本震時における那珂川水管橋での地震動を推定し、堤内地側と堤外地側で地震動特性が大きく異なることを明示した。また、サイト特性置換手法に基づき既存強震観測点での本震記録を再現することで、地震動推定手法の適用性を確認した。

キーワード：　地震動，余震観測，サイト増幅特性，サイト位相特性，那珂川水管橋，2011年東北地方太平洋沖地震

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震(M_W9.0)では、水道施設をはじめとしたライフライン施設において甚大な被害が発生した[1)]。茨城県水戸市・ひたちなか市では、那珂川を横断する橋梁(上流側から国田大橋[2)]、那珂川水管橋[3),4)]、新那珂川大橋[5),6)]など)を中心に深刻な被害が数多く報告[2),3),4),5),6)]されている。その中でも那珂川水管橋(**図1**および**写真1**参照)では、斜張橋トラスの全支承(軸方向のみの可動・固定支承を含む)が損傷し、**写真2**に一例を示すように、単純トラスと斜張橋トラスとの中継橋脚(**P-2**と**P-5**)において、大口径管路の伸縮継手が損傷・脱管するなどの大規模な被害が発生した[3),4)]。なお、単純トラスの支承には被害が発生していない。この被害は、水戸市を中心とした茨城県の水道供給に大きな影響を及ぼした。那珂川水管橋での地震動を推定することは、当該地点における地震動の特性や被災機構などを分析し、水管橋の耐震性評価の高度化を今後図っていく上で非常に重要である[7)]。特に、管路の脱管という被災形態を考慮すると、構造特性(単純トラスと斜張橋トラスの振動特性の違いなど)だけでなく、地震動特性(水管橋サイト内における地震動の空間的な変動など)が被災の一要因になっている可能性は否定できない。これまで著者ら[8),9),10),11)]や片岡ら[12)]は、2011年東北地方太平洋沖地震による被災橋梁などを対象と

して、余震観測に基づく地震動の事後推定に取り組んできているが、対象サイト内における地震動の空間的な変動にまで踏み込んだ推定はこれまでのところ行っていない。そこで、本研究では、新たな試みとして、対象施設の敷地において高密度の余震アレー観測を実施し、その結果に基づいて本震時の地震動を、その空間的変動を含めて評価した。具体的には、堤内地側および堤外地側の計6地点において高密度の余震アレー観測を実施し、サイト増幅・位相特性を評価した。そして、サイト特性置換手法[13]を用いて水管橋周辺の既存強震観測点での記録を再現し、地震動推定手法の適用性を確認した上で、那珂川水管橋における地震動の推定を行った。なお、本研究における地震動の検討では、比較的大きな地震被害に結びつきやすいと考えられるやや短周期帯域[14]、および常時微動観測に基づく那珂川水管橋の上部構造の1次モード周波数(0.59Hz(常時微動に基づく片側管路通水時)[15]、0.54Hz(固有値解析による両側管路通水時の推定)[16])を含む0.2～4.0Hz(0.25～5.0sec)の速度波形[17]に主に着目することとした。一方で、応答スペクトルに関しては、0.1～5.0secの周期帯[18]を評価対象にした。

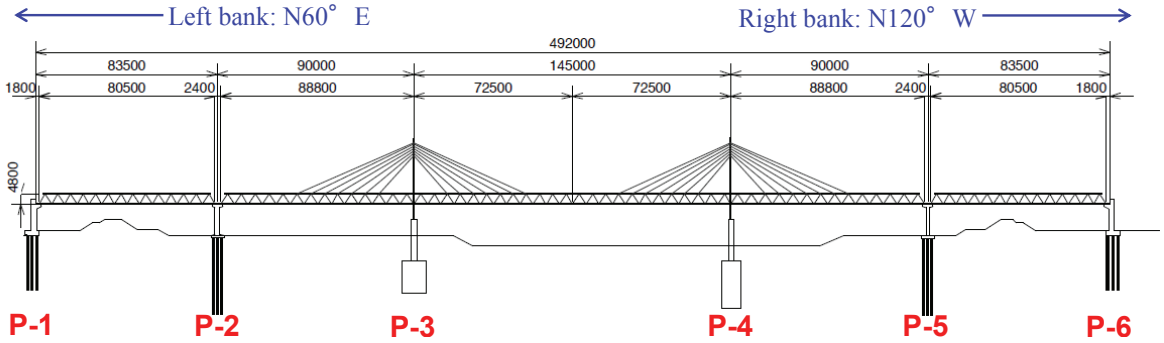

図1　那珂川水管橋の概要(本稿内での橋脚呼称)

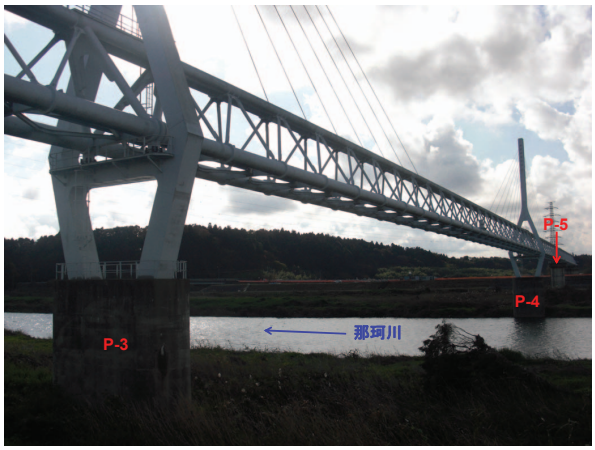

写真1　那珂川水管橋の概況

写真2　那珂川水管橋の継手抜け(**P-5**)[4]

図2　那珂川水管橋周辺の強震観測点で得られた本震記録の分布(3成分合成PGV(cm/s)，気象庁計測震度)

2. 那珂川水管橋周辺での本震観測記録と余震観測

2.1 本震観測記録および地形・地質・地盤条件の整理

図2に那珂川水管橋周辺における既存強震観測点[19),20),21),22),23)]の分布状況を示す。さらに同図には、那珂川水管橋周辺の観測点(地表)での3成分合成最大速度値*PGV*(cm/s)および気象庁計測震度の分布についても示す。また、**図3**および**図4**には、那珂川水管橋周辺の地形図および地質図を示す。これらの図に示す

図3　那珂川水管橋と周辺の強震観測点での地形状況（国土地理院地図閲覧サービスに一部加筆）

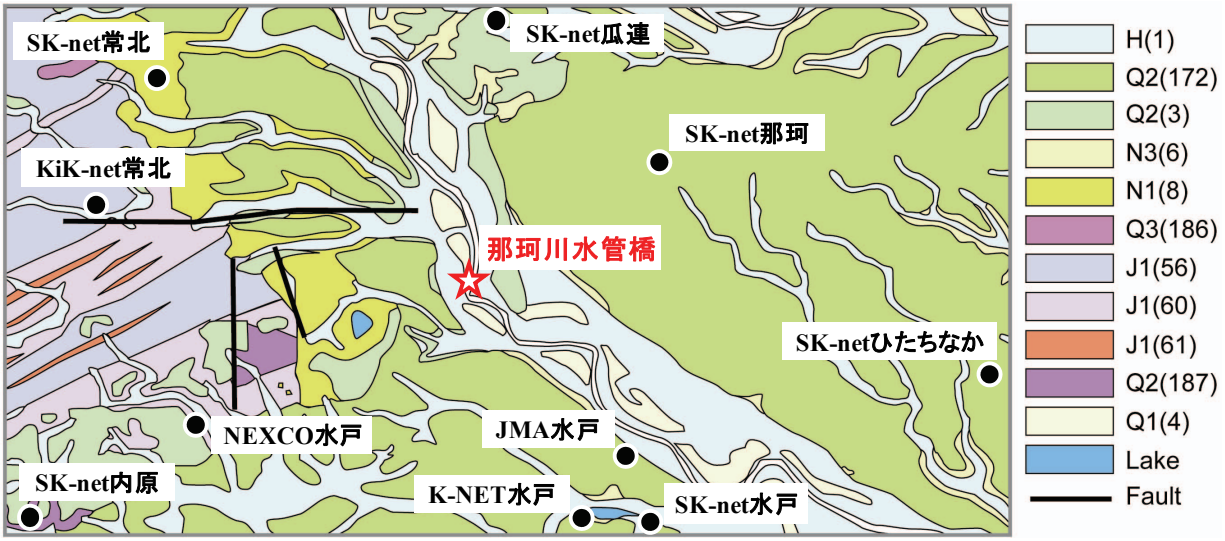

図4　那珂川水管橋と周辺の強震観測点での地質状況（産業技術総合研究所シームレス地質図に一部加筆）
【ここに、凡例は全て地質凡例基準の標準情報化結果[24)]に基づく】

ように、那珂川水管橋の近傍には強震観測点が存在しておらず(**図2**参照)、那珂川水管橋とその周辺の観測点では地形・地質状況が異なっている(**図3**および**図4**参照)。さらに、**図2**に示すように、比較的近接している観測点同士でも、本震時の地震動特性に差異が生じているため(例えば、SK-net那珂とSK-net瓜連の間での*PGV*・計測震度の差異)、那珂川水管橋と既存強震観測点ではサイト増幅・位相特性が異なっている可能性が高い。したがって、那珂川水管橋における本震時の地震動は、当該地点におけるサイト増幅・位相特性を評価した上で推定する必要がある。

那珂川水管橋サイトにおける施工前のボーリング調査結果に基づく推定地盤断面図を**図5**に示す。ボーリングは橋脚位置相当(**P-1**～**P-6**：**図1**および**図6**参照)で実施されており、いずれの地点においても砂質土と粘性土による互層地盤となっており、工学的基盤(N値50以上)[18]の上面は概ね標高－30m付近に位置している。また、N値換算[18]に基づく固有周波数は、1.63Hz(**P-1**)、1.56Hz(**P-2**)、1.72Hz(**P-3**)、1.85Hz(**P-4**)、1.31Hz(**P-5**)、1.39Hz(**P-6**)とそれぞれ概算推定され、左岸側と右岸側の違いや堤内地と堤外地の違いなどといった水管橋サイト内での位置関係が、表層地盤の固有周波数(概算値)に及ぼす影響は比較的小さくなっている。しかしながら、上述したN値に基づく地盤震動特性の評価はあくまでも簡易的なものであり、次節以降では、余震観測記録に基づくサイト増幅・位相特性の評価について述べる。

2.2 余震(中小地震)観測の実施

那珂川水管橋でのサイト増幅・位相特性を評価するため、**図6**に示すように水管橋の下流方向にあたる

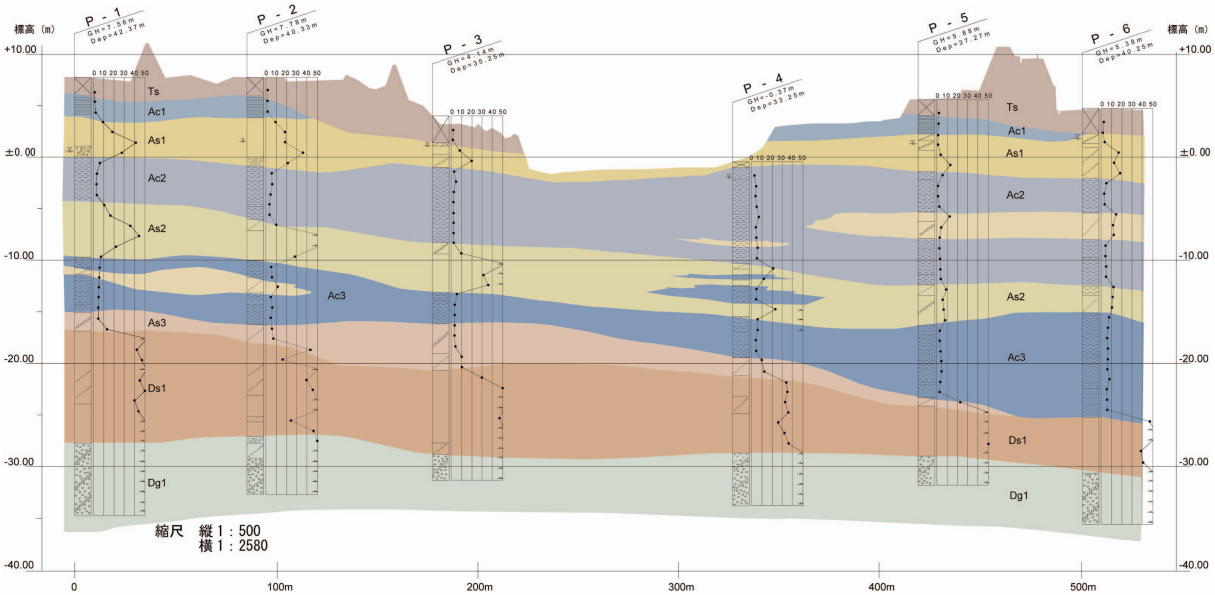

図5　那珂川水管橋サイトにおけるボーリング柱状図と推定地盤断面（茨城県企業局提供資料に一部加筆）

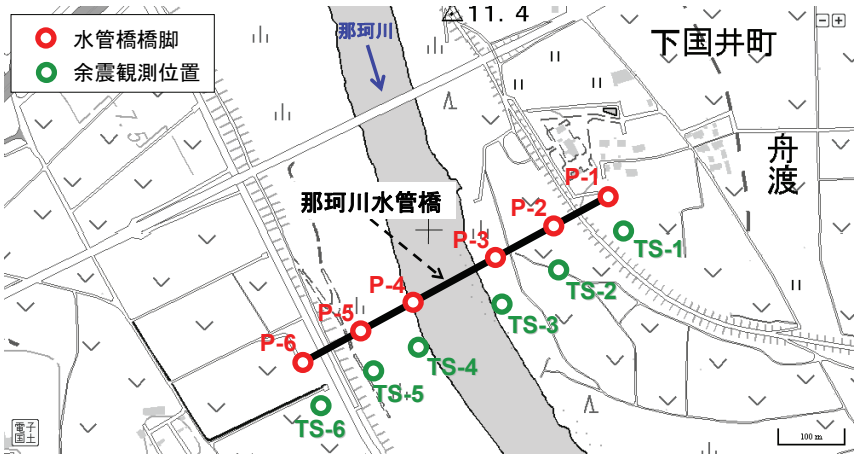

図6　那珂川水管橋サイト近傍での余震観測位置(TS-1～TS-6)（国土地理院地図閲覧サービスに一部加筆）

堤内地側2地点(**TS-1**および**TS-6**地点)および堤外地側4地点(**TS-2**, **TS-3**, **TS-4**, **TS-5**地点)において余震(中小地震)観測を行った。観測期間は、2011年12月18日～2012年1月5日(震災復旧工事の休工日等に配慮)である。**表1**に得られた主な余震観測記録の一覧を示す。**表1**に示すように、**TS-1**地点(基準固定点)ならびに**TS-2**, **TS-3**, **TS-4**, **TS-5**, **TS-6**地点(移動点)に1台ずつ計2台の地震計を同時に設置してアレー観測を行った。地震計は、2台ともに同種の加速度計(一体型微動探査兼地震計機器[25])であり、サンプリング周波数は100Hzであるが、トリガー加速度レベルは設定せずに、連続観測を実施した。観測方向は、N60°E方向(橋軸(管軸)方向)、N30° W方向(橋軸(管軸)直角方向)、鉛直方向の計3成分とした。
さらに本研究では、SK-net那珂、SK-net内原、SK-netひたちなか(**図2**参照)の極近傍においても地震計(加速度計)を設置し、余震観測を行った。これは、SK-net(茨城県)による観測記録は、公開までに一定の期間を要することや、公開が一定の規模を有する地震に限られていることを考慮し、上述した短い期間の観測で、SK-net那珂、SK-net内原、SK-netひたちなかサイトでの余震記録(後述するサイト位相特性を評価するための余震記録)を得るために実施した。**写真3**にSK-net内原での観測状況の一例を示す。観測条件は、観測期間(2011年12月28日－2012年1月4日)および観測方位(NS、EW、UD方向の計3成分)が異なる以外は、那珂川水管橋における余震観測条件と同様である。

表1　那珂川水管橋サイトで得られた余震観測記録の一覧

No.	Year/Month/Day	Hour : Min. (JST)	Latitude (deg.)	Longitude (deg.)	Depth (km)	Source region	JMA Mag.	Temporary stations	
EQ-01	2011/12/18	18:02	35.570	141.022	38	East Off Chiba Pref.	Mj4.8	**TS-1**	**TS-2**
EQ-02	2011/12/19	02:20	36.842	140.848	7	Northern Ibaraki Pref.	Mj4.2	**TS-1**	**TS-2**
EQ-03	2011/12/20	02:24	36.695	140.622	5	Northern Ibaraki Pref.	Mj4.4	**TS-1**	**TS-2**
EQ-04	2011/12/22	05:10	36.977	141.160	30	Off Fukushima Pref.	Mj4.6	**TS-1**	**TS-3**
EQ-05	2011/12/23	23:44	36.152	139.827	54	Southern Ibaraki Pref.	Mj4.2	**TS-1**	**TS-3**
EQ-06	2011/12/25	12:36	36.772	141.022	49	Off Ibaraki Pref.	Mj4.1	**TS-1**	**TS-3**
EQ-07	2011/12/26	02:41	35.898	140.837	41	Off Ibaraki Pref.	Mj4.5	**TS-1**	**TS-4**
EQ-08	2011/12/26	16:16	36.435	141.130	45	Off Ibaraki Pref.	Mj3.9	**TS-1**	**TS-4**
EQ-09	2011/12/28	21:30	36.320	140.830	55	Off Ibaraki Pref.	Mj3.7	**TS-1**	**TS-4**
EQ-10	2011/12/31	08:11	36.855	140.573	8	Northern Ibaraki Pref.	Mj4.5	**TS-1**	**TS-5**
EQ-11	2012/01/01	14:28	31.427	138.565	397	Near Torishima Island	Mj7.0	**TS-1**	**TS-5**
EQ-12	**2012/01/03**	**03:28**	**36.377**	**141.898**	**60**	**Off Ibaraki Pref.**	**Mj5.0**	**TS-1**	**TS-5**
EQ-13	2012/01/03	04:34	36.383	141.723	67	Off Ibaraki Pref.	Mj4.5	**TS-1**	**TS-6**
EQ-14	2012/01/04	21:48	36.573	141.147	33	Off Ibaraki Pref.	Mj4.2	**TS-1**	**TS-6**
EQ-15	2012/01/05	21:37	37.070	140.555	6	Nakadori Fukushima Pref.	Mj3.9	**TS-1**	**TS-6**
EQ-16	2012/01/05	22:13	37.068	140.557	6	Nakadori Fukushima Pref.	Mj4.2	**TS-1**	**TS-6**

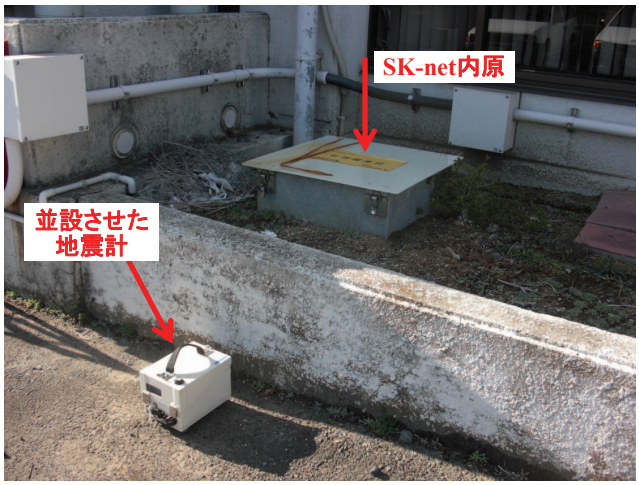

写真3　SK-net内原サイトの極近傍での地震計設置・余震観測状況

3. サイト増幅・位相特性の評価

3.1 那珂川水管橋サイトにおける地盤震動特性の分析

図7は、観測地震(**表1**参照)によるフーリエスペクトルの比率(**TS-2**, **TS-3**, **TS-4**, **TS-5**, **TS-6**地点(移動点)／**TS-1**地点(基準固定点))である。**図7**(e)に示すように、**TS-1**地点と**TS-6**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付近で推移しており、4つの観測地震ごとのスペクトル比の違いも非常に小さいことが確認できる。これは、那珂川水管橋サイトでの左岸側および右岸側の堤内地における地盤震動特性の類似性を示唆している。一方で、**図7**(a),(b),(c),(d)に示すように、**TS-1**地点に対する**TS-2**, **TS-3**, **TS-4**, **TS-5**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を上回っており、3つの観測地震ごとの違いも非常に小さくなっている。さらに、**図7**(f)に示すように、**TS-2**, **TS-3**, **TS-4**, **TS-5**地点では、フーリエスペクトルの比率のバラツキが比較的小さく、那珂川水管橋サイトの堤外地(の左岸側および右岸側)における地盤震動特性の類似性が確認できる。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以上の高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1つの地点に代表させて評価することは、極めて困難であると考えられる。

そこで本研究では、那珂川水管橋におけるサイト増幅・位相特性、および本震時における地震動の評価に、堤内地(**TS-1**, **TS-6**地点)および堤外地(**TS-2**, **TS-3**, **TS-4**, **TS-5**地点)で得られた余震観測記録をそれぞれ利用することとした。

3.2 サイト増幅特性

図8は，那珂川水管橋におけるサイト増幅特性(地震基盤～地表)と、その周辺の強震観測点におけるサイト増幅特性(地震基盤～地表)[23),26)]を比較したものである。那珂川水管橋におけるサイト増幅特性の評価手順を以下に示す。まず、那珂川水管橋(堤内地(**TS-1**))とK-NET水戸で同時に得られた余震観測記録(**EQ-3**,**-4**,**-5**,**-6**,**-10**,**-11**,**-12**)を対象に、両地点の距離の違いによる補正[27),28)]を考慮したフーリエスペクトルの比率(**TS-1**／K-NET水戸)を計算した(**図9**参照)。ここに、**TS-1**を採用した理由としては、**TS-1**と**TS-6**

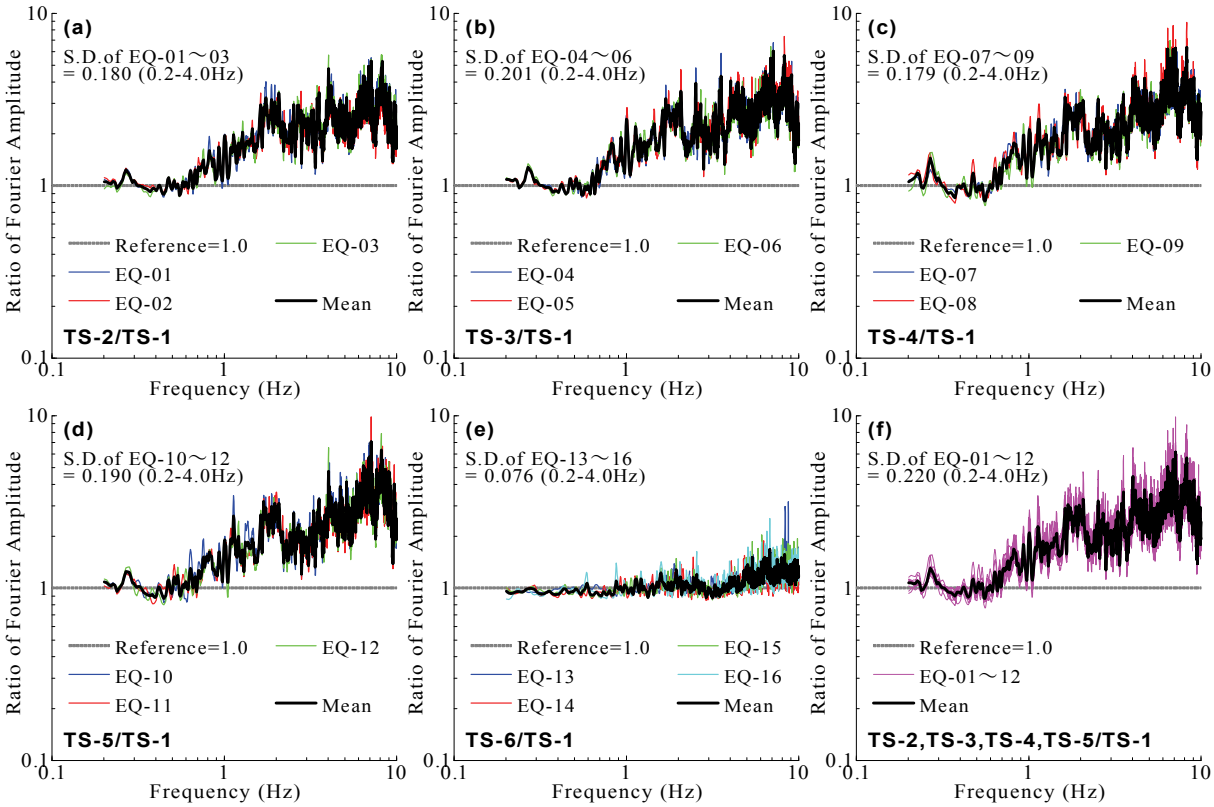

図7　水管橋サイトでの地盤震動特性(**TS-1**地点に対するスペクトル比)※標準偏差S.D.は常用対数を考慮

を比較した場合に**TS-1**の方がより多くの記録が得られており、フーリエスペクトルの比率(**図9**参照)を計算する際に、より信頼性が高まることを勘案したためである。

次に、この比率をK-NET水戸における既存のサイト増幅特性[26]に掛け合わせることによって、那珂川水管橋(堤内地)におけるサイト増幅特性を評価[29]した。文献26)および文献23)で評価されていないSK-net内原、JMA水戸、SK-netひたちなか、SK-net瓜連のサイト増幅特性についても、本震前の中小地震観測記録に基づき同様の方法を用いて評価[29]した。

最後に、那珂川水管橋(堤外地)におけるサイト増幅特性は、余震観測記録に基づく堤外地と堤内地のスペクトル比の平均(堤外地／堤内地：**図7**(f)参照)を上述した那珂川水管橋(堤内地)におけるサイト増

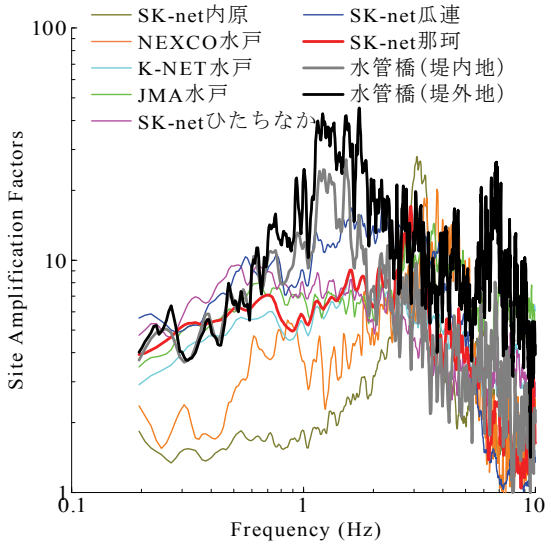

図8　サイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較

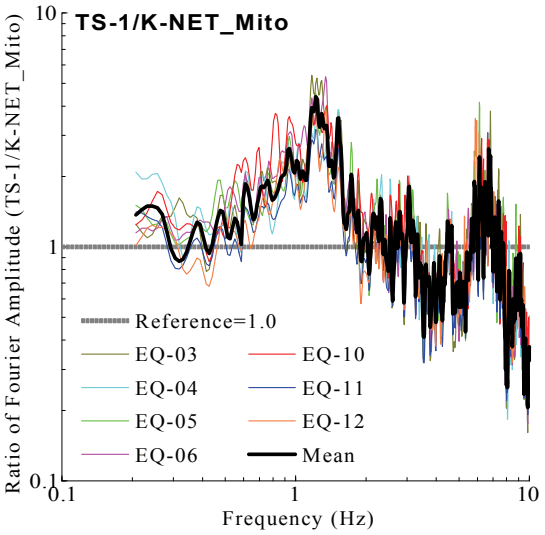

図9 ﾌｰﾘｴｽﾍﾟｸﾄﾙの比率(TS-1地点／K-NET水戸)

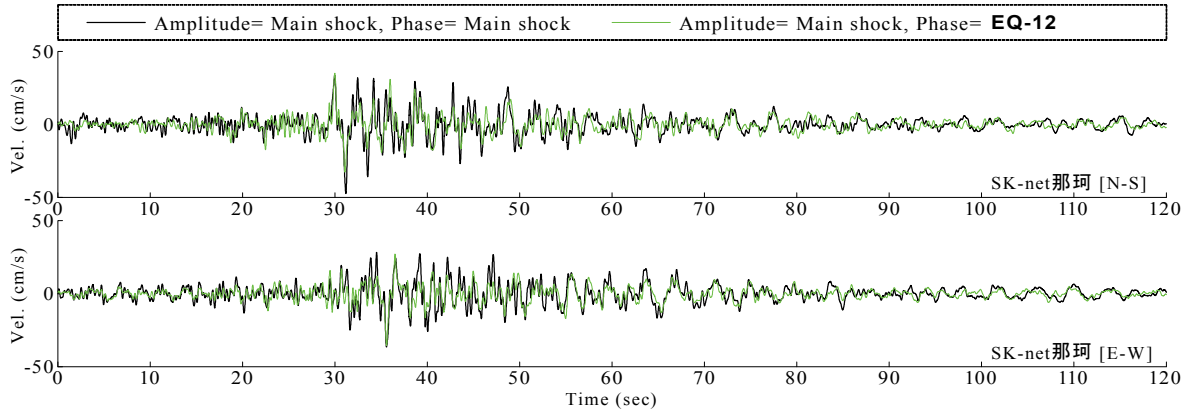

図10　本震と余震によるサイト位相特性の類似性に関する検討(1)　(EQ-12による検討)

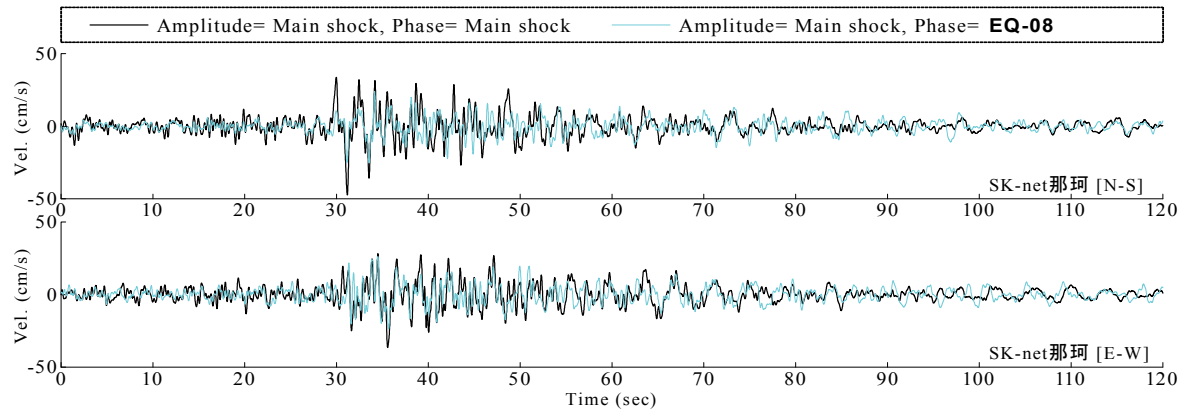

図11　本震と余震によるサイト位相特性の類似性に関する検討(2)　(EQ-08による検討)

幅特性に掛け合わせることによって評価した。ここで、堤外地でのサイト増幅特性を、K-NET水戸でのサイト増幅特性から直接導かずに堤内地でのサイト増幅特性を介して導いたのは、堤内地と堤外地の地震動の相対的な関係を精度良く推定するためである。

図8に示すとおり、那珂川水管橋（堤内地および堤外地）のサイト増幅特性は、周辺の既存強震観測点のものと類似しているとは言い難く、那珂川水管橋と周辺の既存強震観測点では、本震時の地震動特性が大幅に異なっていたものと推察される。さらに、上述した余震観測記録に基づく堤内地に対する堤外地のスペクトル比（**図7**(f)参照）に依存して、同じ那珂川水管橋サイトにおいても0.7Hzより高周波帯域において堤外地のサイト増幅特性が堤内地を連続的に上回っている。これらは、那珂川水管橋（堤内地ならびに堤外地）における本震時の地震動は、サイト増幅特性を考慮して推定する必要性が高いことを改めて示唆するものである。

3.3 サイト位相特性

本震の地震動のフーリエ位相が、同じ地点における余震の地震動のフーリエ位相で近似できるとすることが、サイト特性置換手法[13]の基本となる考え方である。2011年東北地方太平洋沖地震を対象とした場合にも、すでに著者ら[30),31),32)]は、茨城県沖[30)]をはじめとして、福島県沖[31)]や宮城県沖[32)]を震源とする余震のフーリエ位相が、本震波形（あるいはその前半または後半部分）のフーリエ位相に対して良い近似となっていることを確認している。ただし、数多くの余震の中で、どの余震のフーリエ位相が解析に最も適しているかは、地域毎に確認を行っていく必要がある。そこで、ここでは、本研究で対象とする那珂川水管橋およびその周辺地域を対象として、サイト位相特性の評価に用いるのに適した余震を選択するための検討[33),34)]を行った。

図10および**図11**はその検討結果である。すなわち、SK-net那珂（次章で述べるサイト特性置換手法を適用する際の基準観測点）における本震観測記録の速度波形（観測波）と、観測波のフーリエ振幅特性を用いてフーリエ位相特性のみ**EQ-12**もしくは**EQ-08**（**表1**および**図12**参照）のフーリエ位相特性にそれぞれ置き換えた合成速度波形（置換波）を水平成分について比較したものである。なお、**図10**および**図11**では、本研究で着目する周波数帯域に合わせて0.2～4.0Hzのバンドパス・フィルタを施した速度波形を比較対象としている。**図10**と**図11**に示すとおり、30sec付近のN-S成分に着目すると、**EQ-12**を採用したケース（**図10**参照）では主要動の速度パルスの再現性が非常に高いのに対し、**EQ-08**を採用したケース（**図11**参照）では速度パルスを過小に評価しているのが読み取れる。このことは、**EQ-08**のフーリエ位相よりも**EQ-12**のフーリエ位相の方が、対象地域では、本震のフーリエ位相に対するより良い近似となっていることを意味する。よって本検討では、**EQ-12**による観測波形をサイト位相特性として採用することとした。

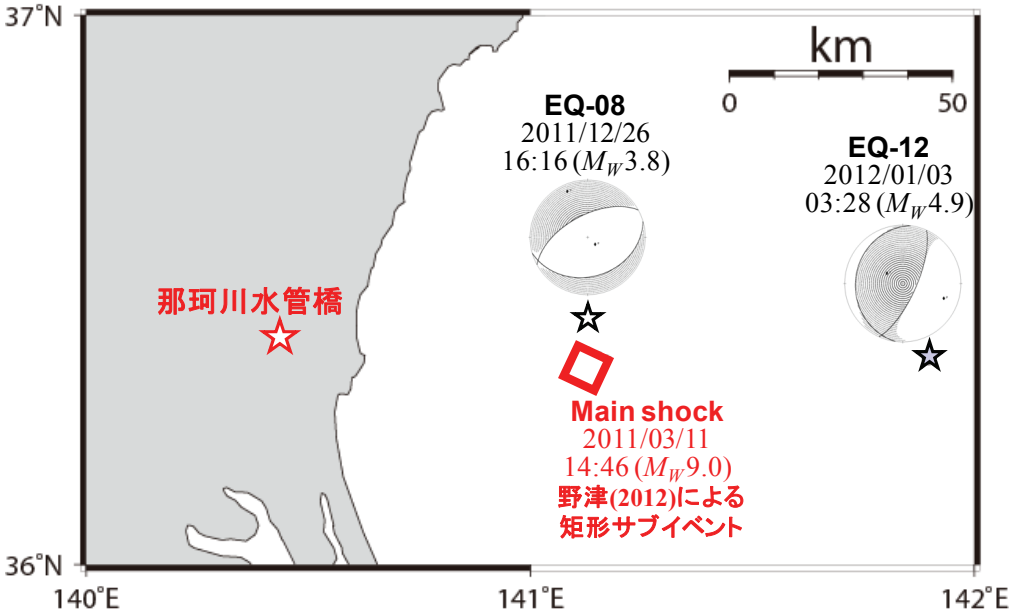

図12　茨城沖のサブイベント[35)]、およびサイト位相特性の評価に用いた余震とその震源メカニズム[36)]

4. 地震動推定手法

本研究では、サイト特性置換手法[13)]を用いて、那珂川水管橋(堤内地および堤外地)およびその周辺の強震観測点(以後、推定点とよぶ)における地震動の推定を行った。この手法は、推定点周辺における強震観測点で得られた本震記録のフーリエ振幅に対し、サイト増幅特性の補正を行うことにより推定点における本震時の地震動のフーリエ振幅を推定し、一方、推定点における本震時の地震動のフーリエ位相には、推定点で観測された余震によるフーリエ位相を採用することにより、推定点における本震時の地震動を推定する手法[13)]である。**図13**に地震動推定の一連の流れを示す。まず、地震動推定の基準となる那珂川水管橋周辺における強震観測点として、SK-net那珂を選定した[23)]。**図14**は、SK-net那珂における水平2成分合成のフーリエスペクトル(本震、**EQ-12**、**EQ-08**)とサイト増幅特性(**図8**参照)を比較したも

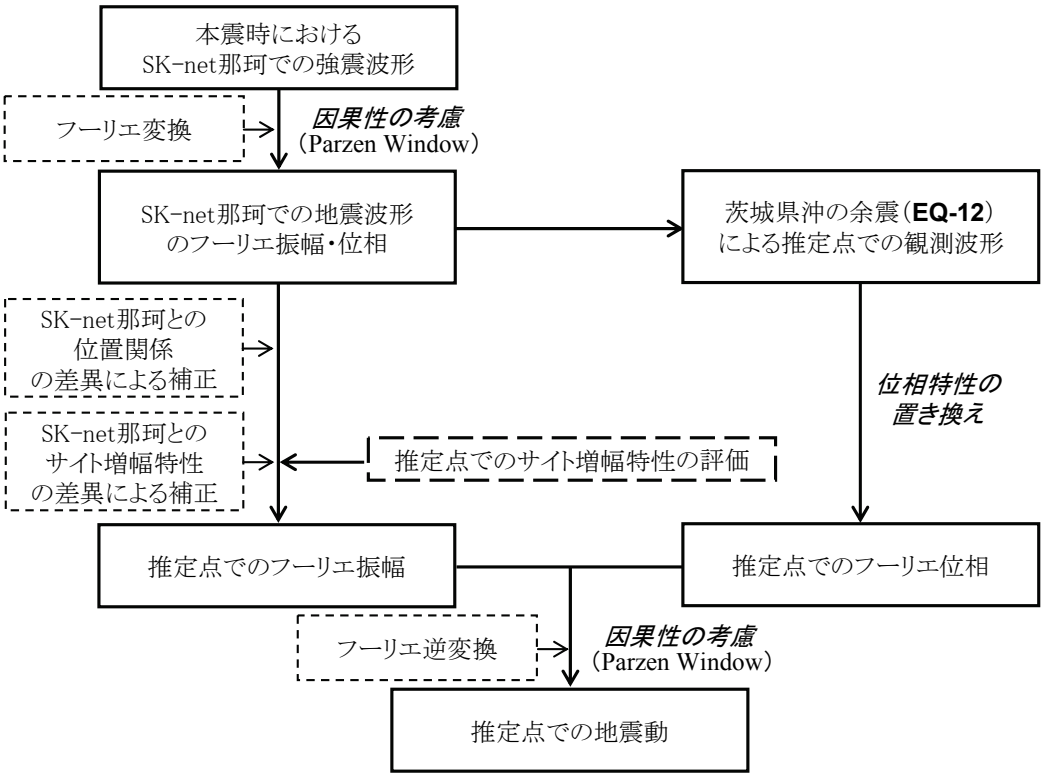

図13　サイト特性置換手法[13)]に基づく地震動推定フロー

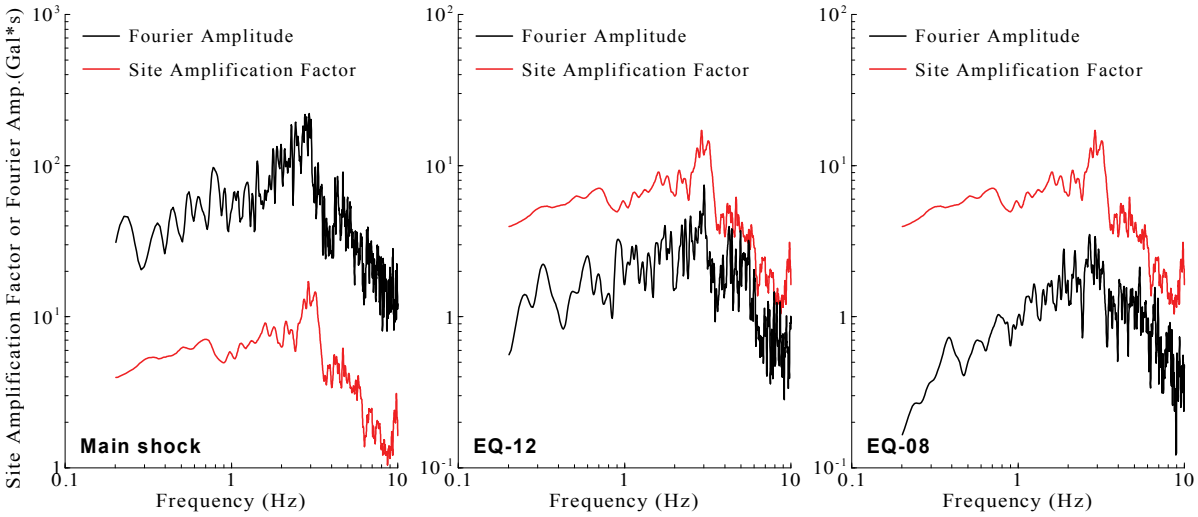

図14　SK-net那珂でのサイト増幅特性[23)]と本震等のフーリエスペクトルの比較

のである。**図14**に示すとおり、SK-net那珂でのサイト増幅特性(線形)は、本震ならびに中小地震(茨城県沖の余震)による観測地震動のフーリエスペクトルに対して、スペクトル形状やピーク周波数などが概ね類似しているため、本震時におけるSK-net那珂での地盤非線形の影響[37),38)]は比較的小さいと推察され、SK-net那珂は基準観測点としての適用性が高い[23)]と考えられる。

次に、SK-net那珂における本震観測記録に対してフーリエ振幅(0.05HzのParzen Windowを考慮)を計算し、これにSK-net那珂と推定点の距離の違いによる補正[27),28)]を施し、さらに、SK-net那珂と推定点のサイト増幅特性(**図8**参照)の比を乗じることにより、推定点におけるフーリエ振幅を推定した。その際、水平2成分(NSとEW成分もしくはN60°EとN30°W成分)それぞれについて同様の計算を行った。なお、距離の違いによる補正については、**図12**に示す2011年東北地方太平洋沖地震における茨城県沖の矩形サブイベント[35)]からの距離に基づいて実施した。

最後に、得られたフーリエ振幅と余震記録のフーリエ位相を組み合わせ、因果性を考慮したフーリエ逆変換[39)]を行うことにより、推定点における本震時の地震動を推定した。なお、このとき用いる余震記録としては、サイト位相特性に関する検討結果(3.3節)を踏まえて、茨城県沖の余震(**EQ-12**)による推定点での観測記録を採用した。

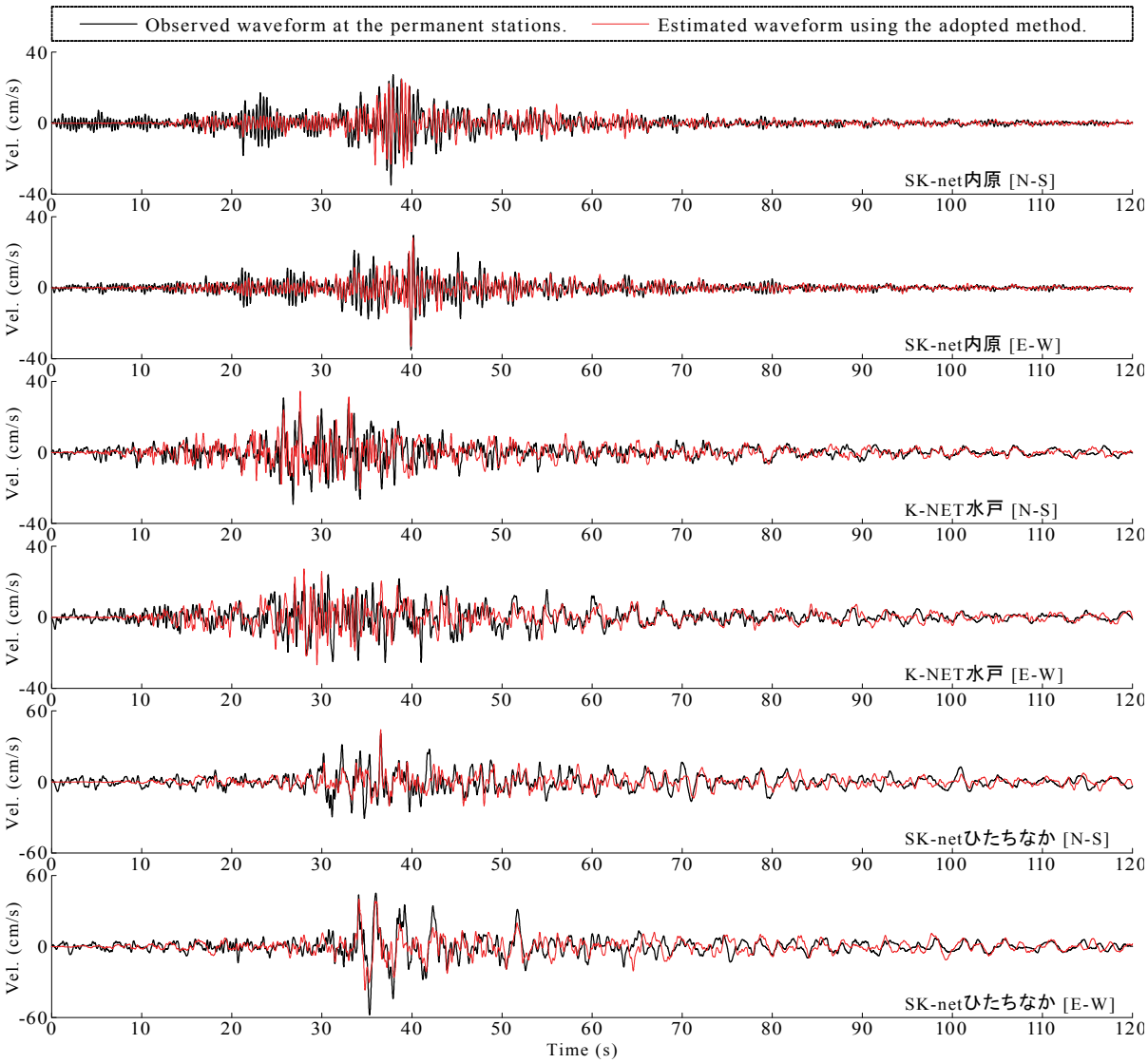

図15　サイト特性置換手法の適用性確認(1)（速度波形(0.2～4.0Hz)の比較）

5. 地震動推定結果

5.1 既存強震観測点

図15に那珂川水管橋周辺の既存強震観測点(SK-net内原、K-NET水戸、SK-netひたちなか)における本震時の速度波形の観測結果(観測波)と推定結果(推定波)を比較したものを示す。なお、ここでは本研究で主に着目する周波数帯域に合わせて0.2～4.0Hzのバンド・パスフィルタを施した速度波形について比較している。**図15**に示すとおり、観測点間の速度振幅や波形形状の差異(サイト増幅・位相特性の違いに起因)は大きいにも関わらず、観測波と推定波は比較的良い一致を示している。具体的には、**図15**に示す

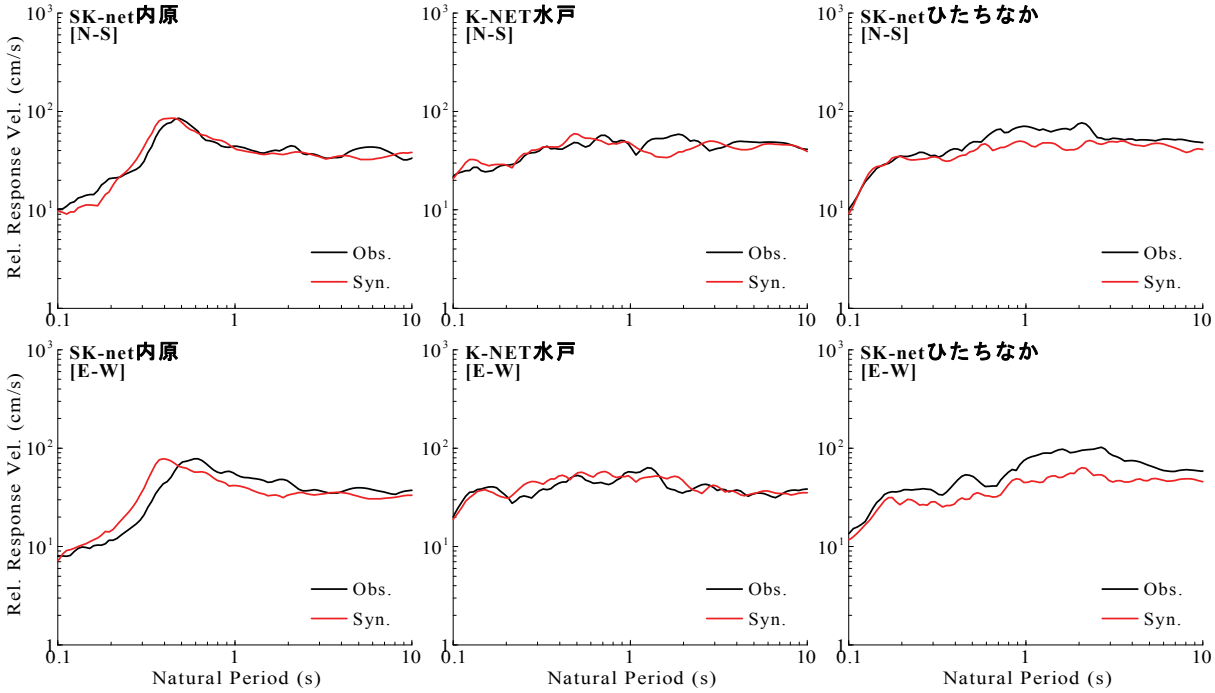

図16　サイト特性置換手法の適用性確認(2)（相対速度応答スペクトル(減衰定数15%)の比較）

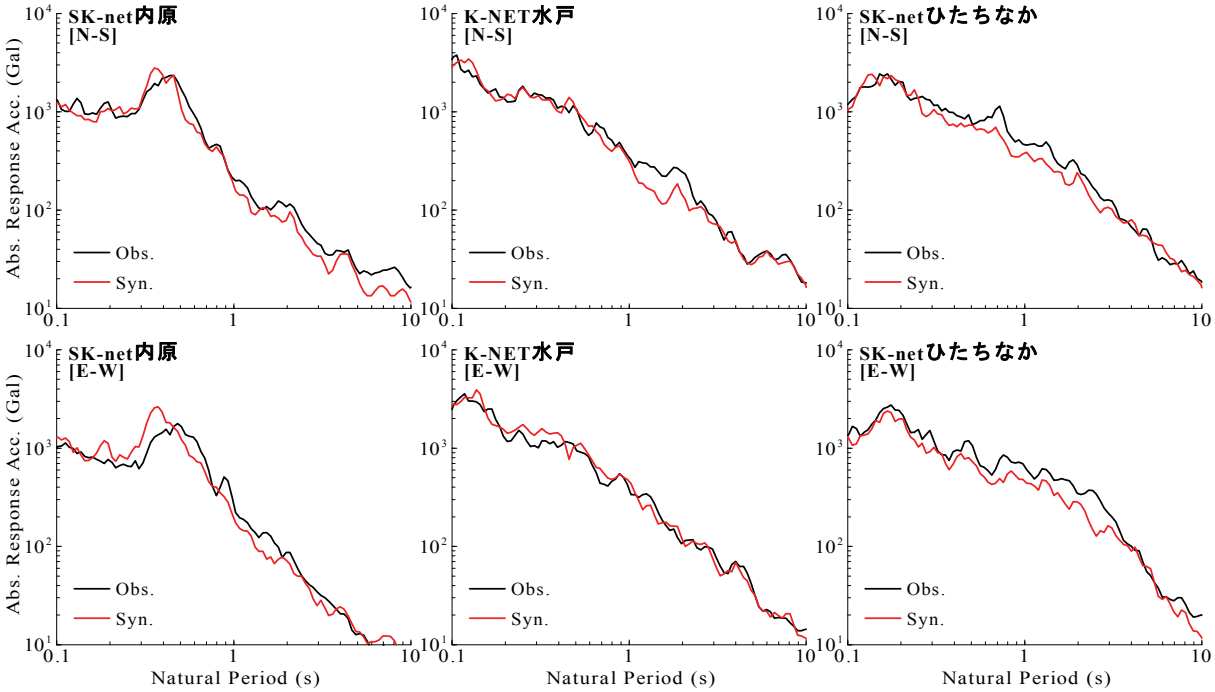

図17　サイト特性置換手法の適用性確認(3)（絶対加速度応答スペクトル(減衰定数5%)の比較）

とおり、主要動となる時間領域において、速度パルスを若干ではあるが過小に評価している時間領域(20～30sec：SK-net内原[N-S, E-W]、30～35sec：SK-netひたちなか[N-S])が見受けられるものの、その他の時間領域では速度パルスや波形形状を一定の精度で再現できている。

図16および**図17**は、観測波と推定波による相対速度応答スペクトルおよび絶対加速度応答スペクトルを比較したものである。ここで、減衰定数に関しては、速度応答スペクトルでは水道施設耐震工法指針・解説[40),41)]を参考に15%、および加速度応答スペクトルでは道路橋示方書・同解説(H14)[18)]を参考に5%をそれぞれ採用した。**図16**および**図17**に示すとおり、SK-netひたちなかでは、若干過小に評価する傾向が見受けられるものの、比較対象の3観測点の中で最も那珂川水管橋に近いK-NET水戸では、観測スペクトルと推定スペクトルが良い一致を示している。

以上のことから、本研究で対象とする地域では、サイト特性置換手法を用い、サイト位相特性の評価に**EQ-12**を用いることにより、地震動の高精度な推定が可能であると考えられる。

なお、サイト特性置換手法は基準観測点での本震観測記録に対してサイト増幅・位相特性を補正する手法であるが、既往の研究ではサイト増幅特性のみを補正する方法[42),43),44)]も提案されている。**図18**はこの方法によるSK-net内原、K-NET水戸、SK-netひたちなかでの推定波と本震観測波を比較したものである。なお、**図18**に示す速度波形は、**図15**と同様に0.2～4.0Hzのバンド・パスフィルタを施している。**図18**と**図15**を比較すると、サイト特性置換手法による推定波のほうが、サイト増幅特性のみを補正する方

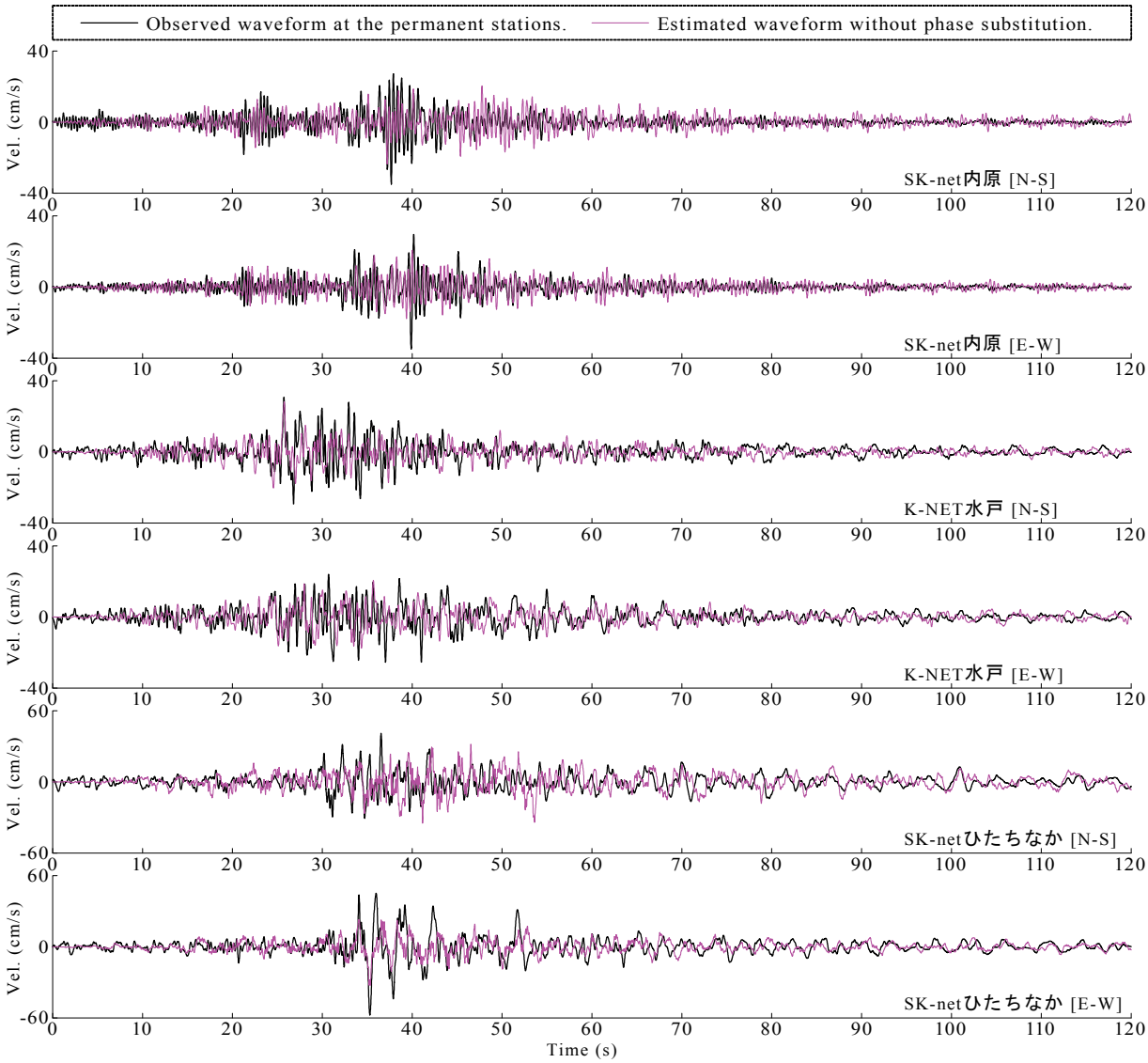

図18　フーリエ振幅のみ補正する方法[42),43),44)]の適用性確認（速度波形(0.2～4.0Hz)の比較）

法による推定波よりも観測波に対する再現性が高い傾向にある。すでに著者ら[13),45)]は、2004年新潟県中越地震(内陸地殻内地震)[45)]および2009年駿河湾の地震(スラブ内地震)[13)]における地震動評価においても同様の傾向があることを確認している。

5.2 那珂川水管橋

那珂川水管橋(堤内地および堤外地)における地震動推定の際に必要となる位置情報としては、**P-1**地点(堤内地)、および**P-3**地点と**P-4**地点の中間部(堤外地)にあたる緯度・経度をそれぞれ採用し、SK-net那珂と那珂川水管橋(堤内地および堤外地)の距離の違いによる補正[27),28)]を施すことで、フーリエ振幅を評価した(4章参照)。一方で、フーリエ位相については、上述したSK-net那珂、SK-net内原、K-NET水戸、SK-netひたちなかでの実績に基づいて、茨城県沖の地震(**EQ-12**)による那珂川水管橋(**TS-1**地点および**TS-5**地点)で得られた観測波形(図19参照)を採用した。図19に示すように、堤内地と堤外地では、同じ方向の同時観測波であるにも関わらず、波形形状の差異が大きい時間領域が長くなっているのが確認できる。これは、那珂川水管橋における堤内地と堤外地では、サイト増幅特性(図8参照)だけでなく、サイト位相特性についても異なっている可能性が高いことを示唆している。

図20および図21は、本震時の那珂川水管橋における推定速度波形および推定加速度波形である。なお、速度波形(図20参照)については、図15と同様に主に着目する周波数帯と対応させて0.2～4.0Hzのバンド・パスフィルタを施している。堤内地と堤外地での推定地震動を比較すると、両地点でのサイト位相特性などの違いにより波形形状に差異が生じているだけでなく(図20および図21参照)、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(図21参照)。また、図21に示す推定加速度波形による計測震度(水平2成分)は、5.9(堤内地)および6.2(堤外地)とそれぞれ算定され、計測震度の値にも大きな差異が生じる結果となった。

さらに、周辺の観測点での記録(図15参照)と那珂川水管橋での推定速度波形(図20参照)を比較すると、最大速度値にそれほど大きな差異は確認できず同等程度であるものの、那珂川水管橋における推定波は、地震動の継続時間が長くなっているのが読み取れる。図22は、地震動を推定する際にサイト位相特性の評価に用いた茨城県沖の余震(**EQ-12**)に関して、那珂川水管橋(堤内地・堤外地)、SK-net内原、K-NET水戸、SK-netひたちなかで得られた観測記録の時刻歴(フィルタ処理無しの速度波形)を比較したもので

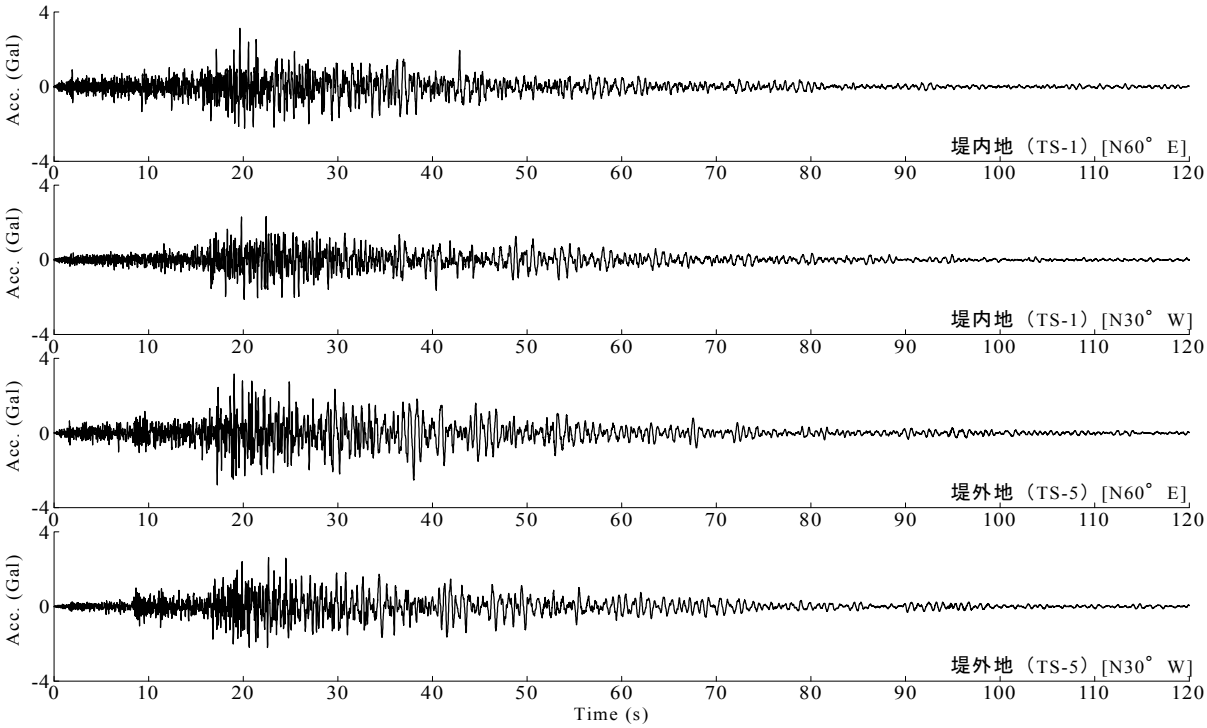

図19　サイト位相特性の評価に用いた余震(EQ-12)における那珂川水管橋での観測波の加速度時刻歴
(2012/01/03 03:28:40から2分間の波形データ)

ある。本震時の速度波形(**図20**および**図15**参照)と余震時(**EQ-12**)の速度波形(**図22**参照)を比較すると、本震と余震による波形形状が非常に類似しているのが確認できる。さらに、**図22**に示すとおり、那珂川水管橋(堤内地・堤外地)では、周辺の観測点と比較して余震による地震動の継続時間が長くなる傾向があり、この傾向は上述したとおり本震時の速度波形の比較(**図20**および**図15**参照)においても確認できる。したがって、那珂川水管橋(堤内地・堤外地)における本震時の推定地震動の継続時間が周辺の観測点と

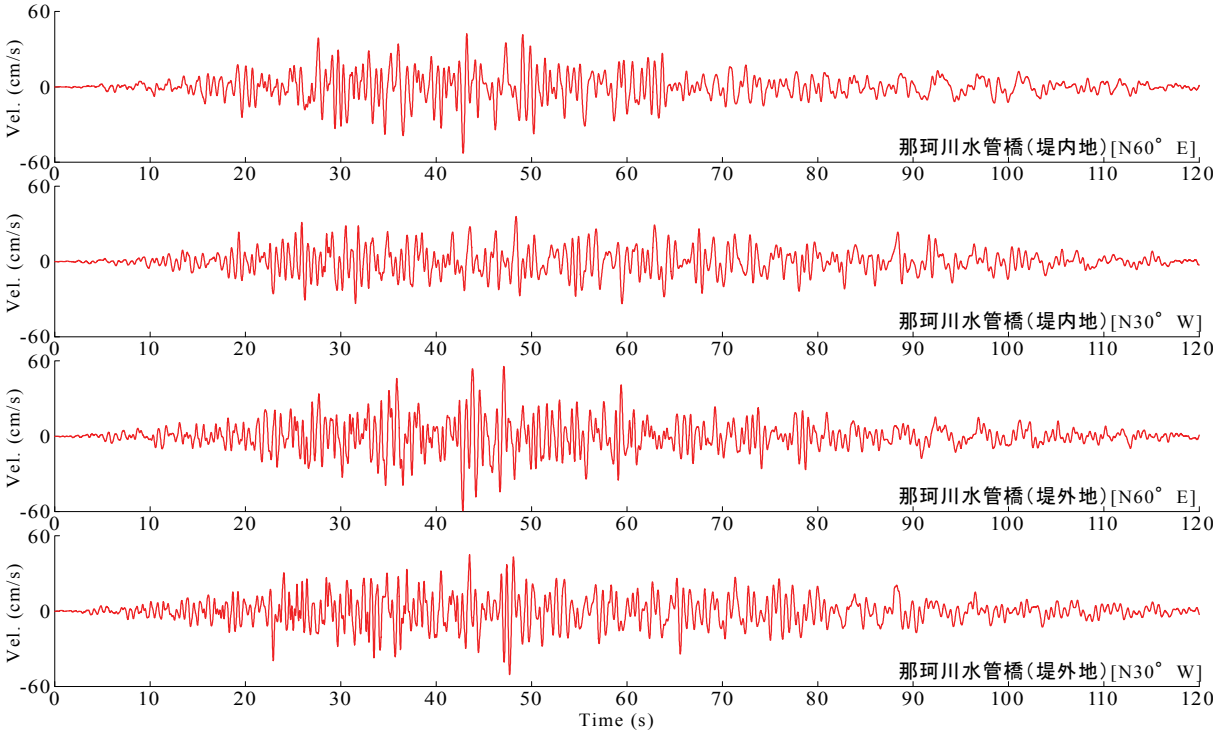

図20　那珂川水管橋での推定地震動(1)（速度波形(0.2～4.0Hz)）

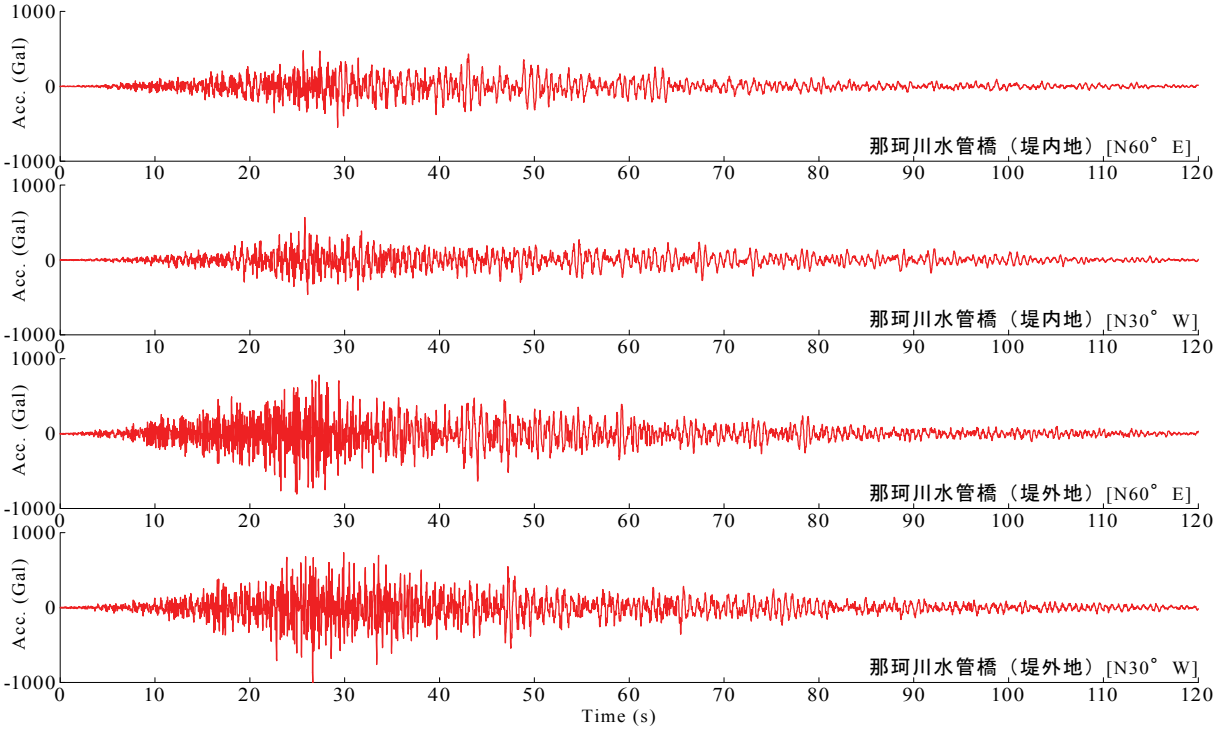

図21　那珂川水管橋での推定地震動(2)（加速度波形(フィルタ処理無し)）

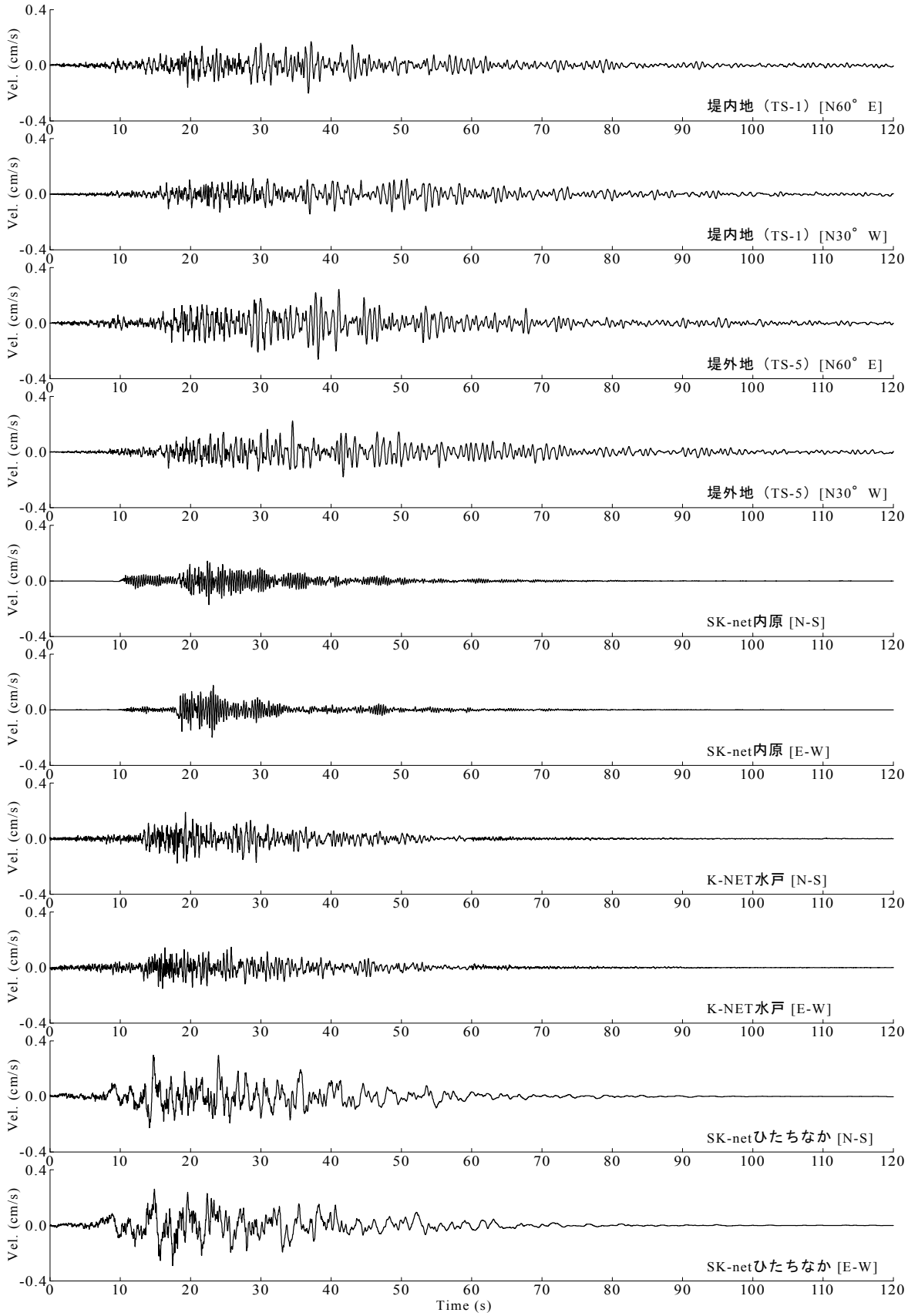

図22　サイト位相特性の評価に用いた余震（**EQ-12**）における観測波の速度時刻歴（フィルタ処理無し）
（2012/01/03 03:28:40から2分間の波形データ）

比較して長くなっているのは、那珂川水管橋サイトにおけるサイト位相特性が大きく影響しているためであると推察される。

図23は、那珂川水管橋での推定地震動(**図21**参照)による絶対加速度応答スペクトル(減衰定数5%[18])を示したものである。**図23**には、道路橋示方書・同解説(H14)[18]によるレベル1地震動およびレベル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)についても同時に示している。**図23**に示すとおり、水管橋の1次モード周期(1.69sec)[15),16)]での加速度応答に着目すると、推定地震動は堤内地および堤外地ともに280Gal程度の値を示しており、設計値(設計水平震度k_H=0.24)相当の240Gal、レベル1地震動の標準スペクトル値相当の190Galをともに上回っているものの、レベル2地震動の標準スペクトル値相当の800Galに対しては、大きく下回っているのが確認できる。さらに、線形のサイト増幅特性(**図8**参照)に基づく推定地震動(**図21**参照)に対して、線形／非線形の重複反射理論[46),47),48)]を適用し、本震時における表層地盤(工学的基盤～地表)の非線形応答を経験的に考慮した推定地震動による絶対加速度応答スペクトル(減衰定数5%[18])を**図24**に示す。**図24**と**図23**を比較すると、水管橋の1次モード周期(1.69sec)において、表層地盤の非線形応答の影響により堤内地および堤外地ともに10Gal程度大きな加速度応答を示しているのが読み取れる。

一方で、**図23**と**図24**に示すとおり、より広帯域での標準スペクトルとの比較では、水管橋における加速度応答スペクトルは、3.0secよりも短周期帯域において、レベル1地震動の標準スペクトルを堤内地および堤外地ともに大きく上回っている。また、レベル2地震動の標準スペクトルに対しては、堤内地および堤外地ともに1.0sec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いる。片側管路通水時の水管橋の微動観測や固有値解析に基づくと[15),16)]、斜張橋トラスの中央径間の1次(管軸直角方向)、2次(鉛直方向)振動モードが構造物全体の1次、2次の振動モードになっており、その周期は1.69sec、1.28sec(微動観測による)になる。一方、側径間の単純トラスの1次（管軸直角方向）、2次（鉛直方向）の振動モードの周期は左右ともに0.68secから0.60sec(微動観測による)になっており、本論文で

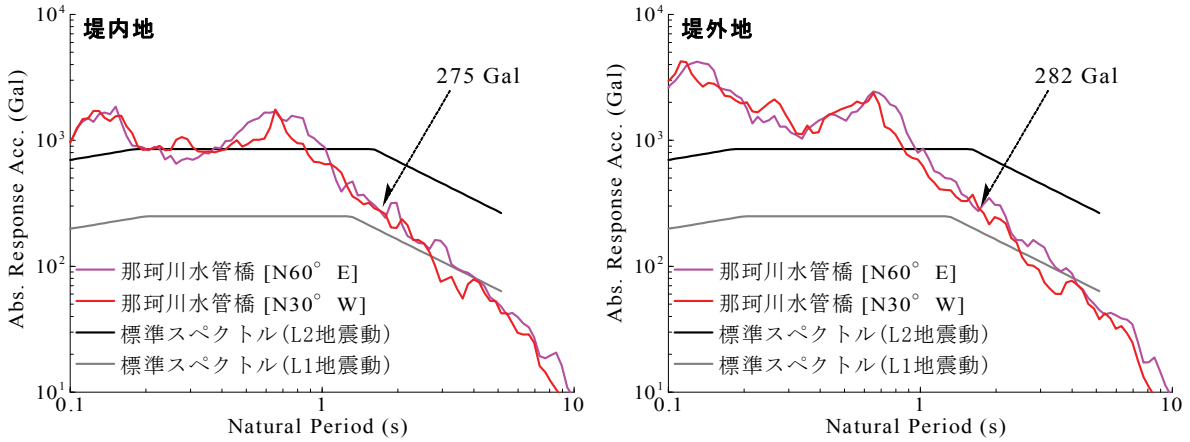

図23　推定地震動の応答スペクトルと道示(H14)による標準スペクトルの比較(表層地盤：線形)

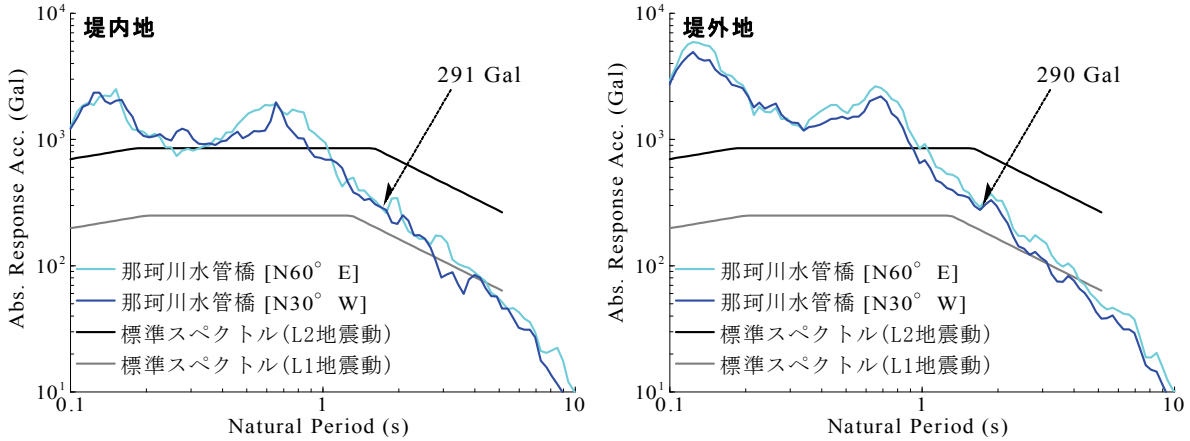

図24　推定地震動の応答スペクトルと道示(H14)による標準スペクトルの比較(表層地盤：非線形)

示した堤内地、堤外地の絶対加速度応答スペクトルにおける0.6sec付近の卓越した周期帯に符合するのは、斜張橋トラスではなく側径間の単純トラスの固有周期になる。しかし、本研究で推定された地震動特有の0.1～0.2secの卓越した短周期成分は、支承反力に過大に作用する。

設計スペクトルよりも0.2sec以下と0.6sec付近の2つの周期帯で卓越したことによる構造物の地震応答については、今後詳細に検討していく次第である。また、那珂川での地震動の継続時間が、他の地震観測点よりも長いことによる影響についても、時刻歴解析を踏まえて考察する必要がある。

6. まとめ

本研究では、高密度の余震アレー観測結果に基づいて、2011年東北地方太平洋沖地震において被災した那珂川水管橋での本震時の地震波形を推定した。得られた知見を以下に示す。

- 那珂川水管橋では、堤内地と堤外地において余震観測記録に基づくサイト増幅・位相特性が大きく異なっており、地表面での地震動を1つの地点に代表させて評価することはできない。
- 那珂川水管橋と周辺の強震観測点の比較においても、サイト増幅・位相特性の差異が大きく、仮に、那珂川水管橋における被害の解析に観測波を直接転用すると、解析精度の低下を招く恐れが高く、当該地点でのサイト増幅・位相特性を適切に評価した上で地震動を推定する必要がある。
- サイト特性置換手法を利用すれば、2011年東北地方太平洋沖地震による那珂川水管橋周辺の観測点における強震波形を一定の精度で再現することが可能である。
- 那珂川水管橋における本震時の推定地震動は、水管橋の1次モード周期（1.69sec）において280Gal～290Gal程度の加速度応答を示しており、設計相当値の240Gal、道路橋示方書（H14）によるレベル1地震動の標準スペクトル値の190Galをともに上回っているが、レベル2地震動の標準スペクトル値の800Galを上回るほどの地震動ではない。
- 水管橋における本震時の推定地震動はレベル2地震動の設計スペクトルよりも0.2sec以下と0.6sec付近の2つの周期帯域で大きくなることがわかった。0.6sec付近の周期帯は側径間の単純トラス橋の固有周期に対応し、0.2sec以下の短周期地震動は支承反力に作用する。堤内地と堤外地の地震動特性の違いが支承の損傷ならびに伸縮継手の脱管といった水管橋の被害にどのように影響を及ぼしたかについては、今後構造物の解析に基づいて明らかにしていく必要がある。

今後は、推定強震動を用いたより詳細な動的解析などを実施し、那珂川水管橋の被災メカニズムに関して更に検討を進めていきたいと考えている。

謝　辞

本研究では、（独）防災科学技術研究所K-NETおよび首都圏強震動総合ネットワークSK-netによる地震観測波形データ、F-netのCMT解、気象庁の震源データをそれぞれ使用させていただきました。また、那珂川水管橋に関する既存資料を茨城県企業局よりご提供いただきました。さらに、茨城県水戸市およびひたちなか市の住民の皆様には、余震観測の実施などにおいて多大なるご支援をいただきました。ここに記して深く御礼申し上げます。

参考文献

1) たとえば，鍬田泰子，片桐信：水道施設の被害，土木学会東日本大震災被害調査団緊急地震被害調査報告書，第10章，2011年, 61p.
2) 国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人土木研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報，国総研資料No.646・土研資料No.4202, 2011年, pp.377-462.
3) 鍬田泰子：東日本大震災による上水道の被害と復旧の課題，日本地震工学会誌，No.15，2011年, pp.41-44.
4) 鍬田泰子，池尻大介，三浦みなみ，上仲亮，金秉洙，澁谷啓：東北地方太平洋沖地震第2次調査団（茨城県），東北地方太平洋沖地震の災害調査情報（二次調査情報），地盤工学会，2011年.
5) Takahashi, Y.: Damage of rubber bearings and dampers of bridges in 2011 Great East Japan Earthquake, *Proc.*

of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, 2012, pp.1333-1342.
6) 高橋良和：2011年東北地方太平洋沖地震によるゴム支承損傷を伴う橋梁被害，第8回日本地震工学会・大会－2011梗概集，2011年, pp.8-9.
7) 野津厚, 一井康二:性能設計の発展型としてのEvidence-Based Designの提案とその実現に向けた課題, 第13回日本地震工学シンポジウム論文集，日本地震工学会，2010年, pp.3073-3080.
8) 秦吉弥，野津厚，中村晋，高橋良和，後藤浩之：拡張型サイト特性置換手法に基づく2011年東北地方太平洋沖地震による新幹線橋梁被災地点での地震動の推定，第14回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，2011年, pp.227-234.
9) 秦吉弥，高橋良和，後藤浩之，野津厚：余震観測記録に基づく2011年東北地方太平洋沖地震における東部高架橋および利府高架橋での地震動の評価，第15回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，2012年, pp.291-298.
10) 秦吉弥，高橋良和，後藤浩之，野津厚：サイト特性置換手法に基づく2011年東北地方太平洋沖地震における新那珂川大橋および旭高架橋での地震動の評価，第15回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，2012年, pp.299-306.
11) 秦吉弥，野津厚，中村晋，一井康二，酒井久和，丸山喜久：2011年東北地方太平洋沖地震で被災した橋梁での余震観測と地震動の推定，日本地震工学会論文集，Vol.12, No.3, 2012年, pp.49-52.
12) 片岡正次郎，金子正洋，松岡一成，長屋和宏：道路橋の地震・津波複合応答解析，第15回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，2012年, pp.9-16.
13) 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, 2011, pp.688-700.
14) 川瀬博：震源近傍強震動の地下構造による増幅プロセスと構造物破壊能―1995年兵庫県南部地震での震災帯の成因に学ぶ―，第10回日本地震工学シンポジウムパネルディスカッション資料集，1998年，pp.29-34.
15) 上仲亮，鍬田泰子：微動観測による水戸市那珂川水管橋の振動特性，第54回（平成24年度）土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集(CD-ROM)，No.I-53, 2012年.
16) 上仲亮，鍬田泰子：東北地方太平洋沖地震における那珂川水管橋の地震応答特性，第67回土木学会年次学術講演会講演概要集，No.I-558, 2012年, pp.1115-1116.
17) 酒井久和，長谷川浩一，Nelson, P.：広域水道管路に対する震害予測手法の提案―2004年新潟県中越地震への適用―，土木学会論文集A，Vol.66, No.3, 2010年, pp.561-567.
18) （社）日本道路協会：道路橋示方書，V耐震設計編，丸善，2002年.
19) Kinoshita, S.: Kyoshin Net (K-net), *Seim. Res. Lett.*, Vol.69, 1998, pp.309-332.
20) Aoi, S., Kunugi, T., and Fujiwara, H.: Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, 2004, pp.65-74.
21) Nishimae, Y.: Observation of seismic intensity and strong ground motion by Japan Meteorological Agency and local governments in Japan, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, 2004, pp.75-78.
22) 鷹野澄，纐纈一起，工藤一嘉，古村孝志，山中佳子，卜部卓，土井恵治：首都圏強震動総合ネットワークSK-net，記念シンポジウム「日本の強震観測50年」―歴史と展望―講演集，防災科学技術研究所資料，No.264, 2005年, pp.119-122.
23) 秦吉弥，一井康二，常田賢一，野津厚，横田聖哉，金田和男：サイト特性置換手法に基づく2011年東北地方太平洋沖地震とその最大余震における盛土被災地点での地震動の推定，土木学会論文集A1（地震工学論文集31-b），Vol.68, No.4, 2012年, pp.I_315-I_330.
24) 鹿野和彦，星住英夫，巖谷敏光，酒井彰，山元孝広，牧本博，久保和也，柳沢幸夫，奥村公男：（資料・解説）地質図に用いる用語，記号，模様，色及び凡例の表示に関する基準とその解説，地質調査所月報，第51巻，第12号，2000年, pp.657-678.
25) 先名重樹，安達繁樹，安藤浩，荒木恒彦，藤原広行：微動探査観測システムの開発，地球惑星連合

大会2006予稿集(CD-ROM)，S111-P002, 2006年.
26) 野津厚，長尾毅，山田雅行：スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性とこれを利用した強震動評価事例，日本地震工学会論文集，Vol.7, No.2, 2007年, pp.215-234.
27) Boore, D. M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America* (*BSSA*), Vol.73, 1983, pp.1865-1894.
28) 佐藤智美，巽誉樹：全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性，日本建築学会構造系論文集，No.556, 2002年, pp.15-24.
29) たとえば，(社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻)，国土交通省港湾局監修，2007年, pp.336-341.
30) 秦吉弥，野津厚，一井康二，酒井久和：サイト特性置換手法に基づく2011年東北地方太平洋沖地震における横浜・柴町集合住宅での地震動の評価，土木学会論文集A1，Vol.68, No.1, 2012年, pp.167-172.
31) 秦吉弥，王功輝，釜井俊孝，末峯章，野津厚：サイト特性置換手法に基づく2011年東北地方太平洋沖地震における葉ノ木平地すべりでの地震動の推定，日本地すべり学会誌，Vol.49, No.3, 2012年, pp.109-118.
32) Hata, Y., Nozu, A., Nakamura, S., Takahashi, Y. and Goto, H.: Strong motion estimation at the elevated bridges of the Tohoku Shinkansen damaged by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake based on extended site effects substitution method, *Proc. of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, 2012, pp.418-429.
33) 野津厚：2008年9月11日十勝沖の地震(M7.1)による地震動のフーリエ位相特性，第44回地盤工学研究発表会講演概要集，No.747, 2009年, pp.1493-1494.
34) 野津厚：2011年東北地方太平洋沖地震による震源付近の地震動の特徴，第66回土木学会年次学術講演会講演概要集，No.I-484, 2011年, pp.967-968.
35) 野津厚：2011年東北地方太平洋沖地震を対象としたスーパーアスペリティモデルの提案，日本地震工学会論文集，Vol.12, No.2, 2012年, pp.21-40.
36) (独)防災科学技術研究所：広帯域地震観測網F-net，http://www.fnet.bosai.go.jp/fnet (last accessed 2012/08/08).
37) 野津厚，盛川仁：表層地盤の多重非線形効果を考慮した経験的グリーン関数法，地震，第2輯，Vol.55, 2003年, pp.361-374.
38) 秦吉弥，中村晋，野津厚：地盤非線形応答時のサイト増幅特性の評価－2011年東北地方太平洋沖地震による福島市の造成盛土崩壊地点での地震動の推定－，地盤工学ジャーナル，Vol.7, No.1, 2012年, pp.139-149.
39) 野津厚，長尾毅，山田雅行：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良－因果性を満足する地震波の生成－，土木学会論文集A，Vol.65, No.3, 2009年, pp.808-813.
40) (社)日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，1997年版，1997年.
41) (社)日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，2009年版，2009年.
42) Maruyama, Y., Yamazaki, F. and Hamada, T.: Microtremor measurements for the estimation of seismic motion along expressways, *Proc. of the 6th international conference on seismic zonation*, 2000, pp.1361-1366.
43) 村岡七重，丸山喜久，山崎文雄：余震および常時微動のフーリエ振幅比を用いた本震の応答スペクトルと計測震度の推定，日本建築学会構造系論文集，No.603, 2006年, pp.179-186.
44) 福島康宏，山田真澄，後藤浩之：臨時余震観測記録を用いた東北地方太平洋沖地震における登米市迫町佐沼の地震動推定，土木学会論文集A1（地震工学論文集31-b），Vol.68, No.4, 2012年, pp.I_119-I_125.
45) 秦吉弥，一井康二，丸山喜久，福島康宏，酒井久和，中村晋：位相を考慮したサイト特性置換手法の震源近傍地点での適用－2004年新潟県中越地震における検討－，構造工学論文集，土木学会，Vol.57A, 2011年, pp.340-353.
46) Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I. and Miura, K.: Equivalent linear method considering frequency dependant characteristics of stiffness and damping, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.22, No.3, 2002, pp.205-222.

47) 吉田望，末富岩雄：DYNEQ:等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム，佐藤工業(株)技術研究所報，1996年, pp.61-70.
48) 安田進，山口勇：種々の不撹乱土における動的変形特性，第20回土質工学研究発表会講演概要集，1985年, pp.539-542.

（受理：2012年 3月30日）
（掲載決定：2012年 8月29日）

Seismic Waveform Evaluation at Naka-River Aqueduct Site for the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Based on the Site-effect Substitution Method

HATA Yoshiya [1], KUWATA Yasuko [2] and NOZU Atsushi [3]

1) Member, Senior Researcher, R&D Center, Nippon Koei Co., Ltd, Dr. Eng.
2) Member, Associate Professor, Graduate School of Eng., Kobe University, Dr. Eng.
3) Member, Head of Engineering Seismology Division, Port and Airport Research Institute, Dr. Eng.

ABSTRACT

During the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Naka-River Aqueduct, Ibaraki Prefecture, Japan, suffered significant damage including pipe dropout in expansion joints. In this study, to estimate strong ground motions at the damage site with high accuracy, aftershock observations with a dense array were conducted at the site. Based on the observation records, difference of site effects between the landside area and the riverside area was indicated. The estimated seismic waveforms at permanent strong motion stations with the site-effect substitution method are very consistent with the observed ones, indicating the validity of the method. Finally, the method was used to estimate strong ground motions at the damage site.

Key Words: Ground motion, *Aftershock observation*, *Site amplification factor*, *Site phase effect*, *Naka-River Aqueduct*, *The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake*