

強震時の上下動に着目した表層地盤増幅特性

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 (Corresponding Author)

表層地盤の強震時増幅特性において、上下動については水平動ほどに関心を持たれない傾向にある。これは、多くの構造物の設計において水平動を主として考慮してきたことによると思われる。しかし、近年PGAの大きい地震記録が計測されてきており、上下動についても十分に考慮すべき状況が増えてくものと考えられる。そこで、本研究では2018年北海道胆振東部地震における強震記録の上下動に着目し、表層地盤の増幅特性について検討した。同地震の震源近傍に位置するKiK-net 追分(IBUH01)観測点を対象として、強震動記録と弱震動記録との比較により、上下動の表層地盤増幅特性についてP波群とS波群とで異なることを示した。特に、強震時に弱震動と異なる増幅特性を示すことが分かった。

Key Words: ground motion, vertical motion, horizontal motion, ground amplification, nonlinearity

1. はじめに

表層地盤の強震時増幅特性に関する検討において、総じて関心の高い水平動に対して、上下動については水平動ほどに注意を払われない傾向にある。これは、多くの構造物が設計において水平動を主として考慮してきたことによると思われる。しかし、2008年岩手・宮城内陸地震ではKiK-net 一関西 (IWTH25) 観測点で最大加速度 $3,866\text{cm/s}^2$ の上下動成分が観測され¹⁾、2011年東北地方太平洋沖地震ではK-NET 築館 (MYG004) をはじめとして複数観測地点で1G (980cm/s^2) 超の上下動加速度が記録された²⁾。このように、上下動についてもPGAの非常に大きい地震記録が近年計測されてきており、これを十分に考慮すべき状況が増えてくものと考えられる。

高層の建築物については上下動の影響に関する検討が行われており、特にアスペクト比の増加に伴って上下動の影響が無視できなくなるとしている³⁾⁵⁾。また、一般的な高層建築物以外でも、着床式の大型洋上風力発電設備のように基礎に高いタワーを有する場合や、基礎の上に機械設備が存在する場合など、上部の構造物や機器類が強大な上下動によって損傷を受ける可能性が否定できない。従って、強震時の表層地盤増幅特性、とりわけ上下動成分について明らかにしておくことが求められる。

表層地盤の上下動増幅特性に着目した既往の研究として以下のような知見が得られている。Tsai and Liu⁶⁾は鉛直アレイ観測記録を分析し、(i)上下動の増幅は水平動と

比較して顕著ではない、(ii)上下動の増幅特性は水平動と比較して地震動動強さへの依存度が小さい、(iii)上下動の増幅特性は水平動と比較して地下水位に対して敏感に反応する、等の知見を得ている。更に、Tsai and Liu⁷⁾は上下動の等価線形解析手法を提案している。モデル化された表層地盤は、飽和条件 (即ち、地下水位の上か下か) に依存して上下方向の非線形挙動が異なり、地下水位の上と下とで異なる動的変形特性モデルを用いている。また、上下動の非線形性は水平動に見られるものと異なるとしている。Shi et al.⁸⁾はTsai and Liu⁷⁾が提案する地下水位の上と下とで異なる動的変形特性モデルを改良して、両者を一体化した動的変形特性モデルを提案している。

一方、先述の近年観測された大加速度記録に関連したものとして、森尾他⁹⁾は2008年岩手・宮城内陸地震におけるKiK-net 一関西及び2011年東北地方太平洋沖地震におけるK-NET 築館での大加速度記録に関して、地盤の弾塑性論的考察を加え、地盤のダイレイタンスーによって水平動の2倍の周波数の上下動が発生すると指摘している。また、佐藤¹⁰⁾は複数のKiK-net 強震記録に基づき、上下動の地盤増幅特性の非線形性の有無が、地表での観測加速度波形を積分した速度波形の形状で識別できることを示し、上下動の増幅特性の卓越周波数の1/2の周波数付近に水平動の卓越周波数が見られる傾向にあることを述べている。佐藤は、この特徴が森尾他⁹⁾の研究で指摘されているダイレイタンスーの特徴と同じであると述べている。なお、これらの研究より前に大嶋・渡辺¹¹⁾は

模型振動実験によって、地下水で飽和されていない地盤に強い水平動が作用すると、地盤のダイレイタンスにより水平動の2倍の周波数を有する上下動が発生することを指摘している。

本研究では、森尾他⁹⁾及び佐藤¹⁰⁾の研究結果を踏まえ2018年北海道胆振東部地震(Mj6.7)の震源近傍で鉛直アレイが組まれているKiK-netの観測記録を用いて、強震時における上下動に着目し、表層地盤増幅特性について検討した。

2018年北海道胆振東部地震における震源近傍で観測された強震動については、先述の佐藤¹⁰⁾の検討の中でも対象とされているが、時刻歴の全区間を対象として分析を

行っている。一方、本研究では観測記録の時刻歴をP波群とS波群に分離して、既往研究とは異なる切り口から分析を行い、考察を加えている。

2. 地震観測の概要

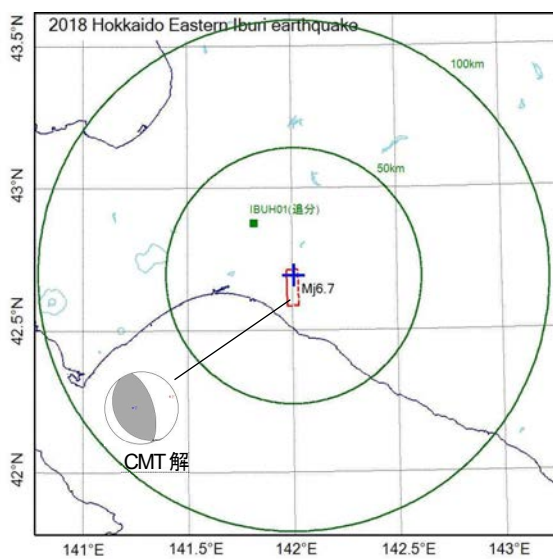
2018年北海道胆振東部地震の震源断層と本論で対象としたKiK-net追分(IBUH01)観測点の位置関係を図-1(1)に示す。断層最短距離は27kmである。

対象観測点は同地震の震源近傍で強震記録が得られていることから選定した。また、以降の検討で使用した観測記録を含めた全ての震央分布図を図-1(2)に示す。防災科学技術研究所から公開されている対象観測地点の速度構造及び土質柱状図は図-2に示す通りである。また、各観測地点における地中地震計の設置方位誤差の推定値は表-1に示す通りである。表より、地中地震計の設置方位誤差は±1°の範囲内にあり、設置方位誤差の影響は極めて微小と考えられる。従って、以降の検討では、地中地震計の方位については特に補正を行っていない。

3. 強震記録に見られる表層地盤増幅特性の非線形性

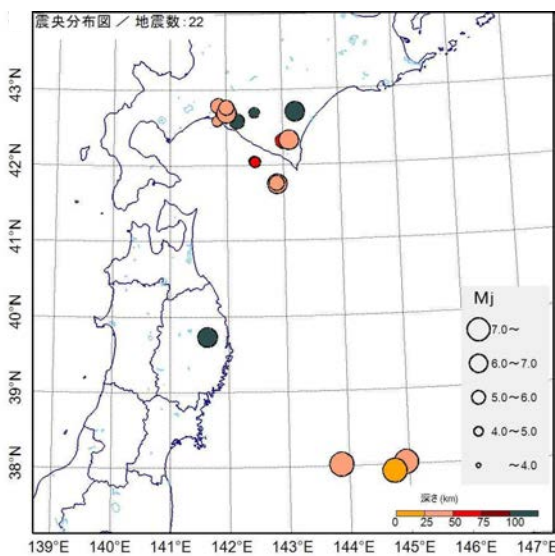
(1) 時刻歴データの処理

本研究で対象とした観測点において、強震動として取り扱った2018年北海道胆振東部地震の観測記録の最大



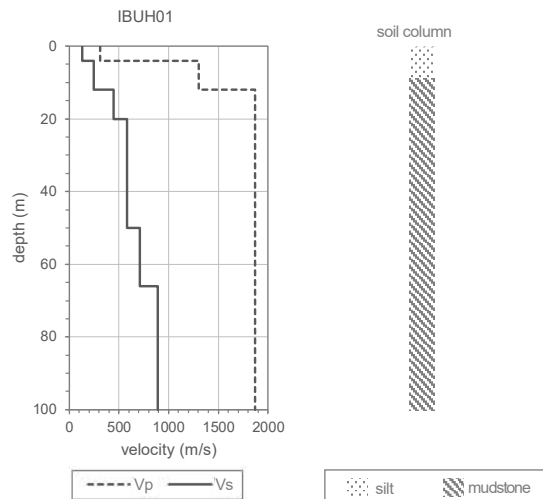
※断層モデルは国土地理院(2018), CMT解は気象庁

(1)2018年北海道胆振東部地震の震源断層と対象観測点の分布



(2)震央分布図

図-1 検討対象地震と観測点



(1)速度構造

(2)柱状図

図-2 観測地点の速度構造と土質柱状図

表-1 地中地震計設置方位推定結果

station	azimuth error (deg)	depth (m)	remark
IBUH01	1	101	

出典：防災科学技術研究所 H-net 地中地震計設置方位

表-2 各対象観測点における強震記録の最大値

		(unit:cm/s ²)
direction		IBUH01
ground surface	NS	1317
	EW	929
	UD	1060
	vector sum	1505
ground burial	NS	182
	EW	255
	UD	84

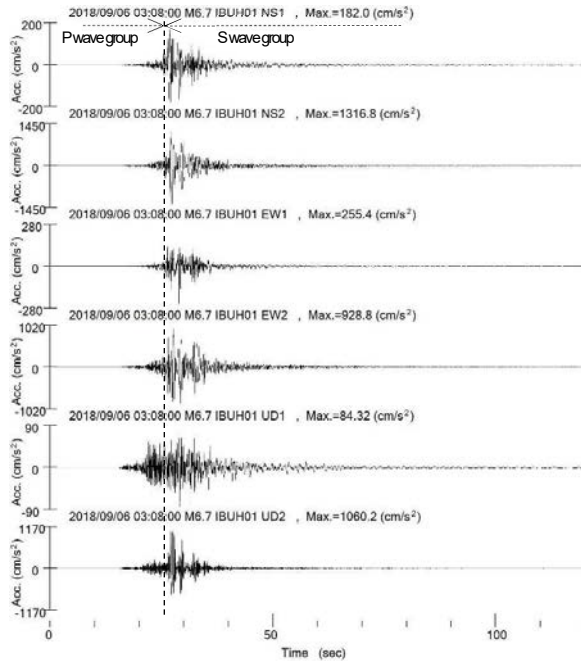


図-3 2018年北海道胆振東部地震におけるIBUH01(追分)の加速度時刻歴

値を表-2に示す。地表加速度記録の3成分ベクトル合成値が1000cm/s²以上と極めて大振幅の加速度記録が得られている。また、地中記録に対して地表記録は明確に増幅している様子が確認できる。

IBUH01(追分)地点の加速度時刻歴を図-3に示す。本研究では、図-3に示す通りP波が主となる初動部とS波到達後の波群とを分離して分析を行った。以降で使用する全ての強震動及び弱震動の時刻歴データについて同様の処理を施して分析を行った。

(2) 水平動の増幅特性

はじめにS波群の水平動に着目して、評価対象観測地点の弱震動と強震動について表層地盤における増幅特性について検討した。

図-4(1)には2018年北海道胆振東部地震の発生以前に観測された地表最大加速度100cm/s²以下の弱震動について、IBUH01(追分)地点における水平動のS波群の地中記録に対する地表記録の幾何平均フーリエスペクトル比を示す。ここで、はじめにフーリエスペクトルを0.2Hz

のParzen windowで平滑化した後に、地中記録に対する地表記録の比を算定している。対象とした弱震動記録は図-1に示したうちの19地震である。理論伝達関数は図-2の速度構造を用いて1次元波動伝播理論で算定した結果である。両者は良く一致しており、弱震動については弾性波動論で表現できることを表している。なお、地盤の密度については周辺K-NET地点の地盤調査結果から速度の近い地層の値を用いた。同図(2)には、2018年北海道胆振東部地震の強震記録のフーリエスペクトル比との比較を示している。ここで、フーリエスペクトルを0.5HzのParzen windowで平滑化した後に比を算定している。強震記録のフーリエスペクトル比は卓越周波数が低周波数側に移動し、高周波成分が減衰しており、表層地盤増幅特性の非線形性の典型的な特徴が認められる。以降の検討におけるフーリエスペクトル比の算定方法は同様とした。

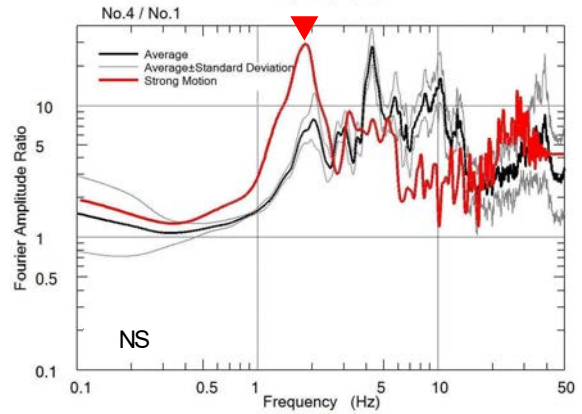
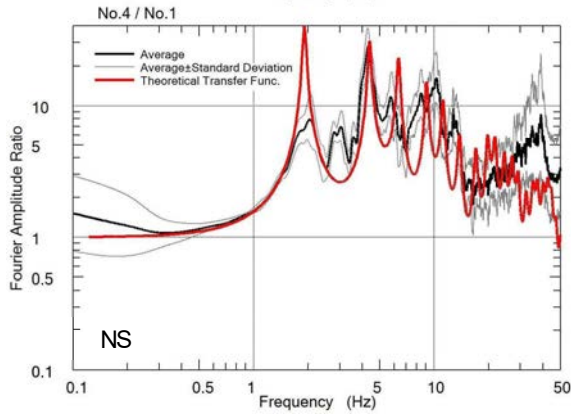
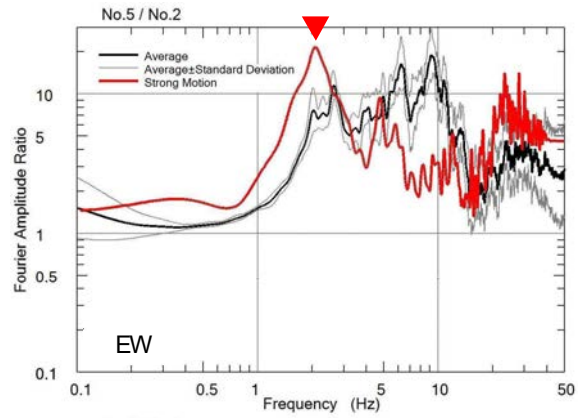
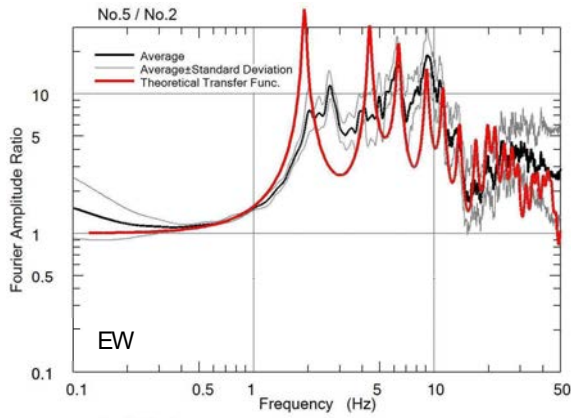
(3) 上下動の増幅特性

図-5(1)には、地表最大加速度100cm/s²以下の弱震動について、IBUH01(追分)地点におけるUD成分の幾何平均フーリエスペクトル比を示す。図にはPS検層結果のV_p構造からP波の鉛直入射を仮定した理論伝達関数も示している。両者は良く一致しており、弱震動については弾性波動論で表現できることを表している。

図-5(2)には強震動記録として2018年北海道胆振東部地震の強震記録のフーリエスペクトル比との比較を示す。はじめにP波群に着目すると、強震動のP波群の地表最大加速度は252cm/s²と十分大きな値であるものの、両者は良く一致しており、水平動とは異なる傾向を示している。次に、S波群上下動観測値の弱震動と強震動とのフーリエスペクトル比の比較では、10Hz以上の高周波数側は一致しているものの、低周波数側では強震動の場合に大きなピークが4Hz付近(図中の▼)に見られ、P波群の場合とは大きく異なる。水平強震動の1次卓越周波数が2Hz付近(図中の▼)であり、ダイレイタンスーにより水平動の2倍の周波数の上下動が発生するという既往研究の指摘⁹⁾と整合している。これは、大振幅の水平動が上下動の増幅特性に関与している可能性を示唆している。

(4) 増幅特性と地震動強さとの関係

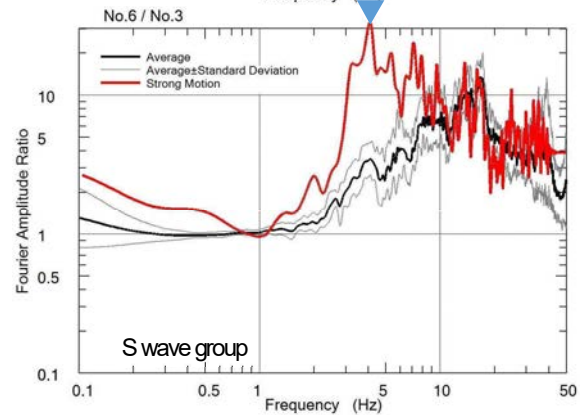
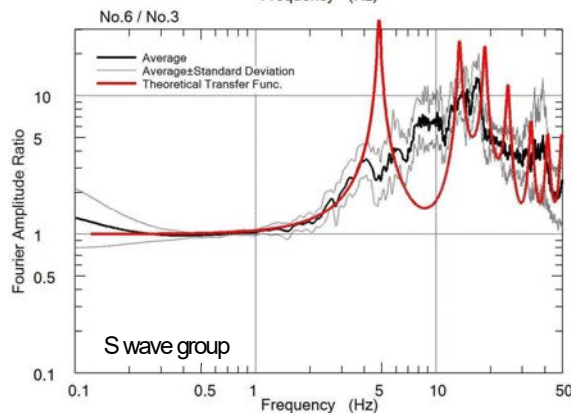
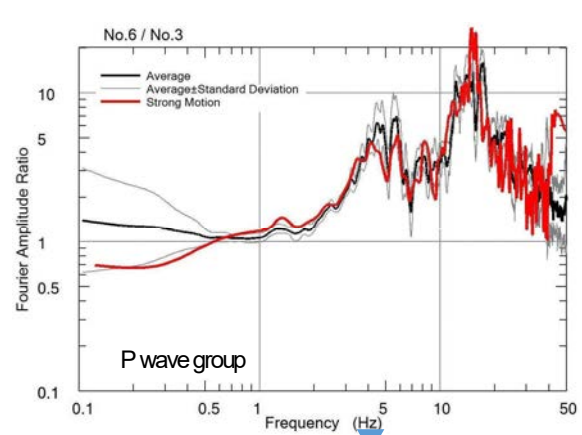
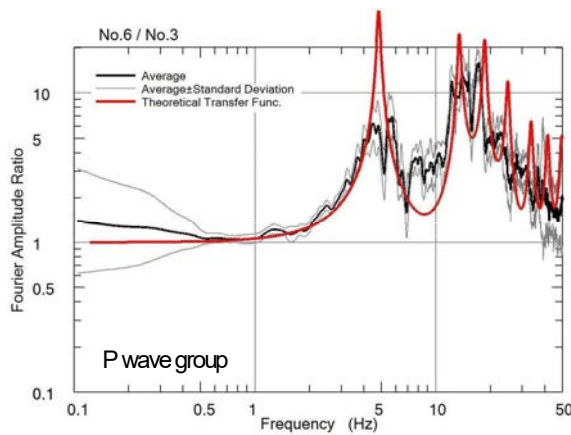
評価対象地点におけるS波群の表層地盤増幅特性と地表の地震動強さとの関係を図-6に示す。ここで、横軸は地表記録の全区間(P波群+S波群)から算定した計測震度及び3成分ベクトル合成加速度の最大値である。縦軸は、地中記録に対する地表記録のフーリエスペクトル比の1次卓越周波数、1次卓越周波数における増幅率(以降、1次増幅率と称する)、水平動の1次卓越



(1)理論伝達関数と弱震動平均値との比較

(2)強震動 (2018年胆振東部地震) と弱震動平均値との比較

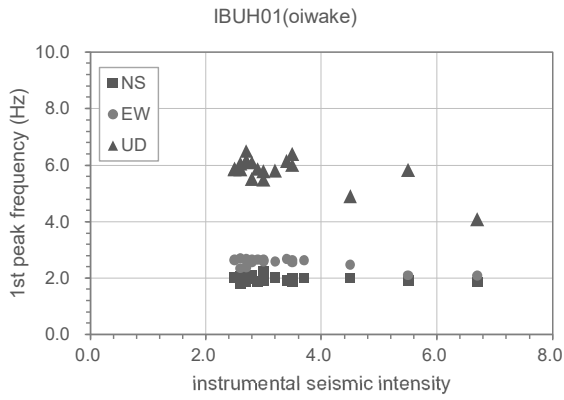
図-4 IBUH01 (追分) 地点における S波群観測記録 NS・EW 成分のフーリエスペクトル比



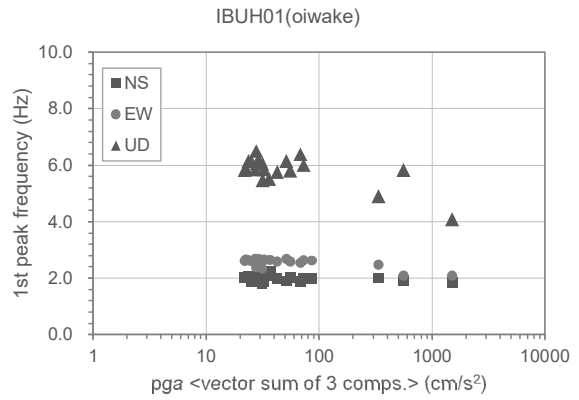
(1)理論伝達関数と弱震動平均値との比較

(2)強震動 (2018年胆振東部地震) と弱震動平均値との比較

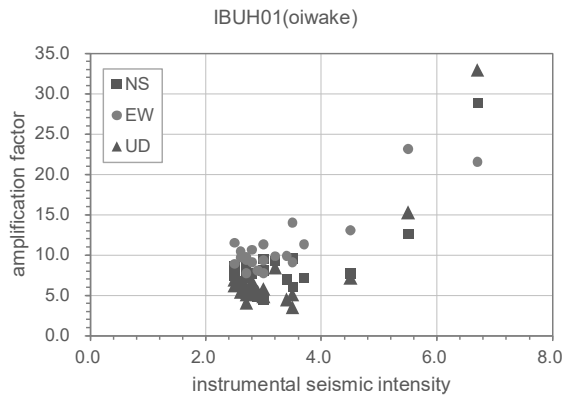
図-5 IBUH01 (追分) 地点における UD成分のフーリエスペクトル比



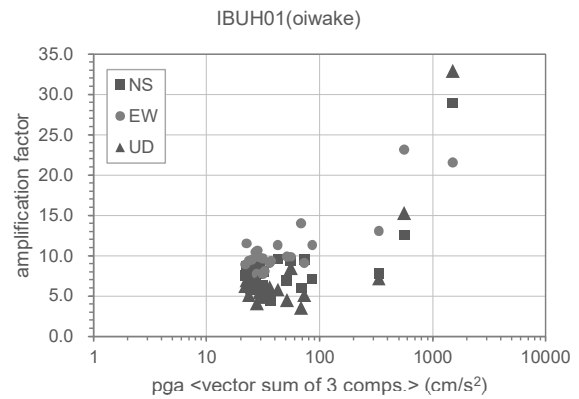
(1) 計測震度と1次卓越周波数



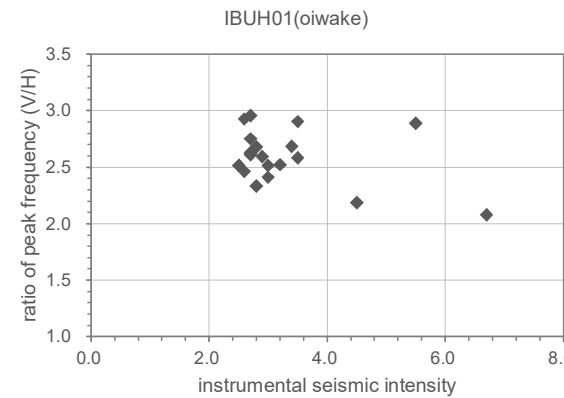
(4) ベクトル合成 PGA と1次卓越周波数



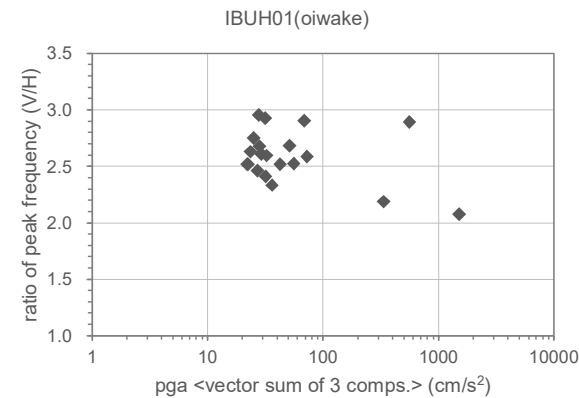
(2) 計測震度と1次増幅率



(5) ベクトル合成 PGA と1次増幅率



(3) 計測震度と卓越周波数比率



(6) ベクトル合成 PGA と卓越周波数比率

図-6 BUH01 (追分) 地点のS波群表層地盤増幅特性と地震動強さとの関係

周波数 (NS と EW の平均値) に対する上下動の1次卓越周波数の比率 (以降、卓越周波数比率と称する) である。なお、これらのパラメータを算出する際には、全記録のフーリエスペクトルの平滑化バンド幅を 0.5Hz で統一している。

更に、ここまで強震動記録として取り扱ってきた2018年北海道胆振東部地震に加えて、2017年7月1日石狩平野の地震 (Mj5.1) 及び2019年2月21日石狩平野の地震 (Mj5.8) を強震動記録として追加している。但し、最大の地震動強さを生じているのは2018年北海道胆振東

部地震の記録である。

図-6の全体的傾向として、地震動強さとして計測震度を用いた場合とベクトル合成最大加速度を用いた場合とで傾向に殆ど差異は認められない。

次に1次卓越周波数に着目すると、水平成分については地震動強さが增大しても1次卓越周波数はさほど変動しない。しかし、地震動強さが增大するにつれて上下成分が減少する傾向が明確認められる。

1次増幅率については、地震動強さが增大するにつれて全成分が増大する傾向が見られる。

最後に卓越周波数比率に着目すると、地震動強さが増大すると卓越周波数比率が徐々に低下して 2.0 に近接する傾向が見られる。

以上より地表の計測震度が 5.0 以上、または、3 成分ベクトル合成加速度の最大値で 500cm/s^2 の強震時に弱震動時と異なる傾向が見られることが分かった。

5. まとめ

本研究は、2018 年北海道胆振東部地震における強震記録にの上下動に着目し、表層地盤増幅特性について検討した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- ・ 強震動記録と弱震動記録との比較により、上下動の表層地盤増幅特性について P 波群と S 波群とで異なることが分かった。
- ・ IBUH01 (追分) においては S 波群の強震時表層地盤増幅特性が弱震時と比較して大きく変動することが分かった。卓越周波数比率 (上下動の 1 次卓越周波数 / 水平動の 1 次卓越周波数) が約 2 倍になる。これは、既往の研究で指摘されている通り地盤のダイレイタンスより水平動の 2 倍の周波数の上下動が発生しているものと推察される。
- ・ IBUH01 (追分) の S 波群表層地盤増幅特性については、地表の地震動強さが増大するに従って上下動及び水平動の 1 次増幅率が共に増大する現象が確認された。

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) , <https://www.doi.org/10.17598/NIED.0004> のデータを、震源情報には気象庁の地震月報 (カタログ編) を、震源断層モデルは国土院の「平成 30 年北海道胆振東部地震の震源断層モデル (暫定)」を使用させて頂きました。ここに記して謝意を表します。

REFERENCES

- 1) 青井真, 功刀卓, 藤原広行, 森川信之, 鈴木亘: 2008 年岩手・宮城内陸地震の地震動の特徴—非対称な地震動とトランポリン効果—, 防災科学技術研究所 主要災害調査, 第 43 号, pp.19-29, 2010. [Aoi, S., Kunugi, T., Fujiwara, H., Morikawa, N. and Suzuki, W.: Strong motions of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake – Asymmetric ground motion and trampoline effect -, *NIED Natural Disaster Research Report*, No.43, pp.19-29, 2010.]
- 2) 功刀卓, 青井真, 鈴木亘, 中村洋光, 森川信之, 藤原広行: 2011 年東北地方太平洋沖地震の強震動, 防災科学技術研究所 主要災害調査, 第 48 号, pp.63-72, 2012. [Kunugi, T., Aoi, S., Suzuki, W., Nakamura, H., Morikawa, N. and Fujiwara, H.: Strong motions of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *NIED Natural Disaster Research Report*, No.48, pp. 63-72, 2012.]
- 3) 張富明: 水平動と上下動を受けるピロティ建物の地震応答及び崩壊性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.495-500, 1997. [Zhang, F.: Seismic response and collapse properties of piloti buildings subjected to horizontal and vertical motions, *Annual Proceedings of Concrete Engineering*, Vol.19, No.2, pp.495-500, 1997.]
- 4) 藤原悌三, 喩徳明: 立体構造物の上下動地震応答と耐震設計, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 449 号, pp.93-102, 1993. [Fujiwara, T. and Yu, D.-M.: Vertical responses and aseismic design of space structures, *Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ)*, No.449, pp.93-102, 1993.]
- 5) 本郷貴之, 佐藤大樹, 北村春幸: 地震動観測記録を用いた超高層・中高層免振建物の水平・上下応答解析に基づく積層ゴムの軸力評価, 日本建築学会技術報告集, 第 20 巻, 第 46 号, pp.905-910., 2014. [Hongo, T., Sato, D. and Kitamura, H.: Evaluation of the axial force of the rubber bearings based on horizontal and vertical response analysis of the high-rise and the middle isolated buildings using the observation earthquake records, *AIJ Journal of Technology and Design*, Vol.20, No.46, pp.905-910, 2014.]
- 6) Tsai, C.-C. and Liu, H.-W.: Amplification behavior of vertical motion observed from downhole arrays, *Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 24, 2017.
- 7) Tsai, C.-C. and Liu, H.-W.: Site response analysis of vertical ground motion in condition of soil nonlinearity, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.102, pp.124-136, 2017.
- 8) Shi, Y., Wang, S.-Y., Cheng, K. and Miao, Y.: In situ characterization of nonlinear soil behavior of vertical ground motion using KiK-net data, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol.18, issue 10, pp.4605-4627, 2020.
- 9) 森尾敏, 加登文学, 藤井照久: 2 つの地震観測地点での大加速度記録に関する地盤の弾塑性論的考察, 日本地震工学会論文集, 第 17 巻, 第 4 号, pp.30-49, 2017. [Morio, S., Kato, Y. and Fujii, T.: Elasto-plasticity condition of the ground on the large acceleration time histories at two earthquake observation sited, *Journal of JAEE*, Vol.17, No.4, pp.30-49, 2017.]
- 10) 佐藤智美: 地表の地震記録に基づく上下動の地盤増幅特性の非線形性の識別に関する研究, 日本地震工学会論文集, 第 20 巻, 第 2 号, pp.17-35, 2020. [Sato, T.: Study on identification of nonlinear site responses of vertical motions using strong motion records observed at the ground surface, *Journal of JAEE*, Vol.20, No.2, pp.17-35, 2020.]
- 11) 大嶋義隆, 渡辺啓行: 3 次元地中構造物の弾塑性動的相互作用に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.489/I-27, pp.261-268, 1994. [Ohshima, Y. and Watanabe, H.: An experimental study on elasto-plastic dynamic interaction of 3-D underground structure and soil, *Journal of JSCE*, No.489/I-27, pp.261-268, 1994.]

GROUND AMPLIFICATION CHARACTERISTICS FOCUSING ON VERTICAL MOTIONS DURING STRONG EARTHQUAKES

Tetsushi KURITA

Regarding the ground amplification characteristics, vertical motions tend to be less attention as horizontal motions. This is because many structures have been designed mainly considering horizontal motion. However, it is expected that the number of situations in which vertical motions should be adequately considered will increase, since seismic records with large PGA have been measured in recent years. In this study, the strong motion records of the 2018 Hokkaido Eastern Iwate earthquake were focused on and the surface ground amplification characteristics of vertical motions was examined. By comparing the strong and weak ground motion records observed at KiK-net station IBUH01(Oiwake), it was shown that the surface ground amplification characteristics of vertical motions differ between the P wave group and the S wave group. In particular, it was found that strong motions show different amplification characteristics from weak motions.