

KiK-net益城における2016年熊本地震の記録に基づく表層地盤の非線形増幅特性

栗田 哲史¹

¹正会員 東電設計株式会社 (〒135-0062 東京都江東区東雲1-7-12 KDX豊洲グランスクエア9F)

E-mail: kurita@tepsco.co.jp

2016年熊本地震では、活断層沿いの幾つかの市街地が非常に激しい揺れに見舞われた。そのような激震地の1つである益城町では、KiK-net益城 (KMMH16) 地点の鉛直アレイ地震観測システムによって、前震および本震など複数の強震記録が得られている。前震の発生以前に得られている弱震動記録との対比により、前震および本震の際に表層地盤で非線形性を生じていることが明らかとなった。即ち、非線形増幅特性の特徴であるフーリエスペクトル比の卓越周波数の低周期化および高周波成分の減少などが観察された。本研究では、これらの観測記録を用いて地盤物性値を逆解析手法によって推定することにより、表層地盤の非線形増幅特性について分析した。検討の結果、地盤のせん断ひずみとせん断剛性の非線形特性を定量的に評価することができた。

Key Words : 2016 Kumamoto earthquake, vertical array observation system, strong ground motion, nonlinearity amplification, subsurface ground

1. はじめに

2016年4月14日の21時26分に発生したMj6.5の前震から始まった2016年熊本地震は、4月16日01時25分にMj7.3の本震が発生し、引き続き数多くの余震を伴って益城町を中心とした断層沿いの地域に多大な被害をもたらした。内陸地殻内の浅い地震が都市近傍で発生した場合に、非常に強い地震動が構造物に作用することを改めて認識させられることとなった。

益城町では、震度7を計測した自治体の震度計が町役場に設置されているが、その他に防災科学技術研究所の基盤強震観測網 (KiK-net) の観測施設が設置されており、前震および本震の強震記録が得られている。KiK-netの観測点では地表地震計のほか、観測井に地中地震計が設置されており、鉛直アレイの地震観測システムが構成されている。益城町内のKiK-net益城 (KMMH16) で得られた前震および本震の強震動記録から算定される震度階は共に震度6強であり、表層地盤物性の非線形性の影響が明瞭に表れている。

設計用入力地震動などの強震動予測において、表層地盤の非線形増幅特性は重要な要因であり、古くから研究がなされてきている。これらについての詳細は、例えば、翠川¹⁾による総説にまとめられている。

鉛直アレイの観測記録が得られている場合には、最適

化手法に基づく逆解析によって表層地盤の物性値を推定することができる。弱震動記録から推定される物性値と強震動記録から得られる物性値を比較することにより、表層地盤の非線形増幅特性を求めることができる。このような試みはこれまでも実施されてきている。例えば、安中他²⁾は東京湾岸の埋立地に設置された鉛直アレイ観測記録を用いて、地盤物性のひずみ依存性をベイズ推定のインバージョン手法によって求めている。この中で、強震記録として使用した地震は1987年千葉県東方沖地震 (Mj6.7) である。また、栗田・吉田³⁾は1995年兵庫県南部地震 (Mj7.3) の際に得られたポートアイランドの鉛直アレイ観測記録から、表層地盤の非線形な動特性を修正Marquardt法で同定している。更に、栗田他⁴⁾は2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) における鉛直アレイ観測記録を用いて、Hardin-Dmievichモデル (HDモデル) に適合させた地盤の動的変形特性を推定している。提案手法により得られた推定結果は室内試験結果と良く一致することが確認されている。

本研究では、栗田他⁴⁾で提案している手法を用いてKiK-net益城における2016年熊本地震の際の強震動による表層地盤の非線形増幅特性について検討し、当該地点における表層地盤の増幅特性の特徴を明らかにすることを目的とする。なお、増幅特性の検討は一次元の等価線形条件下で行っている。



図-1 Kik-net 益城(KMMH16)地点(国土地理院電子国土 Web)

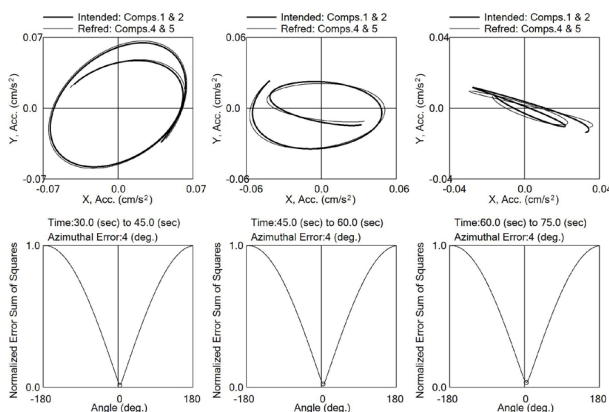


図-3 地中埋設地震計 (GL-252m) の回転誤差推定

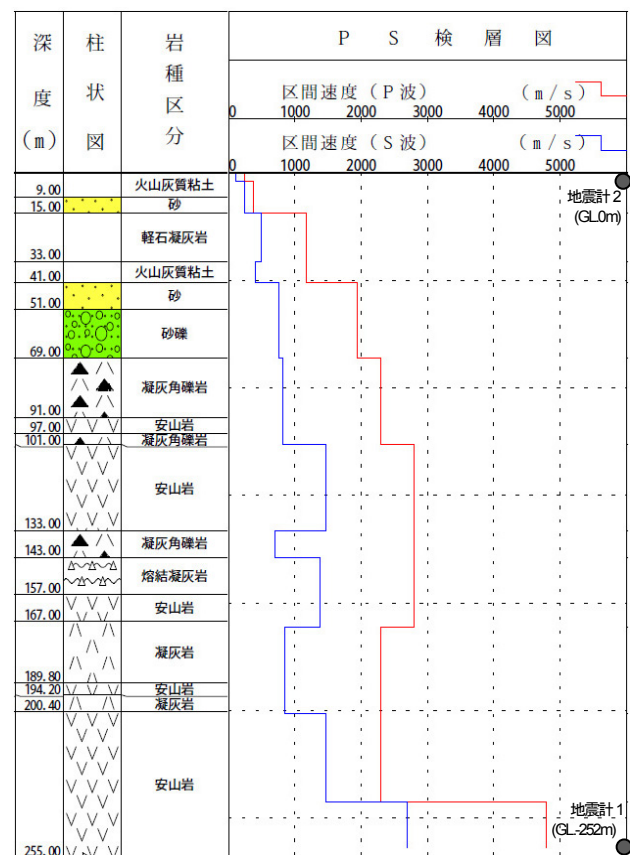
2. 観測データ

(1) 地震観測システム

本検討で使用したKik-net 益城 (KMMH16) は図-1に示す通り、益城町市街地の北部に位置している。地震計は地表と地中 (GL-252m) の2ヶ所に設置されており、鉛直アレイが組まれている。

図-2に示す地震計設置位置のボーリング調査結果によれば、地表付近は火山灰質粘土に覆われており、地中埋設地震計が設置されている最深部は安山岩となっている。その間は、凝灰角礫岩や凝灰岩と安山岩が互層を成している。

地中埋設地震計については設置時の施工状況により、方位誤差が生じている場合がある。そこで、図-3に示すように長周期成分の粒子軌跡を描いて地表地震計に対する地中地震計の水平面内回転誤差推定を行った。観測記録による差異が多少存在するものの、回転誤差は $2^{\circ} \sim 4^{\circ}$ 程度と推定され十分小さいことから、地中地震計に対する回転誤差補正は特に行わないこととした。



注) 防災科学技術研究所公開のボーリング柱状図を加工

図-2 Kik-net 益城 (KMMH16) 地点の地盤調査結果

(2) 弱震動記録

2016年熊本地震の前震および本震の強震記録との比較のために収集した弱震動記録の一覧を表-1に示す。収集した地震は全て2016年熊本地震以前に発生したもので、SN比の状態が良好なものを選定するために地表記録の計測震度が2.0以上のものとした。いずれの地震記録も地表最大加速度 100cm/s^2 以下であり、表層地盤の非線形性は生じていない。この中で、No.2, No.4, No.16の3地震については、マグニチュード4.0未満であり地震波の長周期成分が少ないことから、以降の検討で使用するフーリエスペクトル比を求めた際に、長周期側の信頼性が保てなくなる理由より、検討対象から除外することとした。従って、計16地震の弱震動記録を使用した。

地中地震計 (GL-252m) の記録に対する地表地震計 (GL.0m) の記録のフーリエスペクトル比を図-4に示す。ここでは、観測記録からP波部分を除去したS波群のデータを用いている。また、フーリエスペクトルには0.2HzのParzen windowによる平滑化処理を施している。

図-4より、NS方向とEW方向とで卓越周波数が明確に異なっていることが分かる。また、両者のスペクトル比の形状も異なることから、当該地点の地盤構造が理想的な水平成層でないことが想像される。

図-5には、観測記録の幾何平均値と平均±標準偏差を示す。図中には、図-2のPS検層結果から1次元波動伝播理論で算定される理論伝達関数も示している。なお、防災科学技術研究所から公開されている地盤調査結果には密度情報が含まれていないため、周辺のK-NET観測地点の地盤情報から推定した密度を使用している。

図-5より、NS成分についてはPS検層結果から算定される理論伝達関数と観測記録のフーリエスペクトル比は全く一致しない。EW成分については、1次のピークが対応しているものの、高次のピークは一致していない。以上より、このPS検層結果では当該地点の表層地盤の増幅特性を説明することができない。

(3) 強震動記録

強震動記録として使用した2016年熊本地震の前震と本震の一覧を表-2に示す。前震は上下成分で、本震はEW成分で最大加速度が 1000cm/s^2 を超えている。両記録共に計測震度は6.4となる。

弱震動記録と前震記録のフーリエスペクトル比の比較を図-6に示す。本震についての同様の図を図-7に示す。両図より、前震および本震の強震動ではフーリエスペクトル比のピークが低周波数側にシフトしており、且つ高周波数成分が低減されていることから、表層地盤の物性に非線形性が表れていることが分かる。

表-1 KiK-net益城(KMMH16)の弱震動記録一覧

番 号	発震時刻						震源位置					Mj	震央地名	最大加速度(cm/s ²)					
							緯度		経度		深さ			地中(GL-252m)			地表(GL0m)		
	年	月	日	時	分	秒	度	分	度	分	(km)	NS1	EW1	UD1	NS2	EW2	UD2		
001	2002	05	20	22	19	42.70	32	38.72	130	48.73	14.10	4.1	熊本県南部	2.2	2.0	3.1	10.4	14.9	22.2
002	2002	09	02	05	48	07.75	32	43.69	130	48.27	11.67	3.7	熊本県北西部	8.3	3.8	2.8	33.5	23.4	17.2
003	2002	11	04	13	36	00.02	32	24.76	131	52.17	35.19	5.9	日向灘	4.0	2.2	2.3	19.6	19.7	8.5
004	2003	03	07	15	31	09.66	32	43.12	130	52.47	14.36	3.5	熊本県南部	5.5	1.7	2.0	16.0	9.3	12.2
005	2004	11	04	03	13	21.19	33	04.65	130	32.63	14.19	4.2	有明海北部	5.2	3.5	2.5	27.0	17.7	15.6
006	2005	03	20	10	53	40.32	33	44.35	130	10.58	9.24	7.0	九州地方北西沖	9.9	6.2	4.2	29.9	31.6	20.5
007	2005	04	20	06	11	26.83	33	40.69	130	17.29	13.50	5.8	福岡県中部	2.3	2.5	1.6	18.0	14.5	6.1
008	2005	05	31	11	04	14.73	31	18.37	131	32.71	28.63	5.8	大隅半島南東沖	1.4	1.6	1.0	5.4	5.4	1.8
009	2005	06	03	04	16	41.84	32	29.73	130	32.87	10.89	4.8	天草地方	3.4	3.1	1.2	14.7	18.8	9.5
010	2006	03	27	11	50	26.37	32	36.10	132	09.42	34.76	5.5	日向灘	1.7	1.8	1.2	12.7	8.6	2.8
011	2006	06	12	05	01	24.98	33	08.12	131	26.13	145.17	6.2	大分県北部	1.1	2.0	2.8	14.1	16.5	20.3
012	2009	08	03	20	18	14.96	32	19.00	130	31.89	6.94	4.7	熊本県南部	2.5	1.6	0.9	16.5	9.3	5.3
013	2011	04	25	02	48	22.09	33	01.66	130	43.74	12.32	4.1	熊本県北西部	1.2	1.9	0.8	11.6	9.7	5.5
014	2011	06	28	21	18	26.23	33	01.49	130	44.14	11.28	4.2	熊本県北西部	2.0	2.5	3.2	12.4	14.0	22.9
015	2011	10	05	23	33	27.59	32	54.84	130	51.02	9.69	4.5	熊本県北西部	7.4	5.1	7.3	65.7	28.1	56.7
016	2012	03	12	07	58	08.95	32	55.20	130	51.30	8.45	3.9	熊本県北西部	3.2	2.5	5.4	21.7	11.9	39.8
017	2014	03	14	02	06	50.86	33	41.50	131	53.48	78.04	6.2	伊予灘	1.7	1.8	1.6	8.7	7.6	8.0
018	2014	08	29	04	14	35.51	32	08.47	132	08.73	18.18	6.0	日向灘	1.7	1.8	0.9	7.5	8.3	3.4
019	2015	07	13	02	52	05.94	32	59.56	131	51.31	58.04	5.7	大分県南部	6.2	4.2	1.7	24.7	17.1	7.2

注) 震源情報は気象庁地震月報 (カタログ編) による

表-2 KiK-net益城(KMMH16)の強震動記録一覧

番 号	発震時刻						震源位置					Mj	震央地名	最大加速度(cm/s ²)					
							緯度		経度		深さ			地中(GL-252m)			地表(GL0m)		
	年	月	日	時	分	秒	度	分	度	分	(km)	NS1	EW1	UD1	NS2	EW2	UD2		
001	2016	04	14	21	26	34.43	32	44.52	130	48.54	11.4	6.5	熊本県北西部	236.7	178.5	127.0	759.8	925.0	1399.4
002	2016	04	16	01	25	05.47	32	45.30	130	45.78	12.4	7.3	熊本県北西部	158.6	242.8	195.5	653.0	1156.9	873.4

注) 震源情報は気象庁一元化処理震源要素 (2016 June 29) による

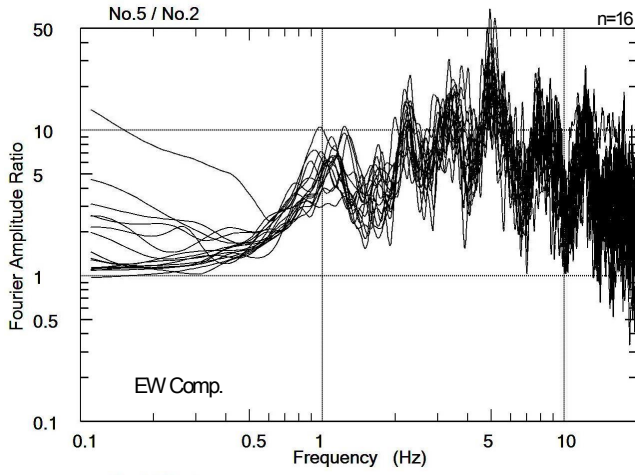


図-4 弱震動記録のフーリエスペクトル比
(GL.0m/GL.-252m)

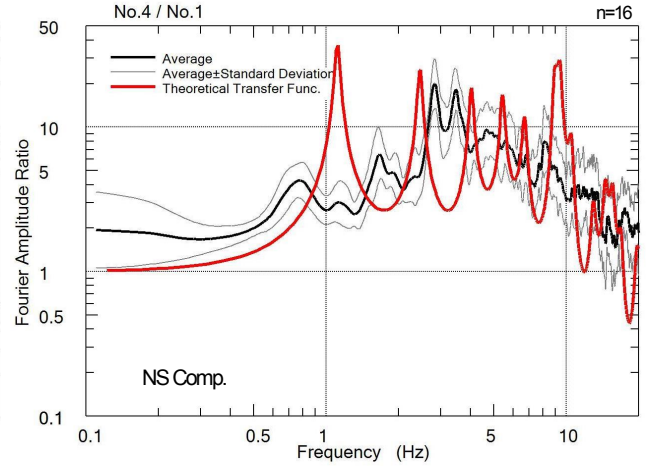
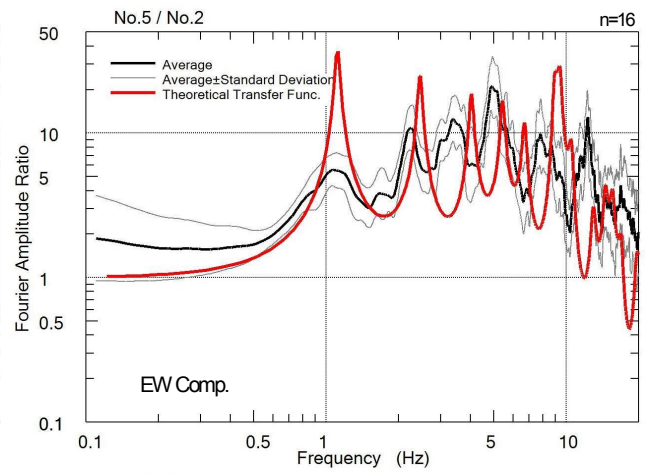


図-5 弱震動記録の平均フーリエスペクトル比と
PS検層結果による理論伝達関数の比較
(GL.0m/GL.-252m)

3. 表層地盤モデルの逆解析

(1) 表層地盤モデルの逆解析手法

先述の通り、PS検層結果でKiK-net益城地点の表層地盤増幅特性を説明できないため、鉛直アレイの地震観測記録から同地点の観測記録を説明できる最適な地盤モデルの逆解析を試みた。

表層地盤の物性値を推定する最適化手法には遺伝的アルゴリズム (GA : Genetic Algorithm) ⁹⁾を用いた。また、鉛直アレイ観測記録から最適な地盤モデルを同定する方法は栗田他⁷⁾で使用している方法を踏襲した。GAの基本的な解析条件も同じにしている。

GAに使用する適応度関数は次式の通り設定した。

$$J = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_f} w_i(\omega_j) \left\{ \ln |R_i(\omega_j)| - \ln |H_i(\omega_j)| \right\}^2} \quad (i \in A) \quad (1)$$

ここで、 $R_i(\omega_j)$: 観測記録のS波群部分のフーリエ

スペクトル比、 $H_i(\omega_j)$: SH波の理論伝達関数、 $w_i(\omega_j)$: 重み係数、 N_f : 周波数領域における伝達関数のデータ数、 A : スペクトル比および伝達関数の組合せの集合、をそれぞれ表している。

本研究では地盤の減衰が次式のようにひずみ依存の項と周波数依存の項との足し合わせで表現できるものと考える。

$$h = h_0(\gamma) + h_1(f) \quad (2a)$$

$$h_1(f) = \alpha \cdot f^\beta \quad (2b)$$

ここで、 h : 全減衰定数、 $h_0(\gamma)$: ひずみ依存減衰、 $h_1(f)$: 周波数依存減衰、 γ : せん断ひずみ、 f : 周波数、 α : 周波数依存減衰の係数、 β : 周波数依存減衰のべき乗項、である。

逆解析では、各層のS波速度 (V_s) と減衰定数を未知量とし、密度と層厚を既知量とした。

(2) 弱震動用の地盤モデル

図-5に示した弱震動記録の幾何平均スペクトル比をターゲットとして、弱震動用の最適地盤モデルを同定した。

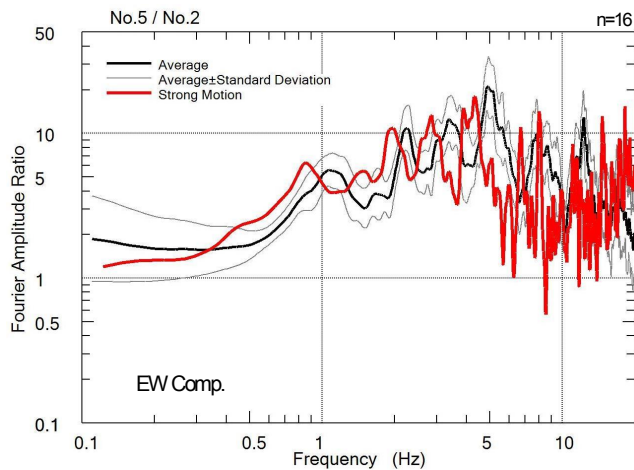


図-6 前震記録と弱震動記録のフーリエスペクトル比の比較
(GL.0m/GL.-252m)

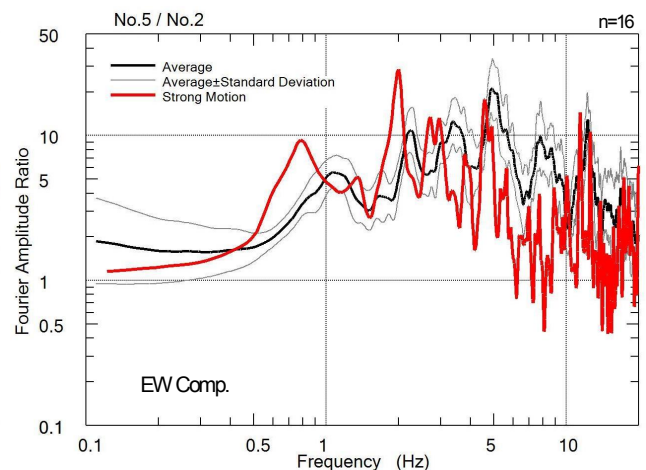


図-7 本震記録と弱震動記録のフーリエスペクトル比の比較
(GL.0m/GL.-252m)

弱震動記録の平均フーリエスペクトル比 (GL.0m/GL.-252m) と弱震動用最適地盤モデルから算定される理論伝達関数との比較を図-8に示す。得られた弱震動用最適地盤モデルの理論伝達関数は、観測記録のフーリエスペクトル比の10Hz以内に存在する高次のピークまで一致している。

弱震動用最適地盤モデルのVs分布図を図-9に示す。図中にはPS検層結果も併せて示している。EW成分についてはPS検層結果を微調整する程度で観測記録のフーリエスペクトル比を説明できる最適地盤モデルが得られるが、NS成分についてはPS検層結果を大幅に変更する必要がある。

逆解析で得られた弱震動用最適地盤モデルの減衰定数を表-3に示す。なお、減衰定数は全層一様な値として設定している。EW成分には若干の周波数依存性が見られるが、NS成分では見られない。

以上の結果より、KiK-net益城の地震観測記録は、弱震動による線形の増幅特性でも成分間に差異が認められ、理想的な水平成層地盤の一次元増幅特性では説明できな

いことが分かった。従って、本検討で得られた弱震動用最適地盤モデルは、当該地点の真の地盤モデルを表しているものではなく、一次元波動理論を適用した場合の等価な一次元モデルということができる。以降の強震動に対する検討においては、このような前提で議論を進めることとする。

(3) 強震動用の地盤モデル

2016年熊本地震で得られた強震記録のうち、前震と本震を対象として、強震動用最適地盤モデルを求めた。逆解析によって得られた前震用最適地盤モデルから算定される理論伝達関数と前震の観測記録のフーリエスペクトル比との比較を図-10に示す。本震に対する同様の結果を図-11に示す。

強震動用最適地盤モデルのVs分布図を図-12に示す。図より、前震のNS成分を除いて101m以浅の層で剛性低下が起こっていることが分かる。一方、前震のNS成分では、101m～133mまでの層の剛性を低下させないと観測記録を再現できない。

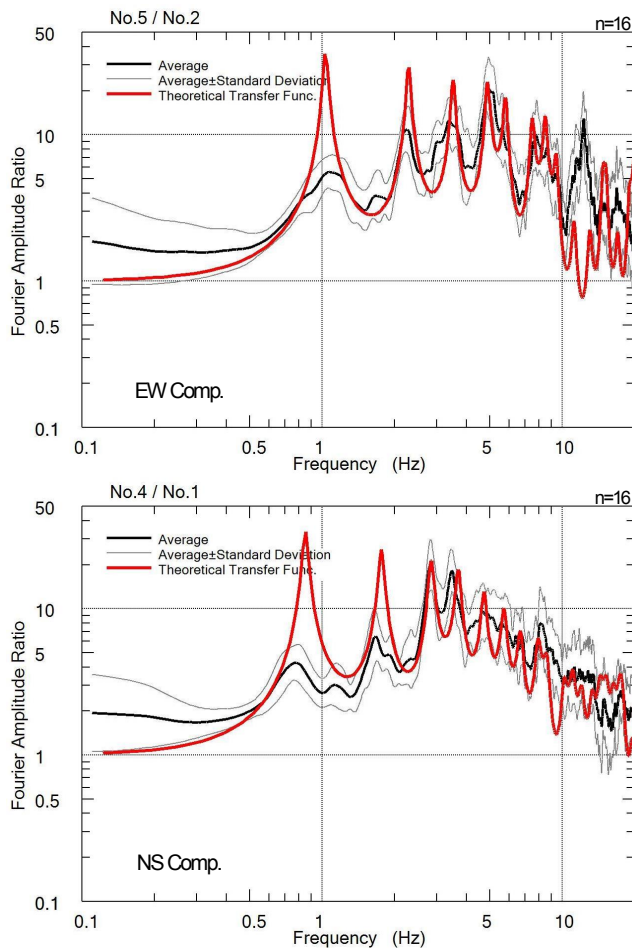


図-8 弱震動記録の平均フーリエスペクトル比と弱震動用最適地盤モデルの理論伝達関数の比較 (GL.0m/GL.-252m)

表-3 弱震動用最適地盤モデルの減衰定数

方 向	減衰定数
NS	$h=0.026 f^{0.00}$
EW	$h=0.023 f^{-0.08}$

4. 地盤の動的変形特性の推定

(1) HDモデルを拘束条件とした動的変形特性の推定

HDモデルの応力-ひずみ関係は次式の通り表される.

$$\tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + \gamma/\gamma_r} \quad (3)$$

ここで, τ : せん断応力, γ : せん断ひずみ, G_0 : 初期せん断剛性, γ_r : 規準ひずみ, である.

せん断剛性の変形特性は以下の通りとなる.

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_r} \quad (4)$$

ここで, G : 割線せん断剛性, である.

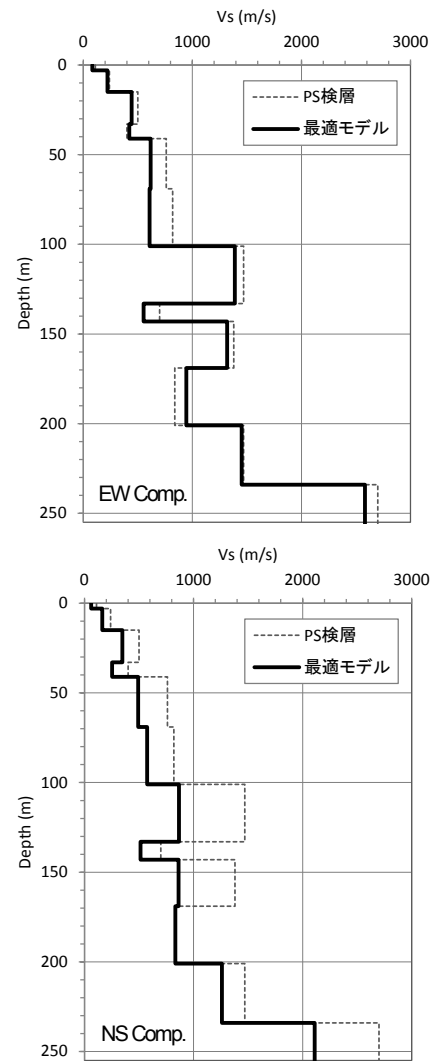


図-9 弱震動用最適地盤モデルのVs分布図

同様に, 減衰の変形特性は式(5)で表される.

$$\frac{h_0(\gamma)}{h_{\max}} = 1 - \frac{G}{G_0} \quad (5)$$

ここで, $h_{\max}$: 最大減衰定数, である.

式(3)~(5)に示したHDモデルを拘束条件として, 鉛直アレイ地震観測地点の動的変形特性を推定した. 推定手法の詳細については, 参考文献(4)および(5)を参照されたい.

(2) 強震記録を用いた動的変形特性の推定結果

前震および本震の鉛直アレイ観測記録から推定した動的変形特性を図-13に示す. 図中の点は逆解析の結果を, 実線は適合させたHDモデルを表している. なお, ここでは図-12でVsの低下を生じている全ての層に共通した動的変形特性としている.

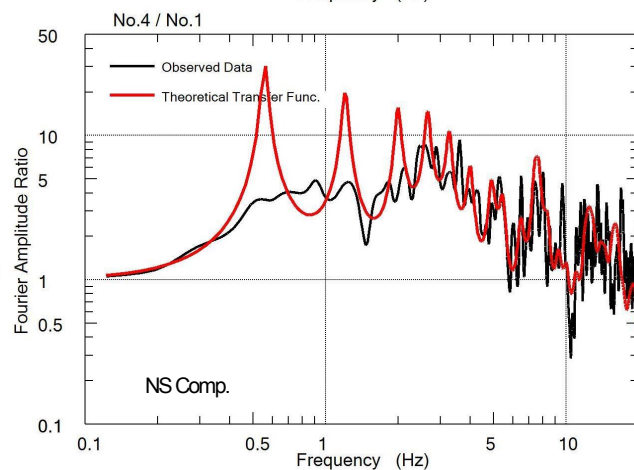
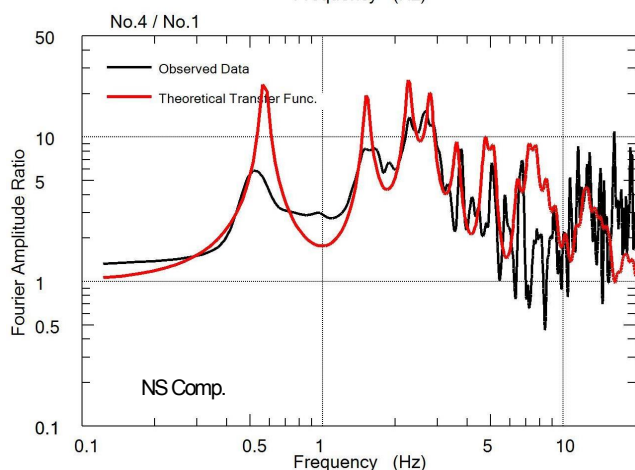
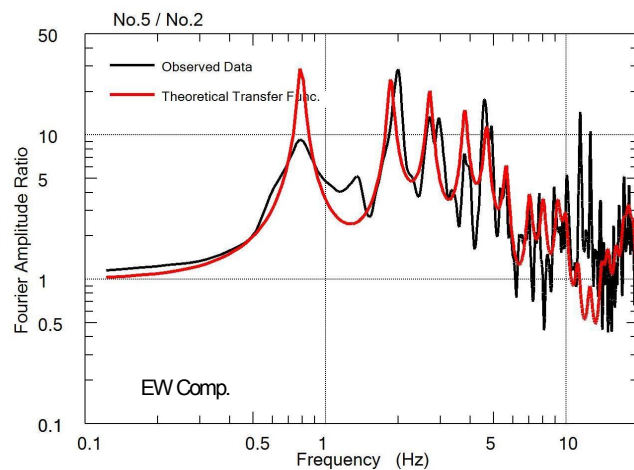
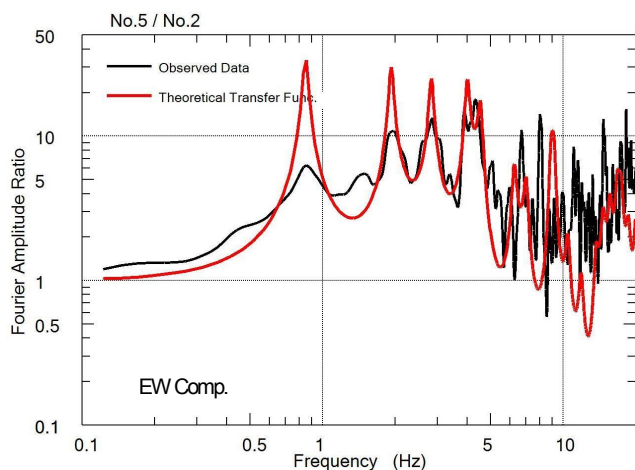


図-10 前震記録のフーリエスペクトル比と前震用最適地盤モデルの理論伝達関数の比較 (GL0m/GL-252m)

図-11 本震記録のフーリエスペクトル比と本震用最適地盤モデルの理論伝達関数の比較 (GL0m/GL-252m)

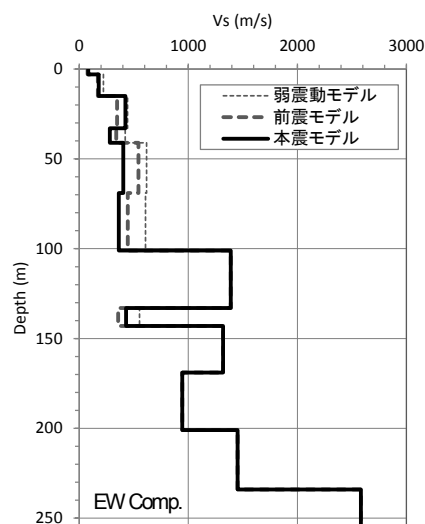
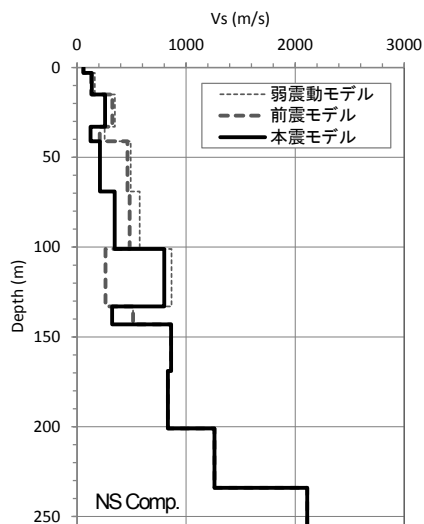
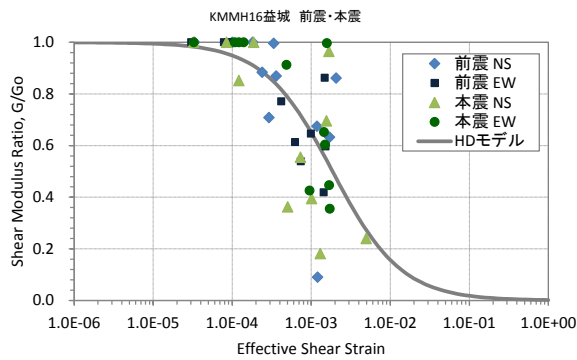


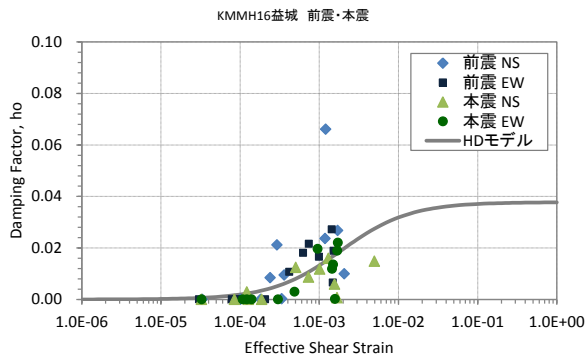
図-12 強震動用最適地盤モデルのVs分布図

図-13より、せん断剛性については、せん断ひずみの大きさに応じて低下している様子が明確に確認できる。一方、減衰定数 ($h_0(\gamma)$) については変化の割合は相対的に小さく、減衰定数の値もさほど大きくない。

次に、図-5に示した通り、観測記録からはNS成分とEW成分とで表層地盤の増幅特性が異なっていることが分かっている。そこで、動的変形特性についてもNS成分とEW成分についての比較検討を行った。

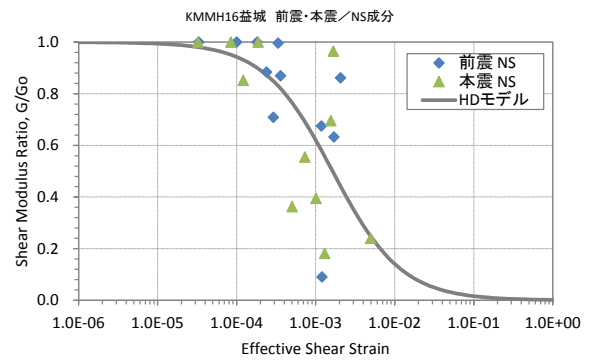


(1) $G/G_0 \sim \gamma$ 関係

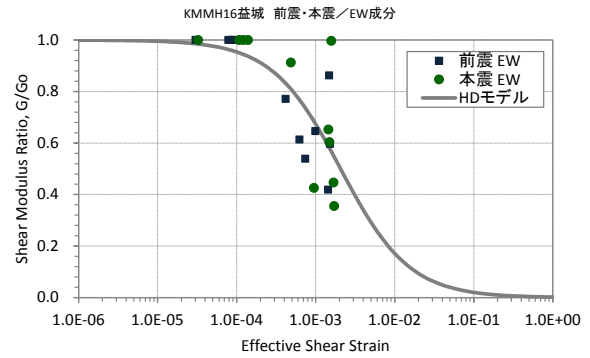


(2) $h \sim \gamma$ 関係

図-13 動的変形特性の推定結果



(1) NS 成分



(2) EW 成分

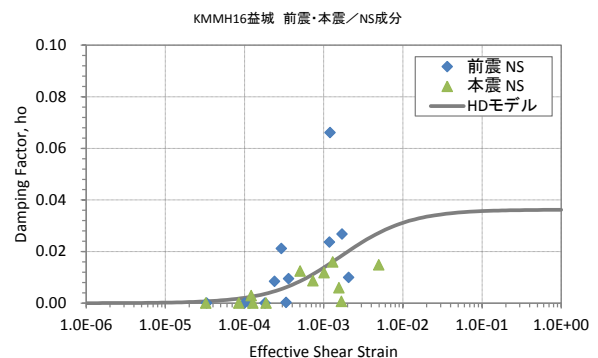
図-14 せん断剛性率推定結果の方向別比較

図-14および図-15にせん断剛性率および減衰定数の方向別の比較を示す。図-13と同様に、点が逆解析による推定値、実線がHDモデルへの適合の様子を表している。せん断剛性率の低下の度合いはNS成分の方がEW成分より顕著である。減衰定数については、1層だけ乖離した値があるものの、それ以外は類似した傾向を示している。1点だけ大きくかけ離れた値は、先述の101m～133mの層の値である。適合させたHDモデルをNS成分とEW成分とで比較すると、両者の間には殆ど差異が認められない。

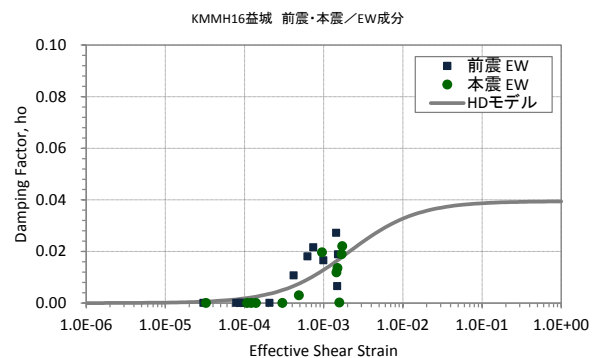
以上より、動的変形特性については方向による明確な違いは生じていないものと考えられる。ただし、NS成分の方が若干ばらつきが大きい。

5. まとめ

本研究は、2016年熊本地震の際にKiK-net益城地点の鉛直アレイ観測システムで得られた強震記録を用いて、表層地盤の非線形増幅特性について次元等価線形条件下で検討したものである。本研究で得られた結論を以下にまとめる。



(1) NS 成分



(2) EW 成分

図-15 減衰定数推定結果の方向別比較

- ・ 弱震動記録の地中記録に対する地表記録のフーリエスペクトル比より、NS成分とEW成分とで卓越振動数が異なっており、更に形状も異なることから、当該観測地点は水平成層地盤でないことが想像される。
- ・ 弱震動記録のフーリエスペクトル比とPS検層結果を比較すると、NS成分、EW成分共に一致しない。特にNS方向では大きくかけ離れている。
- ・ 逆解析手法を用いて弱震動用の地盤モデルと前震および本震の強震動用地盤モデルを作成した。得られた地盤モデルから、前震および本震時に表層地盤において剛性低下が生じていることが確認できた。
- ・ HDモデルを拘束条件とした動的変形特性の推定手法により、表層地盤の動的変形特性を求めた。その結果、せん断剛性がせん断ひずみに応じて低下する様子は明確に確認できたが、減衰定数については若干の増加に止まった。
- ・ 方向別に検討した動的変形特性の推定結果より、動的変形特性については方向による明確な違いは生じていないものと考えられる。

謝辞：本研究では、地震動記録として防災科学技術研究所の基盤強震観測網のデータを、震源情報として気象庁地震月報（カタログ編）および気象庁一元化処理震源要素を使用させて頂いた。また、国土地理院の電子国土Webの地図も使用させて頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 翠川三郎：強震時にみられる地盤特性の非線形性，地震，第2輯，第46巻，pp.207-216，1993年。
- 2) 安中正・都築富雄・増田民夫・嶋田昌義・岡留孝一：鉛直アレー記録から推定した表層地盤の合成率及び減衰定数のひずみ依存性，第9回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.493-498，1994年。
- 3) 栗田哲史・吉田郁政：ポートアイランド表層の地盤動特性の同定，地盤工学における逆解析の適用と施工管理に関するシンポジウム発表論文集，地盤工学会，pp.93-98，1997年。
- 4) 栗田哲史・佐藤博・足立倫海：強震記録を用いた地盤の動的変形特性推定法，土木学会 第69回年次学術講演会講演概要集，I-420，pp.839-840，2014年。
- 5) Kurita, T., Sato, H. and Adachi, T. : Dynamic Deformation Characteristics of the Ground Identified from Seismic Observations in Vertical Boreholes, Proceedings of Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, No.110, 2014.
- 6) 栗田哲史：遺伝的アルゴリズムの構造パラメータ同定問題への適用性に関する検討，土木学会第54回年次学術講演会講演概要集，Vol.54，No.7，pp.160-161，1999年。
- 7) 栗田哲史・佐藤博・足立倫海：表層地盤の周波数依存性に関する統計的性質，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.71，No.4，pp.I_13-I_20，2015年。

NONLINEARITY AMPLIFICATION OF SUBSURFACE GROUND AT KIK-NET MASHIKI SITE DURING THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE

Tetsushi KURITA

During the 2016 Kumamoto earthquake in Japan, a series of strong motions struck the towns along the active faults. The vertical array observation system at KiK-net Mashiki site installed by NIED observed a number of strong ground motions near the heavily damaged area. From the comparing between the weak ground motions before the 2016 Kumamoto earthquake and the strong ground motions mentioned above, nonlinearity of subsurface ground can be seen. Typical behaviors of the nonlinearity amplification are as follows. The predominant frequencies of strong ground motions in the Fourier spectrum ratios between horizontal amplitude motion recorded on a ground surface and that recorded deeper in the ground move to low frequency direction. High-frequency amplitude of strong ground motions is reduced. In this study, the degree of nonlinearity in the amplification of subsurface ground was estimated from the inverse analysis of observed records. Genetic Algorithm was employed as the inverse analysis. Quantitative relationships between the shear strains and shear modulus were obtained by the proposed method.