

距離減衰式の回帰に及ぼす表層地盤増幅の影響

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

経験的な地震動強さ推定法として、従来より距離減衰式が用いられてきている。距離減衰式は観測記録を統計的に処理したものであり、多くの距離減衰式は地表で観測された記録を用いている。一方、土木構造物の設計用入力地震動は S 波速度が 300m/s 以上の工学的基盤上で設定されることが多い。また、震源近傍の地表観測記録を用いた場合、表層増幅特性の非線形性の影響が懸念される。そこで本研究では、表層地盤の増幅特性を取り除いた工学的基盤波を用いて回帰した距離減衰式と地表観測波から得られる距離減衰式との比較を行い、表層地盤増幅特性が距離減衰式の回帰に及ぼす影響について分析した。検討の結果、回帰係数のうち、頭打ち項に顕著な影響を及ぼすことが分かった。また、回帰分析に使用した工学的基盤波の妥当性についても検証した。

Key Words : *ground motion prediction equation, amplification of subsurface ground, ground motion at ground surface, ground motion at base layer, plateaued term*

1. はじめに

地震動の予測方法としては、経験的手法と断層モデルに基づく手法とがある。断層モデルに基づく手法は、理論的手法、経験的グリーン関数法、統計的グリーン関数法などがある。経験的な地震動強さ推定法としては、距離減衰式が用いられてきており、構造物の耐震設計や確率論的地震ハザード解析などに活用されている。距離減衰式については、幾つかの既往文献に詳しくまとめられている^{例えば 1), 2)}。また、米国では NGA プロジェクト³⁾で系統的な検討が行われ、断層タイプや地盤増幅特性など複数の効果を考慮した距離減衰式を開発している。我が国でも、1995 年兵庫県南部地震以降の地震観測網の整備に伴い、多くの距離減衰式が作成されてきた⁴⁾。

距離減衰式は観測記録を統計的に処理したものであり、多くの距離減衰式は地表で観測された記録を用いている。表層地盤の増幅特性については Vs30 で補正する方法などが提案されている^{6), 7)}。一方、土木構造物の設計用入力地震動は S 波速度 (Vs) が 300m/s 以上の工学的基盤上⁵⁾で設定されることが多い。ここで、回帰分析に地表の強震記録を用いる場合に、震源近傍では表層地盤の非線形な増幅特性の影響が反映されているものと考えられる。そこで本研究では、表層地盤の増幅特性を取り除い

た工学的基盤波を用いて回帰した距離減衰式と地表における観測波から得られる距離減衰式との比較を行い、表層地盤増幅特性が距離減衰式の回帰に及ぼす影響について定量的な評価を行った。また、回帰分析に使用した工学的基盤波の妥当性についても検証した。

2. 距離減衰式

本論では、断層近傍で表層地盤の非線形増幅特性が認められ、且つ強震データが豊富に得られている 2016 年熊本地震の前震と本震の観測記録を用いて、距離減衰式の回帰分析を行った。

(1) 距離減衰式の関数型

本研究では、Joyner and Boor(1981)⁸⁾を参考に、加速度応答スペクトルの距離減衰式として次式を考えた。

$$\log Sa(T) = -\log\{r + D(T)\} - B(T) \cdot r + C(T) \pm \sigma(T) \quad (1)$$

ここで、

$Sa(T)$: 5%減衰加速度応答スペクトル(cm/s²)

r : 断層最短距離(km)

T : 周期 (s)

$B(T), C(T), D(T)$: 回帰係数

$\sigma(T)$: 対数標準偏差

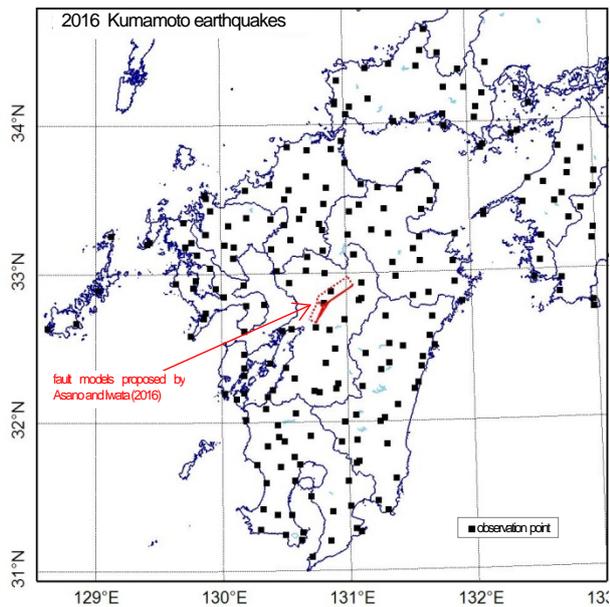


図-1 観測点分布図

距離減衰式の各項は、 $\log\{r + D(T)\}$ ：幾何減衰項， $D(T)$ ：震源近傍の頭打ち項， $B(T) \cdot r$ ：内部減衰項，である。本研究では個別の地震毎に回帰分析を行うため，マグニチュードの項は設けていない。

(2) 地震観測記録

観測記録としては，防災科学技術研究所の強震観測網（K-NET, KiK-net）の地表で得られている2016年熊本地震の前震と本震のデータを使用した。なお，分析に使用した観測点は，断層最短距離が200km以内のものとした。断層最短距離の算定には，Asano and Iwata⁹⁾の前震及び本震の断層モデルを使用した。本研究で使用した全観測点の位置を図-1に示す。

(3) 工学的基盤波の算定

工学的基盤波は，強震観測網で公開されている地盤モデルを用いて地表観測記録から次元波動理論による引戻し計算を行って得ている。従って，地盤モデルが公開されていない地点及び工学的基盤が確認できない地点については除外している。なお，工学的基盤は $V_s \geq 300\text{m/s}$ で速度のコントラストが明瞭な層とした。また，KiK-netの地盤モデルには密度情報が無いため，K-NET

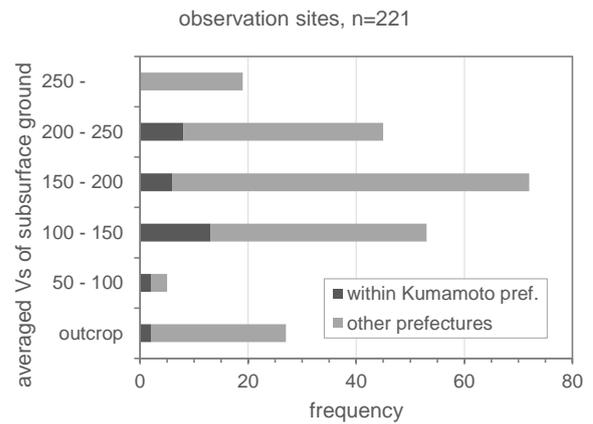


図-2 表層地盤の平均 Vs 頻度分布図

の地盤モデルを参考にして設定した。

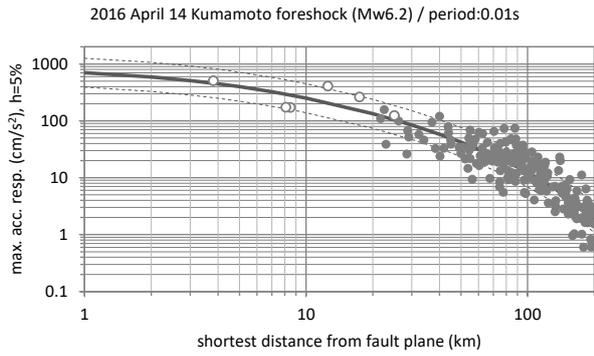
本研究で対象とした全観測地点の工学的基盤以浅の表層地盤の平均 Vs の頻度分布図を図-2に示す。ここで，表層地盤の平均 Vs は全層厚を各層における走時の総和で除して求めた。また，図には断層近傍となる熊本県内の観測地点に限定した頻度分布も併せて示している。図より，全観測地点では $V_s=150\sim 200\text{m/s}$ の地点が最も多く， $100\sim 150\text{m/s}$ の地点がそれに次いでいる。熊本県内に限定すると $100\sim 150\text{m/s}$ の地点が最多である。また，工学的基盤が露頭している箇所が全観測地点のうち27地点，熊本県内でも2地点存在している。

地表の最大加速度が 200m/s^2 以上の記録については，表層地盤の非線形性の影響が無視できないと考え，等価線形解析による引戻し計算を実施した。この時，動的変形特性として，今津・福武¹⁰⁾の回帰モデルを適用した。しかし，同モデルの適用範囲は，同著者らによって最大せん断ひずみが0.5%以下と示されている¹¹⁾。本研究で使用する震源近傍の強震動記録では，この適用範囲を超えてしまう場合がある。特に，減衰定数が非常に大きくなることにより，解析結果の工学的基盤波は高周波数成分が過大評価される問題が生じる。そこで，本研究では今津・福武のモデルをHardin-Dmievichモデルで適合させた動的変形特性モデルを使用した。この時，最大減衰定数(h_{\max})を全ての土質区分共通で20%とした。ここに示した方法で表層地盤の増幅特性を取り除いて得られた工学的基盤波の妥当性については後ほど検証する。

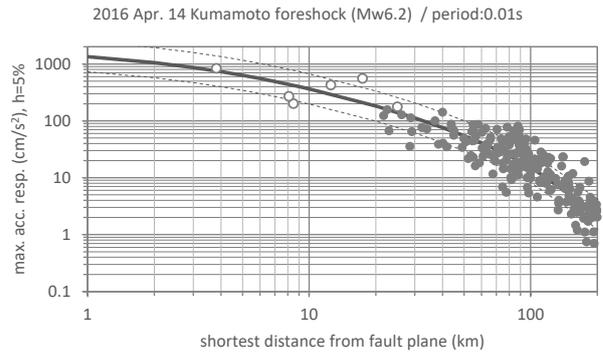
表-1 地震諸元一覧

EQ.	Origin time						Hypocenter				Mj	Mw	
							Long.		Lat.				Depth (km)
	year	m	dy	hr	mi	sec	deg.	min.	deg.	min.			
1	2016	04	14	21	26	34.43	32	44.50	130	48.52	11.39	6.5	6.2
2	2016	04	16	01	25	05.47	32	45.27	130	45.78	12.45	7.3	7.0

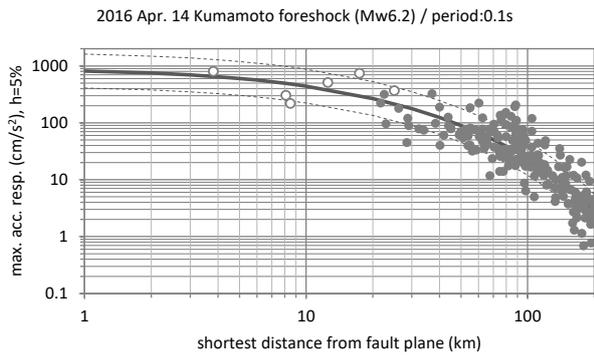
震源情報の出典：気象庁地震月報（カタログ編）



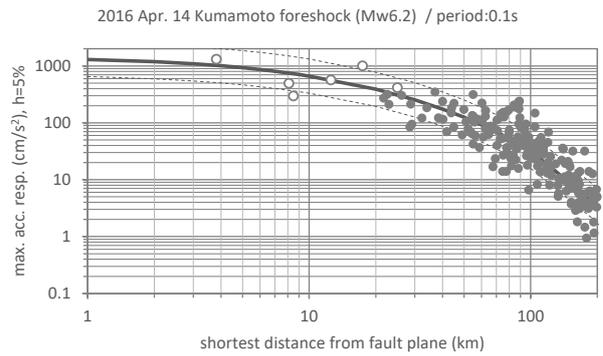
(1)前震・工学的基盤波,周期:0.01秒



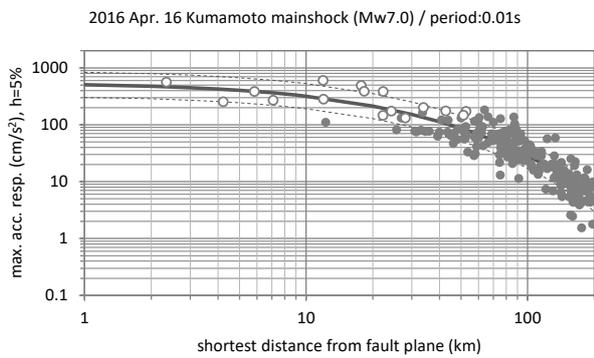
(2)前震・地表波,周期:0.01秒



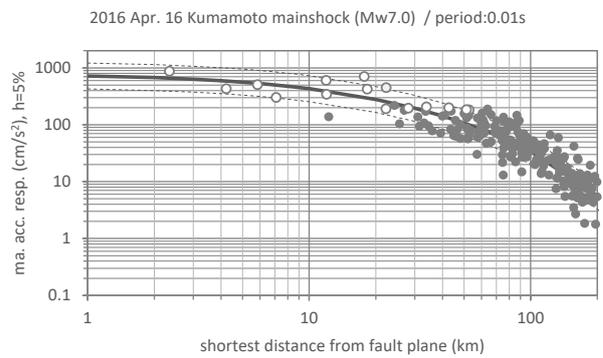
(3)前震・工学的基盤波,周期:0.1秒



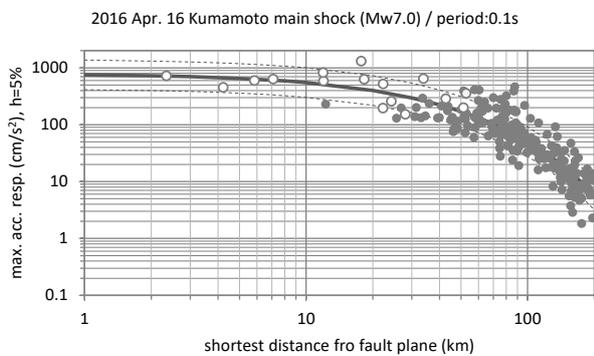
(4)前震・地表波,周期:0.1秒



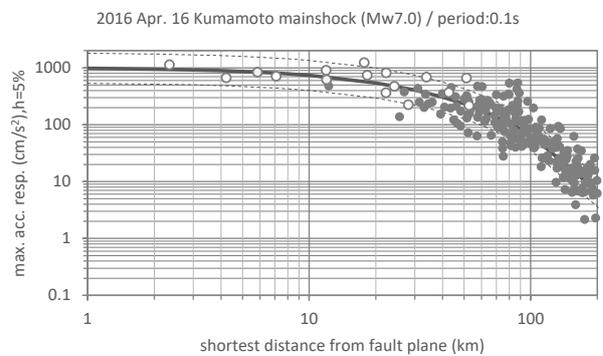
(5)本震・工学的基盤波,周期:0.01秒



(6)本震・地表波,周期:0.01秒

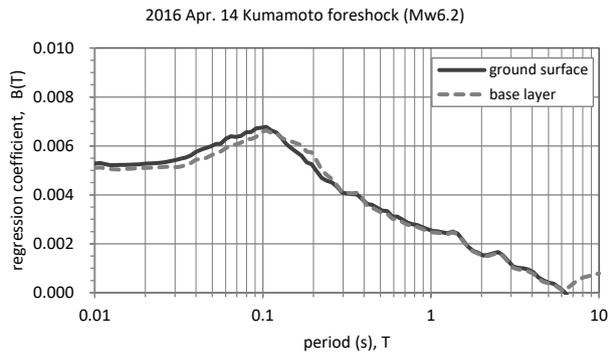


(7)本震・工学的基盤波,周期:0.1秒

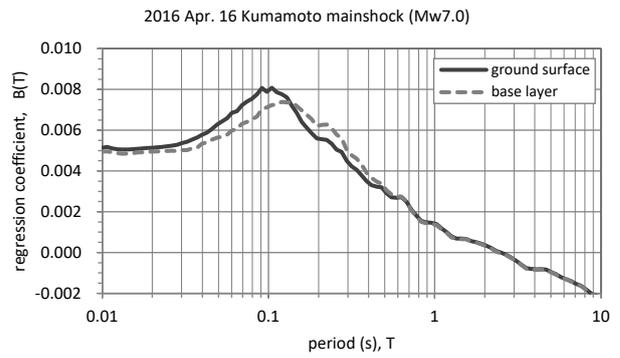


(8)本震・地表波,周期:0.1秒

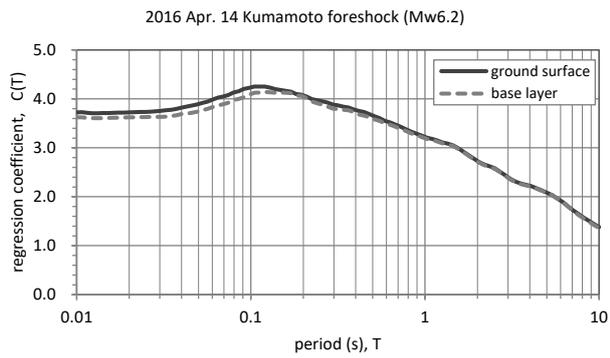
図-3 回帰式と観測値との比較



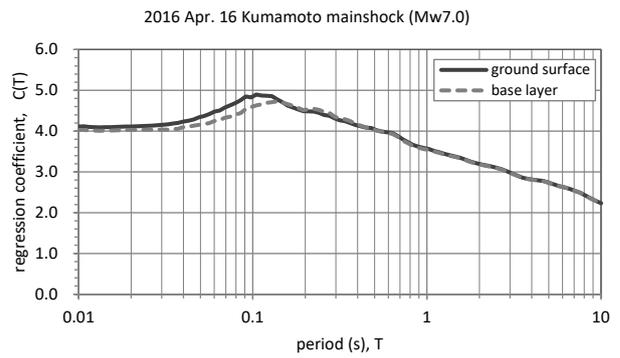
(1) 前震, 回帰係数 : B(T)



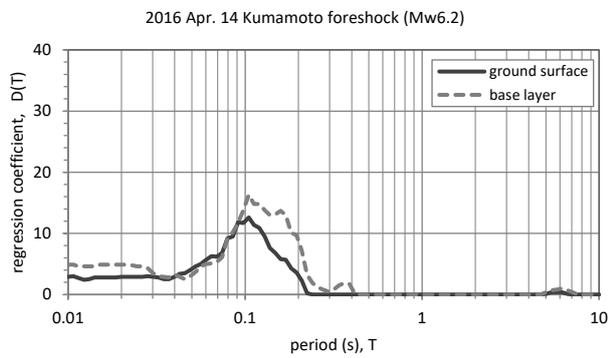
(5) 本震, 回帰係数 : B(T)



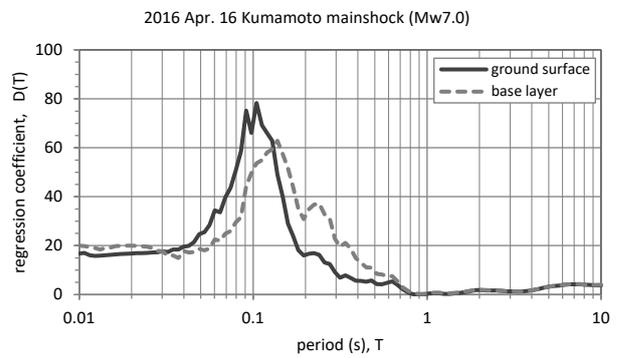
(2) 前震, 回帰係数 : C(T)



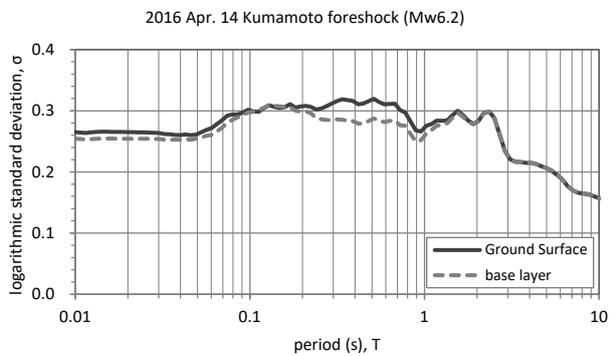
(6) 本震, 回帰係数 : C(T)



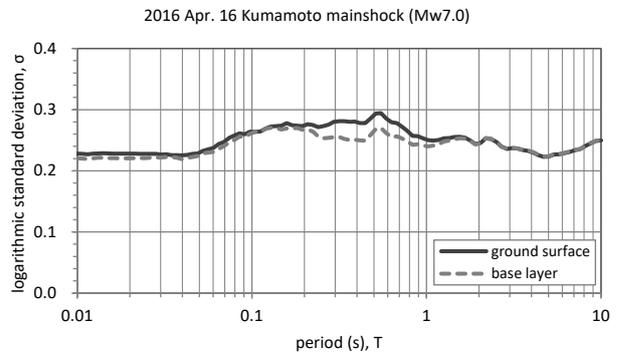
(3) 前震, 回帰係数 : D(T)



(7) 本震, 回帰係数 : D(T)

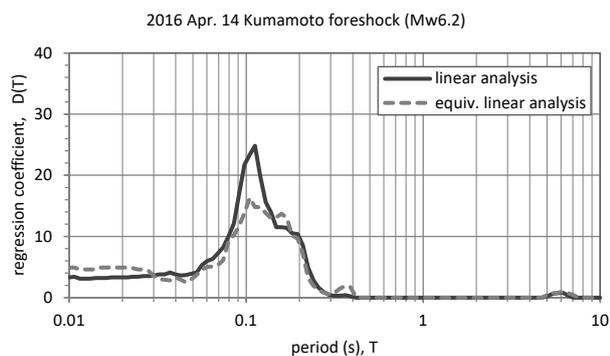


(4) 前震, 対数標準偏差

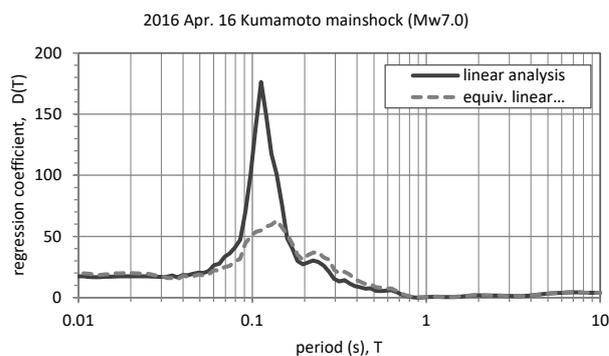


(8) 本震, 対数標準偏差

図-4 回帰係数の比較

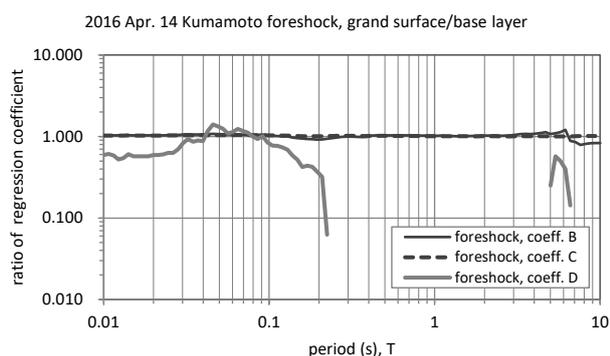


(1) 前震, 回帰係数: $D(T)$

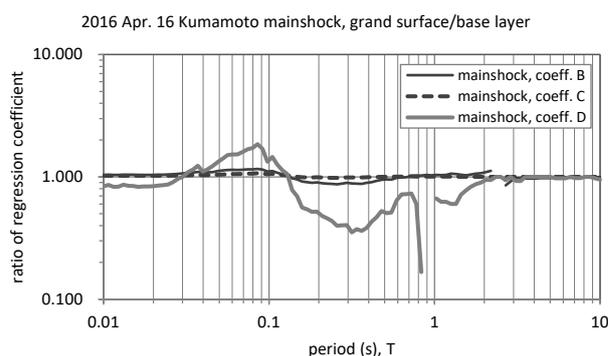


(2) 本震, 回帰係数: $D(T)$

図-5 回帰係数 $D(T)$ の比較



(1) 前震



(2) 本震

図-6 地表波と工学的基盤波との回帰係数の比率

以上のような条件により、前震で 205 地点、本震で 220 地点の観測記録を最終的に選定した。この内、等価線形解析を行った地点は、前震で 6 地点 (K-NET : 4 地点, KiK-net : 2 地点)、本震で 16 地点 (K-NET : 8 地点, KiK-net : 8 地点) である。

3. 回帰分析

(1) 観測データの回帰分析

先述の処理によって得られた前震及び本震の工学的基盤波及び地表波の 5%減衰加速度応答スペクトルを用いて回帰分析を行った。加速度応答スペクトルの周期帯は 0.01 秒~10 秒とした。なお、各応答スペクトルは、水平 2 成分の幾何平均値を目標値とした。

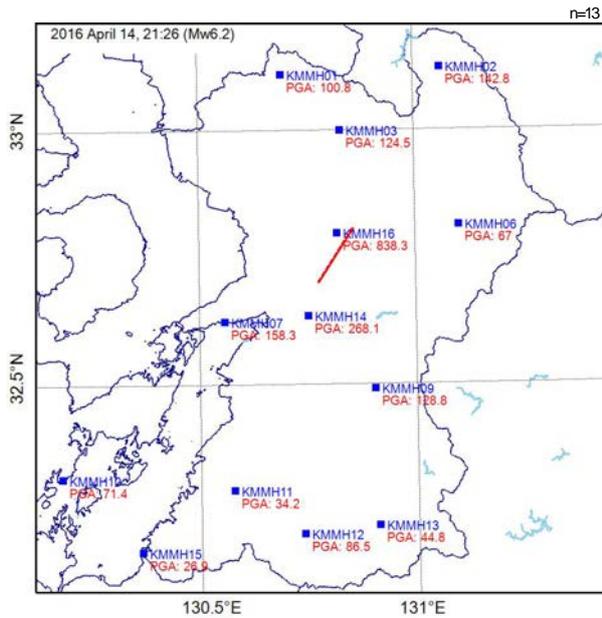
図-3 に得られた回帰式と観測値との比較のうち、工学的基盤波と地表波との差異が明瞭に表れている短周期側の例を示す。図中の実線が回帰式の結果、丸印が観測値を表している。なお、観測値のうちで白抜き印は断層近傍の熊本県内に位置する KiK-net 地点のデータを表している。工学的基盤波と比較して、地表波の方が振幅が大きいことが分かる。回帰結果と観測値は全体的に良く対応している。また、断層近傍の観測値は頭打ちして

いる様子が伺え、回帰式もそれに追従している。

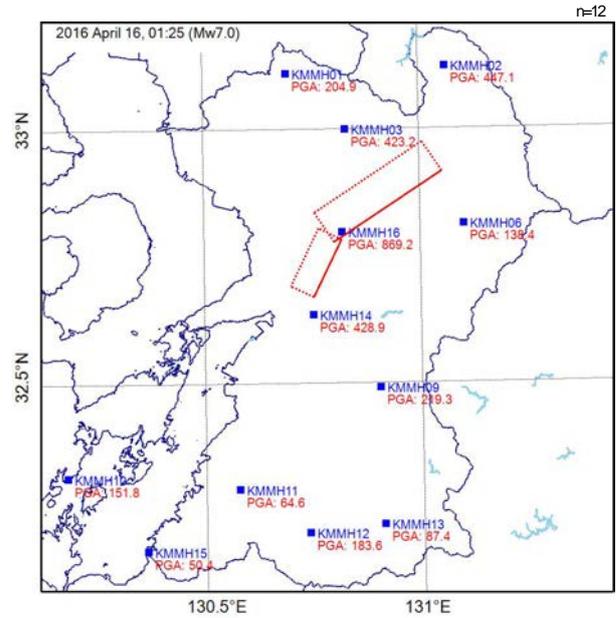
回帰式の対数標準偏差は図-4 に示す通り 0.2~0.3 程度であり、既往の距離減衰式と同程度の範囲¹⁾に収まっていることが確認できる。

(2) 工学的基盤波と地表波の比較検討

図-4 に回帰係数の比較を示す。地表記録を用いた場合の回帰結果は、係数 $B(T)$ 及び $C(T)$ が短周期側で大きくなる傾向にある。頭打ち項 $D(T)$ は、0.03 秒以下と 0.1~1 秒の周期帯で工学的基盤波の方が大きい。対数標準偏差は 1 秒以下の周期帯で工学的基盤波の方が小さい。ここで、試みに工学的基盤波を求める際に等価線形解析を用いず、全て線形モデルの増幅特性とした場合の回帰結果の $D(T)$ を図-5 に示す。図より、線形解析で工学的基盤波を求めた場合の頭打ち項の係数は、等価線形解析の場合の結果を上回っている。これは、震源近傍の強震動において線形解析は表層地盤の増幅特性を過大評価している、即ち工学的基盤波を過小評価していることを表している。以上の結果より、周期 0.1 秒付近における $D(T)$ の値の変動は主として表層地盤の増幅特性の非線形性に起因するものと推察される。一方、それ以外の周期帯にも $D(T)$ の差異は生じているものの値は大きくない。



(1) 前震



(2) 本震

図-7 評価に使用したデータの観測地点分布図

工学的基盤波と地表波との回帰係数の比率を図-6に示す。ここで、地表波の回帰係数を工学的基盤波の回帰係数で除している。図より、表層地盤の増幅特性が回帰式に及ぼす影響としては、頭打ち項に顕著（数十%以上）に表れることが分かる。一方、内部減衰項と定数項の係数には、短周期側で最大15%程度の差異が生じている。

4. 工学的基盤波の妥当性確認

前章の検討では目標値として工学的基盤波を用いた場合と地表波を用いた場合とで、回帰分析結果の差異が頭打ち項に顕著に表れることが分かった。しかし、ここで用いた工学的基盤波は公開されているPS検層結果に基づく地盤モデルを用いて等価線形解析で推定した結果（震源から距離を隔てた地点の線形解析結果も含むが総称として等価線形解析結果を用いる）である。従って、前章で得られた結論は使用した工学的基盤波の妥当性に依存すると考えられる。そこで、工学的基盤波の妥当性について検討した。

(1) 評価方法

本論の回帰分析で検討に使用した工学的基盤波の妥当性評価は、鉛直アレイ観測システムで観測されている地点を対象とした。はじめに、観測記録から表層地盤の最適地盤モデルを求めて、十分な精度を有すると考えられる工学的基盤波を算定する。次に、PS検層結果を用いて等価線形解析で算定した工学的基盤波と最適地盤モデルに基づく工学的基盤波との比較を行った。具体的な検

討は以下のステップに従って実施した。

- i) 鉛直アレイ観測システムの弱震動記録から弾性挙動範囲内増幅特性の最適地盤モデルを逆解析手法によって求める。ここで、未知量は各層のS波速度と周波数依存型減衰定数とした。
- ii) 強震動記録から非線形増幅特性の最適地盤モデルを求める。未知量は各層のS波速度と周波数非依存型減衰定数である。
- iii) 上記のステップで得られた最適地盤モデルを用いて、地表の観測記録から強震時の工学的基盤波を算定する。
- iv) 最適地盤モデルから算定した工学的基盤波と回帰分析に使用したPS検層結果に基づく等価線形解析によって求めた工学的基盤波の両者について、5%減衰加速度応答スペクトルを算定する。
- v) 2種類の工学的基盤波の加速度応答スペクトル比の幾何平均を求め、両者の関係について検討する。

なお、本論で使用した表層地盤の最適地盤モデルを求めるための逆解析手法としては既往検討¹²⁾と同様のものを用いた。

(2) 評価に使用するデータ

評価に使用したデータの観測点分布図を図-7に示す。分析可能な観測地点は、前震の場合に13地点、本震の場合に12地点となった。図中には各観測点における地表最大加速度(PGA)も示している。地表最大加速度は水平2成分の幾何平均として求めている。

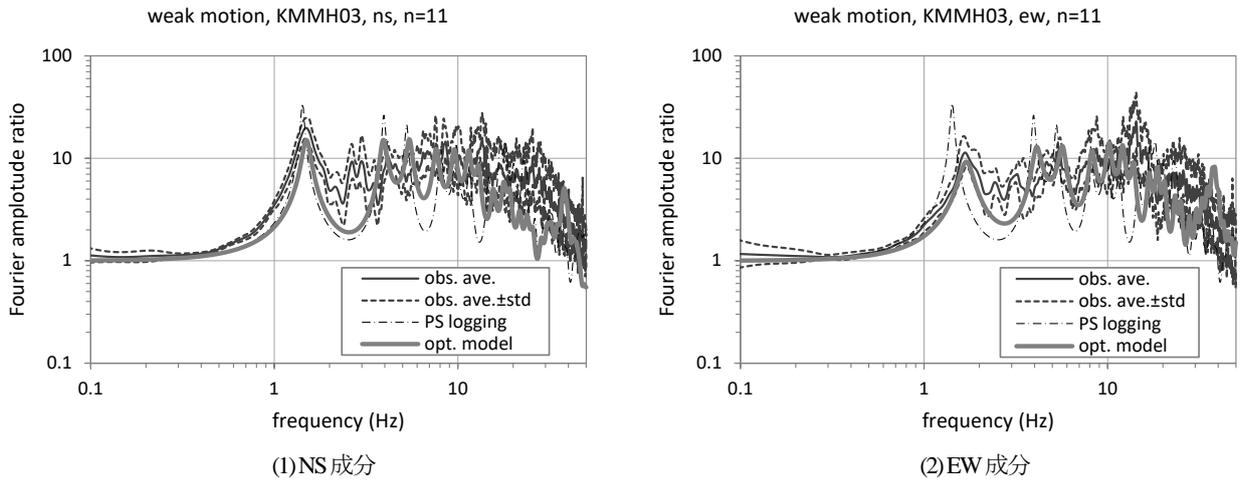


図-8 KMMH03 (菊池) における弱震動記録

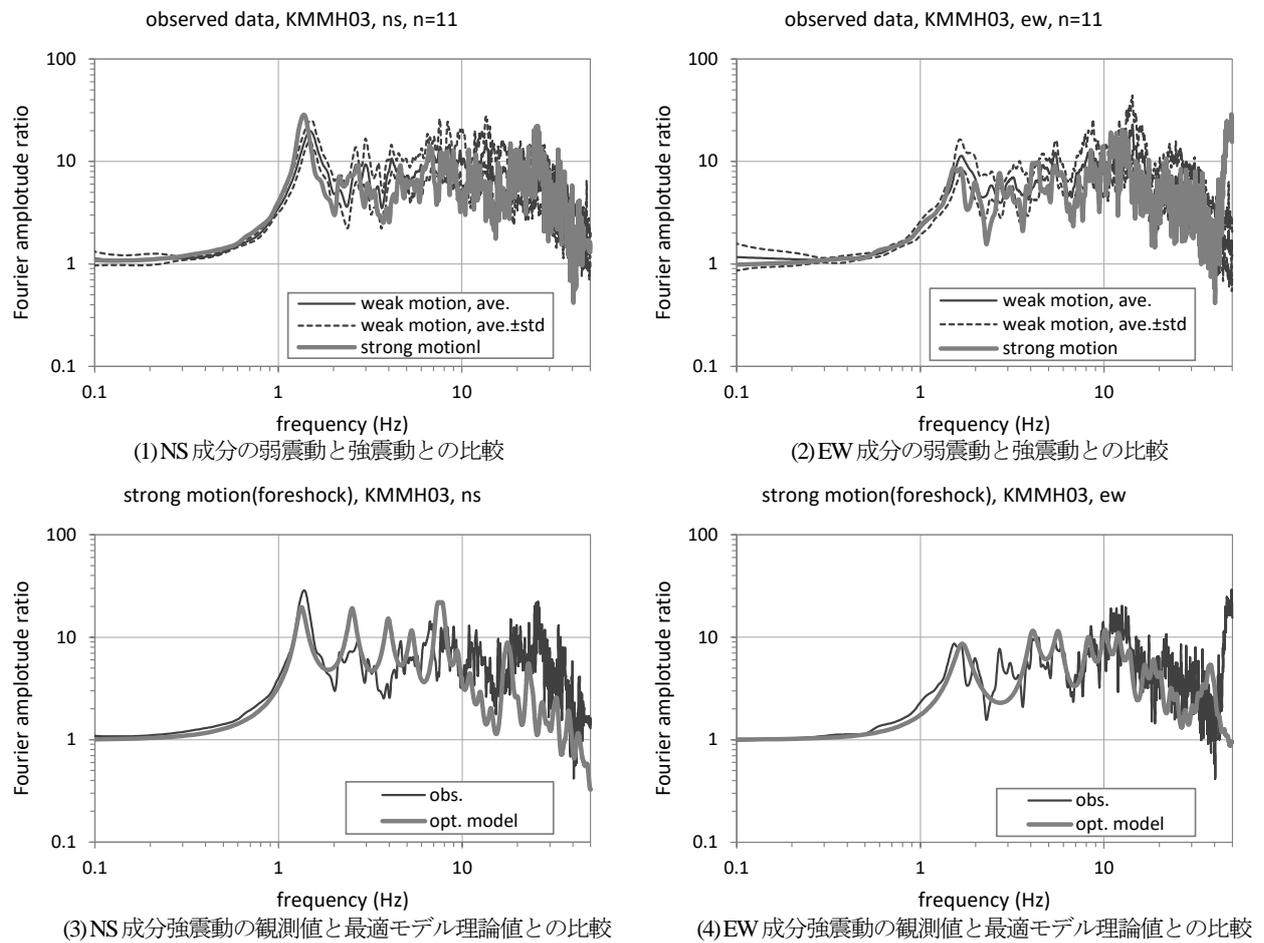
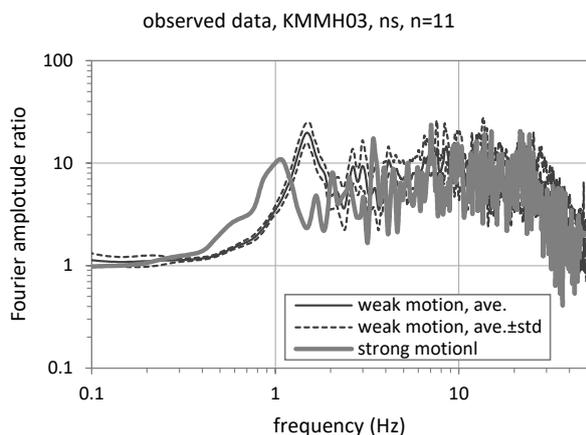


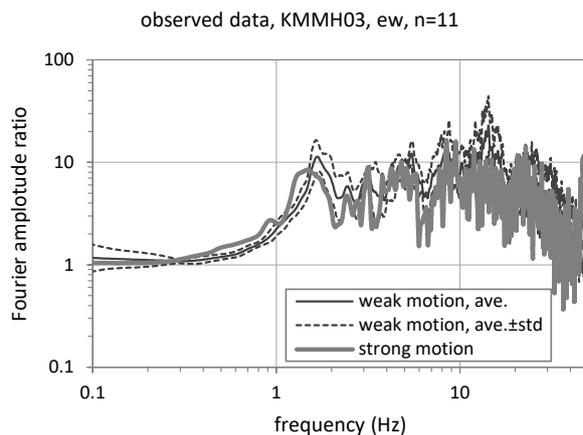
図-9 KMMH03 (菊池) における前震記録の最適地盤モデル推定結果

回帰分析において、頭打ち項に影響を与えるのは主に断層近傍のデータであるため、ここでは熊本県内の KiK-net のデータを用いている。KiK-net のデータを用いる理由は鉛直アレイの地表及び地中のデータが必要なためである。評価対象地点のデータは、図-3の白抜き丸印に対応する。

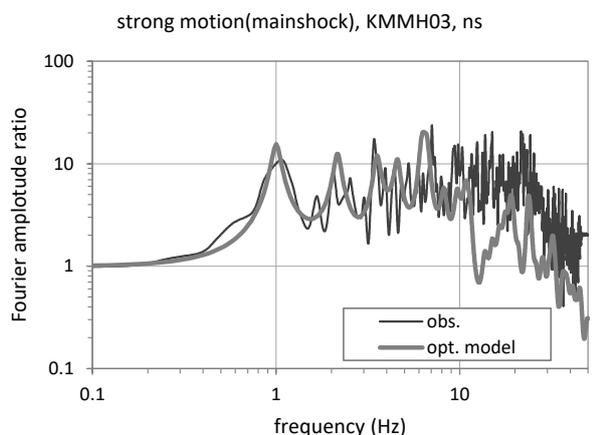
地中埋設地震計の設置方位誤差については、防災科学技術研究所の観測点情報 (https://www.hinet.bosai.go.jp/st_info/detail/, 2020年5月23日閲覧) に基づき、使用したデータの観測時期に応じて、影響が無視できない±10度以上のものを対象に補正している。ここで、観測記録はP波部分を除去



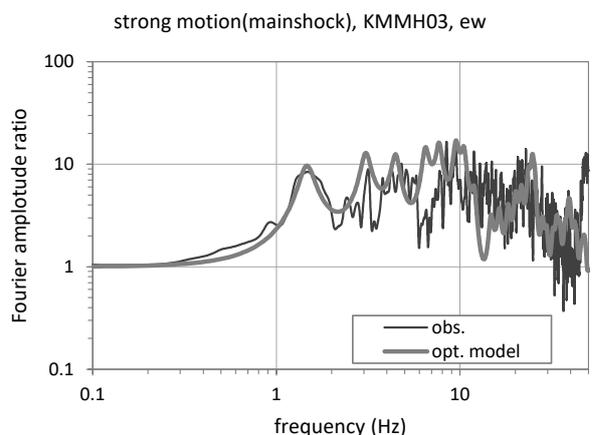
(1)NS 成分の弱震動記録と強震動記録との比較



(2)EW 成分の弱震動記録と強震動記録との比較



(3)NS 成分強震動の観測値と最適モデル理論値との比較



(4)EW 成分強震動の観測値と最適モデル理論値との比較

図-10 KMMH03 (菊池) における本震記録の最適地盤モデル推定結果

した S 波群のデータを用いた。また、加速度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。

(3) 表層地盤の増幅特性

逆解析手法によって表層地盤の増幅特性を評価する手順を示す。ここでは、KMM03 (菊池) 地点を代表として例示する。

図-8 には地表最大加速度が 100cm/s^2 以下の弱震動記録の平均フーリエスペクトル比及び逆解析によって得られた最適地盤モデルから算定した理論伝達関数を示す。また、参考のために等価線形解析に使用した PS 検層結果 (KiK-net の公開地盤モデル) から算定した理論伝達関数も示している。ここで、観測記録のフーリエスペクトル比は地中埋設地震計に対する地表地震計の比としている。理論伝達関数についても同様である。

図-9 (1)~(2)には弱震動記録の平均フーリエスペクトル比と前震時の強震動記録のフーリエスペクトル比を示す。図より、強震動記録のスペクトルは弱震動のフーリエスペクトルよりもピークが低周波数側にシフトしてお

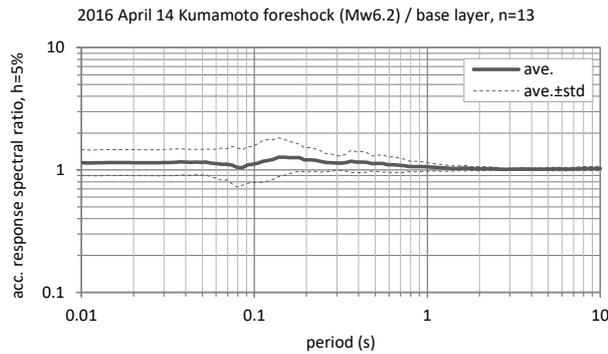
り、表層地盤増幅の非線形性が表れていることが明確に確認できる。図-9 (3)~(4)には強震動記録に対して逆解析を行い求めた理論伝達関数と観測記録との比較を示している。両者は良く対応している。

本震に対する同様の検討結果を図-10 に示す。本震の方が表層地盤増幅特性の非線形性が顕著に表れている。本震についても逆解析結果と観測記録との対応は良いと言える。

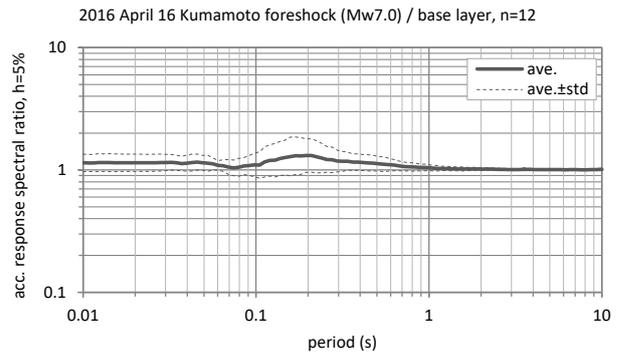
以上の通り、逆解析によって得られた強震時最適地盤モデルの増幅特性は十分妥当なものと言える。従って、このように逆解析によって得られた最適地盤モデルより算定した工学的基盤波についても妥当性が確認されたと考えられる。

(4) 2種類の工学的基盤波の比較検討

ここまでの検討で得られた 2 種類の工学的基盤波について、両者の平均加速度応答スペクトル比を図-11 に示す。ここで、実線は各観測地点の加速度応答スペクトル比の幾何平均値、破線は平均±標準偏差を表している。なお、加速度応答スペクトル比は等価線形解析の結果を



(1) 前震



(2) 本震

図-11 2種類の工学的基盤波の平均加速度応答スペクトル比

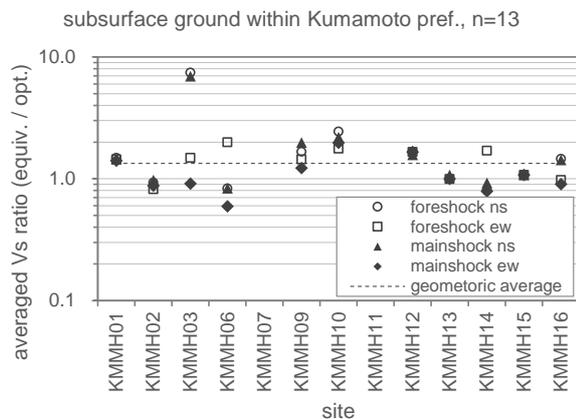


図-12 表層地盤平均 Vs 比

最適地盤モデルの結果で除して求めている。図より、周期 1 秒以上の長周期側では標準偏差が極めて小さく、殆どばらつきが無いことを表している。これは、表層地盤の増幅率が 1 倍の低周波数帯域と対応している。一方、短周期側では、若干のばらつきの存在が認められる。幾何平均値は全周波数帯で概ね 1.0 付近で安定しており、平坦性が保たれている。従って、全体的な傾向として両者の差異は大きくないと言える。

先の検討の通り、鉛直アレイ観測システムで得られた観測記録を用いて逆解析手法で求めた最適地盤モデルは十分精度の高い増幅特性を与えると考えられる。従って、最適地盤モデルから算定される工学的基盤波と PS 検層地盤モデルに基づく等価線形解析から得られる工学的基盤波とが概ね整合するという事は、本論で使用した PS 検層地盤モデルに基づく等価線形解析から算定した工学的基盤波の妥当性が概ね確認されたと言える。

次に各観測点における表層地盤の平均 Vs について等価線形解析結果と最適地盤モデルとの比較を図-12 に示す。ここで、平均 Vs の比率は等価線形解析結果の値を最適地盤モデルの値で除している。また、図中にシンボ

ルが無い地点では工学的基盤が露頭している。KMMH03 の ns 成分で両者の差異が大きいが、それ以外の地点では概ね 1 倍に近く、全体の幾何平均値は 1.3 である。

図-11 で加速度応答スペクトル比の平均値は、周期 0.1 ~ 0.2 秒付近で最大値を生じ、その値は約 1.3 倍である。この結果と図-6 に示した回帰係数の比率を比較してみる。内部減衰項 $B(T)$ と定数項 $C(T)$ の係数の差異は短周期側で最大 15% 程度であり、2 種類の工学的基盤波の平均加速度応答スペクトル比の変動範囲に近いことから、工学的基盤波の差異が影響している可能性を否定しきれない。一方、頭打ち項 $D(T)$ については最大 10 倍以上の乖離があることから、この傾向については有意なものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、2016 年熊本地震の観測記録を用いて、表層地盤増幅が距離減衰式の回帰に及ぼす影響について定量的な検討を行った。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 表層地盤の増幅特性が回帰式に及ぼす顕著な影響としては、頭打ち項に顕著（数十%以上）に表れることが分かった。一方、内部減衰項と定数項の係数には、短周期側で最大 15% 程度の差異が生じた。
- 表層地盤増幅特性の有無による回帰係数の比較における頭打ち項 $D(T)$ の周期 0.1 秒付近の値の変動は、主として地盤増幅特性の非線形性に起因するものと推察される。
- 鉛直アレイ観測システム地点のデータ分析より、最適地盤モデルから算定される工学的基盤波と PS 検層地盤モデルに基づく等価線形解析から得られる工学的基盤波とが概ね整合することが確認できた。このことから、本論の回帰分析で使用した PS 検層地

盤モデルに基づく等価線形解析から算定した工学的基盤波の妥当性が概ね確認された。

- 2種類の工学的基盤波の平均応答スペクトル比の変動が十分小さいことから、工学的基盤波と地表波との各回帰係数のうち、少なくとも頭打ち項に見られる差異は有意なものと考えられる。

謝辞：本研究では、地震動記録及び地盤情報として防災科学技術研究所の強震観測網（K-NET, KiK-net）、doi:10.17598/NIED.0004のデータを利用させて頂きました。また、震源情報として気象庁地震月報（カタログ編）を利用させて頂きました。関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 翠川三郎：地震動強さの距離減衰式，地震，第2輯，第61巻，特集号，pp.S471-S477，2009。
- 2) (社)日本建築学会：地盤震動と強震動予測－基本を学ぶための重要項目－，距離減衰式，丸善出版(株)，pp.172-174，2016。
- 3) Campbell, K. W. and Bozorgna, Y : Next generation attenuation (NGA) empirical ground motion models: Can they be used in Europe?, Proceedings of the First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Paper No.458, 2006.
- 4) (社)日本建築学会：地盤震動－現象と理論－，6.2.4各種距離減衰式，丸善出版(株)，pp.200-205，2005。
- 5) (社)土木学会地震工学委員会レベル2地震動研究小委員会：レベル2地震動研究小委員会の活動成果報告書，3.3.2基準面，p.18，2000。
- 6) Kanno, T., Narita, A., Morikawa, N., Fujiwara, H. and Fukushima, Y. : A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on record data, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 3, pp.897-897, 2006.
- 7) Morikawa, N. and Fujiwara, H. : A new ground motion prediction equation for Japan applicable up to M9 mega-earthquake, *Journal of Disaster Research*, Vol. 8, No. 5, pp.878-888, 2013.
- 8) Joyner, W. B. and Boore D. M. : Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 imperial valley, California, earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 71, No. 6, pp.2011-2038, 1981.
- 9) Asano, K. and Iwata, T. : Source rupture process of the foreshock and mainshock in the 2016 Kumamoto earthquake sequence estimated from the kinematic waveform inversion of strong motion data, *Earth, Planets and Space*, 68: 147, 2016.
- 10) 今津雅紀，福武毅芳：砂礫材料の動的変形特性，第21回土質工学研究発表会，Vol.1，pp.509-512，1986。
- 11) 今津雅紀，福武毅芳：動的変形特性のデータ処理に関する一考察，第21回土質工学研究発表会，Vol.1，pp.533-536，1986。
- 12) 栗田哲史：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，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.73，No.4，pp.I_74-I_82，2017。

EFFECT OF SURFACE SOIL AMPLIFICATION ON THE REGRESSION OF GRAND MOTION PREDICTION EQUATIONS

Tetsushi KURITA

The ground motion prediction equations (GMPEs) have been used as the empirical ground motion estimation method. GMPEs are formulated by statistically processing the observation records. Many GMPEs are obtained from records observed at the ground surface. On the other hand, the input seismic ground motions for design of civil engineering structures are often provided on the engineering base layer with $V_s \geq 300\text{m/s}$. When the observation records obtained on the ground surface near the fault are used, the regression results may be influenced by the nonlinearity of the amplification characteristics. Therefore, in this study, the two kinds of GMPEs were compared. One is a GMPEs obtained from ground motions on the engineering base layer. The other is the GMPEs based on the observed records on the ground surface. As a result of the study, it was found that the regression coefficient had a significant effect on the plateaued term. The validity of the ground motions on the engineering base layer used in the regression analysis was verified.