T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	長周期地震動における f 値と単位地震動の等価繰り返し数の弾塑性応答解析に基づく再評価
Title(English)	Re-evaluation of f-Values of Long-Period Ground Motions and Equivalent Number of Repetitions of Single Elemental Earthquake Based on the Elasto-Plastic Response Analysis
著者(和文)	成田冴子, 小穴温子, 北村春幸, 佐藤利昭, 佐藤大樹, 佐藤俊明, 壇 一男, 吉江慶祐, 谷内孝誠
Authors(English)	Saeko Narita, Atsuko Oana, Haruyuki Kitamura, Toshiaki Sato, Daiki Sato, Toshiaki Sato, Kazuo Dan, Keisuke Yoshie, Kosei Yachi
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, vol. B-2, , pp. 717-718
Citation(English)	, vol. B-2, , pp. 717-718
発行日 / Pub. date	2016, 8
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

日本建築学会大会学術講演梗概集
（九州） 2016 年 8 月

長周期地震動における f 値と単位地震動の等価繰り返し数の弾塑性応答解析に基づく再評価

正会員 ○成田冴子[*1] 同 小穴温子[*2] 同 北村春幸[*1]
同 佐藤利昭[*3] 同 佐藤大樹[*4] 同 佐藤俊明[*5]
同 壇 一男[*2] 同 吉江慶祐[*6] 同 谷内孝誠[*2]

長周期地震動 単位地震動 f 値
弾塑性応答 等価繰り返し数

1. はじめに

2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震より，長周期地震動に対する関心が高まり，疲労損傷に代表される累積値の評価が求められている。これら累積値はエネルギーの釣合に基づく応答評価法 [1]より評価が可能で，佐藤・他 [2]が提案した応答予測法では，地震動特性を表す 1 つの尺度である f 値と単位地震動の等価繰り返し数 ${}_0n'$を用いて，弾塑性時の等価繰り返し数を評価した。f 値は単位地震動の反復数として定義された尺度で [3), 4)]，1940 年 Imperial Valley 地震の El Centro 記録を基準とした等価繰り返し数 ${}_0n$ を用いて簡略化が図られている。以上のことから，等価繰り返し数や f 値を用いて応答予測ができると考えられている。一方で，単位地震動が適用できる周期の範囲には検討の余地が残り，特に長周期地震動の特性が反映し得るか否か検証することは，必要不可欠と言える。本報ではこれらを背景に，2011 年東北地方太平洋沖地震の観測記録を利用し，単位地震動の等価繰り返し数を，1 質点弾塑性応答解析を用いて再評価した結果を示す。

2. 既往研究に基づく単位地震動の等価繰り返し数の定義

秋山・北村 [3]は継続時間の長い地震動を単位地震動の繰り返し事象と仮定し，単位地震動の反復数 f 値を，

$$f=\left(\frac{{}_0F(h)}{F(h)}\right)^2=\left(\frac{1}{\sqrt{1+4\pi h\cdot{}_0n}}\cdot\frac{1}{F(h)}\right)^2 \tag{1}$$

と定義した。ここに，減衰関数 $F(h)$，等価繰り返し数 ${}_0n$ であり，添字の 0 は単位地震動に関する数値を定義する。${}_0n$ は弾性振動系の減衰によるエネルギーの吸収量 ${}_0W_h$ と 1 サイクルでなす減衰によるエネルギー吸収量 ${}_0W_{h1}$ から，

$${}_0n=\frac{{}_0W_h}{{}_0W_{h1}} \tag{2}$$

と表される。現在は El Centro 記録を単位地震動として ${}_0n=3$ を(1)式に採用している [3), 4)]。

f 値は，ある継続時間の長い入力地震動による応答の最大値が単位地震動と等しく，入力エネルギーは単位地震動の入力エネルギーの f 倍と仮定した指標である。この仮定を踏まえ，佐藤・他 [2]はエネルギーの釣合に基づき，f 値を用いて弾塑性系における等価繰り返し数 n を，

$$n=f\cdot{}_0n' \tag{3}$$

と仮定している。${}_0n'$ は弾塑性系における単位地震動の等価繰り返し数であり，累積損傷によるエネルギー吸収量から，

$${}_0n'=\frac{{}_0W_p}{{}_0W_{p1}} \tag{4}$$

と求められる。ここに，${}_0W_p$ は累積塑性ひずみエネルギー，${}_0W_{p1}$ は 1 ループの累積塑性ひずみエネルギーである。

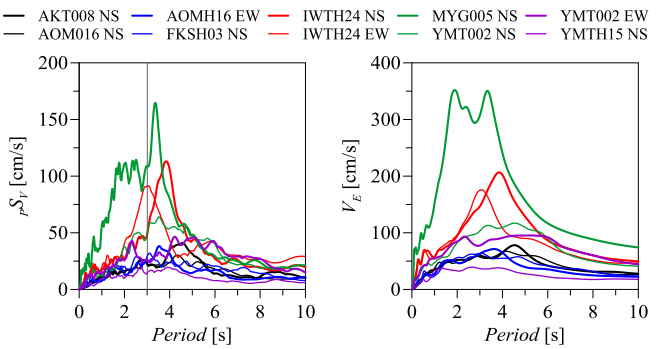
3. 観測地震動の選定と解析条件

(2)式，(4)式のように，単位地震動の等価繰り返し数は，建物の減衰あるいは累積損傷によるエネルギー吸収量から表されるため，これら 2 種類の単位地震動の等価繰り返し数 ${}_0n$，${}_0n'$ を用いて，応答予測ができると考えられる。以降は，2011 年東北地方太平洋沖地震の K-NET，KiK-net 強震記録を利用し，長周期地震動における ${}_0n$ と ${}_0n'$ の対応関係について 1 質点弾塑性応答解析を用いて検討を進める。なお，特に地震動の長周期成分が及ぼす影響度合いを確認するため，周期区間を 0.1-10 秒（以下，全周期帯と記す）と 3-10 秒（以下，長周期帯と記す）に分類する。図 1 に検討対象とする観測地震動の擬似速度応答スペクトル ${}_pS_V(h=0.05)$とエネルギースペクトル $V_E(h=0.1)$を示す。観測地震動の選定条件は，観測記録のデータ長さが 300 秒まであること，${}_pS_V(h=0.05)$の卓越周期が長周期帯にあること，実効継続時間 ${}_et_0$ が 100 秒以上であることとする。ただし，応答解析は入力地震動が終了した後の自由振動を考慮するため，観測記録の最後に 0 をつけ，入力時間を 450 秒として検討する。

解析モデルの復元力特性はバイリニア型とし，解析パラメータを表 1 のように設定する。初期剛性 k_1 と二次剛性 k_2 は，

$$k_1=\frac{4\pi^2M}{T_f^2} \tag{5}$$

$$k_2=\alpha k_1 \tag{6}$$



(a) ${}_pS_V(h=0.05)$ (b) $V_E(h=0.1)$

図 1 観測地震動のスペクトル

Re-evaluation of f-Values of Long-Period Ground Motions and Equivalent Number of Repetitions of Single Elemental Earthquake Based on the Elasto-Plastic Response Analysis

NARITA Saeko, OANA Atsuko, KITAMURA Haruyuki, SATO Toshiaki, SATO Daiki, SATO Toshiaki, DAN Kazuo, YOSHIE Keisuke and YACHI Kosei

とし，塑性率 μ が一定値となるように降伏耐力 Q_y を設定する。ここに，建物質量 M，架構周期 T_f，二次剛性比 α である。μ は降伏変位 δ_y と最大変位 $\delta_{\max}$ より，

$$\mu = \frac{\delta_{\max}}{\delta_y} \tag{7}$$

と表す。f 値は弾性応答によって定義されるため，弾塑性応答を評価する際に適用できるか検証する必要がある。V_E は入力地震動の総エネルギーから求まるため，弾性系と弾塑性系で概ね一致する。そこで，弾性系と弾塑性系の速度応答スペクトル S_V を比較し，平均 S_V が一致するときに，f 値は弾塑性応答においても適用できると考えられる。図 2 に例として YMTH15 NS における弾性系の ${}_PS_V$ と弾塑性系の S_V ($\mu=2, \alpha=0$ と $\mu=5, \alpha=0.2$)を示す。同図に全周期帯と長周期帯の平均値もそれぞれ併せて示す。ただし，横軸は弾性系では架構周期 T_f，弾塑性系では有効周期 T_e とする。図 2 より，等価減衰の影響によって μ が大きいほど弾塑性応答は平滑化され，弾性系の平均 ${}_PS_V$ と $\mu=5, \alpha=0.2$ における弾塑性系の平均 S_V が，全周期帯，長周期帯ともにほぼ一致することが確認できる。したがって本報では，弾性系と弾塑性系の平均 S_V が一致するときを対象とし，パラメータを $\mu=5$，$\alpha=0.2$ と設定した。

4. 単位地震動の等価繰り返し数の再評価

${}_0n$ と ${}_0n'$ の対応関係を 1 質点弾塑性応答解析に基づいて検討する。n は累積塑性変形倍率 η と平均塑性変形倍率 $\bar{\mu}$ から，

$$n = \frac{\eta}{4\bar{\mu}} \tag{8}$$

と求められる。図 3 に各観測地震動の $h=0, 0.01, 0.03, 0.05$ における f と n の関係を示す。黒線は解析結果の等価繰り返し数を(3)式に基づき最小二乗法で線形回帰した結果を表す。全周期帯，長周期帯とも傾き ${}_0n'$ は 2.4 程度と同等であり，周期帯による明確な違いは確認できない。f 値を求める場合の ${}_0n$ は 3.0 であるのに対し，${}_0n'$ は 2.4 程度であることから，弾性系と弾塑性系による累積応答値の違いはこの比率に依存することが推察される。本報では，弾性系と弾塑性系の平均 S_V が一致する μ と α の場合で検討を行ったが，今後は制振・免震構造を考慮し，幅広い範囲での μ と α に対して f 値の妥当性の検証を行う予定である。

5. まとめ

本報では，2011 年東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いて，1 質点弾塑性応答解析を行い，長周期地震動を考慮した単位地震動の等価繰り返し数を再評価した。その結果，弾性系と弾塑性系の平均 S_V が一致する場合では，周期による明らかな違いはなく，${}_0n$ と ${}_0n'$ は 3.0:2.4 程度の比率になることが推察された。今後は制振・免震構造を想定した場合での f 値の妥当性を検証することが課題である。

表 1　1 質点弾塑性応答解析のパラメータ

建物質量	M	[ton]	1000
架構周期	T_f	[s]	0.1-10（刻み 0.1）
減衰定数	h	[-]	0, 0.01, 0.03, 0.05
二次剛性比	α	[-]	0.2
塑性率	μ	[-]	5

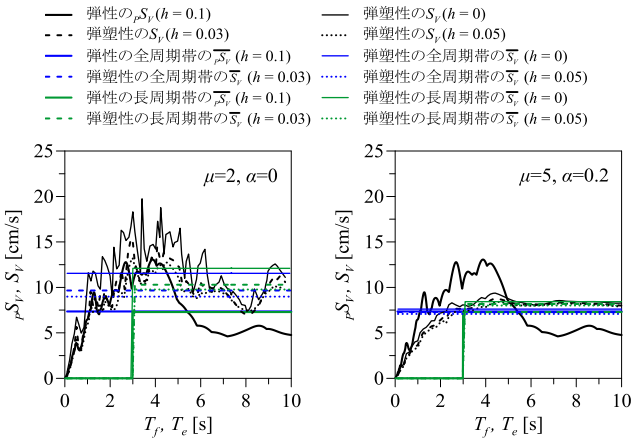
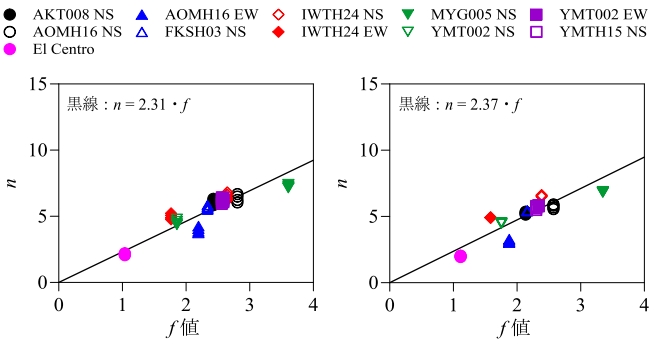


図 2　YMTH15 NS における弾性系の ${}_PS_V$ と弾塑性系の S_V



(a)　全周期帯　　(b)　長周期帯

図 3　各観測地震の f と n の関係

謝辞

本研究は，清水建設(株)，(株)大崎総合研究所，(株)日建設計，東京理科大学による研究会の成果の一部をまとめたものです。本報では，防災科学技術研究所の K-NET，KiK-net 強震記録を使用致しました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

1) 秋山宏：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計，技術堂出版，1999.11
2) 佐藤大輔，他：履歴ダンパーと粘性ダンパーを併用した制振構造のエネルギーの釣合に基づく応答予測法，日本建築学会構造系論文集，第 79 巻，第 699 号，pp.631-640，2014.5
3) 秋山宏，北村春幸：エネルギースペクトルと速度応答スペクトルの対応，日本建築学会構造系論文集，第 608 号，pp.37-43，2006.10
4) 小穴温子，他：設計用地震動のための長周期地震動の f 値の定性的評価，日本建築学会構造系論文集，第 77 巻，第 674 号，pp.575-584，2012.4

*1 東京理科大学　*2 清水建設株式会社
*3 九州大学大学院　*4 東京工業大学
*5 株式会社大崎総合研究所　*6 株式会社日建設計

*1 Tokyo University of Science　*2 Shimizu Corporation
*3 Kyusyu University　*4 Tokyo Institute of Technology
*5 Ohsaki Research Institute, Inc.　*6 Nikken Sekkei Ltd.