

地震時における建物の揺れによる人の不安度評価
—東海・東南海・南海地震動による鋼構造建物を事例に—

正会員 ○松原郁洋*1 同 永野康行*2 同 朝川剛*3 同 山川誠*4

2. 構造—2. 振動—e. 被害予測・地震防災
安心, 不安, 不安度評価, 地震動, 地盤増幅

1. 序

2011年東北地方太平洋沖地震における被害調査報告書によると、大きな建物損傷は無かったけれども「生まれて初めての大きな揺れだったので不安だった」、「とにかく揺れが大きく、歩くことも這って移動することも(動揺もして)できなかった」と述べられている。これは、地震による家具転倒や身近の人の負傷からくる不安ではなく、地震の揺れによる不安であることを示す。つまり、建物の設計において、建物内の人の安全だけでなく、安心についても考慮することが求められてきている。ただ、安心に関する事項は建築基準法で定められていない。

ここで、安全とは、建築基準法で定める外力に対して安全であるとする。また、安心については不安度の評価を行うことで間接的に安心に繋げる位置づけとする。

岡沢ら¹⁾は、ある揺れに対して同じ不安度のレベルを感じる人の割合を揺れの大きさに対する確率分布関数で定めている。その過程で、最大加速度と最大速度に対して加振実験の各加振ケースにおける不安度の平均値との関係が示されている。

このように、地震時を想定して個々における人の不安度を評価することは行われているが、建物の設計時、または、既存の建物に対してあらかじめ不安度評価を行う手法は存在せず、この点に本研究の新規性がある。

本研究の目的は、地震時における個別の建物の揺れによる人の不安度評価手法を提案することである。

2. 不安度評価指標

岡沢らの研究では、図1のように最大加速度、最大速度と不安度の関係が示されている。

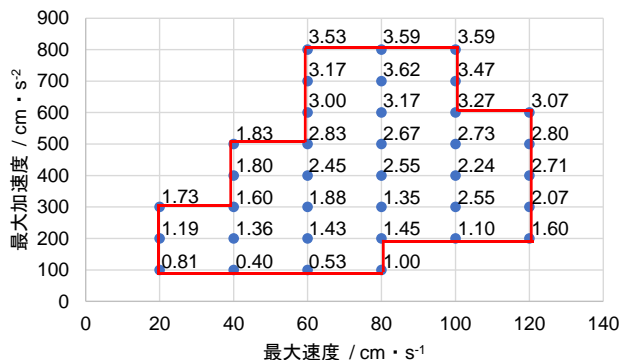


図1 最大加速度、最大速度と不安度の関係¹⁾

図1のように不安度の値は離散的に与えられているだけである。任意の加速度 A 、速度 V で不安度を式(1)により算出した。枠内は本研究の対象範囲である。

$$f(V, A) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} \phi_i(V) \psi_j(A) \quad (1)$$

m, n : 加速度、速度の分割数
 i, j : 加速度、速度のインデックス
 C_{ij} : $V=i\Delta V, A=j\Delta A$ での不安度
 $\phi_i(V), \psi_j(A)$: 基底関数

基底関数である $\phi_i(V)$ と $\psi_j(A)$ の定義を図2に示す。

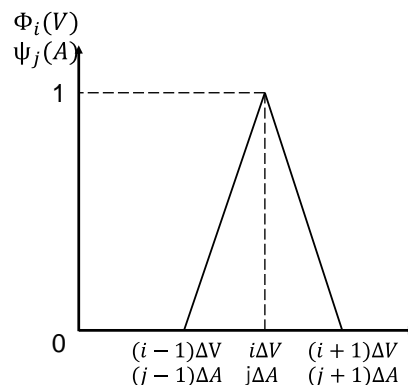


図2 $\phi_i(V)$ と $\psi_j(A)$ の形状

Evaluation of people's anxiety level due to the shaking of buildings during earthquakes
—A case study of steel structure buildings caused by Tokai, Tonankai, and Nankai earthquake motions—
Matsubara Ikuhiro and Nagano Yasuyuki

3.不安度評価手法

不安度評価の流れについて以下の通りである。

- ①質点系モデルの時刻歴応答解析
- ②最大絶対加速度と最大絶対速度の抽出
- ③解析結果を用いて式(1)により不安度の算出

不安度については、以下の表1による。

表1 不安度とレベル¹⁾

レベル	不安度
0	全く不安を感じなかった (なんともなかった)
1	やや不安を感じた (一瞬どきとしたが、冷静でいられた)
2	不安を感じた (何とか冷静でいられたが、好ましくない状況と感じた)
3	かなり不安を感じた (これまでに経験したことが無い状況で冷静でいられなかった、身構えることで精一杯だった)
4	非常に不安を感じた (二度とこのような体験をしたくないほど恐怖を感じた)

式(1)により算出される不安度の値を小数第一位までの値と表1のように5段階の2種類を結果として用いる。その際0~0.4を0、0.5~1.4を1、1.5~2.4を2、2.5~3.4を3、3.5~4を4として不安度とする。

不安度評価の流れ②において、最大絶対速度の抽出が必要であるが、時刻歴応答解析に使用した弾塑性地震応答解析ソフトでは直接出力されない。そのため、絶対加速度応答波形を出力し、これに対して遮断振動数0.05 Hzの2次バターワース型ハイパスフィルターを施したうえで時間積分を行い、絶対速度応答波形を算出した。ハイパスフィルターと積分の操作は、これらを組み合わせたラプラス変換形式の伝達関数から双線形変換によりz変換形式の伝達関数を作成し、離散時系列に対する漸化式を構成することにより行った。

4.例題

4.1.モデル概要

不安度評価を行う建物の対象を今回はA棟とする。対象建物であるA棟は鉄骨造7階建てである。モデル概要について表2に示す。

表2 A棟入力パラメータ

質点番号	階高 m	質量 m 10^3 kg	初期バネ定数 k 10^5 N m ⁻¹
7	5.4	713.7	2271
6	5.5	1992.3	5649
5	4.0	1265.8	11939
4	4.0	1110.8	13806
3	8.0	1561.6	9122
2	6.4	2454.5	7997
1	5.5	901.3	12527

減衰定数は剛性比例型の0.02とした。

4.2.表層地盤を考慮した地震波

時刻歴応答解析に採用する地震波は内閣府の中央防災会議資料を基に作成された東海・東南海・南海地震とした。ただし、工学的基盤($V_s=350\sim700$ m/s 相当層)における地震波であるため、このままでは表層地盤による増幅は考慮されていない。そのため、ShakePRO-Lを用いて表層地盤の増幅を考慮した地震波を作成した。対象とする地盤のS波速度 V_s は式(2)²⁾により算出した。質量密度は、表3に示す値を採用した。砂礫については、礫と砂の平均値とした。

$$V_s = a \cdot N^b \quad (2)$$

V_s : S波速度, N : N値

a:土質係数1(粘土:111.30, 砂:94.38, 礫:123.05)

b:土質係数2(粘土:0.3020, 砂:0.3144, 礫:0.2443)

表3 質量密度⁴⁾

土質	質量密度 / t m ⁻³
礫	2.10
砂	1.85
シルト	1.70
粘土	1.50
関東ローム	1.35

地盤モデルを表 4 に示す。

表 4 地盤入力パラメータ

土質区分 a, b	深度 m	質量密度 $t m^{-3}$	S 波速度 m s	歪み 依存性
砂, 砂	0.300	1.975	206.1	砂質土 (以下 全て 古山田 ・宮本 モデル)
砂, 砂	1.300	1.850	225.7	
砂, 砂	2.200	1.975	341.9	
砂, 砂	3.300	1.975	298.6	
砂, 砂	4.300	1.975	216.4	
砂, 砂	5.300	1.975	256.3	
砂, 砂	6.300	1.850	206.1	
砂, 砂	7.300	1.975	225.7	
砂, 砂	8.300	1.975	211.4	
砂, 砂	9.300	1.850	188.3	
砂, 砂	10.30	1.850	262.9	
砂, 砂	11.30	1.850	272.1	
砂, 砂	12.30	1.850	238.2	
砂, 砂	13.30	1.850	303.3	
砂, 砂	14.15	1.975	341.9	
砂, 砂	15.20	1.975	341.9	
砂, 砂	16.15	1.975	341.9	
砂, 砂	17.20	1.975	341.9	
砂, 砂	18.30	1.975	301.0	
砂, 砂	19.20	1.850	341.9	
砂, 砂	20.30	1.850	249.4	
砂, 砂	21.30	1.850	245.8	
砂, 砂	22.30	1.850	322.9	
砂, 砂	23.30	1.850	288.6	
砂, 砂	24.30	1.850	280.6	
砂, 砂	25.30	1.850	277.8	
砂, 砂	26.20	1.850	341.9	
砂, 砂	27.30	1.850	341.9	
砂, 砂	28.30	1.850	266.0	
粘土, 粘土	29.30	1.500	314.0	粘性土
砂, 砂	30.30	1.850	317.0	砂質土

表層地盤を考慮していない地震波を図 3、考慮した地震波を図 4、加速度応答スペクトルを図 5 に示す。

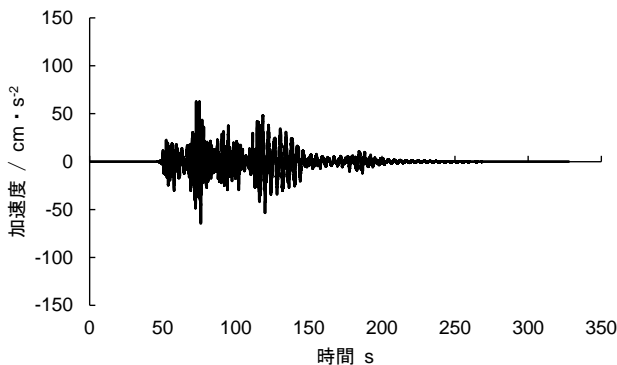


図 3 東海・東南海・南海地震(EW) ③

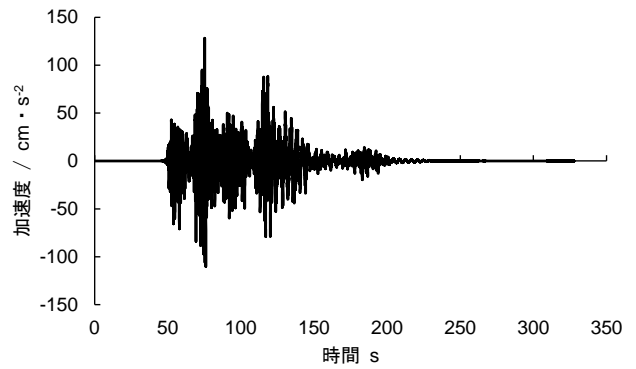


図 4 東海・東南海・南海地震(EW)
表層地盤考慮後

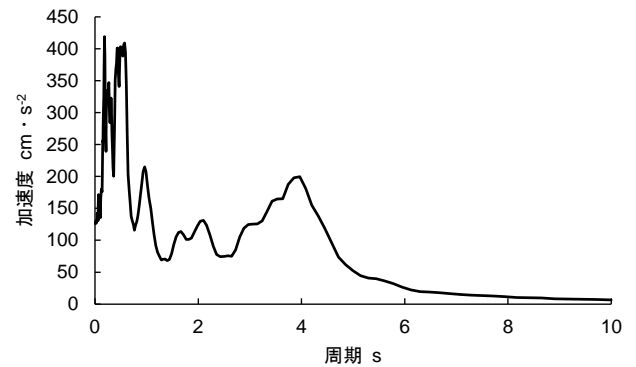


図 5 加速度応答スペクトル

図 5 における減衰定数は、0.02 である。

4.3.解析結果

時刻歴応答解析を行った結果として、階毎の最大絶対加速度、最大絶対速度をそれぞれ図 6、図 7 に示す。

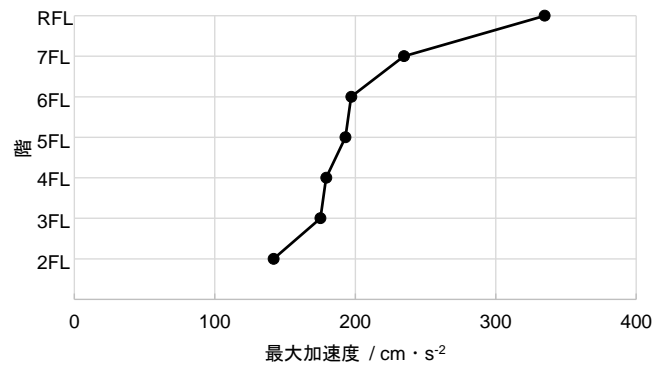


図 6 階毎の最大絶対加速度

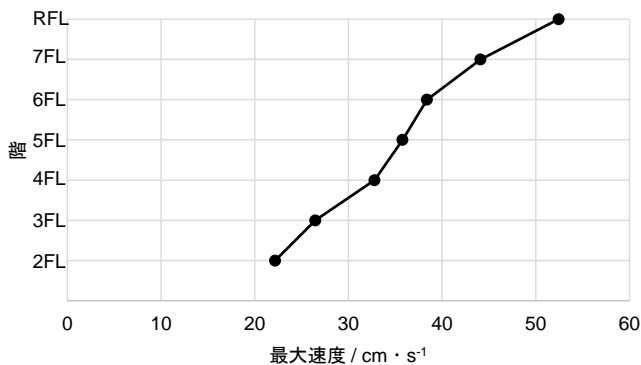


図7 階毎の最大絶対速度

図6, 図7の結果と式(1)を基に不安度評価を行い、その結果を表5に示す。

表5 不安度評価

階	不安度のレベル
RFL	2(1.9)
7FL	2(1.5)
6FL	1(1.3)
5FL	1(1.2)
4FL	1(1.1)
3FL	1(1.1)
2FL	1(0.9)

表5より、上層階ほど不安度が増加していることが見てとれる。一部の階では5段階評価で不安度のレベルが同等であるが、細分化した値を見ると変化している。

以上から、不安度のレベルが上層階ほど増加するため、震度階級のように地表面だけで評価するのは不十分であり、階毎の評価が望ましい。

5. 結

本研究は、建物に対し表層地盤を考慮した地震波による人の不安度を最大絶対加速度と最大絶対速度により評価した。本研究で得られた知見を以下に示す。

・上層階に連れて応答値が増加し、不安度が増加する。

・中低層階で、「やや不安を感じた」。また、上層階で、「不安を感じた」という評価が得られた。

今後の展望として、本研究結果を含む地震に関する情報を事前情報として人に与えることで、日常時における安心の向上や不安の低減に寄与できる可能性を考えている。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP22K04420 (研究代表者：山川誠、耐震レジリエンス/ロバスト性向上のための数値実験システムの開発)、「理化学研究所(研究代表者：永野康行、関西地域を対象とした都市防災の計算科学研究-地震津波と集中豪雨被害のハザードマップの作成-)」による成果の一部である。また、Vs 値の計算を兵庫県立大学環境人間学部環境人間学科 B4 の三田凜也氏にご協力いただきました。ここに記し、謝意を表す。

参考文献

- 岡沢理映, 神原浩, 猿田正明: 被験者実験による地震の揺れに対する人の感覚の定量化に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第24巻, 第56号, pp.81-86, 2018.2
- 中央防災会議, 南海トラフの巨大地震モデル検討会 15 回会合資料 2, https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/15/pdf/shiryou_2.pdf, pp9-11, (最終閲覧: 2024.3.3)
- G 空間情報センター: 東海東南海南海_地震動_(3) 強振動波形_東海東南海南海_28_兵庫県, <https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/1761>. (最終閲覧: 2024.3.3)
- 山崎久雄: 土の単位重量推定に関する資料, <https://www.unions.co.jp/dqs/dynamic/files/03.pdf> (最終閲覧: 2024.3.3)

*1 兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科 博士前期課程
 *2 兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科 教授・博士(工学)
 *3 東京電機大学未来科学部建築学科 准教授・修士(工学)
 *4 東京理科大学工学部建築学科 教授・博士(工学)

Graduate student, Dis. Res. And Gov Univ. Hyogo
 Prof., Grad.Sch Dis. Res. And Gov Univ Hyogo, Dr. Eng
 Assoc. Prof., School of Sci. and Tec. for Future Life, Tokyo Denki Univ., M. Eng
 Prof., Tokyo University of Science, Dr. Eng