長周期地震動の振幅･周期･継続時間の相互関係とその要因に関する考察

岐阜大学工学部　学生会員　○池田翔平
岐阜大学工学部　正会員　能島暢呂

1.背景と目的

地震動は振幅特性・周期特性・継続時間の三要素によって特徴づけられる．南海トラフ巨大地震の切迫性が指摘されるなか，気象庁は長周期地震動に関する観測情報として「長周期地震動階級」の発表を開始した．長周期地震動階級とは，「固有周期が 1～2 秒から 7～8 秒程度の揺れが生じる高層ビル内における，地震時の人の行動の困難さの程度や，家具や什器の移動・転倒などの被害の程度から 4 つの段階に区分した揺れの大きさの指標」である [1]．
長周期地震動の特徴の一つに長い継続時間があげられる．その情報ニーズは高いものの，現状では検討課題とされており，振幅特性や周期特性に継続時間を加えた総合的な評価を行う意義は高いと考えられる．このことを背景に，長周期地震動の継続時間の評価を目的として，長周期地震動階級の「閾値超過時間スペクトル」が提案されている [2]．本研究ではこれに基づく評価事例を示し，上記の三要素の相互関係とそれらに及ぼす要因について考察を行う．

2. 長周期地震動階級の継続時間の評価方法

気象庁では、地表や低層建物 1 階に設置された地震計の観測データを用いて、減衰定数 h=5%の絶対速度応答スペクトル S_{va} を固有周期 T=1.6～7.8s の範囲で 0.2s 刻みで求め、その最大値に対し 5、15、50、100cm/s を下限閾値として階級 1～4 を割り当てたものを「長周期地震動階級」と定義している [1]。
長周期地震動階級で定義された各階級別の下限閾値を超過する継続時間を二つの指標で評価する．

1)減衰定数 h=5%の固有周期 T の線形 1 自由度系を用いて，地動加速度(図 1(a))から水平 2 成分の絶対速度応答を求め，ベクトル合成波形を求める．
2) 図 1(b)のように，速度応答の各階級別の下限閾値(5,15,50,100cm/s)を超過する継続時間を二つの指標を用いて算出する．

・D_B("Bracketed duration"):最初に閾値を上回ってから最後に下回るまでの時間
・D_U ("Uniform duration"):閾値を超えた正味の時間

D_U 評価の際は図 1(a)の赤線に示すように，波形のばらつきを抑えるために，速度応答の各時刻から遡って過去 $t_w=T/2$[s]における最大値をピークホールドした包絡波形を用いる．

3)固有周期 T=1.6～7.8s で 0.2s 刻みで行い，固有周期 T と D_B, D_U の関係を継続時間スペクトルで図示する（図 1(c)の破線 D_B および実線 D_U）．定義より D_B> D_U であるが，本稿では D_U のみを用いる．

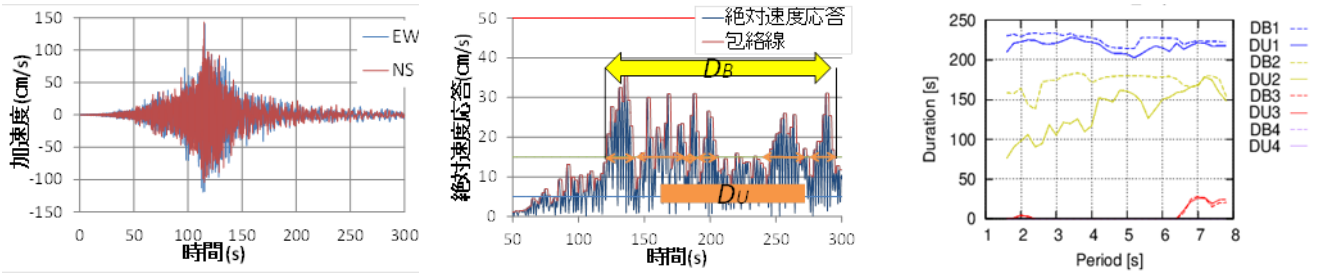
本研究では，2011 年東北地方太平洋沖地震について，長周期地震動が長く現れた関東平野の中から K-NET 観測点よりいくつか選定し，速度応答スペクトル，継続時間スペクトル，速度応答と Bracketed および Uniform 継続時間の関係の 3 つのグラフを算出する．それらから地震動の振幅特性・周期特性・継続時間の相互関係と浅部・深部の地盤条件がどのように影響しているのかを考察する．

3. 2011 年東北地方太平洋沖地震の評価

Mw=9 の東北地方太平洋沖地震では，東北から関東まで広い範囲で強い揺れが観測された．特に関東平野では継続時間の長い長周期地震動が観測された，本研究では，東京･神奈川･千葉･茨城の K-NET 観測点における強震記録を用いた評価を行った．本稿では，その中から 4 地点での結果を図 2 に示す．右上は周期特性と振幅特性の関係を表した速度応答スペクトル（黒線 S_v，赤線 S_{va}），右下は周期特性と継続時間の関係を表した継続時間スペクトル(破線 D_B，実線 D_U，青線 階級 1，黄線 階級 2，赤線 階級 3，淡赤線 階級 4)，左下は横軸に絶対速度応答，継続時間をとったもので振幅特性と継続時間の関係を表す．左上は深部地盤の S 波速度の深度分布である．J-SHIS の深部地盤構造モデルを用いて地表から V_S=2100m/s の層までの地盤の一次固有周期を 1/4 波長則によって算出した．(式(1)，(2))

$AVS=\Sigma H_i/(\Sigma H_i/V_{si})$…(1)　　$T_G=4H/AVS$…(2)

選定した 4 地点の深部地盤はいずれも Vs=1600m/s の層が地下 2800m 以深にある．



(a)　加速度波形　　(b)　絶対速度応答の水平 2 成分のベクトル合成波　　(c)　継続時間スペクトル

図 1　2011 年東北地方太平洋沖地震　K-NET 白鬚(TKY015)

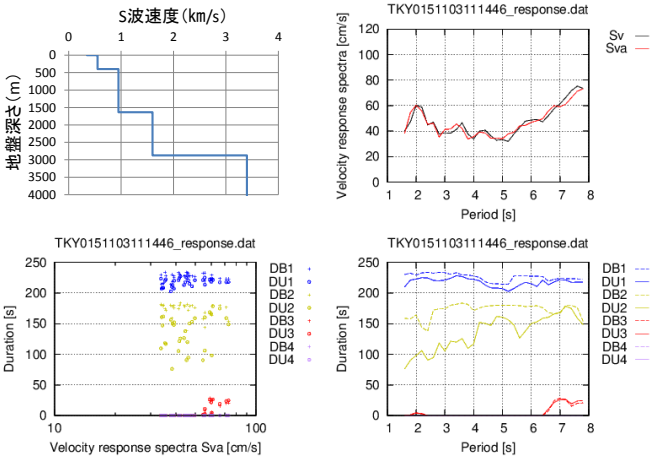
・K-NET 白鬚(TKY015)：堆積層が厚く 1855 年の江戸地震 M6.9 や 1923 年関東地震 M7.9 で木造住家の被害が多かった地域に位置する．地盤の固有周期は 11.2s である．速度応答は長周期側で卓越し，周期 7.8s で S_{va} =73.6cm/s となり階級 3 に達したほか，周期 2s でも階級 3 となった．階級 2 は広い周期帯で 100～180s 程度と長い．

・K-NET 辰巳(TKY017)：東京湾に面した埋立地で軟弱地盤である．S_vには 5s 以下に複数の卓越周期が見られるが，S_{va}は周期 1.8s で卓越し S_{va}=98.7cm/s である．周期 5s 以下で階級 3 に達し，継続時間は 10s を超えており，周期 3.4s で最長 33.1s に及ぶ．階級 2 の継続時間はほぼ全周期帯で 150s 以上である．

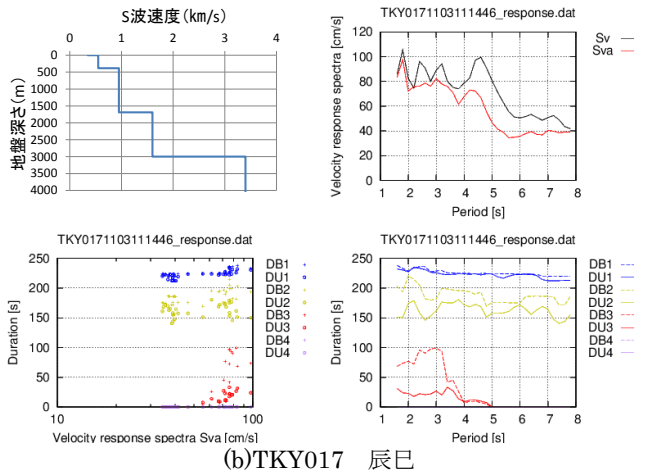
・K-NET 浦安(CHB008)：埋立地盤であり，付近の広い範囲で強く長い揺れによって液状化が発生した．S_{va}は周期 2.0 s で最大 S_{va} =91.1cm/s となったほか，3.4 s と 5.0s でも卓越しており，ほぼ全周期帯で階級 3 に達している．階級 3 の継続時間は最大 25s 程度である．K-NET 辰巳でも見られた複数の卓越周期の要因については今後の検討課題である．

・K-NET 稲毛(CHB024)：コンビナート火災が起きた市原から 13km の埋立地である．S_{va} は 3.8s で S_{va}=102.8cm/s となり階級 4 に達している．全周期帯で階級 3 に達し，周期 3.8s で最長 54.8s である．

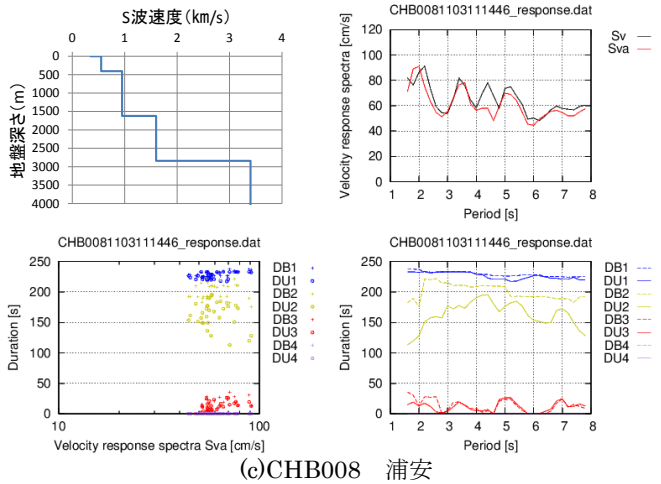
上記 4 地点以外の記録も検討した結果，関東平野の多くの地点で階級 2 の継続時間が 150s を超えることがわかった．また埋立地盤や厚い堆積層の軟弱地盤では速度応答が大きく増幅され，継続時間が長くなる傾向が共通して見られた．



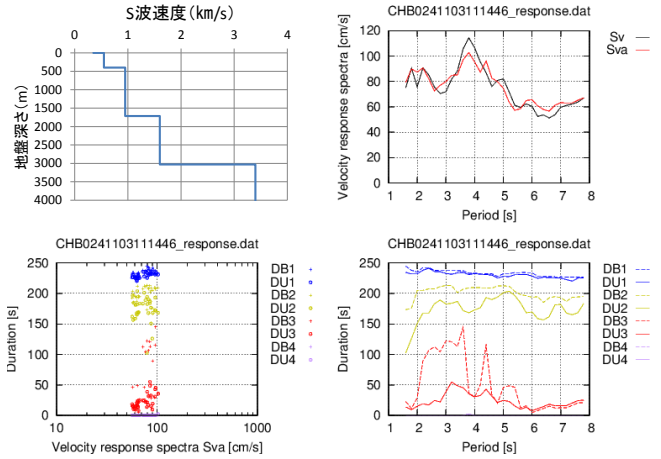
(a)TKY015　白鬚



(b)TKY017　辰巳



(c)CHB008　浦安



(d)CHB024　稲毛

図 2　深部地盤(左上)，速度応答と継続時間の関係(左下)，絶対応答スペクトル(右上)，継続時間スペクトル(右下)

4.おわりに

本研究では，2011 年東北地方太平洋沖地震おいて関東平野で観測された長周期地震動の地震動階級とその継続時間について評価し，振幅特性･周期特性･継続時間特性の関係を考察した．対象とした 4 地点は，深部地盤条件が類似した傾向を示すにも関わらず，速度応答スペクトルの卓越や継続時間の長時間化という観点からは，多様な傾向が見られた．今後，これらの要因をさらに詳しく検討する方針である．

謝辞

本研究では防災科学技術研究所 K-NET 観測記録と，J-SHIS の深部地盤構造モデルを使用しました．記して謝意を表します．

参考文献

1) 気象庁：長周期地震動階級および長周期地震動階級関連解説表について
http://www.data.jma.go.jp/svd/eew/data/ltpgm_explain/about_level.html

2)能島暢呂：長周期地震動階級の継続時間スペクトル，日本地震工学会論文集 Vol. 15 (2015) No. 6 p. 6_142-6_147