釧路地方気象台の鉛直アレー地震観測記録に見られる 表層地盤の増幅特性

AMPLIFICATION CHARACTERISTICS OF SURFACE LAYERS OBTAINED FROM EARTHQUAKE OBSERVATION RECORDS OF VERTICAL INSTRUMENT ARRAYS AT KUSHIRO LOCAL METEOROLOGICAL OBSERVATORY

石田 寛*, 佐々木 透**, 丹羽正徳***, 北川良和****, 鹿嶋俊英*****
*Hiroshi ISHIDA, Toru SASAKI, Masanori NIWA, Yoshikazu KITAGAWA
and Toshihide KASHIMA*

An earthquake observation station with two vertical instrument arrays has been established to investigate the amplification characteristics of surface layers at the site of the Kushiro Local Meteorological Observatory, where a peak ground acceleration over 900cm/s^2 was observed in the 1993 Kushiro-Oki Earthquake. So far, many observed records from weak motions to strong motions have been accumulated, including the 1994 Hokkaido Toho-Oki Earthquake. The present paper reports the earthquake observation system and main observed records and examines the amplification characteristics of surface layers for weak and strong motions to clarify the topographical and non-linearity effects on earthquake motions, using observed records.

Keywords : earthquake observation, vertical instrument array, weak motion, strong motion, non-linearity, surface topography
地震観測、鉛直アレー、弱震、強震、非線形性、地盤不整形性

1. はじめに

1993年1月15日に発生した釧路沖地震(気象庁マグニチュード: $M_j=7.8$)は、釧路地方気象台(以下気象台と略記)の87型強震計で 900cm/s^2 を超える加速度を記録した。しかし、この地震による建造物の被害は比較的少なく、気象台の敷地内の建造物の被害も軽微であった。このことから、日本建築学会¹⁾やESG研究委員会²⁾を始めとして多くの研究が精力的になされている。特に、同じ敷地内にありながら、建設省建築研究所の強震計は約 700cm/s^2 余³⁾と87型強震計に比べて2割ほど小さい値であったことに関連し、気象台の高加速度記録に解釈を与える多くの研究が報告されている。また、これらに横断的な検討を加えている報告⁴⁾もある。

これらの既往研究では、気象台で得られた高加速度の主たる要因として、震源において高振動数成分が強く励

起されたこと、地震計設置基礎やその周辺の構造物などの振動特性の影響、および気象台敷地地盤の不整形性などが抽出されている。しかし、地震動記録の解釈を行う際に最も基本的な表層地盤の増幅特性に関する検討は、必ずしも十分になされているとはいえない。

筆者らは、地震動の局所的な違いを定量的に検討するためには、まず基本的データを得るための鉛直アレー観測が不可欠であると考え、気象庁の協力の下に気象台敷地内の2地点で鉛直アレーによる地震観測を1993年11月末より開始した。これら2地点の鉛直アレーはそれぞれ地表および地中の2観測点から構成されている。

以来、1994年の北海道東方沖地震($M_j=8.1$)の際の 400cm/s^2 余の記録を含む多くの記録が得られた。これらの結果については、機会ある度に断片的な報告を行ってきた⁵⁾。本論はこれらを総括し、地震観測記録に基づい

* 鹿島技術研究所 工修
** 鹿島技術研究所 理修
*** 鹿島技術研究所 工博
**** 広島大学工学部 教授・工博
***** 建設省建築研究所国際地震工学部

Kajima Technical Research Institute, M. Eng.
Kajima Technical Research Institute, M. Sc.
Kajima Technical Research Institute, Dr. Eng.
Prof., Faculty of Engineering, Hiroshima Univ., Dr. Eng.
International Institute of Seismology and Earthquake Engineering,
Building Research Institute, Ministry of Construction

て気象台構内の表層地盤における水平成分の増幅特性を検討したものである。まず、加速度レベルの比較的低い地震(弱震)時の増幅特性を、2観測地点の比較、地盤震動の異方性および一次元波動論の適合性の観点から整理した。さらに、北海道東方沖地震(強震)時における増幅特性を弱震時と同様に整理し、弱震時との比較および強震時における地盤剛性の低下の検討を行なった。

2. 地震観測の概要

2.1 観測地点の配置と地盤構造

釧路地方気象台は図1に示すように、標高約30mの洪積台地上の端部近くに位置している。気象台敷地内の2つの観測地点(ボーリング孔)および4つの地震計(観測点)の配置を図2に示す。地点1より地点2の方が台地端部に近く、2地点の距離は約40mである。それぞれの地点の地盤調査結果を図3に示す。両地点とも地表から17~18mほどせん断波速度500m/s以上の泥岩あるいは砂岩の層が現れる。これらは古第三系の浦幌層群と推定され、工学的基盤とみなすことができる。地中の地震計は、この層内に埋設した。その深さは地点1でGL-20m、地点2でGL-22mである。地表の地震計は、地点1では従来からある建築研究所の地震計を用い、地点2では盛土の下GL-2mに地震計を設置した。地震計の方位は両地点で気象台本庁舎の向き(N063E, N153E)に一致させた。

2.2 観測システム

地点1の地震計はSMAC-MD型強震計(アカシ)である。換振器は地中および地表とも変位帰還型加速度計を用いている。特性は0.02~30Hzの加速度に対して平坦で、DC~400Hzの広い振動数帯域で振子は振動に追従する。測定範囲は $\pm 2000\text{cm/s}^2$ である。地点2の地震計はSANTAC-16X型強震計(東京測振)で、換振器は変位帰還型加速度計である。特性

は0.1~35Hzの加速度に対して平坦であり、DC~100Hzの振動数帯域で振動に追従する。測定範囲は $\pm 1370\text{cm/s}^2$ である。

記録装置はどちらもICカードを媒体とする方式で、駆動部分がないため故障やモーターの回転に伴うノイズ発生の可能性が小さい。記録範囲はともに $\pm 1000\text{cm/s}^2$ であり、この範囲を16bitでA/D変換しているの、総合感度は等価とみなすことができる。各々の地点の地中3成分のいずれかが 1cm/s^2 を超えた時に起動するものとし、遅延時間を10secに、サンプリングは100Hzに設定している。観測システムの模式図を図4に示す。

2.3 観測記録

1993年11月末の観測開始から約1年間で得られた地震記録の主なものを表1に示す。この中には釧路で震度VIを記録した北海道東方沖地震や、震度Vを記録した国後

図1 気象台周辺の地形
(断面は高さを2倍に強調)

図2 気象台敷地と観測点の配置

図3 観測地点の地盤構造
(★は地震計設置位置を示す。)

図4 観測システムの模式図

表1 主な観測地震 (1994年)

No.	日付	震源域	北緯	東経	深さ (km)	規模 (M_j)	震度	最大加速度 (cm/s ²)						有効振動数 範囲(Hz)	注) X(km) Δ(km)
								上段: 地点1		下段: 地点2		UD			
								N063E 地表	N063E 地中	N153E 地表	N153E 地中	UD 地表	UD 地中		
1	01/26	十勝沖	41° 41'	143° 57'	68	5.6	II	3.7 2.3	1.3 1.6	3.3 4.5	1.2 1.2	1.9 1.8	0.9 0.8	0.5~12 0.5~12	162 148
2	02/18	日高支庁中部	42° 35'	142° 35'	107	5.1	III	11.5 13.0	1.8 2.5	11.5 7.6	2.1 2.3	7.5 7.3	2.0 1.4	0.5~12 0.5~12	187 154
3	03/05	釧路沖	42° 45'	144° 11'	101	4.0	II	11.1 11.1	1.9 1.9	12.6 5.5	1.9 1.9	7.4 5.0	1.5 1.4	0.5~12 0.5~12	105 30
4	04/12	国後島付近	44° 13'	146° 42'	134	5.9	III	8.2 6.3	1.5 1.7	6.6 3.7	1.8 1.4	2.9 3.9	0.9 0.9	0.5~12 0.5~12	266 232
5	04/29	十勝支庁北部	42° 59'	142° 52'	128	5.0	II	6.6 10.4	1.3 1.3	8.8 5.5	1.5 1.4	3.9 7.1	0.9 1.1	0.7~15 0.6~15	178 124
6	05/05	根室支庁中部	43° 15'	145° 15'	70	4.7	II	17.7 8.9	2.4 2.0	18.9 11.2	2.6 2.2	8.9 8.6	2.4 1.7	0.7~18 0.7~18	103 76
7	06/25	北海道東方沖	43° 39'	147° 14'	67	5.4	II	5.8 6.3	1.2 1.2	9.3 4.3	1.2 1.3	2.7 2.1	0.9 0.8	0.8~18 0.6~18	250 242
8	07/01	日高山脈南部	42° 15'	143° 05'	67	5.3	II	10.4 10.1	1.5 2.0	10.6 9.0	2.6 2.0	4.9 5.7	1.8 1.6	0.3~15 0.5~15	149 134
9	07/06	十勝沖	42° 45'	143° 58'	107	4.8	III	20.6 18.2	4.1 4.1	21.9 17.8	4.2 5.6	10.5 14.4	3.9 3.9	0.5~18 0.5~15	115 43
10	07/22	日本海北部	42° 17'	133° 33'	551	7.6	II	8.4 5.5	1.3 1.4	7.9 5.0	1.3 1.5	3.6 3.5	1.7 2.0	0.1~20 0.1~12	1014 892
11	08/25	釧路沖	42° 44'	145° 10'	65	5.3	IV	36.9 67.0	7.5 7.5	43.0 58.3	9.5 8.2	16.3 19.4	6.1 5.5	0.2~20 0.2~20	94 69
12	08/31	国後島付近	43° 29'	146° 04'	84	6.5	V	101.5 113.5	34.8 43.0	118.3 71.6	31.5 22.3	39.4 28.2	19.3 17.6	0.05~20 0.1~20	169 147
13	10/04	北海道東方沖	43° 22'	147° 40'	30	8.1	VI	314.1 402.6	100.2 119.0	392.2 258.3	94.8 95.4	189.2 178.6	74.4 77.6	0.05~20 0.05~20	271 270
14	10/09	北海道東方沖	43° 34'	147° 49'	0	7.3	IV	36.8 43.7	10.6 11.9	45.0 29.1	16.1 13.7	11.2 15.3	6.6 6.7	0.1~20 0.1~20	286 286
15	12/28	三陸はるか沖	40° 27'	143° 43'	0	7.5	III	18.9 18.4	5.5 6.0	20.9 20.0	5.0 6.0	9.4 8.4	4.0 3.1	0.05~20 0.05~20	286 286

注) Xは震源距離、 Δ は震央距離を示す。

島付近の地震なども含まれている。これら15地震の際に釧路で観測された震度はII~VIにわたり、地点1および地点2での最大振幅はそれぞれ北海道東方沖地震の 392cm/s^2 および 403cm/s^2 であった。

なお、表1中には有効振動数範囲も示した。ここでいう有効振動数範囲とは、観測記録において地震動の信号とみなしうる振動数範囲の意味であり、言い換えると観測システムのノイズが信号に比べて十分小さい振動数範囲である。有効振動数範囲は観測記録のフーリエスペクトルを用いて以下のように便宜的に求めた。まず、低振動数側では地表と地中のスペクトル比が1でなくなる振動数を限界とした。この振動数では地中か地表の地震計の少なくとも一方でノイズの影響が顕著になったと見な

すことができる。また、高振動数側ではスペクトル比が一定値のまわりに分布し始める振動数を限界とした。これは地中および地表ともに地震動がノイズに埋もれ、ほとんどノイズ同士のスペクトル比になっていることを意味すると考えられる。図5に概念図を示す。

また、地中の観測記録を用いる際には、地震計設置時の方位誤差を考慮する必要がある。そこで、表層地盤や地形の影響が十分小さいと考えられる周期20秒を超えた長周期領域で十分な振幅を有している北海道東方沖地震など3地震の記録を用い、佐藤・片山⁶⁾の方法により方位誤差を推定した。地点1の地表地震計を基準としたときの各地震計の設置方位の推定誤差(3地震の平均)を時計回りを正として表2に示す。以降の検討では、この結果に基づいて方位補正を行った記録を用いている。

図5 有効振動数範囲の簡易決定法

表2 地震計設置方位の誤差
(基準: 地点1 GL、時計回り)

	地点1 GL-20m	地点2 GL-2m	地点2 GL-22m
設置方位誤差 (Deg.)	3	9	12

3. 弱震時の増幅特性

1993年釧路沖地震では気象台構内での地表最大加速度の空間的変動が注目された。また、図1に示したように気象台は台地端部に近く、構内の地震動特性は地盤の不整形性の影響を受ける可能性も考えられる。そこで、ここでは2観測地点の計4観測点における弱震の記録(表1に示したNo.1からNo.11までの比較的加速度レベルの低い11地震の記録)に基づいて2地点の比較および異方性の観点から増幅特性を検討する。これらの記録は、図5の方法により少なくとも1Hzから12Hzまでは有効振動数範囲に含まれることが確認されている。

3.1 パワースペクトル

まず、各記録のパワースペクトルをパルツェンウイン

図6 弱震の平均パワースペクトル

図7 弱震の平均スペクトル比（地表／地中）

ドー（有効バンド幅：0.2Hz）を用いて求め、11地震の相乗平均により弱震の平均パワースペクトルを求めた。ただし、ここではパワースペクトルの算定において時間平均操作は省略した。各方位ごとに2地点の平均パワースペクトルを比較して図6に示す。

図6より、地表観測点（上段）では卓越振動数が地点および方位により異なっていることがわかる。N063E成分の卓越振動数は地点1で4Hz弱、地点2で5Hz弱であり、N153E成分の卓越振動数は地点1で5Hz弱、地点2で約4.5Hzである。また、6Hz付近より高振動数側では地点1の方が地点2より大きくなっている。地中観測点（下段）ではいずれの成分も卓越振動数は約2Hzであり、

7Hz～10Hz付近では地点および方位によりやや変化することが認められる。

3.2 スペクトル比

気象台構内での2地点での鉛直アレイを4つの観測点からなる一つの平面アレイ（図2）と捉え、スペクトル比は各地点での地表と地中（鉛直系列）および地点1と地点2の地表同士あるいは地中同士（水平系列）に分けて考えることができる。

(1) 鉛直系列

まず、各地震時の地表／地中スペクトル比（位相も含む）を次式により求めた⁷⁾。

$$H(f) = \sqrt{\frac{S_{yy}(f)}{S_{xx}(f)}} \exp[i \cdot \arg(S_{xy}(f))] \quad (1)$$

ここに、 $S_{xx}(f)$ および $S_{yy}(f)$ はそれぞれ地中および地表の記録のパワースペクトル、 $S_{xy}(f)$ は両者のクロススペクトル、 $\arg$ は偏角を示す。さらに、11地震のスペクトル比の相乗平均をとり、平均スペクトル比を求めた。各地点ごとに水平2成分の平均スペクトル比を比較して図7に示す（図6は地点の比較、図7は各成分の比較であることに注意）。同図には、地盤調査結果に基づいて次元波動論により求めた理論スペクトル比（減衰定数1%）も示した。

両地点において、平均スペクトル比と理論スペクトル比を比較すると、3Hz付近より低振動数側では振幅および位相とも両者はほぼ一致する。しかし、理論スペクトル比の1次ピーク付近では平均スペクトル比に複数のピークが現れ、両者の違いが顕著になっている。一方、理論スペクトル比の2次ピークに対しては、形状に隔たりはあるものの対応するピークが平均スペクトル比に見られる。なお、ここでは理論スペクトル比に基づいて、6Hz付近より低振動数側を1次ピーク領域、それより高振動数側を2次ピーク領域と呼ぶことにする。

(2) 水平系列

鉛直系列の場合と同様の手法により、地点2に対する地点1のスペクトル比を求めた。ただし、地点1と地点2では共通の時計を有していないため位相は評価していない。図8に地表と地中に分けて結果を示す。これより、地点間の違いは地表では理論スペクトル比の1次ピーク付近（約4Hz）で、地中では2次ピーク付近（約8Hz）で大きいことがわかる。

図8 弱震の平均スペクトル比（地点1／地点2）

3.3 コヒーレンス

各地震時におけるコヒーレンスを次式により求めた。

$$C(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{yy}(f) S_{xx}(f)} \quad (2)$$

さらに、上式による11地震のコヒーレンスを相乗平均して弱震時の平均コヒーレンスを求めた。結果を図9に示す。図9の上段は鉛直系列のコヒーレンスを、下段は水平系列のコヒーレンスを示す。これより、鉛直系列のコヒーレンスはすべて約1Hzから約3.5Hzで大きな値をとり、この範囲の外側では急に落ち込むことがわかる。水平系列でもコヒーレンスは鉛直系列とほぼ同様の形状を

図9 弱震の平均コヒーレンス

示すが、鉛直系列の場合と比較して高コヒーレンス領域はやや狭く、値も低下している。

3.4 一次元波動論の適合性

(1) スペクトル比のピークの生成要因

気象台構内における弱震時の増幅特性は、観測地点および方位により異なっていることが、パワースペクトル(図6)およびスペクトル比(図7、図8)により示された。そこで、弱震時の増幅特性に対する一次元波動論の適合性について検討する。

一次元波動論では、地表/地中スペクトル比のピークは地中スペクトルの谷に起因する。地点1および地点2の場合、地中観測点の深さでの上昇波に対する地中および地表の上昇波+下降波の理論スペクトル比は図10のようになる。一次元波動論に従う波動が支配的であれば、観測記録のスペクトルにおいても図10と同様に地中スペクトルに谷が出現することが期待できる。以下では、この観点から弱震時の増幅特性を検討する。

まず、地中スペクトル(図6)には両成分に理論スペクトル比のピーク振動数付近に谷の存在が認められる。地点1では4Hz強と8Hz～9Hz付近に、地点2では4Hz強と7Hz～8Hz付近に谷が見られる。これらの谷の振動数は、それぞれの地点の地盤調査結果に基づく理論スペクトル比のピーク(図7)とほぼ一致していることがわかる。また、N153E成分はN063Eより谷の存在が明瞭になっている。

そこで、地表/地中スペクトル比(図7)のピークに着目すると、地点1のN063E成分の最も低振動数側のピークはほぼ4Hzにあるが、そのピークは地中スペクトルの谷よりむしろ地表スペクトルの卓越成分により生成されているように見える(図6)。また、地点1のN153E成分は、スペクトル比が4Hzおよび5Hz付近に2つのピークを持っている。これも、約4Hzのピークは地中スペクトルの比較的明瞭な谷の振動数と概ね一致するが、約5Hzのピークは地表スペクトルに見られる卓越成分がピークとして出現したものであることがわかる(図6)。地点2についても地点1と同様に、地表/地中スペクトル比に対する地表卓越成分の影響が見られる。したがって、気象台構内の表層地盤の増幅特性は、3Hz～5Hz付近で一次元波動論によるピークと地表の卓越成分によるピークが複雑に重なり合い、一次元波動論のみでは説明できない状態になっていると考えられる。

地中と地表のコヒーレンス(図9)は3Hz付近から低下し始め、4Hz強で谷となっている。この理由としては、地中の波動と相関性の低い波動が地表で卓越したことが考えられる。しかし、一次元波動論が支配的な場合であっても、地中スペクトルの谷の部分では一次元波動論に従う波動は他の種類の波動に埋もれてしまうため、やはりコヒーレンスは極小となる。したがって、この場合は両方の影響があるものと考えられる。

図10 一次元波動論に基づく地中観測点での上昇波に対する上昇波+下降波のスペクトル比

(2) 地盤の不整形性の影響

地表スペクトルの卓越成分は、地盤の不整形性の効果により発生した可能性が考えられる。上林⁸⁾は、釧路地方気象台周辺の地盤の不整形性を考慮した解析を行い、崖線と直交する成分の地表/地中スペクトル比には一次元波動論によるピークの高振動数側に別のピークが現れること、そしてそのピーク振動数は崖からの距離とともに変動することを示した。ここでは上述したように、一次元波動論と対応するピークを明確に特定することは困難であるが、地表/地中スペクトル比のピークが一次元波動論の1次振動数付近に複数見られ、かつ地点1と地点2でピーク振動数が複雑に変化していることは上林の結果と対応している。水平系列のコヒーレンス(図9)を見ると、3Hz～4Hz付近で谷となっているが、これは両地点の崖からの距離に応じてこの振動数範囲の波群の構成が異なっているためと考えられると理解できる。

以上より、地点1と地点2の増幅特性の違いを生じた原因として、低振動数側(1次ピーク領域)では地盤の不整形性の効果により地表で新たな卓越成分が発生し、かつ地点によりその振動数が変化すること、また高振動数側(2次ピーク領域)では一次元波動論である程度は説明可能であり、局所的な地盤構造の違いが現れたことを指摘できる。しかし、各地点および各成分の増幅特性を定量的に検討することは今後の課題である。

4. 北海道東方沖地震時の増幅特性

北海道東方沖地震の観測記録に基づいて気象台構内の強震時の増幅特性を検討する。この記録の有効振動数範囲は0.05Hzから20Hz(表1)となっている。

4.1 パワースペクトル

北海道東方沖地震のパワースペクトルを、弱震時と同様のパルツェンウィンドーを用いて求めた。結果を図11に示す。地表観測点での卓越振動数は各成分とも3Hz～4Hz付近であり、弱震時より1Hz程度低下している。弱震時にはN063E成分で地点により1Hz程度の違いがあった(図6)が、この場合にはその違いがほとんど解消されている。N153E成分では、両地点の振幅および振動数

図11 北海道東方沖地震のパワースペクトル

図12 北海道東方沖地震のスペクトル比（地表／地中）

の相対関係は弱震時とあまり変化していないように見える。地中のパワースペクトルの卓越振動数は弱震時と同様2Hz付近にあるが、ピークの形は低振動数側に広がっている。これは震源特性による違いであると考えられる。また、重複反射に起因すると考えられる谷が弱震時よりやや低振動数側に比較的明瞭に見える。2次ピーク領域では地点2が地点1より小さめであり、弱震時の傾向と一致している。

4.2 スペクトル比

(1) 鉛直系列

地点1および地点2における北海道東方沖地震の鉛直

系列のスペクトル比（地表／地中）を、地盤調査結果に基づく理論スペクトル比と比較して図12に示す。これより、観測記録のピークは弱震時（図7）より低振動数側に移動し、そのため理論スペクトル比は1次ピークの低振動数側でも観測と整合しないことがわかる。地点2の1次ピーク領域では弱震時のスペクトル比が全体的に低振動数側に移動したように見えるが、地点1ではより複雑に変化している。また、地点2の2次ピーク領域では振幅が弱震時より顕著に低下しているのが注目される。位相に関しても、振幅レベルが増大したため弱震時より安定した変動を示し、全体的に低振動数側に移動していることが認められる。

以上より、両地点において地盤が非線形化して剛性が低下したことが推察される。特に、地点2では地点1と比べて、高振動数成分の増幅に大きく寄与する最表層が強く非線形化した可能性が高い。

(2) 水平系列

水平系列のスペクトル比を図13に示す。弱震時とは複雑に異なっているが、2次ピーク領域では弱震時にも見られた地表の地点間の違い（地点1＞地点2）が増大していること、および地中のスペクトル比が全体的に低振動数側に移動していることを指摘できる。

4.3 コヒーレンス

鉛直系列および水平系列のコヒーレンスを図14に示す。弱震時には鉛直系列および水平系列において、約1Hzより低振動数側でコヒーレンスが低下していたが、北海道東方沖地震の際には非常に低振動数まで高コヒーレンス領域が広がっていることがわかる。これは北海道東方沖地震において、この範囲の振動数成分の振幅レベルが十分高かったためであると考えられる。また、高コヒーレンス領域の高振動数側の限界も弱震時に比べてやや低振動数側に移動している。

4.4 強震時の剛性低下

(1) 各地震時の地盤剛性の変化

北海道東方沖地震の各スペクトルやスペクトル比の形状は弱震時と比較して全体的に低振動数側に移動していることが確かめられた。これは、強震時における地盤の非線形応答に起因すると考えられる。そこで、地震動の加速度レベルと地盤の剛性低下の関係について検討した。対象とした地震は、弱震と北海道東方沖地震のほか、それらの中間の加速度レベル（地表で110cm/s²余）を記録

図13 北海道東方沖地震のスペクトル比
(地点1 / 地点2)

した国後島付近の地震（表1のNo.12）である。剛性低下の評価は一次元波動論に基づく最適化により行うこととした。最適化の対象振動数範囲は、1次ピークより低振動数側の3Hz以下とした。その理由は、弱震時の増幅特性やコヒーレンスの検討結果からこの振動数範囲では一次元波動論が比較的良く適合すると考えられること、およびこの範囲のみでも弱震時と北海道東方沖地震のスペクトル比の違いが明瞭に認められる（図7、図12）ことなどである。しかし、このように非常に限られた振動数範囲で実施する最適化では、地盤モデルの詳しい同定は困難であり、基本的な構造は地盤調査結果に基づくこととし、剛性の変化のみを抽出することとした。最適化に

図14 北海道東方沖地震のコヒーレンス

は準ニュートン法を用い、地盤調査結果から得られる地盤のせん断剛性に対する一次元地盤モデルの剛性の比を対象パラメータとした。この際、減衰定数は全層一律1%と仮定した。最適化は1次ピークより低振動数側のみを対象にしているため、減衰を固定したことによる影響は無視できる程度と考えられる。

最適化は剛性低下をする地盤の部分について2通りのケースを想定した。剛性が全層一律に変化すると仮定した場合をケースA、最表層のみ(図3の $V_s=140\text{m/s}$ までの部分)が一律に変化すると仮定した場合をケースBとした。得られた剛性比と地表観測点の最大加速度の関係を図15に示す。これより、北海道東方沖地震では、剛性の比がケースAおよびケースBでそれぞれ0.7および0.5程度と評価された。また、最大加速度が 70cm/s^2 以下の弱震では剛性比の最適値が1に近づいている。このことは、このような最適化手法の妥当性を支持するものと考えられる。

ここで、北海道東方沖地震について最適地盤モデル(ケースB)および観測記録により得られた地表/地中スペクトル比を比較した例を図16に示す。最適化では減衰を対象としていないことを考慮すると、得られた最適地盤モデルは解析の対象にした振動数範囲だけでなく、全体的にも概ね適合していることがわかる。

(2) 剛性の時系列の検討

北海道東方沖地震の地点2の記録を用い、地震動が継続している間における地盤剛性の変化について検討した。起動時から100秒間の記録を用い、20秒ごとに分割した5区間でそれぞれスペクトル比を求め、ケースBの最適化により剛性変化の時系列を求めた。地表の加速度波形の例とともに図17に示す。これを見ると、地震動が継続している間においても、最表層の剛性が振幅レベルに応じて変化していることがわかる。

しかし、詳しく図17を見ると、主要動前後の振幅レベルの比較的小さい区間でもかなりの剛性低下が見られる。これは、振幅レベルが比較的小さいことなどのために最適化が不安定となり、剛性比の過小評価につながった可能性がある。しかし、主要動部分では振幅レベルが大きく、剛性低下も顕著であるため、地盤剛性は概略的には図17のような時系列をたどったものと考えられる。

4.5 強震後の地盤増幅特性

北海道東方沖地震のほぼ3か月後に、三陸はるか沖地震(表1のNo.15)が発生した。このときの観測値は地表で 20cm/s^2 程度であり、弱震の検討で用いた地震と同程度のレベルである。そこで、強震を経験したために地盤の増幅特性が変化したか否かを検討した。三陸はるか沖地震の際の地点1の地表/地中スペクトル比を図18に示す。これを図7と比較すると、振幅比および位相差ともに概ね傾向が一致し、地盤の増幅特性は強震以前の状態とあまり変わっていないことがわかる。

図15 加速度レベルと等価剛性の比の関係

図16 北海道東方沖地震と最適地盤モデルの地表/地中スペクトル比(地点2・N063E)

図17 北海道東方沖地震における時刻歴と等価剛性比の時系列(地点2)

図18 北海道東方沖地震後の弱震の
地表／地中スペクトル比（地点1）

5. まとめ

釧路地方気象台では1993年釧路沖地震で 900cm/s^2 を超える加速度を記録した。そこで、表層地盤の増幅特性を検討するため、気象台構内の2地点で鉛直アレイによる地震観測を1993年11月末に開始した。これまでに、1994年北海道東方沖地震をはじめ弱震から強震に至るまでの多くの観測記録が蓄積されている。これらの記録に基づいて、弱震時の増幅特性を検討した結果、以下のことがわかった。

- (1) 気象台構内においても、地点および方位により地表卓越成分および表層地盤の増幅特性が複雑に変動する。
- (2) 一次元波動論によるスペクトル比の1次ピーク付近には、地盤の不整形性に起因すると考えられる地表の卓越成分によるピークが重なっているため、一次元波動論のみで観測記録を説明することは困難である。
- (3) 一次元波動論によるスペクトル比の2次ピーク付近では、一次元波動論と観測記録にある程度の整合性が見られる。

次に、北海道東方沖地震などの記録を用いて強震時の増幅特性やその後の弱震時の増幅特性を検討した。その結果、以下のことがわかった。

- (4) 各種のスペクトルおよびスペクトル比の形状は、地盤の非線形応答により弱震時と比較して全体的に低振動数側に移動している。
- (5) 地盤の剛性は各地震の振幅レベルに応じて低下している。また、北海道東方沖地震では、地震動が継続している間においても振幅レベルに応じて剛性が変化したと考えられる。
- (6) 北海道東方沖地震の前と後の弱震時の増幅特性には大きな変化は見られない。

なお、本研究は観測記録の分析に主眼をおいたものであるが、地盤の非線形応答や地盤不整形の影響に関する詳細な検討は機会をあらためて報告する予定である。

謝辞

本研究を行うに当たり気象庁釧路地方気象台には多大なご協力をいただいた。記して感謝する。

参考文献

- 1) 1993年釧路沖地震の総合研究学術研究会：1993年釧路沖地震に関する総合シンポジウム、日本建築学会、1994
- 2) 例えば、研究代表者 瀬尾和夫：地震時の地盤震動特性評価のための微動の活用に関する研究、平成5年度科研費研究成果報告書、1994
- 3) 鹿嶋俊英、北川良和：平成5年(1993年)釧路沖地震強震速報、建設省建築研究所、1993
- 4) 太田外氣晴：釧路気象台における強震動と地盤・構造物の振動特性、日本建築学会構造系論文集、No.474、pp.77-86、1995
- 5) 例えば、佐々木透、丹羽正徳、北川良和、鹿嶋俊英：釧路地方気象台敷地内におけるアレイ地震観測記録の検討(その1) 観測システムの概要、日本建築学会学術講演梗概集、pp251-252、1995
- 6) 佐藤暢彦、片山恒雄：地中地震計の埋設方位の推定、第17回地震工学研究発表会講演概要、pp.115-118、1983
- 7) 石田寛：地震観測記録を用いた伝達関数の評価手法に関する検討、日本建築学会関東支部研究報告集、pp.13-16、1992
- 8) 上林宏敏：釧路JMA周辺域の地形・地盤構造の不整形性が地震動に及ぼす影響、日本建築学会学術講演梗概集、pp247-248、1995

(1996年2月10日原稿受理、1996年8月22日採用決定)