KiK-net 観測記録による地震動推定と構造物被害の原因究明への適用

2000年鳥取県西部地震における変電所被害を事例として

佐藤浩章 — *1 佐藤清隆 — *2
当麻純一 — *3 東 貞成 — *4

キーワード:

基盤強震観測網(KiK-net), 強震動予測, 重複反射理論, 入力地震動, 動的相互作用解析, 構造物被害, 2000年鳥取県西部地震

Keywords:

KiK-net, Strong motion simulation, Multiple reflection theory, Input seismic motion, Dynamic interaction analysis, Structure damage, The 2000 Tottori-ken-seibu earthquake

ESTIMATION OF STRONG GROUND MOTION USING KIK-NET RECORDS AND ITS APPLICATION FOR INVESTIGATION OF THE CAUSE OF STRUCTURE DAMAGE

A case study of electrical substation structure damage during the 2000 Tottori-ken-seibu earthquake

Hiroaki SATO — *1 Kiyotaka SATO — *2
Junichi TOHMA — *3 Sadanori HIGASHI — *4

In order to discuss applicability of strong motion simulation method by 1-D multiple reflection analysis using KiK-net records, we estimate strong motions at the substation where sustained transformer damage during The 2000 Tottori-ken-seibu earthquake. Estimated strong motions are utilized to simulate a dynamic response of soil-base-transformer system. In the substation, the one transformer located on cutting soil was damaged and the other one located on embankment was survived. Analytical results well explain the state of transformers during Tottori-ken-seibu earthquake. By using this method for strong motion simulation after great earthquake, it is possible to investigate the cause of structure damage.

1. はじめに

大規模地震により構造物に被害が生じた際、その原因究明には実際に構造物に作用した地震動が必要となる。しかしながら、多くの場合、被災した構造物で地震記録が得られることはなく、何らかの方法により推定しなければならない。電力などのライフライン施設では、大規模地震により被害が発生した場合、地震後の早急な復旧そして対策方針の決定が求められるため、被害要因を究明するための地震動をできる限り早く推定する必要がある。

表1は、現状の強震動予測手法から考えられる事後対応のためのおもな地震動推定の方法を示したもので、最近では、従来の対象地点近くの観測記録を用いた1次元重複反射理論による方法に加え、同じく観測記録を用いる経験的グリーン関数法や理論的な方法である有限差分法などの不整形地盤の地震動シミュレーションによる方法が実用化の域にあるといわれている¹⁾。しかしながら、有限差分法などによる不整形地盤の地震動シミュレーションの適用に際して

は、地下構造や震源断層のモデル化が容易でないことが多く、また離散化波数法に代表される理論的(解析的)な方法は適用範囲が水平成層構造に限定される。さらに、経験的グリーン関数法では、地下構造モデルを必要としないが、本震の震源断層内で発生した余震の記録や高周波数領域の再現を可能にするためには速報的な震源断層モデルをより詳細に再構築することが求められる。つまり、最新の強震動予測手法を事後対応のための本震地震動の推定に用いる場合には、かなりの時間を要することが考えられる。

一方、1次元重複反射理論による方法は、平成12年から防災科学技術研究所の基盤強震観測網⁶⁾(以下、KiK-net)が全国的に整備され、地中の基盤相当層における地震記録が入手可能となったことから、地盤の不整形性や地震波の斜め入射による影響が少なければ1次元地下構造を把握することによって適用が可能である。したがって、今後はKiK-netの観測記録を用いた1次元重複反射理論による方法により、国内の多くの地域で比較的簡便に本震時の地震動を推定できる可能性がある。

そこで本研究は、KiK-netの観測記録を用いた1次元重複反射理論による方法から、大規模地震による構造物の被害を再現できるような地震動、つまり構造物の応答解析に耐えうる精度を有した地震動を推定できるかという点について検討した。具体的には、鳥取県西部地震で被害を受けた変電所の本震地震動をKiK-netの本震記録を用いて推定し、この地震動を入力地震動とした変圧器-基礎-地盤系の動的相互作用解析の結果と実際の被害状況との比較から、推定した地震動の妥当性の評価を行った。

表1 事後対応におけるおもな地震動予測手法

	代表的な方法	必要な情報
経験的方法 ・対象地点近傍の岩盤での本震記録あり	1次元重複反射理論 ²⁾	・対象地点直下の地下構造モデル ・対象地点近傍の岩盤での本震記録
経験的方法 ・対象地点での余震記録あり	経験的グリーン関数法 ³⁾	・震源モデル ・本震断層内で発生した対象地点での余震記録
理論的方法 ・地下構造が水平成層モデルの場合	離散化波数法 ⁴⁾	・震源モデル ・地下構造(水平成層)モデル
理論的方法 ・地下構造が不整形モデルの場合	有限差分法 ⁵⁾	・震源モデル ・地下構造(不整形)モデル

*1 財電力中央研究所地盤耐震部 主任研究員・修士(工学)
(〒270-1194 我孫子市我孫子1646)

*2 文部科学省研究開発局地震調査研究課 調査員・工修

*3 財電力中央研究所地盤耐震部 部長・工博

*4 財電力中央研究所地盤耐震部 主任研究員・理博

*1 Research Scientist, Geotechnical and Earthquake Engineering Dept., Central Research Institute of Electric Power Industry, M. Eng.

*2 Special Staff, Earthquake Research Division, Research and Development Bureau, Ministry of Education Culture Sports Science and Technology, M. Eng.

*3 Director, Geotechnical and Earthquake Engineering Dept., Central Research Institute of Electric Power Industry, Dr. Eng.

*4 Research Scientist, Geotechnical and Earthquake Engineering Dept., Central Research Institute of Electric Power Industry, Dr. Sci.

図1 変電所の地形および変圧器の設置位置

2. 被害の概要

鳥取県西部地震によるおもな電力施設の被害は、500kV 送電鉄塔の変形、超高圧変電所変圧器 (500 kV/220 kV) の2次側(220kV)のブッシング碍管 (以下、二次ブッシング) の損壊、水力発電所の水圧鉄管の固定台のずれなどが報告されている⁷⁾。なかでも、震央から東北東へ約 5km に位置する超高圧変電所の2系統(3台1組)ある500kV 変圧器のうちの1組の変圧器において発生した二次ブッシングの被害は、同変電所におけるそのほかの大部分の機器やシステムおよび建築物、さらには隣接するもう一方の変圧器が無事であったなかで、その変圧器の二次ブッシングだけが3台ともに損壊するという局所的な現象であった。変電所における既往の地盤調査資料から、隣接する2組の変圧器はそれぞれ切土および厚さ20mの盛土の異なる地盤上に設置されており、今回損壊した変圧器は切土地盤上に設置されていることが分かっている(図1参照)。

3. KiK-net 観測記録を用いた入力地震動の推定

図2に、本研究における地震動推定のフローを示す。図のように、本報告では、地震動の推定において検討した項目を大きく3つの段階に分けて考えることができる。以下において、観測記録を用いた1次元重複反射理論による方法の各段階における考え方を簡単に整理しながら、本研究で実施した方法について述べる。

なお、一概に観測記録を用いた1次元重複反射理論による方法であっても、地盤の伝達関数を計算する方法は複数存在する⁸⁾。本研

図2 本研究における地震動推定のフロー

図3 変電所と KiK-net 観測点の位置

究では、汎用的な SHAKE²⁾を用いてその計算を行った。

3.1 観測記録の選定

図3に、変電所および近傍の KiK-net 観測点の位置および本震発生から20日後までのM3以上の余震分布を示す。観測記録を用いた1次元重複反射理論による方法では、対象地点に最も近い露頭岩盤上や地中における基盤相当層の記録を、対象地点の基盤層への入力地震動として推定することが多い⁸⁾。そこで本研究では、図3に示す変電所から10kmに位置する KiK-net 伯太観測点(以下、SMNH01)の地中観測記録を用いることにした。ここで、変電所にさらに近い KiK-net 日野観測点(以下、TTRH02)の記録を用いなかったのは、TTRH02 がほぼ断層直上に位置するため、観測記録が震源過程による影響を強く受けている可能性が考えられたためである。

3.2 対象地点の地盤モデル

変電所の地盤のモデル化にあたっては、弾性波速度構造に関する情報として、建設前の屈折法地震探査によるP波速度の2次元構造と板たたき法による建設後の最表層部のS波速度についての情報を入手することができた。したがって、変電所の地盤モデルは、まずP波速度断面図をもとに層構造とP波速度をモデル化し、次にS波速度をモデル化した。S波速度のモデル化は、最表層を板たたき法の結果から、それ以外の層は変電所近傍の KiK-net 観測点(TTRH02およびSMNH01)で公開されている速度構造⁹⁾から先にモデル化した変電所のP波速度と同等のP波速度を有する層のS波速度から設定した。表2に設定した盛土および切土地盤モデルを示す。

次に、設定した地盤モデルの妥当性を、盛土および切土地盤の各地点で得られた微動 H/V スペク

トル比と表2の地盤モデルから計算されるレイリー波基本モードの H/V スペクトル比との周波数特性の比較により検討した(図4参照)。微動 H/V スペクトル比の周波数特性が、レイリー波の H/V ス

表2 変電所の地盤モデル (上：盛土地盤，下：切土地盤)

No.	深さ (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	密度 (g/cm ³)	減衰 (%)	層厚 (m)
1	20	1,800	400	2	1	20
2	30	2,200	600	2.2	5	10
3	∞	4,000	1,200	2.5	1.25	∞

No.	深さ (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	密度 (g/cm ³)	減衰 (%)	層厚 (m)
1	30	2,200	600	2.2	5	30
2	∞	4,000	1,200	2.5	1.25	∞

図4 微動 H/V スペクトル比と地盤モデルによるレイリー波基本モードの H/V スペクトル比の比較

ペクトル比と類似することは、微動の主成分が表面波であることからある程度推察され、実際にはレイリー波が十分に優勢であるという前提が必要であると考えられるが、既往の研究から両者が対応する例は多く報告されている^{例えは 9)10)}。また地盤のコントラストが大きければラブ波とレイリー波の1次の卓越周波数が一致する傾向にあることから¹¹⁾、微動 H/V スペクトル比とレイリー波 H/V スペクトル比の比較から、大よその地盤モデルの評価が簡便にできる可能性が考えられる。図4によれば、本研究で設定した切土地盤について、両者の卓越周波数と周波数特性の傾向はよく一致し、また盛土地盤については、卓越周波数は不明瞭なため比較が困難であるが、周波数特性は概ね調和的であり、大きく異なっていない。以上から、設定した地盤モデルは、極端に実際の状況と異なるものではなく、妥当性のあるモデルであると解釈した。

なお、微動観測では、200倍のプリアンプを増設した3成分加速度計(アカシ製 JEP6A3)を用い、H/V スペクトル比は、約20分間の観測記録からノイズの少ない部分(40.96秒)を複数切り出し、それぞれのデータセットについて計算されたスペクトル比を平均することにより求めた。また、微動の水平成分は NS および EW 成分の相乗平均とし、スペクトルには 0.4Hz の Parzen ウィンドウを施した。

3.3 変電所における入射波の推定

対象地点近傍の KiK-net などの地中観測記録を用いて地表面地震動を推定する場合、対象地点において地中観測点が設置されている層と同等の層までの地盤がモデル化されていれば、地中記録の上昇成分を入射波として用いることができる。しかしながら、地中観測点の設置位置が対象地点の地盤モデルの最下層(以下、入射層と呼

図5 SMNH01における地表/地中スペクトル比と地盤モデルの伝達関数の比較

ぶ)より弾性波速度の大きい、いわば地中観測点と地表観測点の間に対象地点の入射層と同等の層が存在することがしばしばある。本研究で使った SMNH01 は、GL-101m の地中観測点が S 波速度 2,800m/s の層にあることから(表3参照)、明らかに変電所の入射層と同等の層は地中観測点よりも上部に存在することになる。したがって本研究では、KiK-net の地中記録を入射波とした1次元重複反射理論から変電所の入射層と同等な層における上昇波成分を計算し、それを変電所への入射波とした。

ここで、鳥取県西部地震の本震時および余震時の SMNH01 における EW 成分の地表/地中スペクトル比を図5に示す。図より、本震時の地表/地中スペクトル比の振幅は、余震時に比べて低下し、卓越周波数は低周波数側へ移動するなど、明らかに地盤の非線形化の影響がみられる。また、図には PS 検層による KiK-net の地盤モデル³⁾の伝達関数(Q 値は $V_s/15$)が併せて示されているが、本震時の地表/地中スペクトル比とは大きく異なっている。つまり、KiK-net の地盤モデルでは、本震時の地盤応答を考慮した入射波を推定することは困難であると考えられる。そこで本研究では、本震時の地表/地中スペクトル比が本震時の SMNH01 における地盤増幅特性の唯一の情報であることから、これを本震時の SMNH01 での地盤の伝達関数とみなし、それに適合するような KiK-net 地盤モデルの S 波速度と Q 値をスペクトル同定法¹²⁾によって再決定し、この地盤モデルを用いて入射波を推定した。なお、Q 値の同定に際しては、周波数依存性

図6 まさ土の $G/G_0 - \gamma \cdot h - \gamma$ 曲線

表3 SMNH01 の地盤モデル

No.	深さ (m)	S波速度			Q値		密度 (g/cm ³)	層厚 (m)
		本震	余震	PS検層	本震	余震		
1	4	180	220	290	2	13	2	4
2	11	180	370	290	2	13	2	7
3	22	480	646	550	5	3	2.2	11
4	42	1200	1200	1200	40	40	2.5	20
5	54	1900	1900	1900	45	45	2.5	12
6	101	2300	2300	2800	50	50	2.7	47
7	∞	2300	2300	2800	50	50	2.7	∞

図7 変電所において推定された本震地震動

図8 加速度応答スペクトル(減衰 5%)の比較

を考慮していない。表3に再決定されたSMNH01の本震時の地盤モデルおよび同様に同定された余震時の地盤モデルを示す。表から、本震時の表層地盤は、余震時に比べても明らかにS波速度とQ値が低下しており、この点からもSMNH01では本震時に地盤が非線形化していたことが分かる。

3.4 本震地震動の推定

震源断層からの距離が変電所とほぼ等しいSMNH01で、表層地盤の非線形化がみられたことから、変電所においても表層地盤が非線形化していた可能性が考えられる。地盤調査資料から、変電所の表層地盤は、切土地盤は花崗岩、盛土地盤は埋め戻しのまさ土であることが分かっている。一般に、岩盤では非線形化が考え難いため、本研究では岩盤である切土地盤については非線形化を考慮せず、盛土地盤について等価線形化解析により地盤の非線形化を考慮することとした。等価線形化解析に用いる地盤の動特性については、実際の地盤からサンプリングした試料に対する動的物性試験から決定することが望ましいが、変電所の盛土地盤では動的物性試験が行われていなかった。そこで本研究では、まさ土の風化環境は異なるが、ポートアイランドで測定されたまさ土の力学特性の試験結果¹³⁾から、盛土地盤のS波速度400m/sに相当する地盤のひずみ依存特性を図6に示すように設定して用いることにした。

図7に、推定された盛土および切土地盤の水平成分の地震動を示す。ここで地震動の方向成分は、図1に示す変圧器の長辺方向をX

図9 変圧器の側面図

図10 変圧器の振動モデル

成分、変圧器の短辺方向をY成分とした。また、変電機器において考慮すべき周波数範囲が0.5Hz~10Hzであることから¹⁴⁾、解析対象とした周波数範囲は10Hzを周波数の上限とした。図より、推定した本震地震動の最大加速度は、若干、盛土地盤の方が大きいがほぼ同等であることが分かる。図8に、盛土および切土地盤上におけるX成分の推定地震動の減衰5%の加速度応答スペクトルを示す。また参考として、1993年釧路沖地震のJMA 釧路と1995年兵庫県南部地震のJMA 神戸における記録の減衰5%の加速度応答スペクトルも併せて示す。図より、ブッシングの固有周期範囲¹⁴⁾の大部分においてブッシングの損壊が発生した切土地盤上における今回の地震動が最も大きな加速度応答を示している。このことは、変電所における実際の被害状況や既往の2地震において現在の基準¹⁴⁾によるブッシングが大きな被害を受けなかったこと¹⁵⁾と調和的な結果である。

4. 変圧器の動的応答解析による被害要因の究明

4.1 変圧器ブッシングの応答特性と損壊パターン

図9には、変圧器の側面図が示されている。ブッシングは、脆性材料である碍子からできているため、ねばりのようなエネルギー吸収はほとんど期待できず、最大加速度応答による慣性力で損壊することが分かっている¹⁴⁾。また、その発生パターンも数多くの試験結果から、振動の際に生じるブッシング下端での応力集中によって発生することが明らかとなっている¹⁴⁾。

したがって本研究では、振動モデル化した変圧器の動的応答解析による損壊の有無の判定を、解析の結果、二次ブッシング下端面で発生する最大応力に着目して行った。

4.2 振動モデル

盛土地盤上の変圧器(以下、変圧器Ⅰ；「無被害」)および切土地盤上の変圧器(以下、変圧器Ⅱ；「損壊」)は、それぞれ杭基礎および直接基礎と異なる基礎形式の上に設置されている。盛土地盤の地盤-基礎系の振動モデル化にあたり、杭基礎の杭の情報を入手することはできなかったが、盛土地盤の表層のS波速度は、本震時の収束値が約300m/sから360m/sと比較的硬質であったことから、杭の効果はそれほど大きくはないことが予想された。そこで、基礎のモデル化については、両者ともに直接基礎に対する剛板分布の田治見の式¹⁶⁾によりモデル化した。また、変圧器本体のモデル化は、質点系のばね-マスモデルにより本体および一次、二次ブッシングをモデル

表 4 変圧器モデルの諸元

質点 No.	X(m)	Y(m)	Z(m)	質量 (ton)	BEAM No.	I端	J端	断面積 (m ²)	断面2次モーメント Y軸(m ⁴) Z軸(m ⁴)	剛性 No.
二次ブッシング										
21	2.75	-1.35	9.808	0.172	21	22	21	1.17E-02	8.62E-05 8.62E-05	5
22	2.75	-1.35	9.316	0.055	22	23	22	2.44E-02	1.35E-04 1.35E-04	5
23	2.75	-1.35	8.834	0.083	23	24	23	3.21E-02	2.68E-04 2.68E-04	5
24	2.75	-1.35	8.345	0.096	24	25	24	4.10E-02	4.81E-04 4.81E-04	5
25	2.75	-1.35	7.852	0.128	25	26	25	4.83E-02	7.57E-04 7.57E-04	5
26	2.75	-1.35	7.336	0.155	26	27	26	4.83E-02	9.06E-04 9.06E-04	5
27	2.75	-1.35	7.048		27	28	27	2.34E-02	2.54E-04 2.54E-04	6
29	2.75	-1.35	7.048	0.018	30	31	30	2.34E-02	2.54E-04 2.54E-04	6
30	2.75	-1.35	6.948	0.208	33	34	33	1.52E-02	1.08E-03 1.08E-03	4
31	2.75	-1.35	6.848		34	35	34	1.52E-02	1.08E-03 1.08E-03	4
33	2.75	-1.35	6.848		35	36	35	1.52E-02	1.08E-03 1.08E-03	4
34	2.75	-1.35	5.434	2.100	本体-基礎					
35	2.75	-1.35	5.349		101	103	101	rigid	rigid	rigid
36	2.75	-1.35	4.020		102	103	102	rigid	rigid	rigid
基礎-地盤										
101	2.55	0.0	4.02		103	104	103	1.70E-01	2.55E-01 1.03E+00	4
102	2.75	0.0	4.02		105	105	104	1.70E-01	2.55E-01 1.03E+00	4
103	0.0	0.0	4.02	182.0	水平方向					
104	0.0	0.0	2.20		回転方向					
105	0.0	0.0	0.0		ばね定数K _{xy} (N/m)					
剛性No.					ヤング率 (MPa)		ポアソン比		減衰定数	
4	2.06E+05		0.28	0.05	ばね定数K _{xy} (N/m)		減衰係数 (N*s/m)		ばね定数K _{xy} (N*m/rad)	
5	5.88E+04		0.23	0.05	3.89E+09	1.23E+08	4.23E+09	1.35E+08		
6	7.06E+04		0.33	0.05	回転ばね (N*m/rad)		減衰定数			
バネ要素					I端	J端	回転ばね (N*m/rad)	減衰定数		
127	29	27	2.42E+07	0.05						
132	33	31	4.90E+07	0.05						
135	102	36	4.90E+07	0.05						

化した。なお、図 10 には、鳥取県西部地震で損壊した変圧器Ⅱの振動モデルが、表 4 には変圧器Ⅱの本体および二次ブッシングのモデルの諸元が示されている。

4.3 解析結果と変圧器ブッシングの被害状況の比較

図 11 に解析結果として、変圧器ⅠおよびⅡの二次ブッシング下端面で発生した応力と許容応力に対する安全率を示す。図には、変圧器ブッシングの設計用地震力(ポケット下端 0.5G 共振正弦 3 波)を入力した場合の結果も併せて示されている。

無被害の変圧器Ⅰの解析結果では、発生した応力が設計用地震力の結果をやや上回っているが、許容応力に対する安全率は 1.57 であった。これは、ブッシングが到底破壊しないレベルであると考えられ、盛土地盤上の変圧器Ⅰが無被害であった実際の状況と一致している。次に、ブッシングが損壊した変圧器Ⅱでは、発生した応力が、設計用地震力で発生した応力の 3 倍以上となり、許容応力に対する安全率は 0.58 となった。これは、製造過程に伴う許容応力値のばらつきを考慮しても、二次ブッシングが破壊に至る応力状態であったと考えることができる。この結果は、変圧器Ⅱの二次ブッシングが損壊した実際の状況と一致している。

以上のように、変圧器の動的応答解析結果は、鳥取県西部地震により実際に変電所に発生した変圧器の被害状況を説明できる結果となった。したがって、KiK-net 観測記録を用いた 1 次元重複反射理論

図 11 変圧器二次ブッシングの動的応答解析結果

図 12 変圧器ブッシングにおける加速度応答波形
(左: 変圧器Ⅰ; 右: 変圧器Ⅱ)

による方法で推定した鳥取県西部地震の本震時の地震動は、変電所における本震時の地震動として妥当であると考えられる。

4.4 変圧器ブッシングの被害要因についての考察

図 12 には、両変圧器に対する入力地震動(推定地震動)と二次ブッシングの下端および頂部における加速度応答波形を示す。無被害の変圧器Ⅰの応答波形は、ブッシング下部において入力 2.3 倍の最大応答加速度を示し、頂部では 7.1 倍となっている。損壊した変圧器Ⅱの応答波形は、ブッシング下部で入力 5.2 倍の最大応答加速度を示し、変圧器Ⅰの 2 倍以上となっている。さらにブッシング頂部では、入力約 12.9 倍であり、変圧器Ⅰの 1.8 倍となっている。また、損壊した変圧器Ⅱの応答波形には、単一の周期によるものと考えられる共振的な位相が顕著にみられる。これは、無被害の変圧器Ⅰの応答波形が、入力地震動の形状を比較的保持していることと対照的である。損壊した二次ブッシングの固有周期は、約 0.16 秒 (6.1Hz) であり、図 8 の応答スペクトルから切土地盤の入力地震動(推定地震動)の卓越周期とほぼ一致していることがわかる。一方、無被害の二次ブッシングの固有周期は、約 0.14 秒 (7.4Hz) であり、盛土地盤の入力地震動(推定地震動)の卓越周期とは離れている。

以上から、切土地盤上における変圧器Ⅱの二次ブッシングが損壊した要因は、地震動と二次ブッシングの共振現象により、過大な応力が発生したことが原因であると考えられる。

5. 弾塑性応答による推定地震動の妥当性

本研究で推定した地震動を入力とした変圧器の応答解析結果は、実際に変電所で発生した被害状況とよく一致することが分かった。したがって、推定した地震動は本震時における変電所の妥当な地震動であると本研究の応答解析の結果からは考えることができる。しかしながら、強震動が作用した場合、本研究で対象とした変圧器ブ

図 13 復元力特性

図 14 必要耐カスペクトルの比較

ッシングは弾性応答のまま損壊に至るが、一般の建築・土木構造物は塑性応答を示すことが多い。そこで、構造物の弾塑性応答を考慮した場合の推定地震動の妥当性を検討するために、損壊した変圧器Ⅱの入力地震動の必要耐カスペクトルを求めた。復元力特性は図 13 に示すように比較的安定した履歴を示す RC 構造物で用いられる Takeda モデル¹⁷⁾とした。なお、図 13 において Q_c/Q_y は 1/3、 α_y は 0.3 と仮定している。図 14 には許容塑性率 $\mu=4$ とした必要耐カスペクトルを、図 8 と同様な既往の 2 地震の必要耐カスペクトルと併せて示す。図より周期約 0.2 秒から 0.4 秒では、兵庫県南部地震が鳥取県西部地震や釧路沖地震よりもかなり大きな耐力が必要となることが分かる。この周期帯域は兵庫県南部地震で多数被害を受けた中・低層の RC 構造物の固有周期に該当しており、実際の状況と調和的である。また図 14 では、周期 0.1 秒から 1 秒のほぼ全帯域において、今回の鳥取県西部地震における変圧器Ⅱの地震動が最も小さく、周期約 0.2 秒から 0.4 秒では必要ベースシア係数は 0.1 を下回っている。こうした結果は、鳥取県西部地震において変電所内建屋にほとんど損傷が無かった実際の状況(1978 年宮城沖地震災害調査報告¹⁸⁾の被災度Ⅰに相当)と一致しており、今回の推定地震動は、強震時に塑性応答をする一般の建築・土木構造物に対しても矛盾しない結果を与えるものと考えられる。

6. まとめ

近年、防災科学技術研究所による基盤強震観測網(KiK-net)が全国的に整備されたことから、岩盤での観測記録の入手が容易となった。そこで、最も簡便と考えられる KiK-net の観測記録を用いた 1 次元重複反射理論による地震動推定法の有用性を検討することを目的として、鳥取県西部地震により被害を受けた変電所の本震地震動を推定した。本研究では、この方法で推定した鳥取県西部地震における変電所の本震地震動が、実際に変電所で発生した 2 組の変圧器の異なる被害状況とよく一致する動的応答解析結果を与えることを示した。このことは、KiK-net 観測記録を利用した 1 次元重複反射理論による方法によって、事後対応などにおいて必要とされる大規模地震による構造物の被害を再現できるような地震動、つまり構造物の応答解析に耐えうる精度を有した地震動を簡便に推定できる可能性を示唆するものと考えられる。なお本研究は、地震後の限られた情

報のもとで実施したため、地盤物性値や振動モデル化に際して周辺状況から若干の仮定を行っている。これらの点については、今後詳細な情報が得られた場合、本研究の妥当性の検証も含めて検討を実施する予定である。

謝辞

本研究にあたり、中国電力(株)の関係者の方々からご協力をいただきました。なお、本研究では防災科学技術研究所 KiK-net の記録と観測点情報、さらに気象庁の記録を使用させていただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 香川敬生ほか：強震動予測の現状と将来の展望，地震 2，51，pp.339-354，1998
- 2) 例えば，Schnabel, P. B. et al. : SHAKE : A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, EERC72-12, UC Berkley, California,
- 3) 例えば，Irukura, K. : Prediction of Strong Acceleration Motions Using Empirical Green's Function, Proc. 7th Japan Conf. Earthquake Engineering, pp.151-156, 1986
- 4) 例えば，Bouchon, M. : Discrete wave number representation of elastic wave fields in three-space dimensions, J. Geophys. Res, 84, pp.3609-3614, 1979
- 5) 例えば，Graves, R. W. : Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences, Bull. Seism. Soc. Am., 86, pp.1091-1106, 1996
- 6) 防災科学技術研究所：http://www.kik.bosai.go.jp/kik/
- 7) 当麻純一ほか：平成 12 年鳥取県西部地震調査速報，電力中央研究所調査報告 U00019, 2000
- 8) 例えば，Sasatani, T. : Methodology of response analyses used for the Ashigara valley blind predictions, Proc. of International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, Association for Earthquake Disaster Prevention, Japan, Vol.2, pp.61-64, 1992
- 9) 野越三雄ほか：微動の振幅特性(その 2)，地震 2，24, pp.26-40, 1971
- 10) 時松孝次ほか：短周期微動の水平鉛直振幅比と地盤特性の関係，日本建築学会構造系論文集, 457, pp.11-18, 1994
- 11) Allam, A. and E., Shima : An Investigation into the Nature of Microtremors, Bull. Earthq. Res. Inst., 45, pp.43-59, 1967
- 12) 石田勝彦ほか：地震観測にもとづく軟質地盤の地下構造の推定と基準化応答スペクトル特性，電力中央研究所報告 385005, 1985
- 13) 阪神淡路大震災・地盤調査研究会：平成 9 年度報告書，1998
- 14) 社団法人日本電気協会：変電所等における電気設備の耐震設計指針 JEAG5003-1998，オーム社，1998
- 15) 資源エネルギー庁編：地震に強い電気設備のために，電力新報社，1996
- 16) 金井清，田治見宏，大沢胖，小林啓美：地震工学，彰国社，1968
- 17) Takeda, T., Sozen, M.A. and Nielsen, N.N., 1970, Reinforce concrete response to simulated earthquakes, Journal of the Structural Division, ASCE, 96, No.ST5
- 18) 日本建築学会：1978 年宮城県沖地震災害調査報告，1980

[2001年10月19日原稿受理 2002年2月18日採用決定]