

# 相模トラフ沿いの地震のばらつきを考慮した 地震動解析とリスク評価

山本 優\*<sup>1</sup>・西本 昌\*<sup>1</sup>・五十嵐 さやか\*<sup>1</sup>・内山 泰生\*<sup>1</sup>・糸井 達哉\*<sup>2</sup>

Keywords : great earthquakes along Sagami Trough, source characteristics, uncertainty, variation, seismic risk analysis

相模トラフ沿いの地震, 震源特性, 不確実性, ばらつき, リスク評価

## 1. はじめに

南海トラフ地震や相模トラフ地震, 首都直下地震などの大規模災害に対し, レジリエントな都市を実現するためには, 都市を構成する各建築物の損傷を防ぐとともに, 損傷した場合の機能維持, 早期回復を視野に入れた対策を行うことが重要である。レジリエンスを表現する指標の1つであるロバストネスは, 性能低下を招かずに外力に耐えることのできる能力<sup>1)</sup>とされている。ロバストネスを高める対策についてその有効性を評価するためには, 設計想定を超える地震外力が, どの程度の大きさで, どの程度の発生可能性があるのかを適切に評価し, それに対する建築物の応答や生じうる損失の大きさが如何ほどかを適切に評価する, 所謂リスク評価の観点が必要である。

近年, 地震外力の評価技術として, 断層モデルを用いた地震動評価手法が実務設計においても広く用いられている。断層モデルでは, 断層破壊の物理現象を様々な震源パラメータで説明することで, 任意の地点の時刻歴地震動をシミュレートすることが可能となる。しかし, 地震動評価は自然現象としてのばらつきを含めた不確実性を避けることができない。巨視的な断層面設定の多様性や震源パラメータの不確実性が評価結果に大きなばらつきを与えることから, 地震外力の設定やリスク評価のための将来予測としての地震動評価を行う場合, 従来のような一つあるいは少数のシナリオのみを考慮した地震動評価では不十分であることが指摘されている<sup>例えば 2)</sup>。しかし一方で, 過去の地震観測

記録等から得られる震源パラメータの平均像とばらつきを確率変数として, 断層破壊の多様性を考慮した多数回のシミュレーションを行う事により, 当該地点の地震動のばらつき(当該地点の地震動の平均像とその振れ幅)を発生確率と紐づけて評価することが可能となる。以上を入力地震動とした地震応答解析を行うことで, 設計想定を超える地震外力に対する建物の応答とそれが起こる可能性を把握することが可能となる。その結果, 建物のレジリエンス性についても, より具体的に, より定量的に説明することができるようになると考えられる。

以上の背景を受け, 本研究では, 近い将来の発生と甚大な被害が予測されている相模トラフ沿いの巨大地震を対象に, 地震外力のばらつきが建物の地震リスクに与える影響を把握することを目的として, 震源パラメータの不確実性を考慮した地震動評価を実施し, 地震動強さの統計量の特徴を分析するとともに, 30層の超高層建築物を対象に, ばらつきを有する地震外力に対する地震応答解析及び建物機能損傷評価を実施した。

## 2. 相模トラフ沿いの地震の地震動評価

2011年東北地方太平洋沖地震をきっかけに地震本部により長期評価<sup>注1)</sup>手法の見直しが行われ, 地震の多様性が重視されるようになった。これを受けて地震本部(2016)<sup>2)</sup>では, 相模トラフ沿いの地震の規模や震源パラメータを変動させた長周期地震動評価を実施している。首都圏では多くの高層建物が集中しており, 巨大地震

\*1 技術センター 都市基盤技術研究部 防災研究室

\*2 東京大学

の長周期地震動に対する地震動強さの特徴を把握することは極めて重要である。本章では、地震本部(2016)の検討を参照し、相模トラフ地震を対象に震源パラメータの不確実性を考慮した長周期地震動評価を実施し、地震動強さの統計量の分析を行った。

2.1 地震動評価

2.1.1 震源・地盤モデル

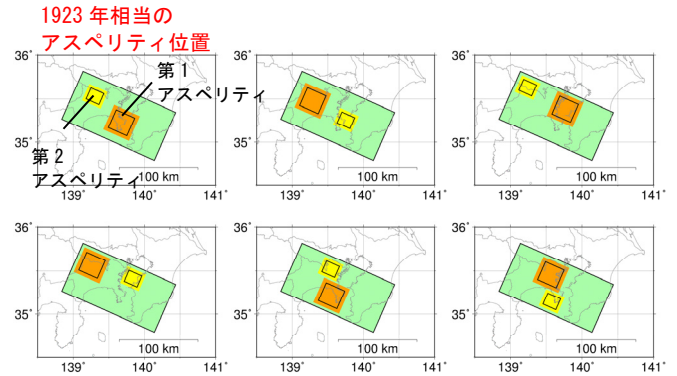
本報告では、相模トラフ沿いに発生する巨大地震のうち、1923年大正型関東地震の巨視的断層面を対象とした。震源モデルを図-1に示す。主な震源パラメータを表-1に示す。簡単のため、断層面はSato et al.(2005)<sup>3)</sup>による断層すべり分布を、横浜市の検討<sup>4)</sup>を参考に2個のアスペリティモデル(図-1の橙色：第1アスペリティ、黄色：第2アスペリティ<sup>注2)</sup>)に置換した震源モデルを用いた。断層面を1km×1kmの要素断層に分割し、要素断層毎に与える震源時間関数として中村・宮武(2000)<sup>5)</sup>を用いた。

3次元地下構造は先名ほか(2015)<sup>6)</sup>の深部・浅部統合モデルを用い、大正型関東地震の震源域を含む320km×220km×深さ50kmの範囲をモデル化した。3次元有限要素法(3D-FEM)<sup>7)</sup>により周期2.5秒以上を対象に長周期地震動を計算した。

震源特性の不確実性として、地震本部(2016)<sup>2)</sup>を参照し、アスペリティの面積(サイズ①とサイズ②の2通り)、アスペリティの位置(6通り)、破壊開始点の位置(6通り)を設定し、計72通りの計算を実施した。図-1(a)はアスペリティ位置を示している。橙色及び黄色の大きさがサイズ①を示しており、アスペリティ内の黒枠がサイズ②の場合を示している。図-1(b)は設定した破壊開始点を示している。ここで、図-1(a)の左上及び図-1(b)の断層の南西側に位置する赤★印が1923年大正型関東地震に最も近い配置の震源モデル(以下、1923年相当と称す)である。

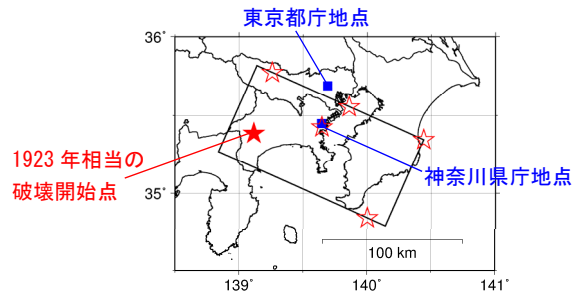
2.1.2 計算結果の検証

翠川ほか(2022)<sup>8)</sup>が1923年大正型関東地震に対し、本郷の地震記録の復元を実施しており、過去の復元結果との比較を行っている。検証のため、1923年相当による減衰5%擬似速度応答スペクトル(以下、pSv(h=5%)とする)との比較を行った結果を図-2に示す。なお、図-2は、翠川ほか(2022)の結果図をデジタイズしたものである。計算結果は、復元結果に概ね整合する振幅となっており、過去の復元結果よりも翠川ほか(2022)の結果に近い結果が得られた。なお、3章で用いる、本モデルから計算した建物応答評価用の地震動の東京都庁地点及び神奈川県庁地点の震度は6弱及び6強となり、



(a) アスペリティ位置

※12通り、橙色と黄色のハッチの大きさがサイズ①であり、黒枠はサイズ②の場合を示す



(b) 破壊開始点 (6通り, ★☆印)

図-1 相模トラフ沿いの地震の震源モデル(大正型)

Fig.1 Fault model for the earthquake along Sagami Trough

表-1 主な震源パラメータ

Table 1 Fault Parameters

断層パラメータ	値	断層パラメータ		値	
		サイズ①	サイズ②	サイズ①	サイズ②
断層原点 緯度[deg]	34.79 140.14	第1アスペリティ			
断層上端深さ[km]	4.00				
走向, 傾斜, すべり角[deg]	294 16 139	面積[km <sup>2</sup> ]	1296	676	
断層サイズ[km]	130 × 70	平均すべり量[m]	7.61	7.64	
破壊伝播形式, Vr[km/s]	同心円状, 2.52	地震モーメント[Nm]	3.38E+20	1.77E+20	
地震モーメント[Nm]	1.07E+21	第2アスペリティ			
モーメントマグニチュード	8.0				
震源近傍の剛性率[N/m <sup>2</sup> ]	3.43E+10	面積[km <sup>2</sup> ]	624	288	
		平均すべり量[m]	5.28	4.99	
		地震モーメント[Nm]	1.13E+20	4.93E+19	

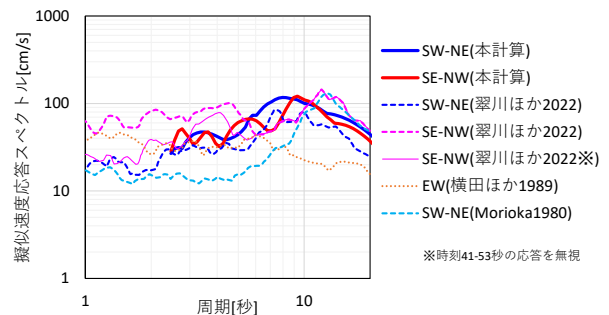


図-2 翠川ほか(2022)との pSv(h=5%)の比較 (翠川ほか(2022)をデジタイズして作成)

Fig.2 Comparison between estimation results of Midorikawa et al.(2022) and this study

概ね既往の研究の震度<sup>9)10)</sup>と対応した。

2.2 統計量の基本特性

地震動強さの基本的な統計量、つまり平均や標準偏

差( $\sigma$ )は、耐震性能評価で活用する外力を選択する上で重要な指標となり、各震源パラメータとの関連の分析は重要である。本節では、図-1 に示す代表地点(東京都庁地点、神奈川県庁地点)における地震動評価結果及び地震動強さの統計値の空間分布、震源パラメータの関連について考察した。

2.2.1 pSv(h=5%)の評価結果とばらつき

東京都庁地点と神奈川県庁地点における地震動評価結果を図-3 に示す。左図のグレーの線が 72 通りの計算結果の水平 2 成分の pSv(h=5%)、黒線が平均と平均+1 $\sigma$ 、右図の黒線は左図と同じで、赤線と青線が 1923 年相当による NS, EW 方向の pSv(h=5%)である。参考のため、告示 Lv.2<sup>注3)</sup>相当の振幅(80cm/s)の線を緑線で示した。東京都庁地点の平均は告示 Lv.2 を下回るが、平均+1 $\sigma$ は周期 4 秒以上で告示 Lv.2 を上回る。神奈川県庁地点は平均が概ね告示 Lv.2 と同等か上回る大きさであり、平均+1 $\sigma$ はほぼ全ての周期帯で告示 Lv.2 を大きく上回っている。東京都庁地点と神奈川県庁地点の

地震動の大小関係は、既往の研究とも整合する。ここで、1923 年相当の地震は、東京都庁地点及び神奈川県庁地点の 2 地点とも、平均と平均+1 $\sigma$  の中間程度の値であることがわかる。

2.2.2 pSv(h=5%)の空間分布

先名ほか(2015)の 3 次元地下構造<sup>9)</sup>を図-4 に示す。周期 5 秒の pSv(h=5%)の平均値(幾何平均)と標準偏差(自然対数標準偏差)を図-5 に示す。平均値の大きさは、図-4 の基盤深度が深い部分と概ね対応し、基盤深度の深さが、地震動の振幅に大きく影響することがわかる。東京都の南部や神奈川東部、房総半島の中央部で特に大きい傾向がある。

一方、標準偏差は異なる傾向であり、断層の長辺方向となる北西側のばらつきが大きく、短辺方向に近い南西側や北東側のばらつきが小さい傾向がある。これは、断層形状と破壊開始点の位置関係に起因している可能性がある。一方、東京都の南部など、平均とばらつきが両方大きい地点も存在する。

2.2.3 震源パラメータの影響度

本解析で考慮した震源パラメータの影響度を分析した。影響度の評価結果を図-6 に示す。西本ほか(2022)<sup>11)</sup>と同様に、該当特性を固定した場合の pSv(h=5%)の平均を全ケースの pSv(h=5%)の平均で除す形で比を求めた。比率の常用対数の絶対値(図中の縦軸の値=1 からの距離)を影響度と考える。赤系及び青系の色がそれぞれアスペリティサイズ・位置による影響を示し、緑系の色が破壊開始点位置による影響を示している。

東京都庁地点、神奈川県庁地点ともにアスペリティのサイズや位置に伴う影響は小さい。一方で、特定の破壊開始点の影響度が非常に高いものが存在する。図は割愛するが、東京都庁地点、神奈川県庁地点以外の他の地点でも、特定の破壊開始点の影響が大きい傾向であった。この結果から、破壊開始点を如何に設定するかによって、予測地震動の平均的な大きさだけでなく、ばらつきの大きさを支配する要因でもあること、

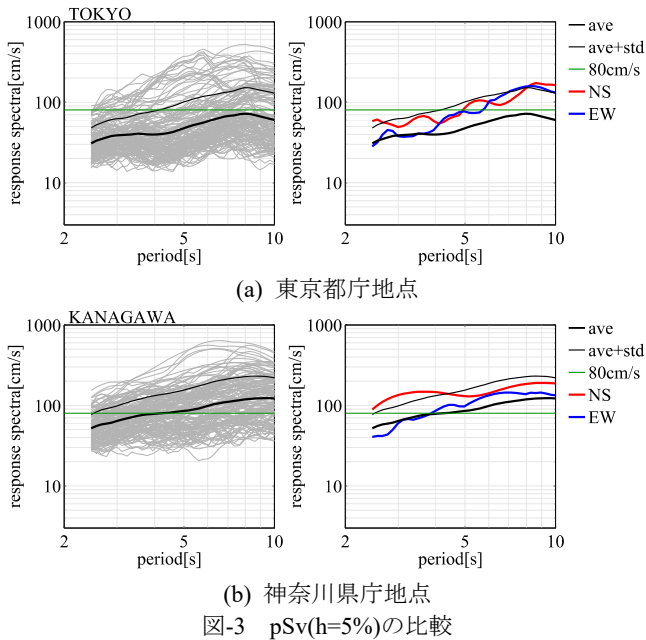


Fig.3 Pseudo velocity response spectra (h=5%)

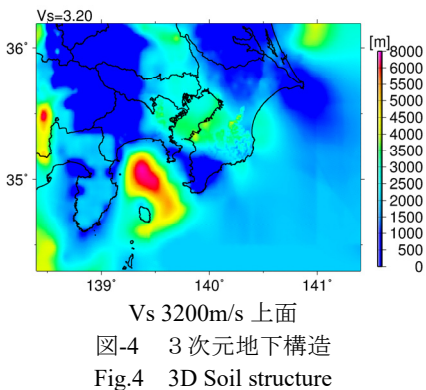


図-4 3次元地下構造  
Fig.4 3D Soil structure

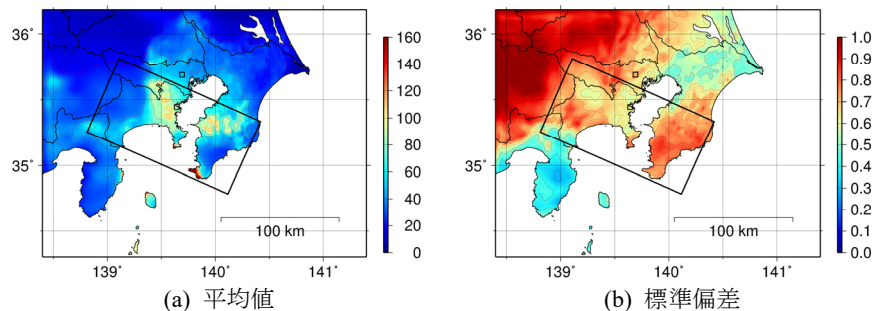


図-5 周期 5 秒の pSv(h=5%)の空間分布  
Fig.5 Spatial distribution of pseudo response spectra (h=5%) with the period of 5s

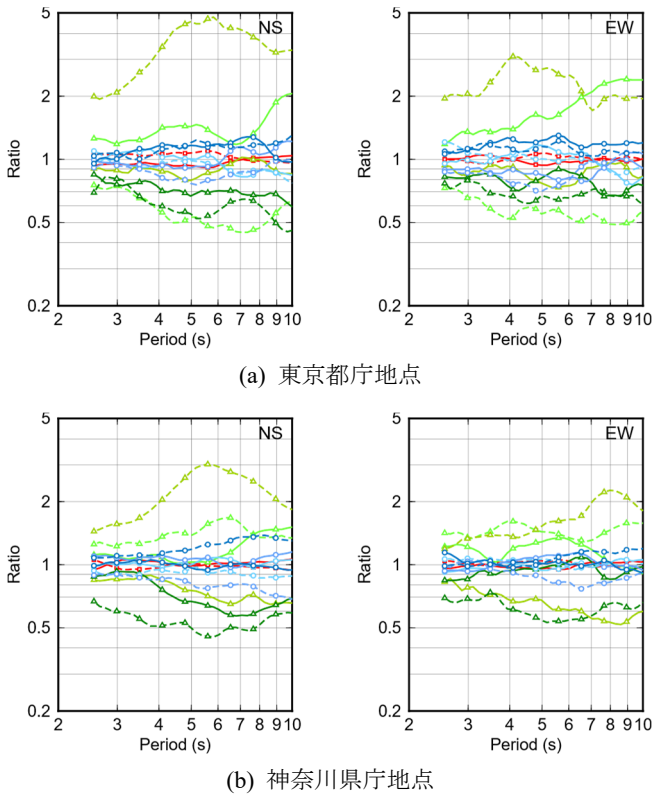


図-6 震源パラメータの影響

(赤系の線：アスペリティサイズ，青系の線：アスペリティ位置，緑系の線：破壊開始点位置)

Fig.6 Effects of source parameters

さらにこれらの絶対値は、方向や周期帯により変動することもわかる。

### 3. 建物機能損傷評価

本章では、ばらつきを有する地震動評価結果が建物応答や機能維持に及ぼす影響を把握することを目的として、応答解析に基づく建物の機能損傷確率の試算を行った。

#### 3.1 入力地震動

入力地震動は、前章で評価した東京都庁地点および神奈川県庁地点における72ケースの震源に対する工学的基盤波とする。水平2方向のうちNS方向の72ケースの  $pSv(h=5\%)$  と平均及び平均  $\pm 1\sigma$ 、告示Lv.2、1923年相当の結果を図-7に示す。建物機能維持の観点から、機器類の応答も評価に加えるため、72ケースの震源に対して、2.5秒以下の短周期地震動を統計的グリーン関数法<sup>12)</sup>で評価し、前章の長周期地震動結果とのハイブリッド合成<sup>13)</sup>(接続周期2.5秒)を行い、建物応答評価用の地震動を作成した。ここで、72ケースの  $pSv(h=5\%)$  の平均と平均  $+1\sigma$  および告示Lv.2のスペクトルに適合させた模擬地震動(乱数位相)も別途作成した。

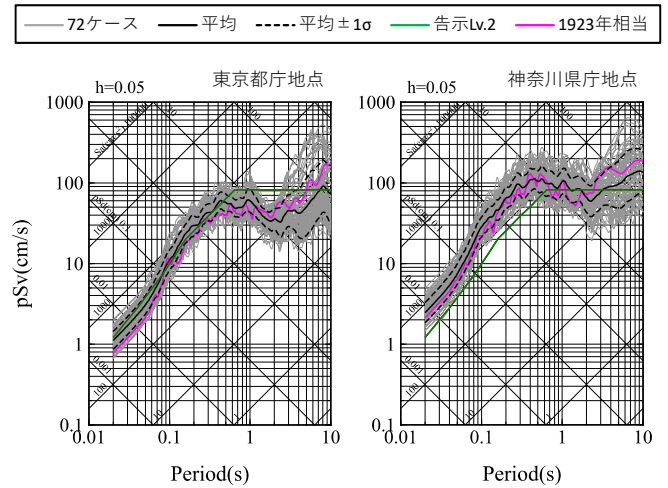


図-7 入力地震動の  $pSv(h=5\%)$

Fig.7 Pseudo response spectra ( $h=5\%$ ) of input motion

#### 3.2 地震応答解析

解析建物は、30層のS造超高層建物を想定したせん断質点系モデルとした。各層高さは4mとし、 $A_i$ 分布外力に対して各層変形が等しくなるように剛性比を定め、さらに1次固有周期  $T=3.6$ 秒 ( $0.03H$ ) に一致するように各層剛性を比例倍した。地震応答解析については、建物基礎底への1方向入力とし、2%の初期剛性比例型の減衰を付与した。また、非線形特性は各層共通とし、第1折点時変形角  $R_{y1}=1/250rad$ 、第2折点時変形角  $R_{y2}=1/125rad$  の標準型トリリニアとしてモデル化した。第1折点時におけるベースシア係数  $C_B$  は  $0.074(C_B \times T=0.27)$  である。なお、建物モデルの妥当性検証のため、標準3波(50kine基準化)およびLv.2告示波による応答値を事前に確認し、Taft波において塑性率2をやや超える層が一部に見られたものの、いずれの地震動によっても最大層間変形角が  $1/100rad$  以内(最大  $1/119rad$ ) に収まることを確認している。

応答の大きかったNS方向を一例として、72ケースの地震動による最大層間変形角の分布とその統計値(平均、平均  $\pm 1\sigma$ ) を図-8に示す。また、1923年相当波、比較用として作成した模擬地震動による結果についても併せて示す。72ケースの応答に関しては、建物最下層の応答が最も大きい傾向となっており、その平均と平均  $+1\sigma$  は、東京都庁地点において  $1/176, 1/70rad$  程度、神奈川県庁地点において  $1/68, 1/26rad$  程度であった。なお、72ケースによる最下層の応答最大値については、東京都庁地点で  $1/14rad$ 、神奈川県庁地点で  $1/5rad$  という非常に大きな値となっており、震源パラメータの組合せによっては、いずれのサイトにおいても建物倒壊に至る危険性のある地震動が生じる可能性があることが確認された。

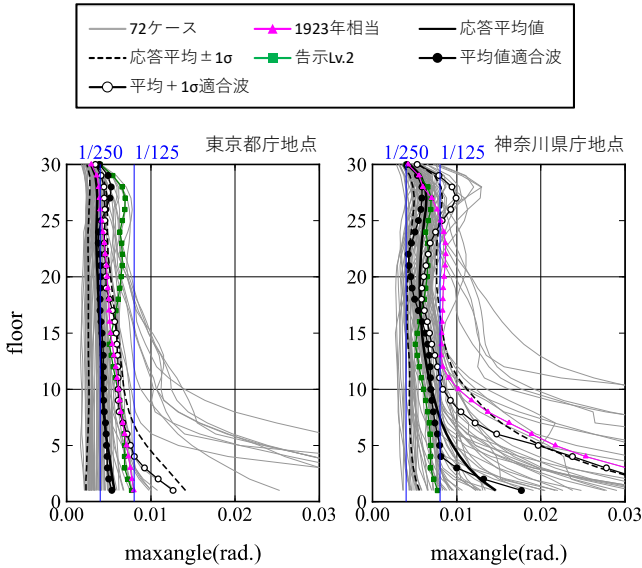


図-8 最大層間変形角(NS 方向)  
Fig.8 Maximum inter-story drift in NS direction

また、図-7 の  $pSv(h=5\%)$  の統計値に適合する模擬地震動、1923 年相当波、告示波 Lv.2 について応答を比較すると、1923 年相当波による応答は、東京都庁地点においては平均+1 $\sigma$  の適合波と同等かやや小さめ、神奈川県庁地点においては平均+1 $\sigma$  の適合波よりも大きめの結果となった。いずれのサイトに関しても、応答の大小関係は、建物 1 次周期 3.6 秒付近の地震動レベルと概ね調和的であった。

### 3.3 建物機能損傷評価

本項では、給水システムの損傷に起因する建物の機能損傷の評価を行った。システム構成を図-9 に示す。1 階に設置された並列接続の受水槽 1 および 2 と揚水ポンプ、各階配管、30 階に設置された高置水槽が直列で接続される構成である。各部位の損傷指標は、受水槽及び高置水槽、揚水ポンプについては、図-9 に示す対象周期（カッコ内の数字）における各設置階の床応答加速度、配管については各設置階の層間変形とした。また、各部位の耐震基準は耐震 S クラス<sup>14)</sup>に相当するとし、その耐力分布は表-2 の平均値とばらつきを有する対数正規分布に従う仮定の下、各部位の応答が耐力を上回る確率を評価した。

入力地震動(NS 方向)の地震動強さと給水システム全体の損傷確率の関係を図-10 に示す。図-10 では、給水システムを 1 階受水槽群、揚水ポンプ、各階配管群、高置水槽で部位分けし、システム全体の損傷確率に対する寄与度が高い部位毎にマーカー種別を区別して図示した。具体的には、各印が○の場合はシステム損傷が配管群で決まった場合、△の場合はシステム損傷が

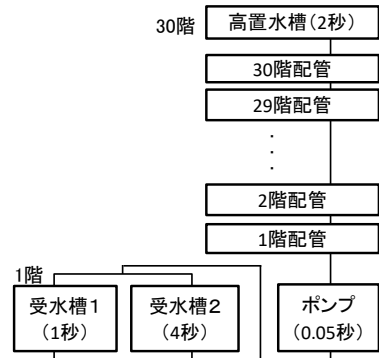


図-9 システム構成  
Fig.9 System configuration diagram

表-2 機器類の耐力分布  
Table 2 Yield strength distribution

	$\mu$	$\zeta$
受水槽1	1471 gal (1.5G)	0.2
受水槽2	1471 ga l(1.5G)	
ポンプ	981 gal (1.0G)	
配管	5.6 cm (1/72rad.)	
高置水槽	1962 gal (2.0G)	

※ $\mu$ :対数平均値,  $\zeta$ :自然対数標準偏差

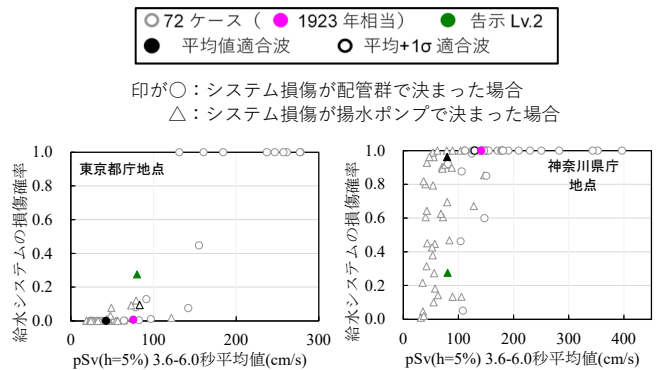


図-10 入力地震動(NS 方向)の地震動強さと損傷確率の関係  
Fig.10 Relationship between the input motions in NS direction and functional loss probability

揚水ポンプで決まった場合を示している。横軸の地震動強さ指標については、建物の塑性化の影響を考慮し、 $pSv(h=5\%)$ の周期 3.6~6.0 秒の平均値を採用した。

図-10 から、本システムに関しては、配管群(図-10 の○印)または揚水ポンプ(図-10 の△印)がシステム全体の損傷に寄与することが確認された。特に、配管群が寄与するケース(図-10 の○印)に関しては、建物の 1 次固有周期より長い範囲の地震動強さによって、給水システムの損傷確率の大小関係が整理でき、いずれのサイトにおいても、入力地震動の  $pSv(h=5\%)$  の周期 3.6~6.0 秒平均値が 120cm/s 程度を境にシステム損傷確率が上昇

する傾向が確認された。一方、対象周期(0.05 秒)の地震動が東京都庁地点よりも大きい神奈川県庁地点においては、揚水ポンプでシステム損傷が決まるケース(図-10 の△印)が多くなっており、横軸の地震動強さ(pSv(h=5%))の周期3.6秒~6.0秒の平均値)に対するシステム損傷確率の相関は小さいことがわかる。なお、受水槽および高置水槽については、地震応答解析で得られた建物応答に対して相対的に強い耐力設定となっていたため、これらについては、システム全体の損傷に寄与することはなかった。

入力地震動(NS 方向)に対して給水システムの損傷確率が 0.9 以上となったケースについて、システム損傷に寄与する部位毎に色分けした pSv(h=5%)を図-11 に示す。

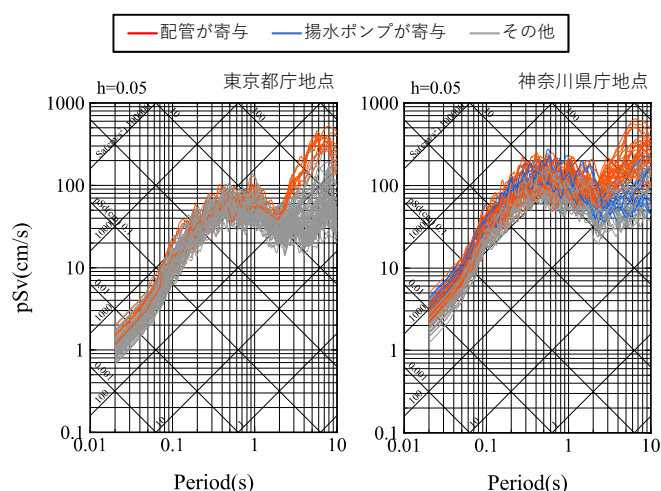


図-11 地震動レベルと機能損傷に寄与する部位の関係  
Fig.11 Relationship between input motion amplitude level and the equipment parts that contribute to functional loss

システムの損傷確率が高い結果となったケースについては、地震動レベルが全体的に大きい傾向が確認された。システム損傷に寄与する部位毎に見てみると、配管が寄与するケースでは、建物 1 次固有周期付近の地震動レベルが大きい傾向となっているが、揚水ポンプが寄与するケースでは、周期 0.05 秒付近の地震動レベルが大きい結果となっており、必ずしも建物 1 次周期付近の地震動レベルが大きい傾向とはなっていない。一般的に、設計時には建物周期に対応する地震動レベルに着目する機会が多いが、本報告の結果より、建物の機能損傷リスクを考える上では、設備機器等も含めて、建物の機能損傷に寄与する部位と関連性の高い地震動強さ指標のレベルの大小についても重要な情報となることが明らかとなった。

### 3.4 建物の機能損傷リスク試算

ここで参考値として、今後 50 年以内の大正型関東地

震の発生確率<sup>15)</sup>を考慮した給水システムの損傷確率を試算した。地震発生確率については、地震本部(2004)の手法<sup>15)</sup>に倣い、2022 年 1 月基準で 3.7%と評価された。

大正型関東地震の地震発生領域と本報の 72 ケースの震源が対応しており、72 ケースの地震が等重みで発生すると仮定した場合の、今後 50 年以内の大正型関東地震による建物の機能損傷確率の試算結果を表-3 に示す。本評価については、水平 2 方向の応答の大きい方の結果を用いて損傷確率を算定しており、東京都庁地点と比較して、神奈川県庁地点の方が建物の機能損傷リスクは高い結果となった。

表-3 本報告による建物の機能損傷リスク  
Table 3 Risk of building function loss for this study

今後 50 年の大正型関東地震による建物の機能損傷確率(%)	東京都庁地点 0.6	神奈川県庁地点 3.0
--------------------------------	---------------	----------------

## 4. まとめ

本報告では、相模トラフ沿いの地震のうち 1923 年大正型関東地震の巨視的断層面を対象に、震源パラメータの不確実性を考慮した計 72 通りの長周期地震動を評価した。

計算結果の検証の上、耐震設計における外力設定においてばらつきを伴う地震動の統計量を扱うことを想定し、pSv(h=5%)の平均・ばらつき特性の分析や 1923 年相当の地震動との比較、周期 5 秒を対象とした平均や標準偏差の空間分布、pSv(h=5%)に対する震源パラメータとの影響について考察を行った。以上の分析から、破壊開始点の影響が大きく、評価地点により異なることを定量的に示した。このような検討は、相模トラフの地震に対する地震動評価と耐震性能評価において重要となる断層パラメータの把握などにおいて有効であると考えられる。

さらに、上記のモデルから建物応答評価用の地震動を作成の上、30 層の超高層建築物の機能損傷リスクの試算を行い、建物機能損傷に寄与する部位と地震動レベルの対応関係を明らかにした。機能損傷リスクの試算結果は、設定した震源パラメータの不確実性に対し、等重み(生起確率が等しい)を仮定したが、今後、その設定に関する知見が蓄積されれば、本報告で示した一連の流れにより、より現実的なリスク評価並びに外力の設定が可能であろう。

## 謝辞

図の描画には GMT を使用しました。

## 注

- 注1) 主要な活断層で発生する地震や海溝型地震を対象に地震の規模や一定期間内に地震が発生する確率を予測したものの。
- 注2) 横浜市の検討<sup>3)</sup>では、地震調査研究推進本部の強震動予測レシピア<sup>16)</sup>に従い、大正型関東地震のアスペリティ個数を2個とし、2:1の面積比としている。ここで、面積比2のほうを第1アスペリティ、面積比1のほうを第2アスペリティと呼んでおり、本報告でも同じ呼び方をした。
- 注3) 平成12年建設省告示1461号で規定された解放工学的基盤における加速度応答スペクトルのうち、極めて稀に発生する地震動に対応するもの。本報告では、これを擬似速度応答スペクトルに換算したものを扱う。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：建物のレジリエンスとBCPレベル指標検討特別委員会報告書，事業継続計画策定のための地震災害等に対する建物維持・回復評価指標の提案に向けて，2020.
- 2) 地震調査研究推進本部，地震調査委員会：長周期地震動評価2016年試作版－相模トラフ巨大地震の検討－，2016.
- 3) Sato, H., N. Hirata, K. Koketsu, D. Okaya, S. Abe, R. Kobayashi, M. Matsubara, T. Iwasaki, T. Ito, T. Ikawa, T. Kawanaka, K. Kasahara, and S. Harder: Earthquake source fault beneath Tokyo, *Science*, Vol. 309, pp.462-464, 2005.
- 4) 横浜市：横浜市地震被害想定報告書，2012.
- 5) 中村洋光，宮武隆：断層近傍強震動のための滑り速度時間関数の近似式，*地震2*，52，pp.1-9, 2000.
- 6) 先名重樹，若井淳，神薫，前田宜浩，松山尚典，藤原広行：強震動評価のための関東地域における浅部・深部統合地盤モデルの構築，*日本地震工学会・大会-2015*，pp.4-37, 2015.
- 7) 山本優，内山泰生：大規模地震における長周期地震動シミュレーション技術の開発，*大成建設技術センター報*，第49号，01-1～01-7，2016.
- 8) 翠川三郎，三浦弘之，山田眞：ユーイング円盤記録式強震計による1923年関東地震の記象の解析 その2 地震計の特性の検討に基づく地動の推定，*日本地震工学会論文集*，第22巻，第1号，pp.16-35，2022.
- 9) 諸井孝文，武村雅之：関東地震(1923年9月1日)による木造住家被害データの整理と震度分布の推定，*日本地震工学会論文集*，第2巻，第3号，pp.35-71, 2002.
- 10) 宮腰淳一，小穴温子：断層モデルによる南海トラフ地震・相模トラフ地震の地震動評価，AIJシンポジウム「大振幅地震動に対する耐震性能評価」－実験データに基づく建築物の損傷予測：部材フラジリティと修復コストのDB化を目指して，pp.5-16，2021.
- 11) 西本昌，山本優，縣亮一郎，堀高峰：複数の発生シナリオを考慮した長周期地震動評価 千島海溝沿いの巨大地震を対象とした検討，*日本建築学会学術講演梗概集*，21072，2022.
- 12) 釜江克宏，入倉孝次郎，福知保長：地震のスケーリング則に基づいた大地震時の強震動予測 統計的波形合成法による予測，*日本建築学会構造系論文集*，第430号，pp.1-9，1991.
- 13) 入倉孝次郎，釜江克宏：1948年福井地震の強震動－ハイブリッド法による広周期帯域強震動の再現－，*地震2*，pp.129-150，1999.
- 14) 一般財団法人日本建築センター：建築設備耐震設計・施工指針2014年度版，2014.
- 15) 地震調査研究推進本部：相模トラフ沿いの地震活動の長期評価について，[https://www.jishin.go.jp/main/chousa/04aug\\_sagami/index.htm](https://www.jishin.go.jp/main/chousa/04aug_sagami/index.htm)，2004.
- 16) 地震調査研究推進本部，地震調査委員会：震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピア」），[https://www.jishin.go.jp/main/chousa/09\\_yosokuchizu/g\\_furoku3.pdf](https://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_yosokuchizu/g_furoku3.pdf)，2009.