

# 長崎の模擬および観測地震動を用いた質点モデルの 弾塑性応答性状に関する解析的研究

中原浩之\*, 中山大輝\*\*, 小俣慶太\*\*\*,

## Analytical Study of Elastic and Inelastic Behavior of Simple System to Artificial Earthquake Vibrations in Nagasaki

Hiroyuki NAKAHARA\*, Taiki NAKAYAMA\*\* and Keita ODAWARA\*\*\*

Nagasaki Prefecture is located at relatively low seismicity area in Japanese archipelago. There are no records of strong ground motions over 200 gal in Nagasaki Prefecture from the K-NET which started observation in 1996. When the Kumamoto earthquakes occurred and shook the Nagasaki City in 2016, the peak ground acceleration of the ground motions did not achieve 200 gal. The ground motions were not enough big to bring the inelastic response of the structures in Nagasaki according to the field survey of the damaged buildings in Nagasaki by the Kumamoto earthquake. There is no adequate size of the ground motion to investigate the inelastic response of the buildings in Nagasaki.

The artificial earthquake vibrations were made in order to investigate to the seismic response of the new city hall of Nagasaki City which will be constructed in 2022. In this paper, the authors have studied the characteristics of the artificial vibrations of which the peak ground accelerations are 630 gal and 663 gal. The elastic response analysis was conducted to be compared to the response spectra of the building cord of Japan. The inelastic response analysis was conducted to be compared to the assumption of equating the energies proposed by Newmark in 1960. The response spectra of acceleration were over twice of the design spectra of the building cord of Japan. The maximum deformations calculated by time history analysis of the inelastic system were estimated safely by the assumption of equating the energies.

**Key words:** equating the energies, response spectra, building cord of Japan, elasto-plastic deformation, time history analysis.

### 1. はじめに

2016年4月14日と4月16日に、熊本県内の布田川・日奈久断層帯を震源とする最大震度7を観測する地震が発生した。これらの地震動は、長崎市にも到達しており、震度4を観測した。著者らは、防災科学技術研究所の強震観測網(K-NET, KiK-net)<sup>1)</sup>を用いて、熊本を震源とする地震による長崎県内の地震動を収集して応答スペクトルを作成し、これらを比較することで長崎県内の揺れやすさを分析している<sup>2)3)</sup>。しかしながら、得られた地動は加速度が小さく、建物が崩壊するような強震下での応答特性などは検討されていない。

長崎県は、建築基準法上、地震危険度が低い地域に分類されており、強震動が記録されることはまれである。そのため、長崎の地震防災を考えるために必要な強震データは、これまで得られていない。一方、長崎市では令和5年1月の開庁を目指して新市庁舎建設工事が進められている。その新市庁舎の耐震設計には、長崎県の地盤特性を有する模擬地震動が用いられている。

模擬地震動は建設地点における過去の地震発生履歴や周辺における活断層や地質、直下地盤性状などその固有の地震地盤環境に基づいて個別に決められる地震動である。つまり長崎の特性に合わせて作られた地震波ということになる。

本研究では、この模擬波を入力してスペクトル解析と弾塑性応答解析を実施する。スペクトル解析においては、建築基準法の加速度応答スペクトルとの比較を行い、弾塑性解析では建築基準法の構造特性係数  $D_s$  値の算出根拠となっているエネルギー一定則<sup>4)</sup>などと比較し、模擬波の特性を調べる。

### 2. 入力地震動

解析に使用する模擬地震動の加速度波形を図1に示す。図1(a)が、東西方向で、図1(b)が、南北方向である。最大地動加速度(Peak ground acceleration, PGA)は、それぞれ630 galと663 galである。PGAを含む強震領域は10秒以下と短い。本論では、上下動は研究対象としない。また、図2に、比較用の観測地震動の加速度波形を示す。

令和3年12月20日受理

\* システム科学部門 (Division of System Science)

\*\* 工学部(school of Engineering)

\*\*\* 株式会社 山下設計 (Yamashita Sekkei inc.)

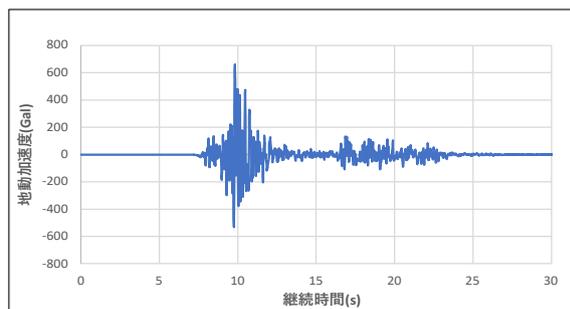


図1 (a) 模擬波 東西方向

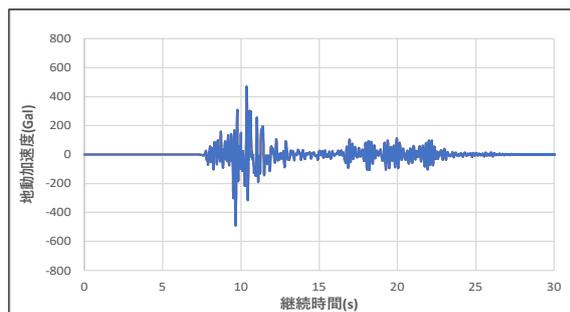


図1 (b) 模擬波 南北方向

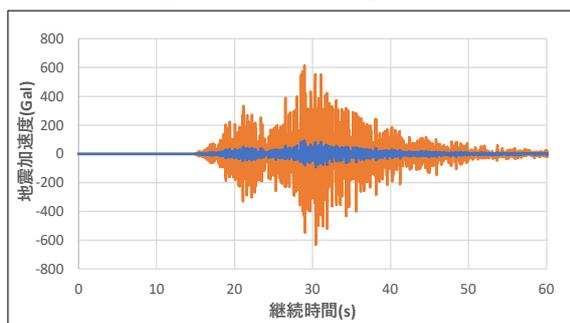


図2 (a) 長崎市 観測波 東西方向

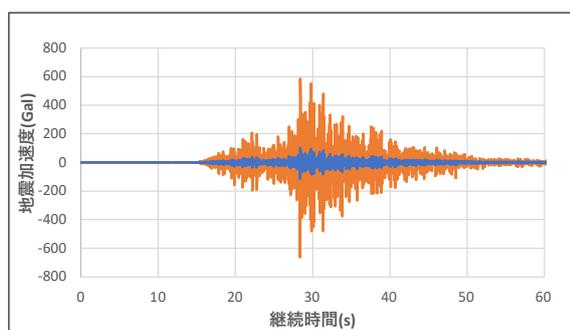


図2 (b) 長崎市 観測波 南北方向

これらは、2016年の熊本地震において、K-NET長崎で観測されたものである。図2(a)が、東西方向で、図2(b)が、南北方向である。これらのPGAは、それぞれ93galと114galである。青の波形が伝波してきた地震波で、オレンジの波形が模擬地震動の最大加速度に合わせて増幅させた波になる。以降の解析では、この増幅させたオレンジの波形を解析に使用する。

模擬地震動の作成は、以下の手順①～⑤に沿って行っ

た。これの概要を示す。

### ① 新市庁舎建設地における地盤構造モデルの設定

模擬地震動作成に際して採用した地盤構造モデルを表1に示す。新市庁舎の建設地は、比較的浅いレベル（GL-5m程度）以深においてN値60以上となる非常に強固な地盤（凝灰角礫岩層）を有する。この地盤は $V_s$ （S波速度）が1060m/sであり、このGL-5mの位置を工学的基盤面として設定した。地表から工学的基盤面までの地盤構造モデルは、新市庁舎建設に際して行った地盤調査（PS検層）の結果に基づいて設定しており、それより以深のデータは防災科学技術研究所・地震ハザードステーションの公開情報<sup>1)</sup>に拠っている。地震基盤はGL-267m、 $V_s=3100$ m/sの位置としている。地盤の減衰効果を表すQ値は、 $V_s/15 \sim V_s/10$ として設定した。

表1 模擬地震動作成用の地盤構造モデル

層	深度 [m]	層厚 [m]	P波速度 [m/s]	S波速度 [m/s]	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	Q <sub>p</sub>	Q <sub>s</sub>	備考
1	0.0 ~ 1.5	1.5	320	155	1.8	21	10	PS
2	1.5 ~ 5.0	3.5	1290	500	1.9	67	33	検層結果
3	5.0 ~ 20.0	15	2300	1060	2.2	141	71	工学的基盤
4	20.0 ~ 34.5	14.5	2500	1100	2.2	150	150	地震 ハザード ステーション
5	34.5 ~ 43.5	9	3000	1400	2.25	150	150	
6	43.5 ~ 53.0	9.5	3500	1700	2.3	150	150	
7	53.0 ~ 227.5	174.5	4000	2100	2.4	200	200	
8	227.5 ~ 267.0	39.5	5000	2700	2.5	200	200	地震基盤
9	267.0 ~ 2008.5	1741.5	5500	3100	2.6	300	300	
10	2008.5 ~ 7007.5	4999	5700	3300	2.7	300	300	
11	7007.5 ~		6000	3400	2.75	300	300	

### ② 周辺の地震環境の評価と想定地震の評価

長崎県内における過去の地震を調査し、海溝型、活断層型の地震環境を考察する。

長崎県周辺に震源域のある海溝型地震は無いが、南海トラフ沿いの巨大地震で被害を受ける可能性もある。長崎県では、南海トラフ沿いの巨大地震の中で、四国沖から紀伊半島沖が震源域となった場合、津波による浸水や地震の揺れ等による被害を受けることがある。例えば、1707年の宝永地震（M8.6）では津波による浸水被害が長崎市で生じた。また、1854年の安政南海地震（M8.4）や1946年の南海地震（M8.0）でも、家屋への被害が生じた。

長崎県の主要な活断層には、島原湾から島原半島を経て橋湾まで延びる雲仙断層群がある。その他の活断層として、多良岳南西麓断層帯があるが、短い活断層であることから建設地における影響は雲仙断層群よりも小さいと考えられる。

### ③ 模擬地震動を作成する想定地震の評価

模擬波の作成にあたり、海溝型および活断層を考慮した断層モデルを比較し、建設地において最も影響度の高いものを選定する。

前述の通り、海溝型地震のうち新市庁舎建設地に最も影響を与えられられるのは、南海トラフ巨大地震であり、南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ<sup>2)</sup>によると、建設地における最大震度の推計値は4程度である。一方、活断層型の地震については、防災科学技

術研究所の地震ハザードステーションにおいて、震源断層を特定した地震動予測地図データが公開されており、雲仙断層群について検討が行われた結果を参照すると、長崎県での揺れの大きさは、概ね南海トラフ巨大地震を上回る。表2に、雲仙断層群の各活断層について、地震ハザードステーションで公開されている想定地震地図より読み取った、新市庁舎計画地付近における工学的基盤面での計測震度と最大速度を示す。

表2 震源として想定する活断層と新市庁舎建設地における震度

活断層	M <sub>j</sub>	断層の長さ	設定ケース	工学的基盤面での値	
				計測震度	最大速度 [cm/s]
雲仙断層群北部	7.3程度	30 km程度以上	1	4.9	18.5
			2	4.7	17.7
雲仙断層群南東部	7.1程度	23 km程度	1	3.5	3.3
雲仙断層群南西部	7.3程度	30 km程度	1	5.2	22.1
			2	5.4	30.5
			3	4.9	18.3
南部	7.1程度	23 km程度	1	4.4	14

注) M<sub>j</sub>は気象庁マグニチュードを表す

海溝型および活断層による想定地震について、建設地において影響度の高いものを推定震度等から判断すると、活断層の雲仙断層群南西部北部のケース2になる。

雲仙断層群の各断層が同時に活動する状態(連動)を考慮した場合、雲仙断層群南東部よりも南西部の方が、建設地における工学的基盤面での計測震度や最大速度が大きいことから、雲仙断層群南西部北部と南東部の連動よりも雲仙断層群南西部北部と南部の連動の方が、建設地に与える影響度は高くなるものと考えられる。

以上を考慮し、雲仙断層群南西部の北部と南部の単独、およびそれらの連動による加速度波形を作成し、加速度応答スペクトルを比較することにより最終的な模擬波を決定した。

④ 解放工学的基盤面における模擬地震動波形の作成

図3に模擬波の作成で考慮すべき雲仙断層群の北部と南部の活断層(断層モデル)位置図を示す。

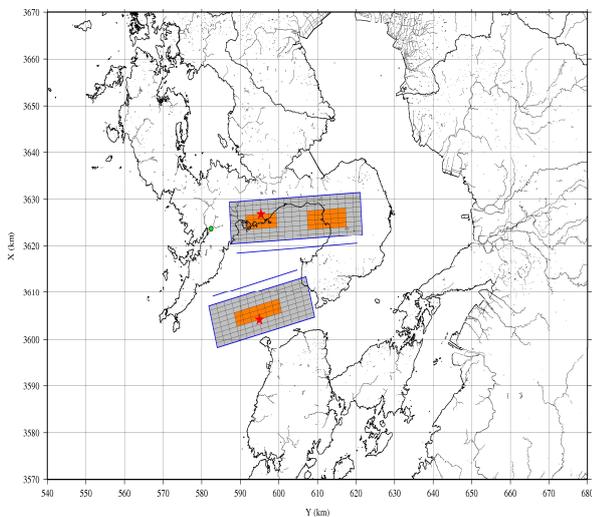


図3 雲仙断層群南西部の北部・南部の活断層位置図

解放工学的基盤面における加速度波形は、地震ハザードステーションの公開データ等を参考として設定した震源パラメータを用い、統計的グリーン関数法により作成した。まず、雲仙断層群南西部の北部と南部のそれぞれについて加速度波形を作成し、次に加速度波形の振幅や加速度応答スペクトルが大きくなるように、南部の加速度波形に対して北部の加速度波形を数秒間時間シフトして加算し、北部と南部の連動時の加速度波形を作成した。

これらの加速度波形について計算した減衰5%の加速度応答スペクトルを図4に示す。南部のスペクトルは北部のスペクトルに比してかなり小さいが、連動型は北部のスペクトルをやや上回る。このことから、最終的な模擬波は北部と南部の連動時の加速度波形とした。

⑤ 地表面における模擬地震動波形の作成

工学的基盤面における加速度波形より、地表における加速度波形を作成する。表1で示した地盤構造モデルを用いて重複反射理論に基づいて地盤増幅率を計算し、工学的基盤面より上位の浅部地盤の影響を考慮した。

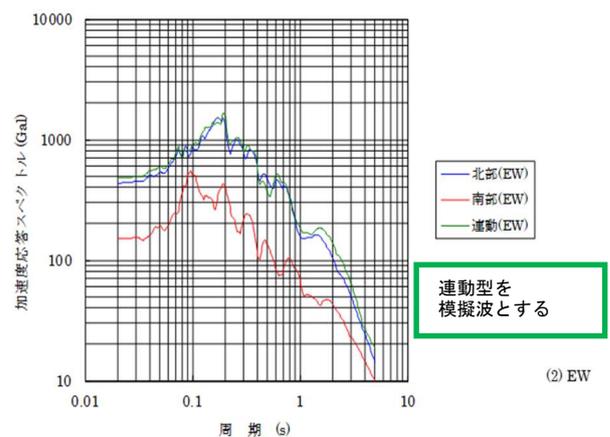
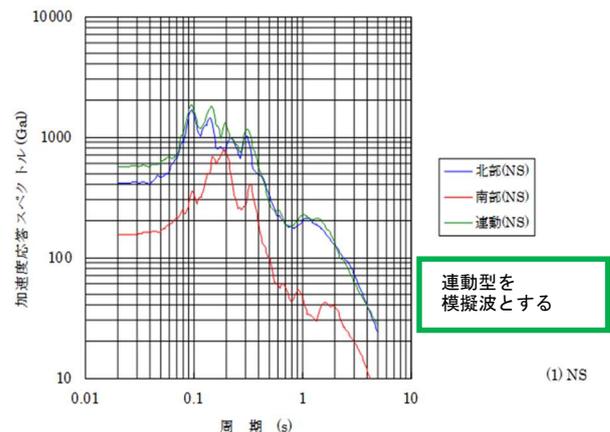


図4 模擬波(雲仙断層群南西部地震)の加速度応答スペクトル(工学的基盤面・減衰5%・

上段:南北NS方向・下段:東西EW方向)

### 3. 解析概要

解析モデルは、図5に示す1質点系モデルとした。運動方程式は以下となる。

$$m\ddot{u}_t + c\dot{u}_t + p_t = -m\ddot{y}_t \tag{1}$$

ここで、 $m\ddot{u}_t$  : 慣性力,  $c\dot{u}_t$  : 減衰力,  $p_t$  : 復元力,  $m\ddot{y}_t$  : 外力である。

数値解析にはNewmarkのβ法 (β=1/4) を用いた。

$$u_{t+\Delta t} = u_t + \Delta u \tag{2}$$

$$\dot{u}_{t+\Delta t} = \dot{u}_t + \frac{\ddot{u}_t + \ddot{u}_{t+\Delta t}}{2} \Delta t \tag{3}$$

$$\ddot{u}_{t+\Delta t} = -\ddot{u}_t - \frac{4}{\Delta t} \dot{u}_t + \frac{4}{\Delta t^2} \Delta u \tag{4}$$

$$\Delta u = \frac{m\ddot{u}_t + (4m/\Delta t + c)\dot{u}_t - p_t - m\ddot{y}_{t+\Delta t}}{4m/\Delta t^2 + 2c/\Delta t + k_t} \tag{5}$$

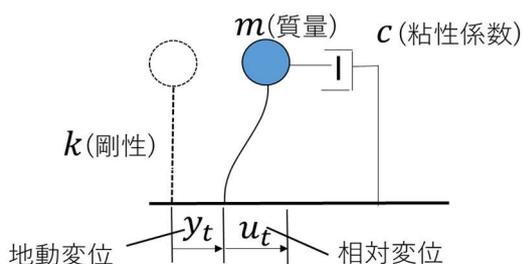


図5 1自由度系のモデル

表3 地震動の応答スペクトル

周期	加速度応答スペクトル
$T < 0.16$	$320 + 3000T$
$0.16 \leq T < 0.64$	800
$0.64 \leq T$	$5.12/T$

表4 地域増幅係数

周期	地盤増幅係数
$T < 0.576$	1.5
$0.576 \leq T < 0.64$	$0.864/T$
$0.64 < T$	1.35

### 4. 弾性応答解析

長崎市新市庁舎の耐震設計に使用された模擬波の加速度応答スペクトルを図6(a), 図6(b)に示す。減衰定数は2%, 5%, 10%と3通り設定して計算した。図6に示す、耐震設計用のスペクトルは、表3, 表4に示す建築基準法で定められたスペクトルに同表の地盤増幅係数と地域係

数0.8を乗じたものである。建築基準法で規定される耐震性能は、最低レベルであるため、通常の設計ではこれを上回る。ここでは、建築基準法レベルを2倍にしたものも同図に示す。

図6(a)の東西方向においては固有周期 $T$ が0.32sec.で最大加速度を示しており、減衰定数2% (青線) は建築基準法の2倍のレベルを超えている。 $T$ が0.3sec.から応答加速度は急激に低下し、 $T=1.5$ sec.を超えると、基準法のレベルを下回るようになる。また図6(b)の南北方向においては $T=0.15$ sec.で最大加速度となり、 $T=0.62$ sec.以降から建築基準法を下回った。東西・南北両成分ともに $T=0.4$ sec.以下の短周期成分に卓越がみられた。これは、長崎県内で観測した2016年熊本地震の解析結果<sup>2)</sup>と同じ傾向を示している。即ち、模擬波は、長崎の比較的強固な地盤特性が考慮されたものとなっている。模擬波の東西方向では、 $T=0.6$ sec.と $T=1.2$ sec.あたりにも応答量の大きい領域がある。模擬波の南北方向では、 $T=0.5$ sec.あたりに応答量の大きい領域がある。

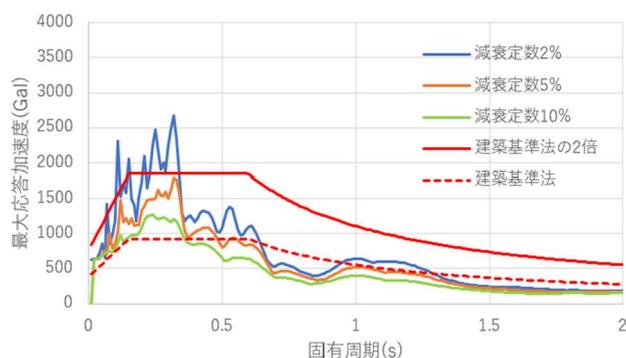


図6 (a) 模擬地震動 東西方向

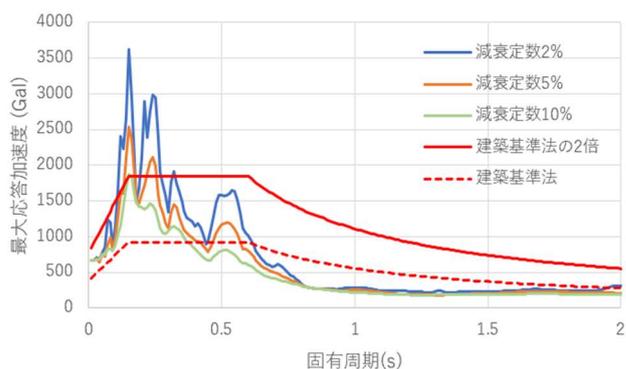


図6 (b) 模擬地震動 南北方向

### 5. 弾塑性応答解析

ここまでで、弾性応答計算結果から加速度応答スペクトルを算出し、模擬波の周期特性を得た。これから分かるように、この地震動が入力されると、建物は弾性範囲を超えて、弾塑性応答する。本節では、模擬波を入力した場合

の建物の弾塑性最大応答変位を計算し、これらと建築基準法の構造特性係数  $D_s$  値の算出根拠となっているエネルギー一定則<sup>4)</sup>と比較する。復元力特性は、Bi-linear型を採用した。減衰定数は2%、二次剛性は初期剛性の2%とした。本研究では、熊本地震で被災したRC造建物をモデル化した既往の研究<sup>3)</sup>と同じ解析モデルを使用する。具体的には、建物の重量を32MN、固有周期を0.41sec.に設定した。

建築基準法における保有水平耐力の計算に用いられる構造特性係数  $D_s$  は、下の式で算定される。

$$D_s = \frac{P_y}{P_E} = \frac{\delta_y}{\delta_E} = \frac{1}{\sqrt{2\mu-1}} \quad (6)$$

ここで、 $\mu = \delta_p / \delta_y$  は、塑性率 (Ductility factor) と呼ばれる。

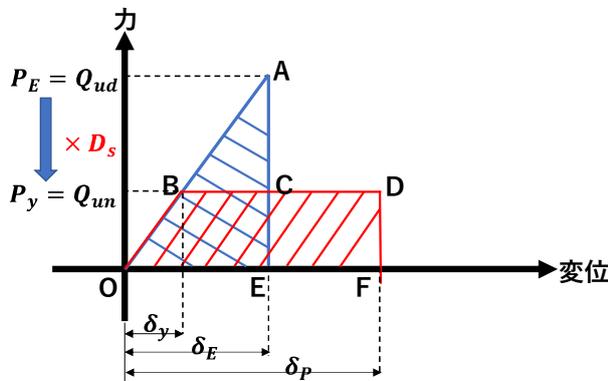


図 7-1 荷重-変形関係上のエネルギー一定則の模式図

これは、文献4)で提案されているエネルギー一定則を根拠にしている。エネルギー一定則とは、図7-1に示すように、地震応答する構造物の弾性ひずみエネルギーと弾塑性ひずみエネルギーが等価となるという仮説で、文献4)において2通りの地震動の入力に対して上記はほぼ成り立つとされている経験則である。図7-1においては、三角形OAEと台形OBDFの面積が等しいということになり、実際に計算してみると、

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} P_E \delta_E &= \frac{1}{2} P_y (2\delta_p - \delta_y) \\ k \delta_E \delta_E &= k \delta_y \delta_y (2\mu - 1) \quad (\because P_E = k \delta_E, P_y = k \delta_y, \delta_p = \mu \delta_E) \\ \delta_E^2 &= \delta_y^2 (2\mu - 1) \\ \frac{P_y}{P_E} &= \frac{\delta_y}{\delta_E} = \frac{1}{\sqrt{2\mu - 1}} = D_s \end{aligned}$$

上は、完全弾塑性型のモデルに対応した値である。実際の地震応答計算に用いる復元力特性は、塑性域でも強度上昇するモデルが用いられることが多い。ここでは、塑性領域での剛性を初期剛性の  $\alpha$  倍とにおいて、上と同様にエ

ネルギー一定則から、 $D_s$  を計算すると、次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} P_E \delta_E &= \frac{1}{2} P_y (2\delta_p - \delta_y) + \frac{\alpha k}{2} (\delta_p - \delta_y)^2 \\ \frac{k \delta_E^2}{2} &= \frac{k \delta_y}{2} (2\mu \delta_y - \delta_y) + \frac{\alpha k}{2} (\mu \delta_y - \delta_y)^2 \\ \frac{\delta_E^2}{\delta_y^2} &= (2\mu - 1) + \alpha (\mu - 1)^2 \\ D_s &= \frac{1}{\sqrt{2\mu - 1 + \alpha (\mu - 1)^2}} \quad (7) \end{aligned}$$

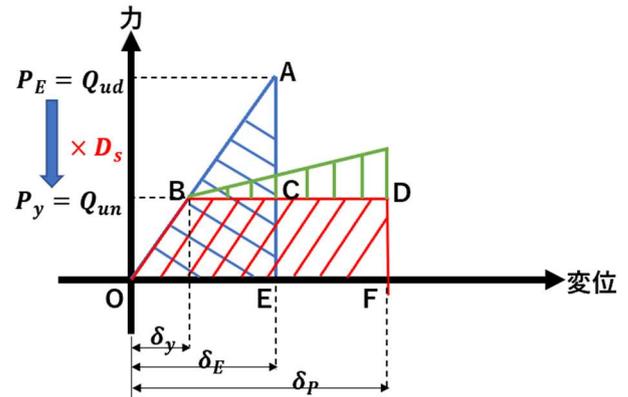


図 7-2 二次剛性を考慮したエネルギー一定則の模式図

また、文献4)では、下のような、 $D_s$  の計算法も提案されている。

$$D_s = \frac{1}{\mu} \quad (8)$$

これまでに定義した式(6)～(8)の3通りの  $D_s$  と、塑性率  $\mu$  の関係を示すと次の図8のグラフのようになる。

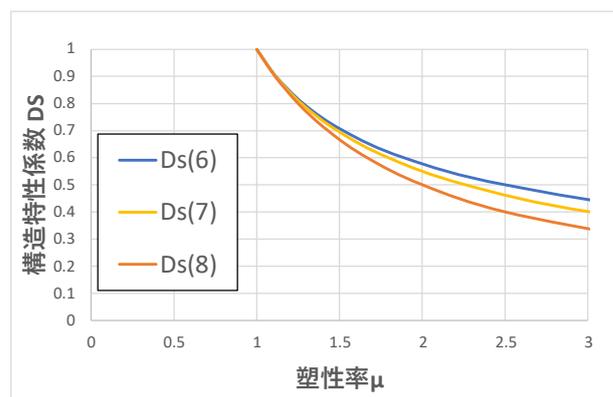


図 8  $D_s$  と塑性率  $\mu$  の関係

新たに提案した式(7)は、文献4)の式(6)と式(8)の間に位置していることが分かる。文献3)の研究では、弾塑性応答の数値解析結果は、式(6)と式(8)の間にプロットされることが分かっている。ここでは、式(7)

で弾塑性応答の数値解析結果を予測することを試みる。

式 (7) の  $\alpha$  の値は、図 7-2 によると二次剛性に対応しているため、本来であれば 0.02 となるが、後述する累積塑性ひずみによるエネルギー消費を取り込むために、便宜的に 0.3 と設定している。

弾塑性解析は、 $D_s$  値をパラメータとする。図 9 に模擬波を入力した際の弾性解析の水平力-水平変位関係を示す。弾性解析から得られた最大水平変位に弾性剛性を乗じて得られた最大水平力を  $Pe(\max)$  と表現する。弾塑性解析の降伏耐力は、この  $Pe(\max)$  に 1.0, 0.9, ..., 0.1 までの  $D_s$  値を乗じて設定する。図 10 に、弾塑性応答履歴の一例として、降伏耐力を、 $0.4 Pe(\max)$  としたときの水平力-水平変位関係を示す。建物モデルは早期に降伏するものの累積する塑性ひずみによるエネルギー吸収が期待できる荷重-変形関係となっている。実際、図 10 の最大応答変位は、図 9 の 5 cm よりもわずかに大きい 5.7 cm であり、降伏を許容しても大きな被害が出るとは考えにくい結果が得られている。図 11 に各  $D_s$  値における弾塑性時刻歴応答解析から得られた最大応答変位をプロットしたものを示す。図 11 (a) は模擬地震動の東西方向、図 11 (b) は南北方向の波を入力した結果である。図 11, 図 12 とともに式 (6) ~ (8) の 3 通りの方法による簡易な最大応答予測も載せている。

図 12 にも各  $D_s$  値における弾塑性時刻歴応答解析から得られた最大応答変位をプロットしたものを示す。図 12 (a) は長崎市の観測地震動を増幅したものの東西方向、図 12 (b) は南北方向の波を入力した結果である。

## 6. 弾塑性応答解析結果と考察

弾塑性時刻歴応答解析による数値計算結果とエネルギー一定則の予測値が同程度の値となったのは、東西入力では 1.0 から 0.7 の範囲で、南北方向入力時では  $D_s$  値が 1.0 から 0.5 の範囲であった。それ以下の  $D_s$  値の範囲では数値計算結果はエネルギー一定則による予測値よりも大幅に小さくなった。その要因としては、塑性化による消費エネルギーは、図 10 のように応答時間中に累積するため、エネルギー一定則の想定よりも多くの履歴減衰が発揮されたためと言える。

今回の模擬波の数値計算結果は、基準法で想定している最大応答変形レベルを下回ったことから、長崎市において予想されている強震動に対して想定以上の被災が起る等の危険な兆候は見られない。

図 11 (a) は、変位一定側よりも、小さい応答が出ている一方で、図 11 (b) は、エネルギー一定側では過大評価となるが、変位一定側では過小評価となる結果が得られている。本論で提案した図の緑線は、両者の中間に位置しており、弾塑性応答の最大変位を簡易に予測できる可能性が示されている。今後も同様の研究を進めてさら

なるデータを蓄積してゆく予定である。

図 12 は、図 11 と比較すると、弾性応答変位も小さく、かつ変位一定側よりも、小さい応答量となっている。文献 4) をはじめとする既往文献を調べたところ、変位一定側を下回るような傾向の応答結果は見られず、PGA が小さい観測波を単純に増幅したとしても、適切な強震の入力波となりえないことがわかる。本論のように模擬地震動を用いて応答性状を検討することが、長崎の地震防災に備えるにあたって重要であることが再確認できた。

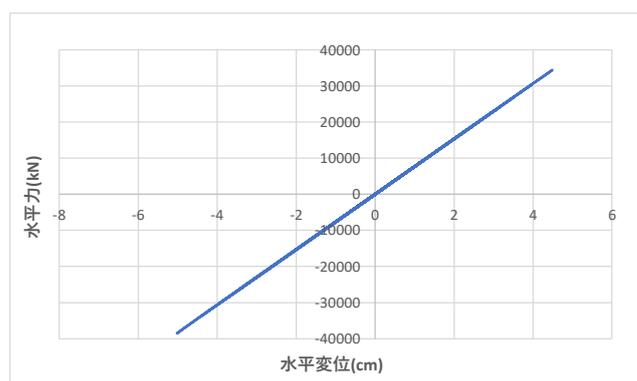


図 9 弾性解析の結果

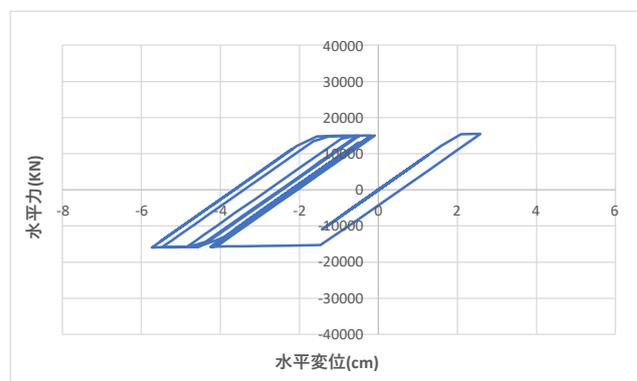


図 10 弾塑性解析  $0.4Pe(\max)$  の結果

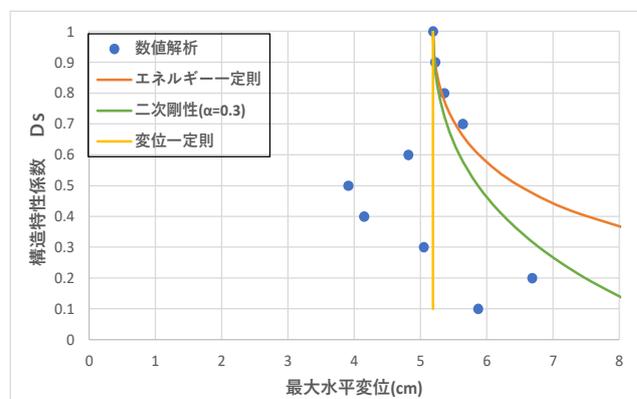


図 11 (a) 長崎模擬地震動 (東西方向) による応答比較

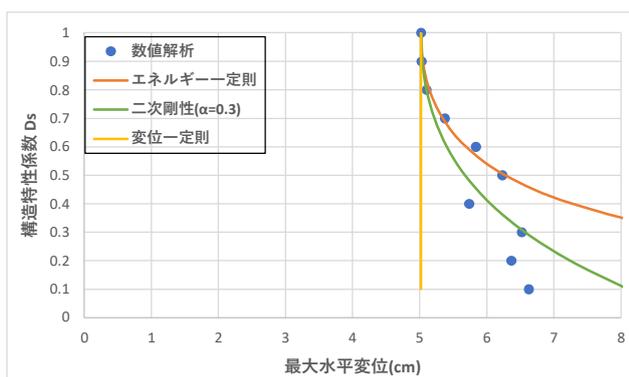


図 11 (b) 長崎模擬地震動（南北方向）による応答比較

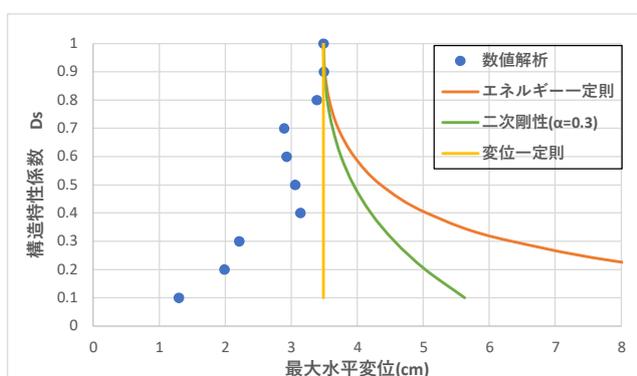


図 12 (a) 長崎市観測波の東西方向による応答比較

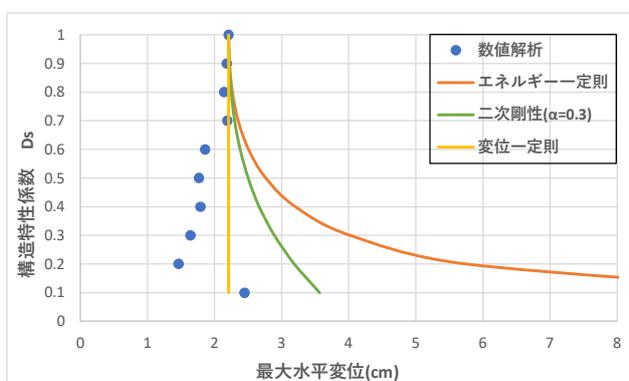


図 12 (b) 長崎市観測波の南北方向による応答比較

## 7. 今後の研究計画

現時点の解析においては固有周期, 二次剛性, とともにパラメータを固定して解析を行っている。長崎市に立つ実際の建物は, 多くのバリエーションがあるため, 本論の結果があまねく成立するとは限らない。また, 入力地震動も長崎市の模擬波と観測波のみで, 一般性に欠く。新たに二次剛性追加したエネルギー一定則 (式 (7)) と時刻歴応答解析値との比較も不十分である。今後は, 上記を踏まえて, パラメータを拡大し, より一般的な傾向を

見出して, 長崎の都市防災に資するデータを蓄積してゆく。

### <参考文献>

- 1) 国立研究開発法人防災科学技術研究所 HP  
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 2) 中原浩之, 内田美寿々: 熊本地震による長崎県での地震動データの応答解析, 長崎大学大学院工学研究科研究報告第 47 巻 89 号, pp.44-52, 2017.
- 3) 中原浩之, 戸高広大, 坂井 実佳子: 熊本地震における強震記録を用いた被災建造物の 1 質点系モデルの弾塑性応答性状に関する解析的研究, 長崎大学工学部研究報告第 51 巻 96 号, pp.48-54, 2021.
- 4) Veletsos, A. S. and Newmark, N. M. : Effect of Inelastic Behavior on the Response of Simple Systems to Earthquake Motions, Proceedings, Second World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, II, 895-912. 1960.
- 5) 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ: 南海トラフの巨大地震モデル検討会 (第二次報告), 強震断層モデル編—強震断層モデルと震度分布について—, 2012.

**謝辞:** 本研究で使用した模擬地震動は, 長崎市役所から提供を受けた。長崎市長・田上富久氏をはじめ, 関係各位に謝意を表す。