

2016年鳥取県中部の地震における 非線形地盤応答

野口 竜也¹・西川 隼人²・香川 敬生³・吉田 昌平⁴

¹正会員 鳥取大学大学院工学研究科助教（〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4-101）

E-mail: noguchit@cv.tottori-u.ac.jp

²正会員 舞鶴工業高等専門学校（〒625-8511 京都府舞鶴市宇白屋234）

E-mail: nisikawa@g.maizuru-ct.ac.jp

³正会員 鳥取大学大学院工学研究科教授（〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4-101）

E-mail: kagawa@cv.tottori-u.ac.jp

⁴学生会員 鳥取大学大学院工学研究科（〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4-101）

E-mail: D16T4003B@edu.tottori-u.ac.jp

2016年10月21日に鳥取県中部を震源とするM6.6の地震が発生し、鳥取県中部地域では建物の損壊や道路の地盤沈下などの被害が生じた。この地震では防災科学技術研究所の強震観測点の他、鳥取県内自治体の震度観測点や鳥取大学の臨時観測点などで強震記録が得られている。震源域近傍の2地点の地震記録からは、明瞭な非線形効果による地盤応答がみられた。その他の地点でも非線形地盤応答が認められ、この地震の地震動特性に影響を与えた可能性がある。そこで本研究では、非線形応答の度合いを簡易的に評価する指標を求め、各種地震動の指標や地盤構造との比較を行った。その結果、この地震に伴う非線形地盤応答の特性を把握することができた。

Key Words : *the 2016 mid Tottori prefecture, strong ground motion, nonlinear soil response, DNL, mid Tottori prefecture area*

1. はじめに

2016年10月21日14:07に鳥取県中部を震源とするM6.6の地震が発生し、鳥取県倉吉市、北栄町、湯梨浜町の3地点最大震度6弱の地震動を記録した。この地震により、鳥取県中部地域では建物の損壊や道路の地盤沈下などの被害が生じた¹⁾。倒壊家屋18棟、半壊一部損壊は15,000棟を超え²⁾、この地域の広範囲で強い揺れが生じたことを示している。なお、倒壊家屋は北栄町の一部の地域に集中¹⁾しており、地盤増幅効果や非線形地盤応答などが影響し、局所的に被害が拡大した可能性も示唆される。

この地震の地震記録は、防災科学技術研究所K-NETおよびKiK-net、鳥取県内自治体の震度観測点、鳥取大学の臨時観測点等で得られている。地震記録の分析より、地震動が地盤構造の違い³⁾により地盤増幅の影響を受けた⁴⁾ことがわかっている。また、震源域近傍の東郷庁舎および北条庁舎の地震記録とそのスペクトル特性から、明瞭な非線形効果による地盤応答がみられ⁴⁾、地震動特性に影響を与えた可能性がある。

非線形地盤応答を定量的に評価する指標の一つにDNL⁵⁾がある。この指標は地盤の動的変形特性などの情報がない場合でも、地震記録さえあれば算出が可能であるため、多数の観測点で比較的容易に非線形応答を評価できる。

一方、非線形地盤応答により地盤増幅度が低下することに注目して、地盤の平均S波速度と地震記録の最大速度を用いて表層地盤の概略的な有効ひずみ（擬似有効ひずみ）を求め、地盤増幅率の変化を非線形応答を示す係数（非線形特性係数）に換算することで、非線形性状をモデル化する方法が提案されている⁶⁾。

そこで、本研究では鳥取県中部地域とその周辺の地震観測点を対象に、DNLや非線形特性係数を用いて、2016年鳥取県中部の地震の非線形地盤応答を評価した。

2. 広域の非線形地盤応答

(1) DNLによる評価

解析方法としては、対象とする地点の地震のS波

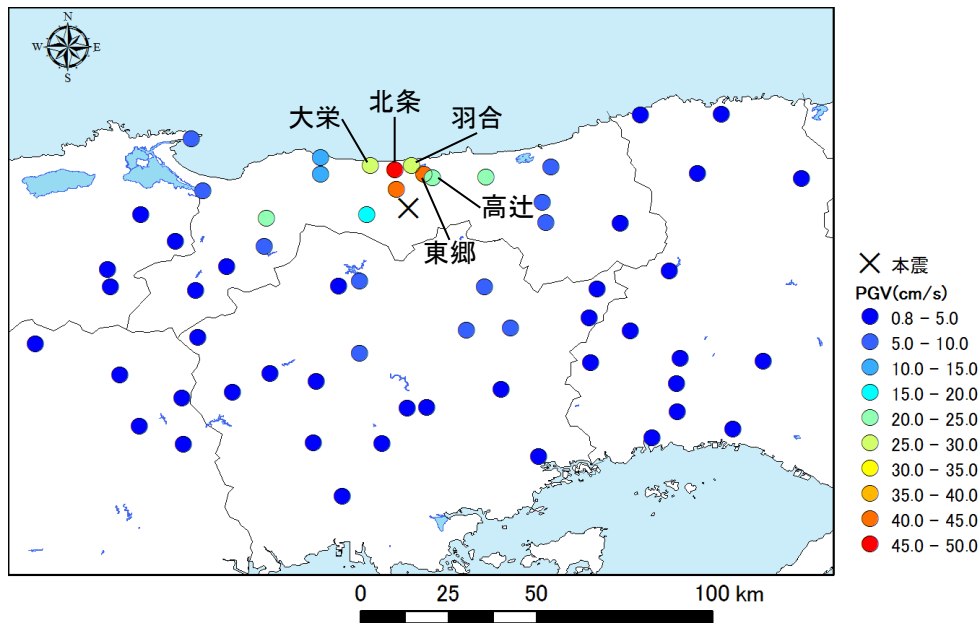


図-1 対象地点と本震のPGVの分布図

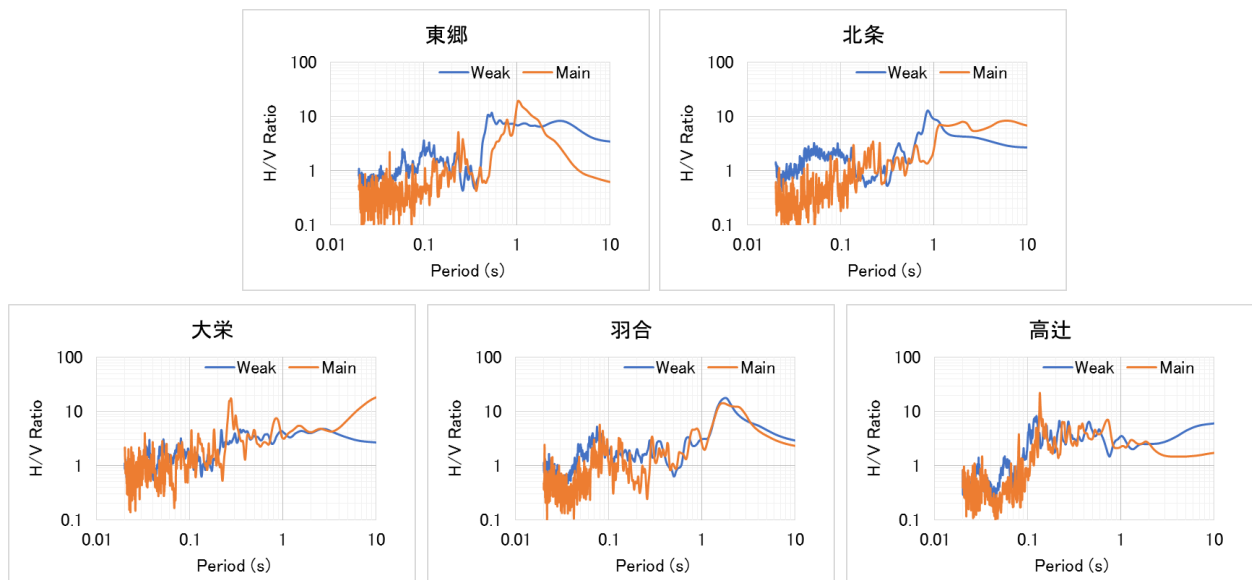


図-2 鳥取県自治体4地点と高辻の本震・弱震のH/V

部分の水平動と上下動のスペクトル比 (S-H/V) を求め、 DNL^5 を次式により計算する。このとき、周波数範囲は0.5～20Hzとする。

$$DNL = \sum \left| \log \left(\frac{R_{tgt}(f)}{R_{ref}(f)} \right) \right| \Delta f \quad (1)$$

ここに、 $R_{ref}(f)$ ：弱震時のスペクトル比、 $R_{tgt}(f)$ ：本震のスペクトル比である。

対象とする地点は、防災科学技術研究所によるK-NETおよびKiK-net地点のうち本震の震源から100km以内の56地点と鳥取県中部域の自治体の地震観測点4地点、鳥取大学による臨時観測点⁴⁾(高辻)1地点である。図-1に対象地点の位置と本震のPGVの分布

を示す。

地盤の線形応答とみなされる弱震記録については最大加速度が 100cm/s^2 以下の記録とし、K-NETおよびKiK-net地点は余震で得られた3～4地震、自治体の地震観測点は2013年以降余震を含めた7～10地震、高辻は余震で得られた5地震のデータを用いる。

本震および弱震記録ともS波部分の10.24秒を切り出し、5%のコサインテーパーを施して、K-NETおよびKiK-net地点はバンド幅0.4Hz、自治体および高辻は0.2HzのParzenウィンドウで平滑化し、各成分のフーリエスペクトルを求めた。なお、水平動スペクトルはNS、EW成分を相乗平均している。また Δf はK-NETおよびKiK-net地点は1/8192Hz、自治体および高辻は1/2048Hzとした。

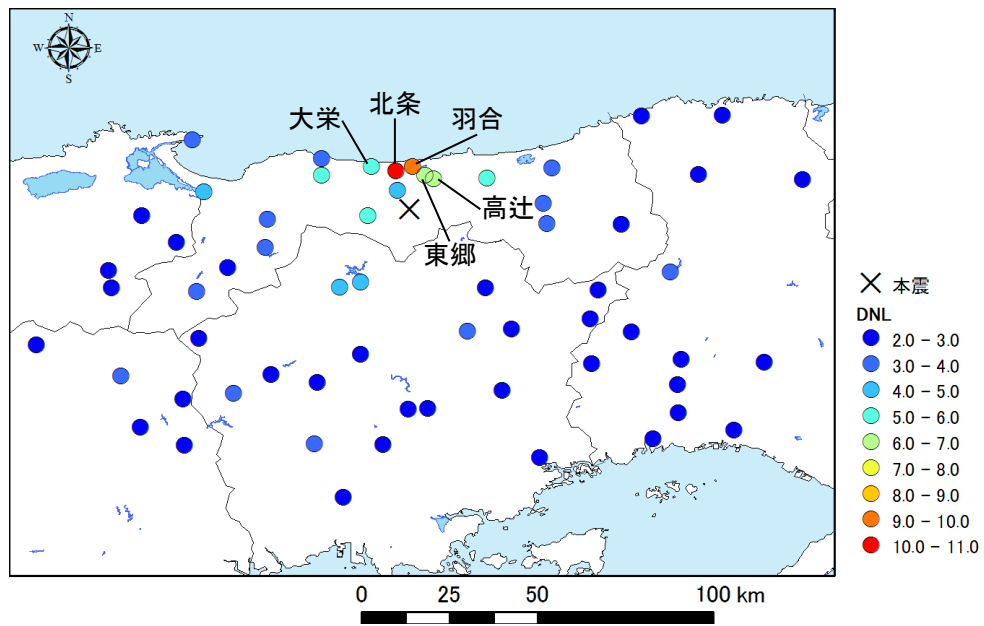


図-3 DNLの分布図

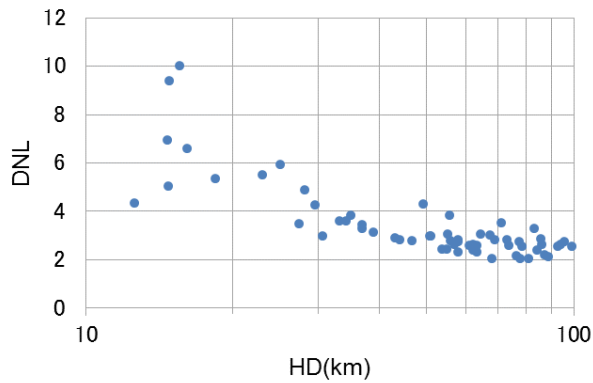


図-4 DNLと震源距離の関係

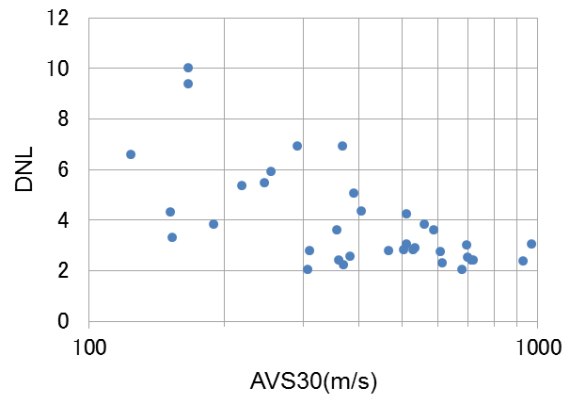


図-5 DNLとAVS30の関係

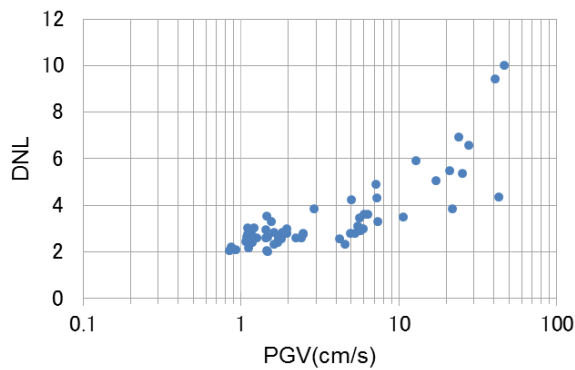


図-6 DNLとPGAの関係

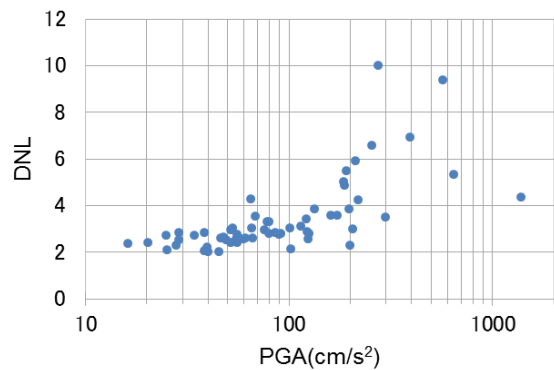


図-7 DNLとPGVの関係

図-2に自治体4地点と高辻の弱震および本震のH/V、DNL値を示す。図中の青線は弱震、橙線は本震のH/Vである。この図より本震は弱震に比べ、東郷と北条では1秒付近卓越周期が長周期側に移動、0.2秒以下の短周期域でのスペクトル比の低下が顕著にみられる。また、羽合では0.5秒付近で極端なスペクトル比の低下、高辻では0.1秒以下の短周期域でスペクトル比の低下、大栄では他の地点のような

差はみられない。本震と弱震のH/Vとの差が大きい地点では、DNLの値が大きくなることがわかる。

DNLの空間分布について、図-3に対象地点のDNLの分布図を示す。震源からの距離の増大に応じてDNLが小さくなる様子が見受けられるが、鳥取県内の一部の地点では震源距離とは関係ない大小関係となっている。これは表層地盤の特性の違いによる影響と思われる。図-4にDNLと震央距離HDの関係を

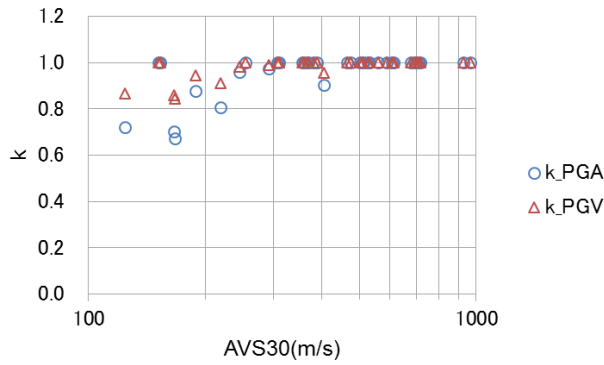


図-8 非線形特性係数 k と AVS30 の関係

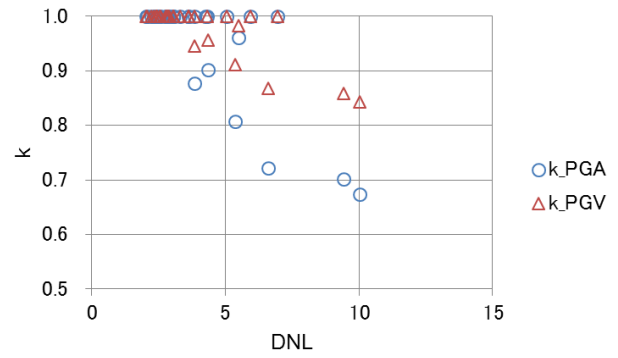


図-9 非線形特性係数 k と DNL の関係

示す．震源距離が30km以下では，ばらつきが大きいもののHDの増大に応じて，DNLが低下する強い相関がみられる．

DNLと地盤構造との関連性について，図-5にDNLとAVS30との関係を示す．AVS30が小さい側でばらつきが大きいもののAVS30の増大に伴いDNLが大きくなる傾向がみられる．

DNLと地震動の指標との関連性について，図-6にDNLと最大加速度（PGA）の関係を示す．PGAが100cm/s²以下ではDNLはほぼ同じ値で，それ以上になるとばらつきは大きいもののPGAの増大とともにDNLも大きくなる傾向がみられる．図-7にDNLと最大速度（PGV）の関係を示す．PGVの増大に伴いDNLが徐々に大きくなる傾向がみられ，PGAとの関係よりばらつきが少なく相関が強い．図-4のDNLの分布状況が図-1のPGVの分布と類似しているようにもみえる．

(2) 非線形特性係数による評価

解析方法としては，非線形特性係数⁶⁾を以下に示す手順で算出した．この計算に必要なパラメータは本震のPGVと深さ30mまでの平均S波速度AVS30である．そこで対象とするのは深さ30mまでの地盤構造モデルが得られている地点とした．疑似有効ひずみ γ'_{eff} ，非線形応答を考慮した地震動の振幅 A_{NL} ，非線形応答を考慮しない地震動 A_L ，非線形特性係数 $k(\gamma'_{eff})$ には次式の関係が成り立つ．

$$A_{NL} = k(\gamma'_{eff}) \times A_L \quad (2)$$

また， $k(\gamma'_{eff})$ は γ'_{eff} の値により，次の通り計算する．

$$(i) \quad \gamma'_{eff} \leq 3.0 \times 10^{-4} \text{ のとき}$$

$$\log_{10} k(\gamma'_{eff}) = 0 \quad (3)$$

$$(ii) \quad \gamma'_{eff} \geq 3.0 \times 10^{-4} \text{ のとき}$$

$$\log_{10} k(\gamma'_{eff}) = a \cdot (\log_{10} \gamma'_{eff} - \log_{10} 3.0 \times 10^{-4}) \quad (4)$$

このとき， γ'_{eff} は次式により計算し，(3)，(4)式を判定して算出する．

$$\gamma'_{eff} = 0.4 \cdot PGV / AVS30 \quad (5)$$

式(4)の a はPGA，PGVに対し経験的に得られており，それぞれ-0.30，-0.13として係数を求める．よって，PGA，PGVにおける非線形特性係数を得ることになる．この係数が小さくなることは地盤増幅度が低下することを意味し，非線形性が強いと判断できる．

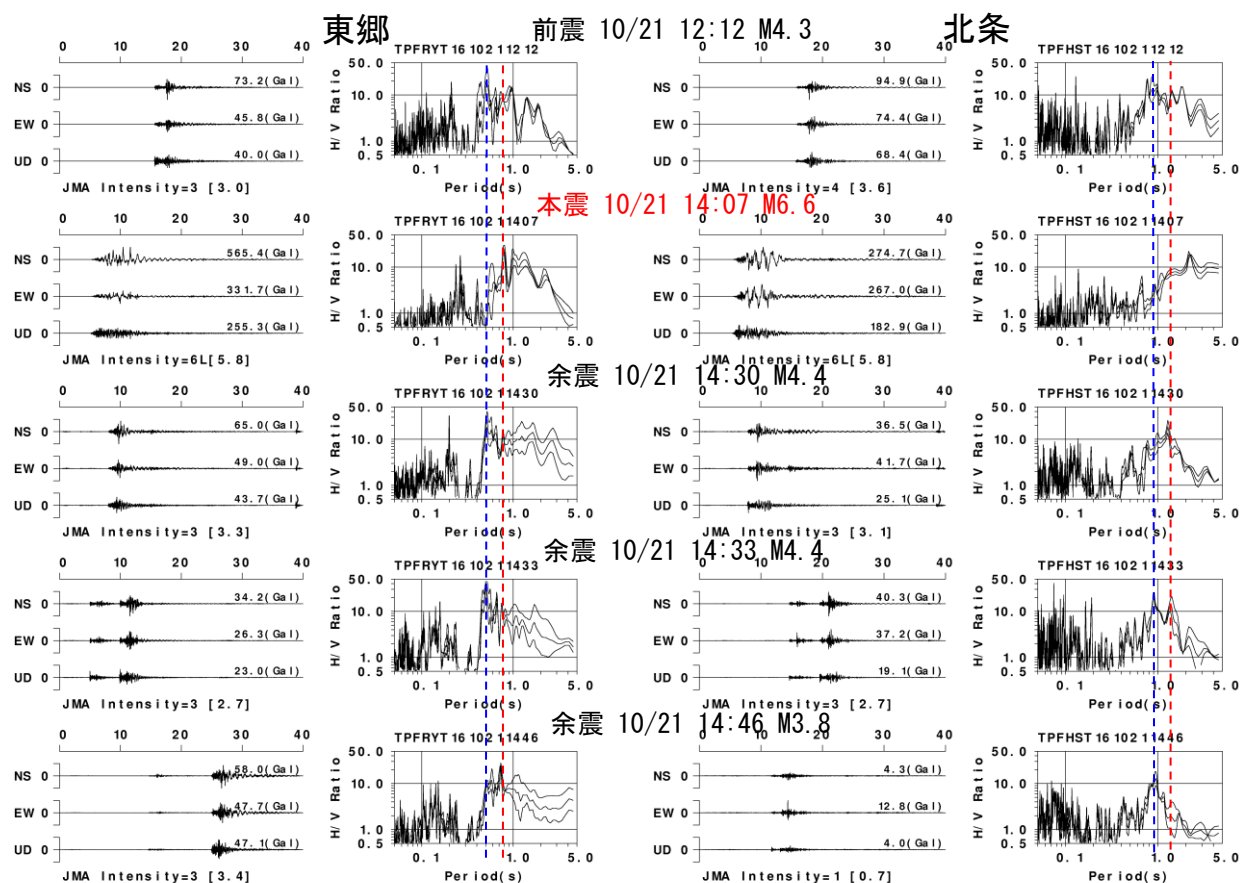
図-8に得られた非線形特性係数 k とAVS30との関係を示す．AVS30が300m/s以下になると係数が小さくなり始め，AVS30の低下に伴い係数も小さくなる傾向がみられる．

図-9に得られた非線形特性係数 k とDNLとの関係を示す．DNLが4程度以上からPGA，PGVのいずれの非線形特性係数とも低下し始め，DNLが大きくなるにつれ係数が低下する傾向がみられる．また，DNLが10と最も大きくなる場合でPGAの係数が0.67，PGVの係数が0.85となる．このことより，非線形特性係数とDNLには相関があること，同じDNLに対しPGAがPGVに比べ，非線形特性係数の低下（地盤増幅度の低下）が大きいことがわかる．今後多くのケースについて，この関係を調べていくことで，地震観測点の地盤構造モデル（AVS30の値）がなくてもDNLより地盤増幅度低下の評価が可能になると考えられる．

3. 東郷および北条の非線形地盤応答

東郷および北条については，DNLが特に大きく非線形特性係数も小さいことから，非線形応答が顕著であると判断できる．そこで，この2地点に着目して，非線形応答の特性を調べることにする．

図-10に東郷と北条における本震と前震・余震の加速度記録およびH/Vを並べて示す．図中の青線は前震・余震の卓越周期の位置，赤線は本震の卓越周期の位置を示す．東郷の本震のNS成分の加速度記録にはスパイク状の波形がみられる．H/Vについて，いずれの地点とも本震の卓越周期は余震・前震の卓越周期に比べ，長周期に移動しており，2(1)で前述した通りの状況がみられる．また，前震と余震の卓越周期がほぼ同じであることから，本震のあと30分後の余震で，ほぼ前震のH/Vの状態に戻っているこ



赤線: 本震の卓越周期の位置 青線: 前震・余震の卓越周期の位置

図-10 東郷と北条における本震・前震・余震の加速度記録とH/V

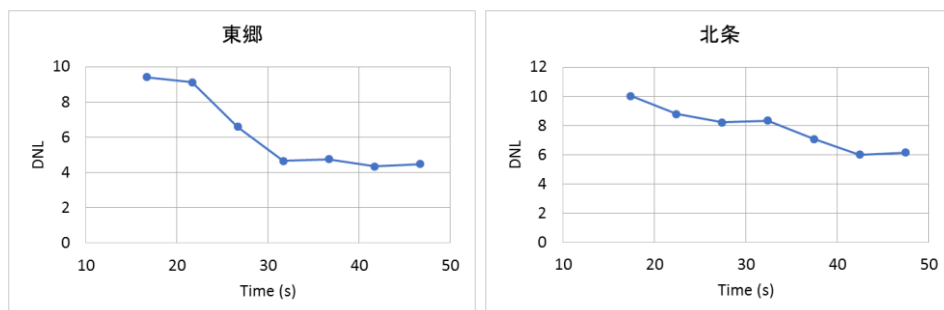


図-11 東郷と北条におけるDNLの経時変化

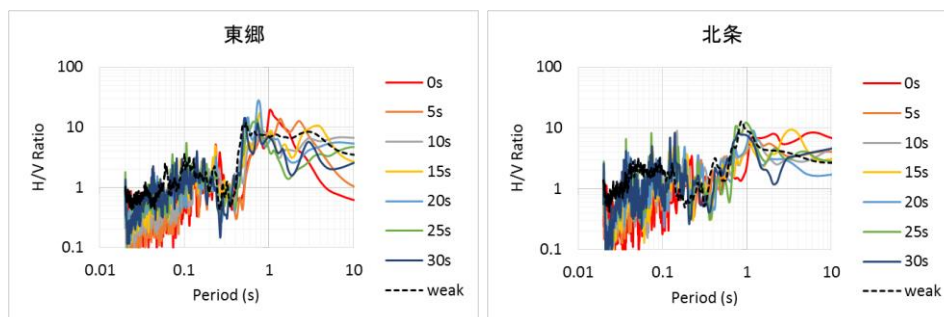


図-12 東郷と北条におけるステップ毎のH/V

とがわかる。よって、かなり短期間で地盤がもとの状態に回復していることが示唆される。

そこで、本震でのDNLの経時変化を調べるために、

S波初動から切り出し区間を5秒ずつずらし、7ステップについてDNLを求めた。図-11に東郷と北条のDNLの経時変化を示す。なお、両図の横軸は地震記

録の開始時刻からの時間である。いずれの地点も非線形応答はS波の最初の部分が最も大きくなっており時間の経過とともにDNLが低下している。東郷は4ステップまで徐々に低下し、それ以降は4程度で一定となる。北条では徐々に低下し、最終的に6程度まで低下する。図-12に東郷と北条の各ステップのH/Vを示す。東郷では15秒、北条では25秒で弱震のH/Vにほぼ一致していることがわかる。これらのことより比較的早い段階で線形の状態に戻っていたと考えられる。

4. まとめ

2016年鳥取中部の地震における非線形地盤応答について、非線形応答の度合い簡易的に評価する指標により評価した。その結果、以下のことがわかった。

- a) 鳥取県中部とその周辺の地震観測点においてDNLを求め、非線形性を定量的に評価した。また、DNLとPGA, PGV, 震源距離, AVS30との関係を調べた。PGA, PGVが大きく、震源距離が近く、AVS30が小さくなるにつれ、DNLは大きな値をとる傾向がみられた。特にPGVと震源距離について強い相関がみられた。
- b) 深さ30mまでの地盤構造がわかっている地点について、非線形特性係数を求め、地盤増幅率の低下の観点で非線形性を評価した。また、係数とAVS30, DNLとの関係を調べた。AVS30との関係は、ばらつきが大きいもののAVS30が小さくなると係数が小さくなる相関がみられた。DNLとの関係は、DNLが4以上で係数の低下し始め、DNLが大きくなるにつれ係数も大きくなる傾向がみられた。
- c) 非線形地盤応答が顕著に見られる東郷と北条

の地点について詳細に調べた。東郷ではNS成分の加速度記録にスパイク状の波形がみられた。また、DNLの経時変化を調べたところ、両地点とも本震の間の短時間でもとの地盤の状態に戻っていたことが示唆された。

謝辞：本研究の解析には、防災科学技術研究所のK-NET, KiK-netの地盤データならび地震記録を用いました。鳥取県からは各自治体の地震記録を提供して頂きました。高辻の観測点の設置およびデータ収集は鳥取大学工学部技術職員の山本真二氏に協力して頂きました。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 香川敬生：2016年鳥取県中部の地震(M6.6)について、地震ジャーナル, No.63, pp.14-22, 2017.
- 2) 鳥取県：鳥取中部地震(第96報)(2017年8月18日12:00), <http://www.pref.tottori.lg.jp/secure/1090003/1.pdf>, 最終閲覧日2017/8/31.
- 3) 野口竜也, 香川敬生：微動および重力探査による倉吉平野臨海部の地盤構造推定, 土木学会論文集A1(構造・地震工学, Vol.70, No.4), [特]地震工学論文集, Vol.33, p.I-888-I-896, 2014.
- 4) Kagawa, T., Noguchi, T., Yoshida, S. and Yamamoto S.: Effect of the surface geology on strong ground motions due to the 2016 Central Tottori Earthquake, Japan, Earth, Planets and Space, Vol.69, DOI 10.1186/s40623-017-0689-0, 2017.
- 5) 野口科子, 笹谷努：2003年宮城県沖スラブ内地震における表層地盤の非線形応答とその強震動への影響, 地震, 第2輯, 第63巻, pp.165-187, 2011.
- 6) 山口亮, 翠川三郎：観測記録に基づく地盤増幅率の非線形特性のモデル化：日本地震工学会論文集, 第14巻, 第1号, pp.56-70, 2014.

NONLINEAR SOIL RESPONSE DUE TO THE 2016 CENTRAL TOTTORI EARTHQUAKE

Tatsuya NOGUCHI, Hayato NISHIKAWA, Takao KAGAWA and Shohei YOSHIDA

An earthquake (Mj6.6) occurred in central Tottori prefecture in Japan on October 21, 2016. We investigated nonlinear soil response based on strong ground motion of K-NET, KiK-net station (NIED), local government observation station in Tottori prefecture and temporary observation station by Tottori University. In this study, we calculated a nonlinear soil response due to this earthquake using an index for easily evaluating the degree of nonlinear response. In addition, we compared the index with indicators of ground motion and subsurface structure. As a result, we grasped a characteristics of the nonlinear ground response due to this earthquake.