

# 柏崎中心市街地における地震動の表層地盤増幅に関する 地震応答解析を用いた検討

田村 良一\*

(令和 3 年 11 月 30 日受理)

## Analytical Study of Amplification of Earthquake Motion in Surface Layer at Central City in Kashiwazaki

Ryoichi TAMURA\*

The central city in Kashiwazaki suffered severe building damage by the 2007 Niigata-ken Chuetsu-oki Earthquake. This study has examined amplification of seismic motion in surface layer at this area by earthquake response analysis. Seismic response analysis was performed by using the estimated outcrop waves of the alluvial basement layer (Nishiyama Formation) and the analysis model of surface layer at K-net Kashiwazaki located in the central area of Kashiwazaki.

Amplification of seismic motion at surface layer was estimated by using the amplification rate of ground surface to the bottom of surface layer. For relatively weak seismic motion (the 2007 Noto-Hanto Earthquake), the amplification rate of about 2 to 3 in the primary predominant period(1-1.5s) and about 3 to 4 in the secondary predominant period(around 0.4s) were estimated. this primary predominant period is consistent with the amplified period estimated by microtremor measurement. For strong seismic motion (the 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake), the amplification rate was estimated about 2 to 3 in the primary predominant period, The primary predominant period was 1.5 to 2 times longer than the above value due to the influence of non-linearity of the ground soil. Amplification in the secondary predominant period was almost not observed from the response of this earthquake motion .

Key words: Surface layer , Amplification , Earthquake response analysis , Chuetsu-oki earthquake

### 1. はじめに

2007 年 7 月 16 日 10 時 13 分頃に発生した新潟県中越沖地震(M6.8)は、新潟県中越沖を震源とし震源に近い柏崎市、刈羽村等では震度 6 強を観測した。この地震により柏崎市では、建物倒壊の下敷きになるなどによる人的被害を受ける一方、建築、土木構造物においても多くの被害を受けた。このような中、古くからの市街地であった柏崎市中心部では建物の被害、地盤の被害が集中する傾向が見られた<sup>[1]</sup>。この中心市街地の表層地盤には、砂

---

\* 工学科(建築都市学系)教授  
Professor, Field of Architecture and Urban Engineering, Department of Engineering

丘層の下に厚い沖積層を見ることができる<sup>例えば[2], [3]</sup>. 本論は, この沖積層による地震動増幅が地表面の地震動に及ぼす影響について, 地震応答解析を行うことにより検討する. 検討は, 中心市街地内の地震観測点 K-net 柏崎(NIG018)<sup>[13]</sup>を評価対象地点とし, 地震観測記録を参考としながら進める. 評価対象地点の表層地盤の基底面は GL-60m程度と推定されるが, このような厚い軟質な沖積層を有する地点での検討は稀であると考えられ, 増幅特性を地震観測記録との比較を交えて検討しておくことは重要と考える.

また, 本論は, 後述するように評価対象地点から約 8km 離れた位置で評価した入力地震動, 入手可能であった地盤データを用いた解析モデル, 利用可能である解析プログラムを用いて実施しているものであり, 地震観測記録の詳細なシミュレーションを目的としたものではない.

## 2. 中心市街地の地盤構成と観測地震動記録

### 2.1 中心市街地の表層地盤

中心市街地位置のイメージは Fig.1 に示すが, 2007 年中越沖地震で建物被害の大きかった区域として日本建築学会が悉皆調査を行った地域<sup>[1], [7]</sup> (西本町, 東本町, 中央町, 諏訪町等)を主な対象としている. この区域は柏崎平野南西部の海岸近くに位置しており, 沖積層基底層の上に N 値 10 程度を含む軟弱な沖積層の粘性土(Ac)が厚く堆積し, 40~50m に達している. Fig.2 は評価対象地点である K-net 柏崎(NIG018)の地盤図<sup>[13]</sup>であるが, 地表面から 13m 程度は新規砂丘(荒浜砂丘)に覆われており, それ以深は本論で対象としている沖積層である粘性土となっている. 文献<sup>[13]</sup>の情報は GL-20m までであるので, その以深は周辺近傍地点における資料<sup>[3]</sup>から推定する. Fig.3 の柱状図は Fig.1 に示す 17-1, 17-2 地点のものである. K-net 柏崎(NIG018)近傍 17-1 の柱状図に見られるように粘性土(Ac)を中心とした沖積層が続き, T 層(新第三紀の西山層)に至っているものと考えられる.

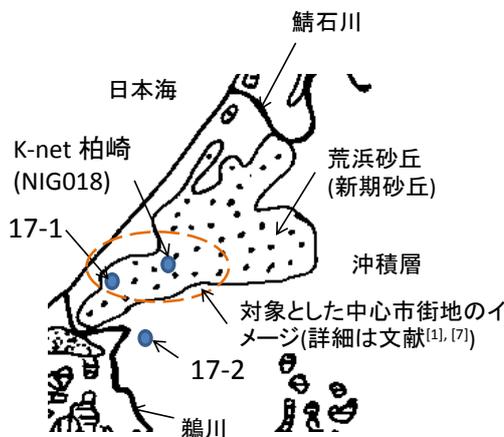


Fig.1 Soil Layout of Kashiwazaki City

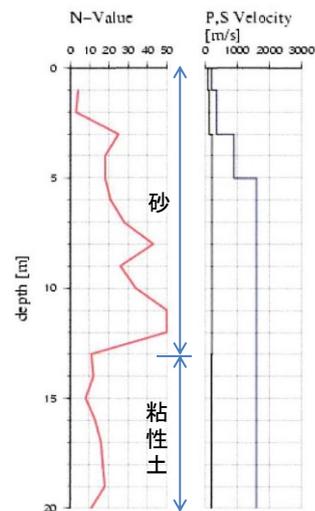


Fig.2 Soil Cross Section of NIG018<sup>[3]</sup>

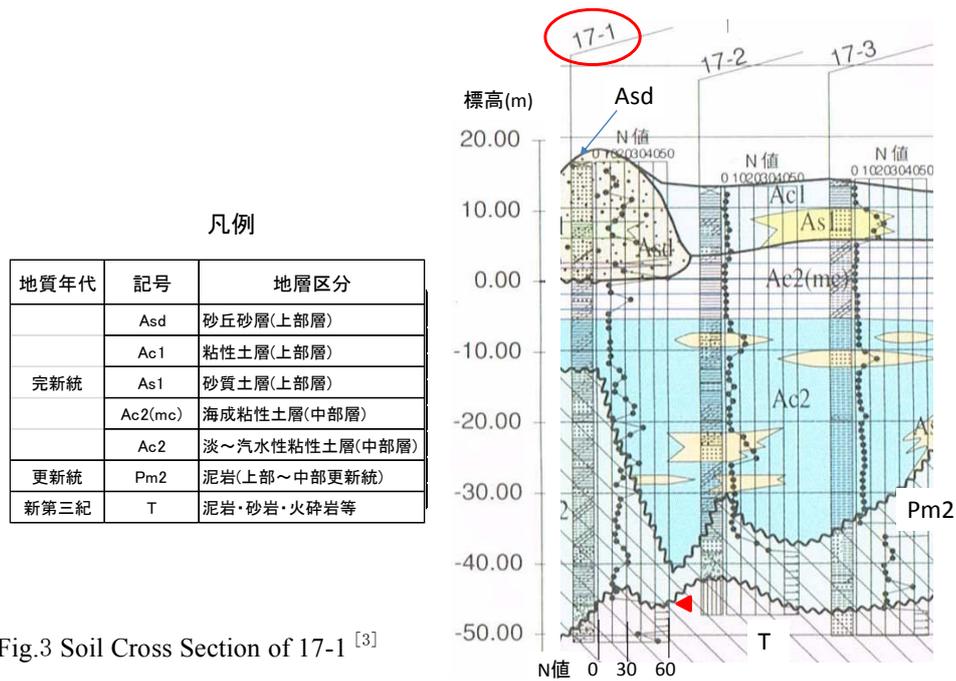


Fig.3 Soil Cross Section of 17-1 [3]

## 2.2 中心市街地での観測地震動

評価対象地点である K-net 柏崎 (NIG018) の位置は Fig.1 に示すが、旧柏崎市役所駐車場脇である。地震観測されている記録は地表面におけるものである。検討対象とした地震の諸元は Table 1 に示すが、2007 年能登半島地震の本震、2007 年中越沖地震の本震を対象とする。K-net 柏崎 (NIG018) での観測記録の水平方向 (NS, EW) の最大加速度、最大速度を Table 2 に、NS または EW 方向どちらかの加速度時刻歴を Fig.4 に、速度応答スペクトルを Fig.5 に示す。最大加速度(最大速度)は NS, EW 方向の順に、能登半島地震で 23(3), 23cm/s<sup>2</sup>(3cm/s), 中越沖地震で 667(130), 514cm/s<sup>2</sup>(85cm/s) である。速度応答スペクトルにおいては、能登半島地震で周期 1~2 秒程度、中越沖地震で周期 2~3 秒程度に比較的大きなピークを見られる。

Table1 List of Earthquakes

	発生日時	M <sub>j</sub>	震源深さ	最大震度
2007年能登半島地震(本震)	2007年3月25日9時41分	6.9	11km	6強
2007年中越沖地震(本震)	2007年7月16日10時13分	6.8	17km	6強

Table2 List of Recorded Max. Acc. And Max. Vel. at NIG018

地震名	2007年能登半島地震(本震)		2007年中越沖地震(本震)	
	NS	EW	NS	EW
最大加速度(cm/s <sup>2</sup> )	23	23	667	514
最大速度(cm/s)	3	3	130	85

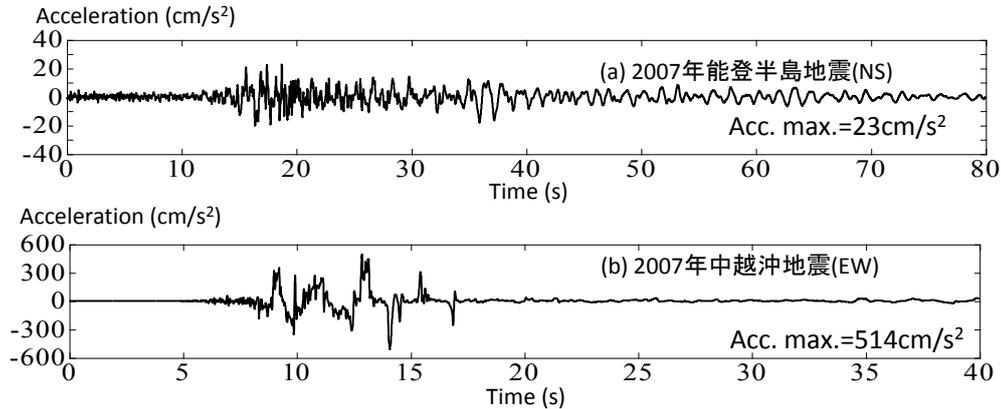


Fig.4 Time History of Recorded Acceleration at NIG018

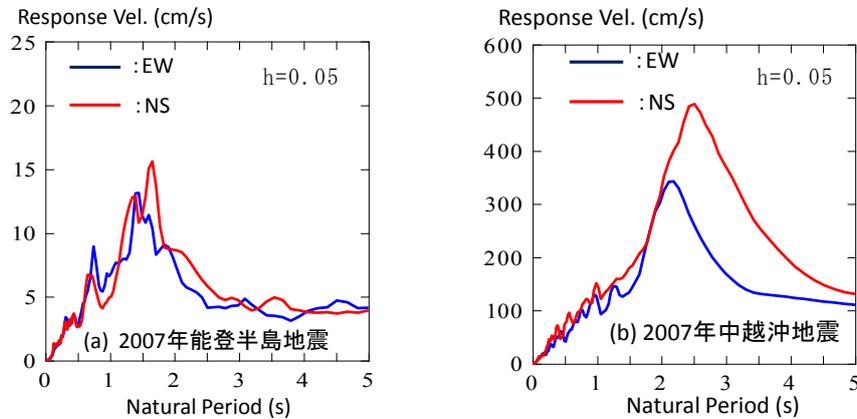


Fig.5 Velocity Response Spectrum at NIG018

### 2.3 2007年中越沖地震におけるK-net 柏崎(NIG018)の観測地震動

2007年中越沖地震本震のK-net 柏崎(NIG018)での観測記録には文献<sup>4)</sup>で、以下のように考察されている。Fig.6のNS方向の加速度波形で述べると、図中のAの部分より波形は長周期化しており、さらにBのような急激な加速度の増加、Cのような加速度がほとんど0の状態が続いているところがある。これらは、液状化が起こったときに観察される波形に似ている。Fig.2の観測点位置の柱状図を見ると、GL-3m以深ではN値20より大きくなっている。地下水位は5m程度であったと想定されるが、これより深いところではN値はさらに大きくなっていく、N値がこんなに大きいところで大規模な液状化が起こるとは考えられない。周辺にも噴砂は確認できなかった。また、K-netのサイトから60m離れたところにある自治体震度計の記録も、ほとんど同じ波形であり、局所的な地盤条件が影響しているわけではなく、この地域全体としての波形が現れていたものと考えられる。このような波形は、乾燥した砂の揺すり込み沈下でも発生するので、揺すり込み沈下が発生していたと考えられる。また、周辺では揺すり込み沈下による地盤の沈下はかなり観察されている。また、Fig.4に示したEW方向の記録においても、12.5秒程度以降に上述のような波形的な特徴を見ることができる。

本論で実施する地震応答解析では設計に用いるような解析プログラム<sup>[16]</sup>を使用するので、液状化や砂の揺すり込み沈下のような現象は対象外であり、再現することは出来ない。

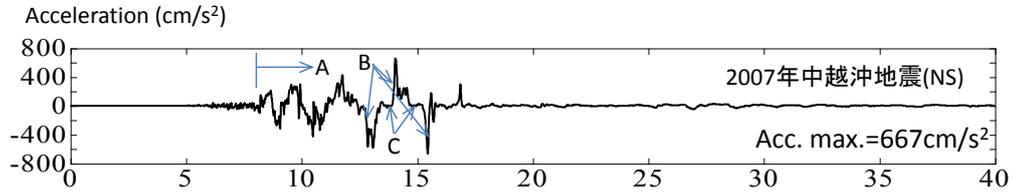


Fig.6 Time History of NS Comp. at NIG018 by 2007 Niigatoken Chuetsu-oki Earthquake

### 3. 露頭基盤地震動の推定

#### 3.1 評価位置と評価方法

文献<sup>[7]</sup>と同様に中心市街地から8km程度離れた東京電力柏崎刈羽原子力発電所におけるサービスホール(Fig.7)での鉛直アレイ地震観測記録<sup>[15]</sup>を用いて、基盤層(西山層)における基盤露頭波(2E)を評価する。サービスホールでは表層付近から深度250mまでの砂層及び泥岩層内の4深度(SG1~SG4)で鉛直アレイ地震観測が実施されている<sup>[15]</sup>。深度250mまでの地盤のS波の速度構造、地質構造、地震計の埋設深度をFig.7に示す。

基盤露頭波の算出方法は文献<sup>[7]</sup>で記述しているので省略するが、今回変更した点について以下に記述する。計算に用いた微小ひずみ時のせん断剛性( $G_0$ )について、文献<sup>[7]</sup>では $V_s$ (せん断波速度)が一定区間(Fig.7)に対して(1)式を用いて同一の値を設定していたが、拘束圧依存性を文献<sup>[10]</sup>に倣って考慮した。 $V_s$ 一定区間の深さ方向中央の位置で(1)式で求められる $G_0$ とし、他の位置では $G_0$ が有効拘束圧( $\sigma'_0$ )の平方根に比例すると仮定して設定した。有効拘束圧( $\sigma'_0$ )は静止土圧係数( $K_0$ )を0.5として計算した。

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (1)$$

文献<sup>[7]</sup>と同様にサービスホールの深度250m(SG4)位置で露頭基盤波(2E)を評価する。

#### 3.2 推定された露頭基盤波

評価された露頭基盤波において2007年能登半島地震のNS方向、2007年中越沖地震のEW方向の加速度時刻歴をFig.8に、速度応答スペクトルをFig.9に示す。ここでは、サービスホール地震計の水平NS、EWの方位は、プラント建屋の向きに合わせており、それぞれ真東、真北から時計周りに約19回転している<sup>[15]</sup>ので、方向に関する補正をした結果を示している。

加速度時刻歴の最大値は図中に示しているが、中越沖地震は能登半島地震の約45倍であり、中越沖地震の波形は一つのパルスの波形によって大きな最大値となっている。中越沖地震の波形にはFig.4に示すK-net 柏崎(NIG018)の地表面の波形と比較して短周期成分

も卓越している様子を見ることができる。速度応答スペクトルでは、能登半島地震で、周期 0.5~1.0 秒程度、1.5~2 秒程度、中越沖地震で、周期 0.5 秒付近、1.0 秒付近、2~3 秒程度にピークが見られる。

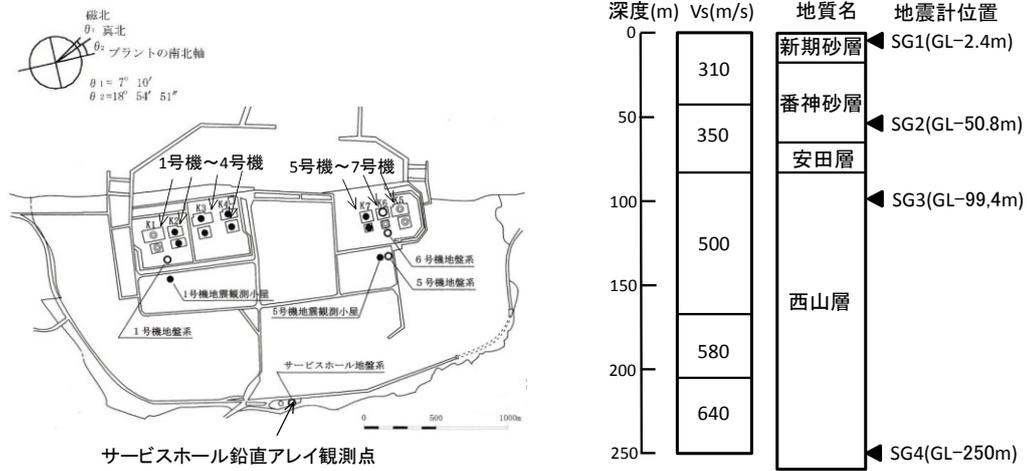


Fig.7 Details of Service Hall Downhole Array Earthquake Observation

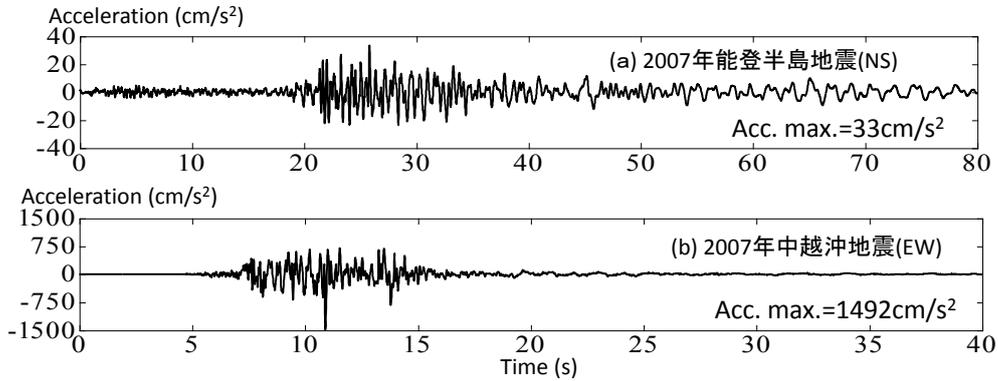


Fig.8 Time History of Computed Earthquake Motions of Bedrock Outcrop

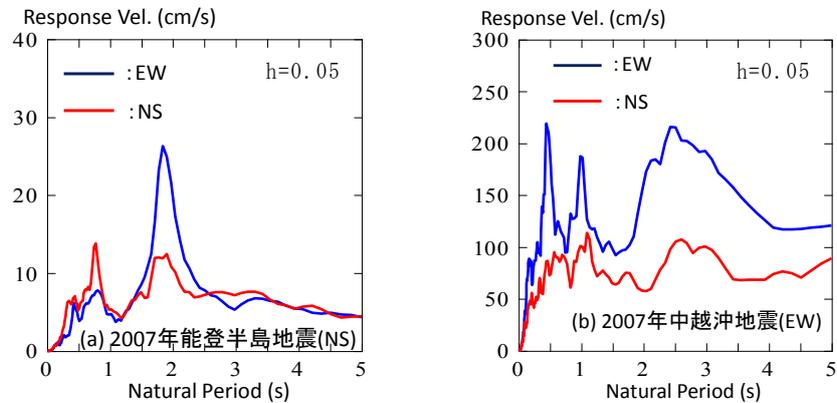


Fig.9 Velocity Response Spectrum by Computed Motions of Bedrock Outcrop

## 4. 地震応答解析を用いた増幅特性検討

### 4.1 解析モデル及び地震応答解析手法

K-net 柏崎 (NIG018) を対象として地盤解析モデルを作成し地震応答解析を実施する。解析モデルは Fig.10 に示ように、表層地盤を対象として平面ひずみ要素<sup>[16]</sup>を用いてせん断土柱モデル作成する。水平成層に 46 層に分割し、水平方向の自由度のみを考慮する。

地層構成は、地表面～GL-20m は Fig.2 に示した K-net 柏崎 (NIG018)、それ以深は Fig.3 に示した 17-1 地点を参考とする。地表面～GL-13m は新期砂層、GL-13m～GL-60m は沖積粘性土層、GL-60m 以深は西山層とし GL-65m までモデル化している。17-1 地点の地盤図 (Fig.3) をみると、標高-20m 程度～-45m 程度までは P<sub>m2</sub> (更新統、泥岩層) と表示されているが、N 値の大きさから判断して沖積粘土層として扱っている。設定した沖積粘土層の基底面は Fig.3 に  で示している。各深度での N 値分布は Fig.11 に示すが、地表面～GL-20 m は K-net 柏崎 (NIG018)、それ以深は 17-1 地点の柱状図 (Fig.3) を目視で読み取っている。

各深度の初期せん断剛性 (G<sub>0</sub>) は (1) 式を用いて算出するが、せん断波速度 (V<sub>s</sub>) は各深度の N 値 (N)、深さ (D) から (2) 式<sup>[5]</sup>を用いて算出する。

$$V_{si} = 68.78 N^{0.171} D^{0.199} F_1 F_2 \quad (2)$$

ここで、i は水平成層地盤の層番号、F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub> は土質と地質年代による係数を示す。地盤の非線形性特性は H-D モデルとし (3)、(4) 式<sup>[5], [11]</sup>を用いて設定する。

$$G/G_0 = \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_{0.5}} \quad (3) \quad h = h_{\max} (1 - G/G_0) \quad (4)$$

ここで、 $\gamma$  はせん断ひずみ、 $\gamma_{0.5}$  は基準ひずみ、G はせん断剛性、G/G<sub>0</sub> はせん断剛性低下率である。h は減衰定数、h<sub>max</sub> は最大減衰定数である。(3)、(4) 式において G/G<sub>0</sub>、h は、 $\gamma_{0.5}$ 、h<sub>max</sub> を用いて表現されているが、この 2 つのパラメータは柏崎刈羽原子力発電所における文献<sup>[12]</sup> を参考として設定している (Table3)。粘性土 (沖積層) に対応する値は文献<sup>[12]</sup> において安田層に対する値で代用している。各地層に設定した密度、ポアソン比も Table4 に示すが文献<sup>[12]</sup> を参考に設定している。

粘性減衰は Rayleigh 型として 0.5 と 5Hz で減衰定数 2% を設定し、GL-65m 位置 (西山層) に 3 章で評価した露頭基盤波 (2E) を設定し、時刻歴地震応答解析を実施する。

また、地盤モデルにおいて、地層及び N 値の変化に着目して Fig.10 に示す PO-1 (地表面)、PO-2 (GL-13m)、PO-3 (GL-29m)、PO-4 (GL-48m)、PO-5 (GL-60m) の計 5 地点を設定し、増幅特性について検討する。PO-5 (GL-60m) は表層地盤の基底面位置である。

### 4.2 地表面における解析結果と観測結果との比較

地表面 (PO-1) における解析結果を K-net 柏崎 (NIG018) の観測記録と比較する。2007 年能

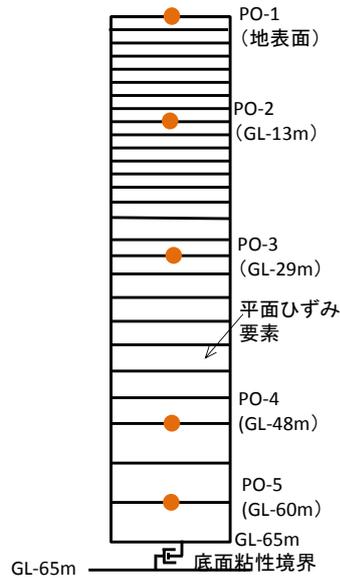


Fig.10 Analysis Model

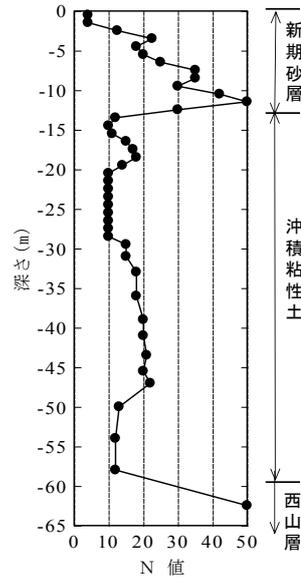


Fig.11 N-value Distribution

Table3 Parameters of Nonlinear Computation

地層名	$\gamma_{0.5}$	$h_{max}$
新規砂層	$4.3 \times 10^{-4}$	0.31
粘性土(沖積層)	$1.4 \times 10^{-3}$	0.2
西山層	$5 \times 10^{-3}$	0.26

注)  $\gamma_{0.5}$ : 基準ひずみ、 $h_{max}$ : 最大減衰定数

Table4 Characteristic Values of Soil

地層名	密度( $g/cm^3$ )	ポアソン比
新規砂層	1.64	0.33
粘性土(沖積層)	1.78	0.46
西山層	1.73	0.45

登半島地震の NS 方向, 2007 年中越沖地震の EW 方向について示す. 加速度時刻歴を Fig.12 に, 速度応答スペクトルを Fig.13 に示す. 速度応答スペクトルでは観測記録 (Fig. 5) との重ね書きとして示しているが, 時刻歴波形では, 観測と解析の時刻が別々に設定されているので, 重ね書きとすることはできない. 時刻歴の最大値は図中に表示している.

(1) 2007 年能登半島地震

加速度時刻歴の全体的な形状は Fig.4 の観測記録と似ており特徴は捉えているが, 最大加速度は  $38cm/s^2$  であり, 観測記録の  $23cm/s^2$  の 1.6 倍程度となっている. これは, Fig.12 の時刻歴で時刻 20~35 秒程度の振幅が大きくなっていることに見ることができる. 速度応答スペクトルにおいて, 観測記録の周期 1.5 秒付近のピークに対応する解析結果のピークは周期 1.5~2 秒であり幾分相違が見られるが, 両者のピークの大きさは同程度である. しかし, 解析結果の速度応答スペクトルは全体的に観測記録より大きくなっており, 特に, 周期 1 秒以下のピークで, 大きくなっている. 時刻歴波形の時刻 20~35 秒程度にみられた振幅の相違には, 解析結果が比較的短周期成分を多く有しているため, この成分が影響していると考えられる. また, 解析結果に見られる周期 0.5~1 秒程度のピークを生じさせたと考えられる同周期成分は推定露頭基盤波 (Fig.9, NS 方向) にも見られるので, 入力地震動が実際の K-net 柏崎 (NIG018) 直下での地震動と幾分相違があった可能性も考えられる.

(2) 2007 年中越沖地震

Fig.4 の観測記録の時刻歴で 12.5 秒程度以降は、前述の乾燥した砂の揺すり込み沈下の影響が波形に表れていることを考慮して、それ以前の部分を比較する。解析結果の時刻歴には幾分短周期成分が多く見られるが、波形全体としては観測記録と調和的である。最大加速度は  $460\text{cm/s}^2$  と観測結果の  $514\text{cm/s}^2$  より小さいことは、砂の揺すり込み沈下の影響と考えられる急激な鋭いピークが見られないことの影響も含むと考えられる。速度応答スペクトルでは、観測記録は周期 2~2.5 秒付近でピークが見られるが、解析結果は約 2.5 秒であり、幾分長くなっている。しかし、2 つのピークの大きさは同程度である。このピークの周期帯の位置の相違については、2007 年能登半島地震と同様に入力地震動の影響に加え、対象地点の地層構成、地盤物性値等において直接直下のものを使用できていないことが影響している可能性がある。

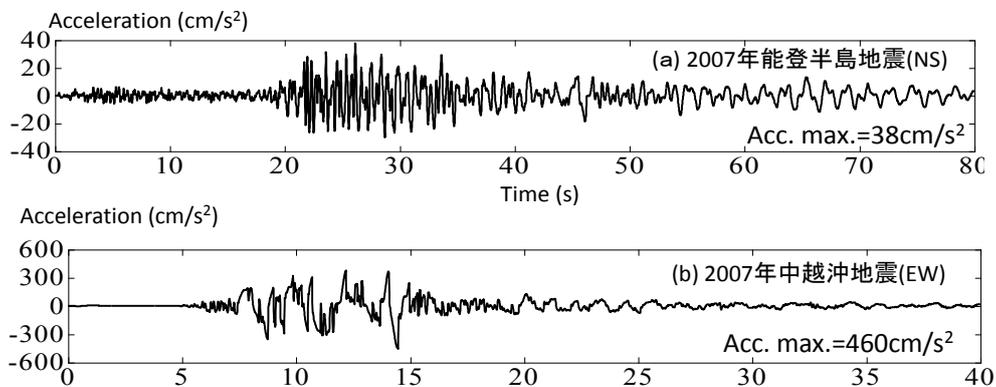


Fig.12 Time History of Computed Earthquake Motions of NIG018

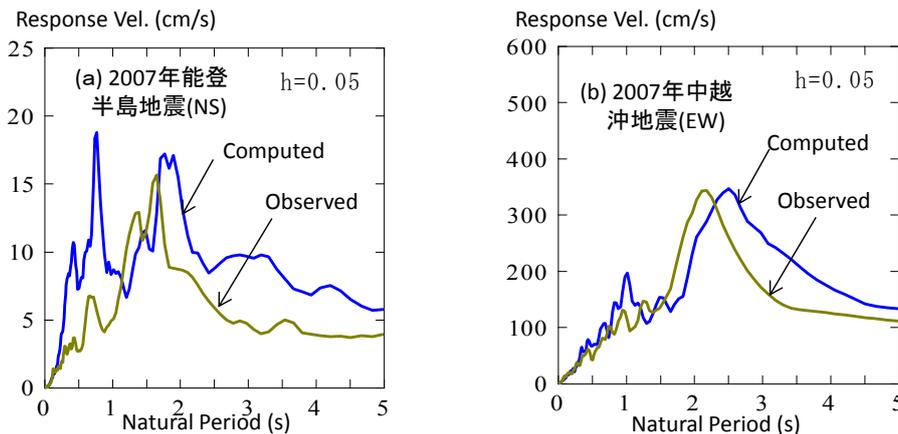


Fig.13 Velocity Response Spectrum by Computed Motions of NIG018

4.3 地震応答解析による地盤増幅特性

地震応答解析結果は 2007 年能登半島地震の NS 方向，2007 年中越沖地震の EW 方向に

ついて結果を示す。一般に、表層地盤には地盤が揺れやすい周期として地盤卓越周期がある。これは S 波が鉛直方向から入射する場合に、Fig.14 に示すような地表面位置で波形の腹となるような波動の周期に相当する。周期の大きい方から 1 次( $T_{g1}$ ), 2 次( $T_{g2}$ ), 3 次( $T_{g3}$ ) であるが、 $T_{g2} = T_{g1}/3$ ,  $T_{g3} = T_{g1}/5$  となる。各次の地盤内での振動形状は Fig.14 に示す。

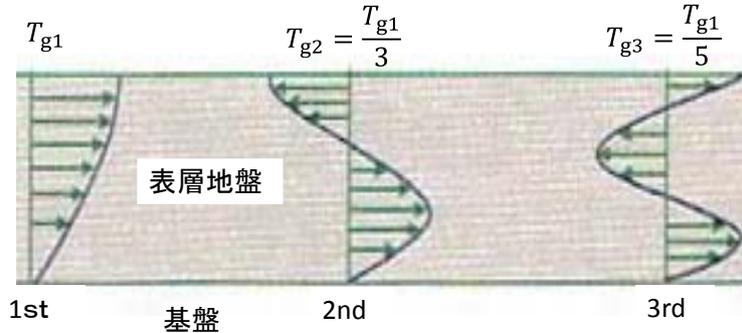


Fig.14 Predominant Period and vibration Shape<sup>[6]</sup>

#### 4.3.1 最大応答値に見られる地盤増幅

深さ方向の最大加速度分布を Fig. 15 に、最大せん断ひずみ度の分布を Fig. 16 に示す。

##### (1) 2007 年能登半島地震

最大加速度分布において、沖積粘性土では特に大きな増大は見られないが、新規砂層で地表面に向かって大きくなる傾向がみられる。これは、後述する 2 次卓越周期の振動成分による影響と考えられる。沖積粘性土の最大ひずみ度の最大値は  $1.6 \times 10^{-4}$  程度であったが、深さ方向にほぼ一樣な大きさとなる傾向が見られる。新規砂層においては、大きな N 値 (大きな剛性) の影響を受けてより小さなひずみ度となる傾向が見られる。また、Table3 の非線形情報から判断して全体的に弾性的な応答性状であったと考えられる。

##### (2) 2007 年中越沖地震

最大加速度分布において、沖積粘性土ではより上方になるに従って小さな値となり、新規砂層で地表面に向かって幾分大きくなる傾向がみられる。

最大ひずみ度は全体的に  $10^{-3} \sim 10^{-2}$  であり、非線形性の影響を大きく受けている。沖積粘性土の最大加速度が上方に向かって小さくなっているのはこの影響と考えられる。沖積粘性土の最大ひずみ度は、深さ方向にほぼ一樣な大きさとなる傾向が見られ、下方部の GL-50m 以深で幾分大きくなっているが、特定の部分に集中する傾向は見られない。新規砂層においては、比較的小さな歪みレベルから非線形性が考慮されている (Table3) ことも影響していると考えられるが、最大ひずみ度は  $10^{-2}$  程度と大きくなっている。

#### 4.3.2 時刻歴及び応答スペクトルに見られる地盤増幅特性

解析結果の PO-1~PO-5 の加速度時刻歴を Fig.17 に、速度応答スペクトルを Fig.18 に、速度応答スペクトルにおける PO-1~PO-4 の PO-5 に対する増幅率 (PO-1/PO-5 ~ PO-4/PO-5) を Fig. 19 に示す。これは、PO-1~PO-4 の基底面 (PO-5) に対する増幅率に相当する。

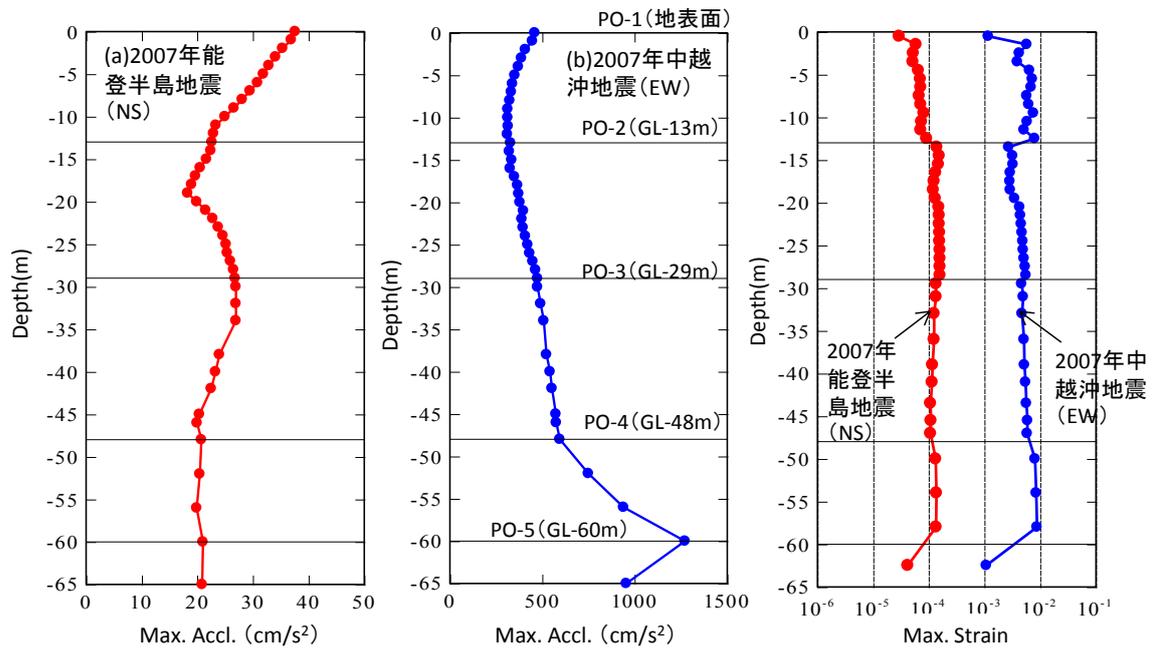


Fig.15 Max. Acceleration by Resp. Analysis Fig.16 Max. strain by Resp. Analysis

(1) 2007年能登半島地震

PO-1～PO-5 の速度応答スペクトルのピーク位置の周期は入力地震動の影響を受けて 0.5～1 秒, 1.5～2 秒程度であるが, Fig.19 の増幅率では, 周期 0.4 秒程度, 1 秒付近, 1～1.5 秒程度にピークを見ることができる. 1～1.5 秒程度のピークは PO-4/PO-5 から PO-1/PO-5 に見ることができ, 上方に向かうに従って増幅率は大きくなっているので 1 次卓越周期により振動形状となっている. この周期帯の地表面での増幅率(PO-1/PO-5)は, 最大で 2.7 である. また, 対象地点の常時微動計測による地盤卓越周期は, 1.3 秒程度<sup>[7]</sup> であったので, 対応しているものと考えられる.

また, 周期 0.4 秒程度のピークは 1 次卓越周期の 1/3 に相当するので 2 次卓越周期であると考えられるが, 地表面での増幅率(PO-1/PO-5)は最大で 3.6 である. Fig. 17 の加速度時刻歴において, PO-2 で短周期成分が比較的少ない波形となっているのは, 2 次卓越周期に対応する振動形状 (Fig. 14) が, PO-2 付近で小さくなっているためと考えられる.

(2) 2007年中越沖地震

Fig.17 の時刻歴において, 上方ほど最大加速度が小さくなり波形において短周期成分の減少する傾向が見られ, 地盤非線形性の影響を大きく受けていることが分かる.

Fig.18 の PO-1～PO-5 の速度応答スペクトルのピーク位置の周期帯は入力地震動の影響を受けて 2.5 秒付近である. Fig.19 の増幅率では, PO-1/PO-5 から PO-4/PO-5 において, 速度応答スペクトルに見られた周期 2.5 秒付近より幾分短い周期 2～2.5 秒程度にピークを見ることができる. この周期帯は PO-4/PO-5 から上方に向かうに従って増幅率は大きくなっており, 1 次卓越周期により振動形状となっている. 1 次卓越周期に相当する周期帯は

地盤非線形性の影響を受けて微振動時の値(1.3秒程度)から1.5~2倍程度伸びていることがわかる。この周期帯の地表面での増幅率(PO-1/PO-5)は、最大で2.4である。

2次卓越周期に相当する周期帯の増幅率(Fig.19)を見ると、対応する位置にピークはほとんど見ることができない。これは、地盤非線形性が大きかったことが影響していると考えられる。

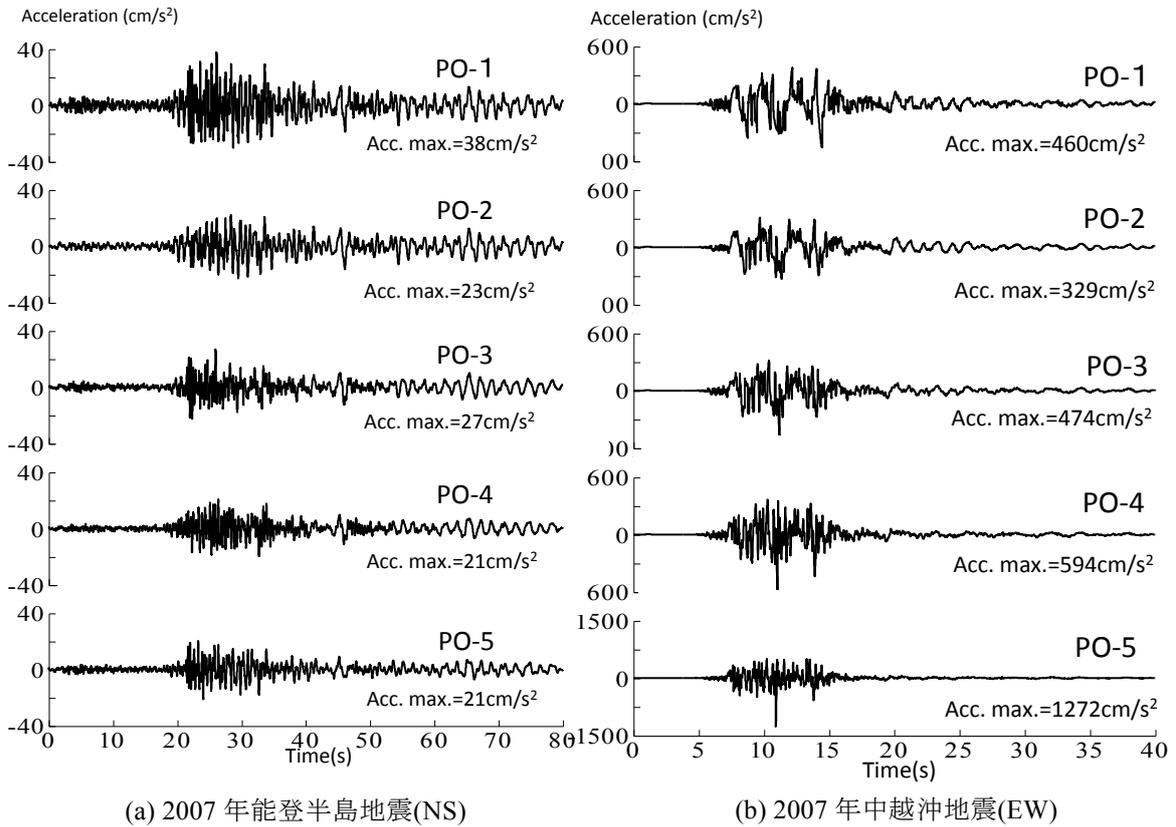


Fig.17 Time History of Computed Earthquake Motions of Surface

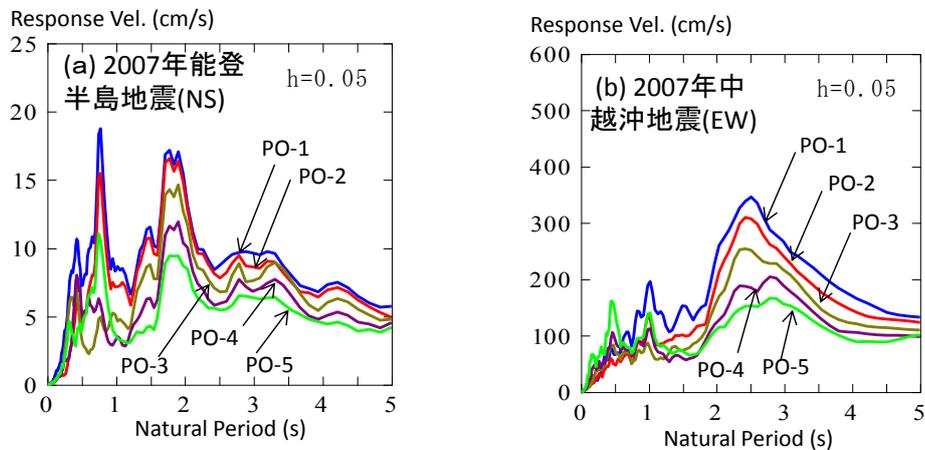


Fig.18 Velocity Response Spectrum by Computed Motions of Surface

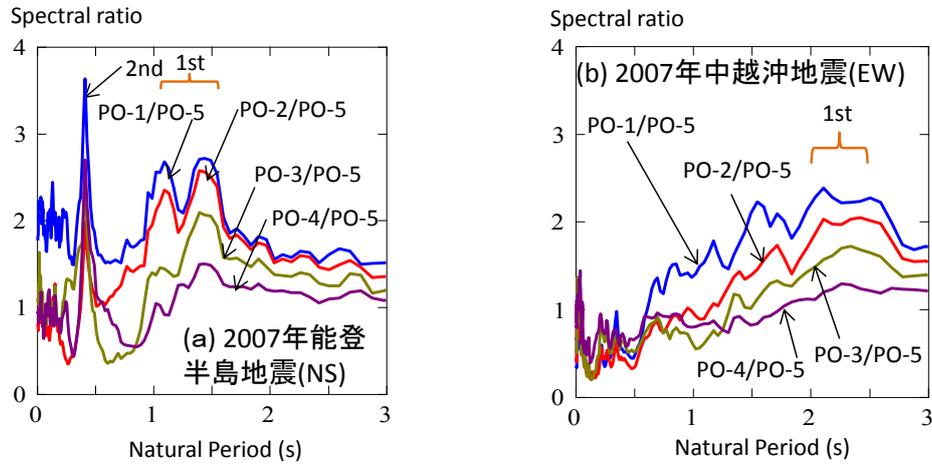


Fig.19 Spectral Ratio of PO-1~PO-4 to PO-5

## 5. まとめ

柏崎中心市街地に位置する地震観測点(K-net 柏崎, NIG018)を対象として, 表層地盤を対象とした地震応答解析を実施した. その結果, 表層地盤の地震動増幅特性について, 得られた知見を以下に示す. 検討は 2007 年能登半島地震, 2007 年中越沖地震を対象として実施した.

(1) 観測された地震動記録(地表面)と解析結果との比較を実施した. 地震応答解析の入力地震動は K-net 柏崎(NIG018)から約 8km 離れた位置の該当する地層(西山層)で評価した推定露頭基盤波を用いた. 解析結果は, 加速度時刻歴, 速度応答スペクトルにおいて, 観測結果(地表面)の概略の特徴を捉えることができていると考えられる.

(2) 地震応答解析結果から表層地盤基底面に対する増幅率等を算出し, 地震動の地盤増幅特性について検討した.

2007 年能登半島地震(NS 方向)では, 地盤の 1 次卓越周期に相当する周期帯で沖積層基底面位置に対する地表面の増幅率は 2~3 程度, 2 次卓越周期に相当する周期帯で増幅率は 3~4 程度であった. 1 次卓越周期は常時微動計測による周期帯と対応していた.

2007 年中越沖地震(EW 方向)では, 1 次卓越周期に相当する周期帯の増幅率は 2~3 程度であった. 1 次卓越周期に相当する周期帯は, 大地震動による地盤の非線形性の影響で前述の常時微動計測による値から 1.5~2 倍程度伸びていた. また, 2 次卓越周期に相当する周期帯における増幅は, ほとんど見られなかった.

(3) 2007 年能登半島地震(NS 方向)の解析結果では, 高層建築物の応答性状と同様に, 高次成分(本論では 2 次)の影響を受けていた. しかし, 観測された地震動(地表面)には解析結果ほど顕著に表れていなかった. 原因として, 入力地震動(露頭基盤波)の評価位置の影響が考えられたが, 他の観測記録による検討も実施し確認していきたい.

(4) 2007 年中越沖地震の観測記録に見られた乾燥した砂の揺すり込み沈下に伴うと考えら

れる加速度の急激なピーク等は、本論では解析プログラムの関係で対象外とした。しかし、急激なピークによる大加速度が建築物等の地震被害に及ぼす影響については、今後検討の必要な課題と考えられる。

## 謝辞

本論文では、防災科学技術研究所 強震観測網(K-net, Kik-net)の観測記録及び東京電力株式会社が公開した地震観測記録を使用させていただきました。

## 文献

### 図書

- [1] 日本建築学会：2007年能登半島地震災害調査報告 2007年新潟県中越沖地震災害調査報告；丸善株式会社，pp.178-356，2010.
- [2] 建設省北陸地方建設局・北陸技術事務所：新潟平野部の地盤図集；1981.
- [3] 新潟県地質調査業協会：新潟県地盤図 新潟県地盤図説明書；2002.
- [4] 吉田望：液状化現象 メカニズムから数値解析まで；森北出版，pp.39-40，2020.
- [5] 日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計；pp.51-57，2006.
- [6] 鈴木猛康，上石勲，橋本隆雄，山本吉道：防災工学；理工図書，p.27，2019.

### 論文

- [7] 田村良一，岩野武尊：柏崎中心市街地における表層地盤と地震動の増幅；新潟工科大学研究紀要，第25号，6-20，2021.03.
- [8] (財)北海道道路管理技術センター：平成19年(2007年)新潟県中越地震 現地調査報告写真集，26，2007年10月.
- [9] 時松幸次，新井洋，蓑和健太郎：柏崎刈羽原子力発電所サービスホールの鉛直アレイ強震記録から推定した地盤非線形性状と基板露頭波；日本建築学会構造系論文集，第73巻，第630号，1273-1280，2008.
- [10] 吉田望：1995年兵庫県南部地震におけるポートアイランドの地震応答解析；土と基礎，40-54，1995年10月.
- [11] Hardin, B.O. and Drnevich, V.P : Shear Modulus and Damping in Soils Design Equations and Curve ; Proc. ASCE, SM7, 667-692, 1972.
- [12] 土方勝一郎，菊地利喜郎，貫井泰他：新潟県中越沖地震における地盤非線形性に着目した柏崎刈羽原子力発電所7号機原子力建屋の応答性状；日本建築学会構造系論文集，第76巻，第660号，319-327，2011.

### 電子文献, その他

- [13] 防災科学技術研究所：強震観測網(K-NET, KiK-NET),  
<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>.
- [14] 防災科学技術研究所 強震観測管理室：K-NET 柏崎(NIG018)に関して，

[https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/chuetsuoki20070716/K-NET\\_Kashiwazaki.pdf](https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/chuetsuoki20070716/K-NET_Kashiwazaki.pdf).

- [15] 東京電力株式会社: 柏崎刈羽原子力発電所における 2007 年新潟県中越沖地震など時刻歴データ, 領布元 震災予防協会 (DVD-R) .
- [16] アーク情報システム: TDAPⅢ(バッチ版) Ver. 3.04 使用手引書, 2012 年 4 月.
- [17] 小長井一男, 末富岩雄他: 2007 年新潟県中越沖地震の被害とその特徴; 土木学会, [http://www.jsce.or.jp/library/eq\\_repo/Vol3/05/report-combined-V6.pdf](http://www.jsce.or.jp/library/eq_repo/Vol3/05/report-combined-V6.pdf).