

# 論文 2023年トルコ地震におけるRC造建物の耐震性能評価

牛尾 はな\*1 ALWASHALI Hamood \*2

**要旨:** 本研究では、2023年トルコ地震により被災した鉄筋コンクリート造(RC造)建物123棟の耐震性能を、志賀マップと日本の耐震診断基準(一次診断)を用いて解析した。志賀マップでは、検討したトルコの建物123棟のうち114棟は、耐震壁が少なく、せん断応力度が大きい危険区域に分類された。検討したトルコの建物の一次診断の $I_s$ 値の平均は0.19と低かった。また $I_s$ 値が0.4以上の建物は少なく、 $I_s$ 値が0.4以上の建物には被害がなかった。

**キーワード:** 耐震性能評価, 志賀マップ, 地震被害, RC造建物, トルコ地震

## 1. はじめに

2023年2月6日にトルコで発生したマグニチュード7.7の大地震(以下「トルコ地震」)は、トルコ南部と中部、シリア北部と西部に甚大な被害を及ぼした<sup>1)</sup>。建物の受けた被害に着目すると、トルコでは2018年までに3度建築基準の改訂が行われているにもかかわらず、倒壊、大破となった建物も多かった。

耐震基準と地震で受けた被害の関係についての研究は、1990年、志賀ら<sup>2)</sup>の過去の地震被害と耐震性能の比較から完成した志賀マップや、(財)日本建築防災協会の「既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説<sup>3)</sup>(以下「RC診断基準」)を用い、日本で大地震が起きた際には多くの研究者により行われてきた。

そこで本研究は、トルコ地震での建物被害を一部ではあるが把握することと、被害建物の耐震性能について検討することを目的とする。耐震性能の検討には、志賀マップ<sup>2)</sup>と、RC診断基準<sup>3)</sup>の耐震診断のうち一次診断を用いる。また、その結果を兵庫県南部地震での被害建物と比較し、日本の耐震診断基準のトルコの建物への適用について検討を行う。

用した<sup>4)</sup>。またRC診断基準の対象が中低層であることから、本研究では収集されたデータのうち7階建て以下の建物123棟を分析対象とした。その被害の内訳は、123棟のうち4棟がCollapsed(倒壊)、72棟がSevere(大破)、11棟がModerate(中破)、26棟がLight(小破)、10棟がNone(無被害)であった。調査チームがデータベース内の建物に対して適用した被害レベルの分類は次の通りである。

Severe: 少なくとも一つの構造部材が破壊している

Moderate: より大きいコンクリートの亀裂や剥離が見られる

Light: 構造部材に幅0.13mm未満のせん断及び曲げひび割れが見られる

また、分析対象の建物は図-1に示す8つの町に位置しており、その棟数分布は図-2に示す。

## 2. トルコ地震と建物データの概要

### 2.1 トルコ地震の概要

トルコ地震では、マグニチュード7以上の地震が2回発生した。一度目の地震(AFAD<sup>1)</sup>によるID543428)の震源地はKahramanmaraşの南南東約35kmであり、激しい揺れと広範囲にわたる被害をもたらした。またこの約9時間後に、最初の震源地から北北東95kmの場所でマグニチュード7.7の二度目の地震(AFAD<sup>1)</sup>によるID543593)が発生した<sup>1)4)</sup>。二度目の地震の震源地は図-1に示してある。

### 2.2 建物データの概要

#### (1) 建物の所在地と被害

本研究では、米国コンクリート協会(ACI)災害偵察委員会と多くの大学の学生などにより収集されたデータを使

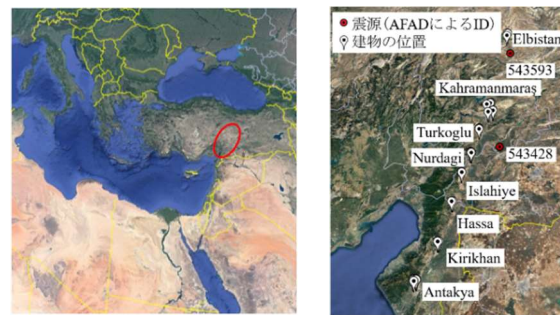


図-1 分析対象建物の位置

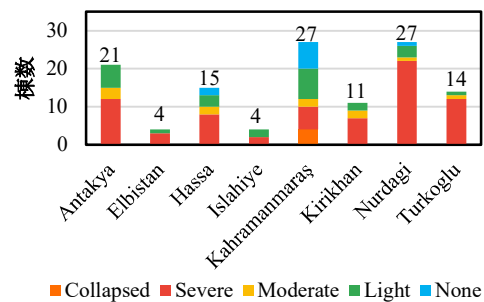


図-2 町ごとの分析対象棟数

\*1 株式会社新井組 土木本部 (正会員)

\*2 岡山大学 学術研究院環境生命自然科学学域 准教授 (正会員)

## (2) 建物の階数・建設年の分布

本研究で分析対象とした建物の、階数の分布は図-3に示す通りである。今回使用したデータでは、多くの建物が6~7階建てであった。また同様に、トルコの建築基準改訂に合わせた区間での建設年の分布を図-4に示す。本研究で対象とした建物の7割以上が、2007年の改訂以降に建設されたものであった。

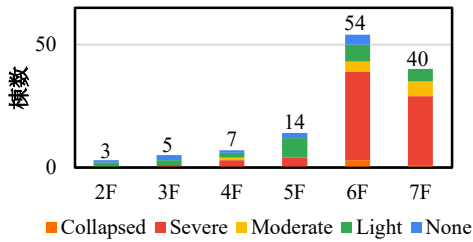


図-3 階数ごとの分析対象棟数

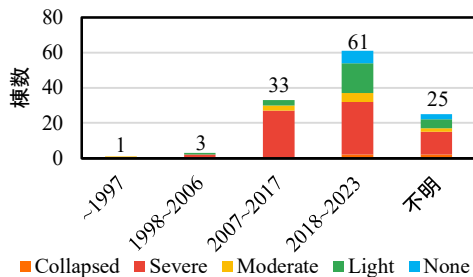


図-4 建設年ごとの分析対象棟数

## 2.3 建物データの内容

ACIを中心としたチームが収集した建物データから、本研究では建物ID、所在地名、緯度、経度、建設年、階数、階高、RC構造被害レベル、レンガ壁被害レベルを使用した。またこのほかに、図-5に示す簡単な平面図を、柱、壁断面面積の算出、床面積の算出に用いた。さらに、図-6のような建物の写真を、建物の位置や構造の確認に用いた。

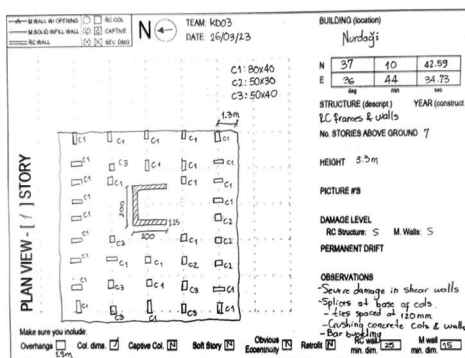


図-5 平面図



図-6 写真データ

## 3. 志賀マップを用いたトルコ地震被害データ分析

### 3.1 志賀マップの概要

志賀ら<sup>2)</sup>は1968年十勝沖地震の被害調査で、RC造被害建物はいずれも壁が少ないことに着目し、設計に容易に使える方法として志賀マップを提案した。志賀マップは、建物の単位面積あたりの重量を10kN、1階におけるベースシア係数を1.0としたとき、横軸を壁率(式(1))、縦軸を柱壁均しせん断応力度(式(2))にとった関係を示したものである(図-7)。

$$\frac{A_w}{\sum A_f} \text{ (cm}^2/\text{m}^2\text{)} \quad (1)$$

$$\frac{10\sum A_f}{A_c + A_w} \text{ (kN/cm}^2\text{)} \quad (2)$$

ここで、

$\sum A_f$ : 1階以上の延べ床面積(m<sup>2</sup>)

$A_w$ : 建物の1階における1方向のRC壁の総水平断面積(cm<sup>2</sup>)

$A_c$ : 建物の1階における柱の総水平断面積(cm<sup>2</sup>)

式(2)では、分子10 $\sum A_f$ をベースシア係数を1.0としたときの層せん断力と解釈し、これを分母である柱・壁の断面積の和で除すことで、柱壁均しせん断応力度としている。

図-7で、被害のあった建物はおおむね壁率30cm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>以下、柱壁均しせん断応力度0.12kN/cm<sup>2</sup>以上の範囲にあることから、無被害建物の属するCゾーン、被害建物の属するA、Bゾーンが区分される。

またCゾーンの限界から、柱だけの場合の限界せん断応力度、壁だけの場合の限界せん断応力度をそれぞれ求めると式(3)、式(4)のようになる。

$$\frac{W}{A_c} = \frac{10\sum A_f}{A_c} = 0.12 \text{ (kN/cm}^2\text{)} \quad (3)$$

$$\frac{W}{A_w} = \frac{10\sum A_f}{30\sum A_f} = 0.33 \text{ (kN/cm}^2\text{)} \quad (4)$$

これらを用いると、A、Bゾーンを分ける曲線は式(5)で表される。

$$0.12A_c + 0.33A_w = 10\sum A_f \quad (5)$$

ここで、0.12と0.33はそれぞれ柱と壁に予想されるせ

せん断応力を示している。

現行の耐震規定では、高さ 20 m 以下の RC 構造物を対象に、2 次設計以降の検討を要しない構造計算ルート 1 が規定されている。これは、志賀マップ上で十分安全な領域に対応する柱及び壁の量を確認することと同義である。

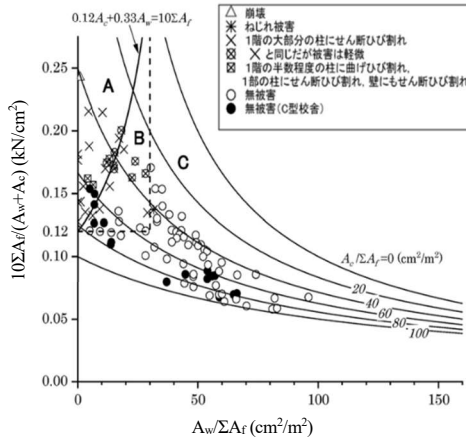


図-7 十勝沖地震の志賀マップ<sup>7)</sup>

### 3.2 トルコの建物への志賀マップの適用

トルコの建物のデータより、3.1 で述べた志賀マップの横軸、縦軸となる壁率、柱壁均しせん断応力度を求め、プロットした図を示した (図-8)。被害レベルにかかわらず、A、Bゾーンに属する建物がほとんどであった。すなわち、トルコの建物はせん断応力度が大きく、壁率が小さい傾向があることが分かる。

壁率に関して、対象とした 123 棟すべてのほか、被害レベル Severe の建物の壁率を区間別の棟数で示したものが図-9 である。本研究で対象とした建物について、被害レベル Severe の建物はすべて壁率 30 cm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> 以下となっていることが分かる。このことから、志賀マップにおける被害建物と無被害建物の区別である A、Bゾーンの判定は、トルコの建物の耐震性能を評価するにあたり有用だと考えられる。また柱率について、図-7 に示した十勝沖地震では大きな被害を受けた建物の柱率が 20~80 cm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> であるのに対し、図-8 に示したトルコ地震では 0~60 cm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> であった。これより、トルコの建物では柱率が小さい傾向があることが分かる。

せん断応力度について、平均は 0.378 kN/cm<sup>2</sup>、標準偏差は 0.158 であり、図-7 と比較すると、全体として 2~3 倍程度大きくなっている。

また、トルコの建物への志賀マップの適用に関し、その整合性について述べる。まずコンクリート強度 (以下 F<sub>c</sub>) について、トルコの建物は 20 N/mm<sup>2</sup> と仮定する (詳細は 4.1(3)にて述べる)。対して十勝沖地震被害建

物は、構造計算ルート 1 が志賀マップと対応しているため、ルート 1 での F<sub>c</sub> の扱いより考える。本研究で志賀マップを考えるにあたり F<sub>c</sub> は考慮していないことから、ルート 1 での F<sub>c</sub> による割増係数 α = 1 と仮定すると、F<sub>c</sub> = 18 N/mm<sup>2</sup> となる<sup>7)</sup>。すなわち、志賀マップ提案当時の日本の建物と、トルコ地震被害建物それぞれの F<sub>c</sub> に大きな差はないと考えられる。次に対象建物の規模について、志賀マップは 4 階建て以下であるのに対し、トルコの建物は 6~7 階建ての建物が多い。これに関して、志賀マップの横軸、縦軸共に階層が変わってもその持つ意味は基本的には変わらないと考える。さらに、構造計算ルート 1 が志賀マップと対応していること、ルート 1 は RC 造高さ 20m 以下の建物を対象とすることから、高さ 20 m をおよそ 6~7 階ととらえると、本研究で対象としたトルコの建物にも志賀マップは適用可能と考える。

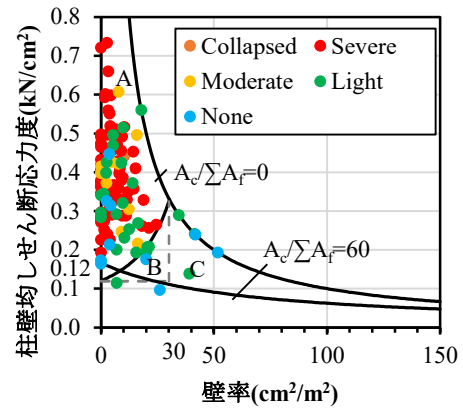


図-8 トルコ地震の志賀マップ

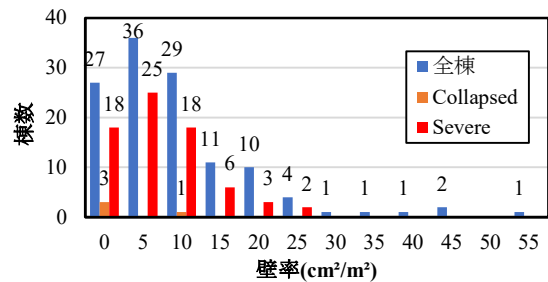


図-9 トルコの建物の壁率分布

## 4. 日本の耐震性能評価のトルコ地震への適用

### 4.1 日本の耐震診断のトルコの建物への適用

RC 診断基準に基づいた一次診断<sup>3)</sup>をトルコの建物に適用することを考える。

一次診断において、構造耐震指標 I<sub>s</sub> は式(6)で表される。

$$I_s = E_0 \times S_D \times T \quad (6)$$

ここで、

E<sub>0</sub>: 保有性能基本指標, S<sub>D</sub>: 形状指標, T: 経年指標

保有性能基本指標  $E_0$  は、式(7)、式(8)による値の大きい方とする。

$$E_0 = \varphi \times (C_w + \alpha_1 C_c) \times F_w \quad (7)$$

$$E_0 = \varphi \times (C_{sc} + \alpha_2 C_w + \alpha_3 C_c) \times F_{sc} \quad (8)$$

ここで、

$\varphi$  : 振動モードの補正係数

階ごとの加速度の違いを補正するものである。本研究では 1 階部分の耐震性能について検討を行うため、 $\varphi = 1$  となる。

$C_w, C_c, C_{sc}$  : 壁、柱、極短柱の強度指標

$\alpha_1$  : 壁の終局強度時変形での柱の強度寄与係数 = 0.7

$\alpha_2$  : 極短柱の終局強度時変形での壁の強度寄与係数 = 0.7

$\alpha_3$  : 極短柱の終局強度時変形での柱の強度寄与係数 = 0.5

$F_w$  : 壁の靱性指標 = 1.0,  $F_{sc}$  : 極短柱の靱性指標 = 0.8

本研究で使用したデータに記載のない部分に関して、以下のように仮定した。

#### (1) 柱の平均せん断応力度

極短柱を無視し、すべて  $1 \text{ N/mm}^2$  と仮定する。

#### (2) 単位面積当たり重量

トルコの建物の壁は日本のものと比べて少ないが、使用されているレンガは重量が大きい。また、トルコにほど近いヨルダンやバングラデシュの建物の単位面積当たり重量は  $10 \sim 13 \text{ kN/m}^2$  である<sup>8)</sup>。日本でよく用いられる値であることから、単位面積当たりの重量は  $12 \text{ kN/m}^2$  を用いるものとする。

#### (3) コンクリート強度に関する係数 $\beta_c$

$C_w, C_c$  を求める際に、式(9)、式(10)を用いる。

$$C_w = \left( \frac{\tau_{w1} \cdot A_{w1} + \tau_{w2} \cdot A_{w2} + \tau_{w3} \cdot A_{w3}}{\Sigma W} \right) \cdot \beta_c \quad (9)$$

$$C_c = \left( \frac{\tau_c \cdot A_c}{\Sigma W} \right) \cdot \beta_c \quad (10)$$

また、 $\beta_c$  は式(11)、式(12)で求められる。

$$\beta_c = \frac{F_c}{20} \quad (F_c \leq 20) \quad (11)$$

$$\beta_c = \sqrt{\frac{F_c}{20}} \quad (F_c \geq 20) \quad (12)$$

コンクリート圧縮強度  $F_c$  について、本研究で対象とする建物はほとんどが 2000 年以降に建設されたものであるため、 $F_c = 25 \sim 30 \text{ N/mm}^2$  と予想される。そこで、さらに安全側をとり  $F_c = 20 \text{ N/mm}^2$  と仮定することで、 $\beta_c = 1$  として計算する。

#### (4) 形状指標 $S_D$

RC 診断基準<sup>3)</sup>に定められた項目のうち、a)整形性、b)辺長比、c)くびれ、e)吹抜、f)吹抜の偏在、i)層高の均等性、j)ピロティの有無についてのみ評価を行った。

#### (5) 経年指標 $T$

RC 診断基準<sup>3)</sup>に定められた項目のうち、建築年数についてのみ評価を行った。

(1)~(5)で述べた仮定を考慮し、式(6)、(7)に含まれる係数に一次診断で用いる数値を代入すると、本研究で  $I_s$  を求めるために用いた式(13)が以下に示される。

$$I_s = (C_w + 0.7 C_c) \times S_D \times T \quad (13)$$

### 4.2 トルコの建物の構造耐震指標 $I_s$

式(13)を用いて算出した  $I_s$  を、横軸を建物の桁行方向、縦軸を梁間方向とし、分析対象とした全棟をひとつのグラフにプロットしたものを図-10、町ごとに各建物の  $I_s$  の最小値 (以下  $I_{s \min}$  とする) の平均値、標準偏差をまとめたものを表-1、町ごとに  $I_s$  をプロットしたものを図-11 に示した。Kahramanmaraş が、平均、標準偏差ともに他の町に比べてやや大きい結果となった。

そのほか全棟と被害レベル Severe 以上の建物について、 $I_{s \min}$  の対数正規分布を図-12、区間別棟数を図-13、平均と標準偏差を表-2 に示した。

トルコの建物の  $I_{s \min}$  の全棟平均がおおよそ 0.2 と、一次診断の基準である  $I_s = 0.8$  に及ばない結果となった。また、 $I_{s \min}$  が 0.4 を超えると、本研究の分析対象建物では被害がほとんどないことが分かった。

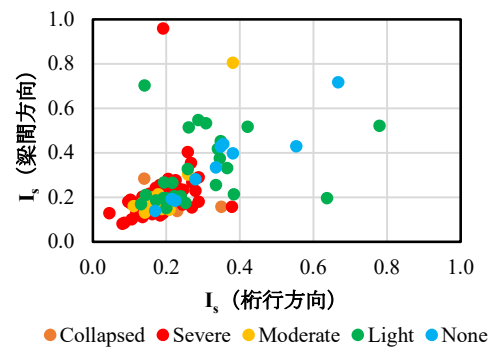


図-10 トルコ地震  $I_s$  全棟

表-1 トルコ地震  $I_{s \min}$  町ごとの平均と標準偏差

地域名	$I_{s \min}$ 平均	標準偏差
Antakya	0.171	0.046
Elbistan	0.191	0.088
Hassa	0.189	0.056
Islahiye	0.177	0.023
Kahramanmaraş	0.259	0.115
Kirikhan	0.176	0.043
Nurdagi	0.179	0.109
Turkoglu	0.155	0.035

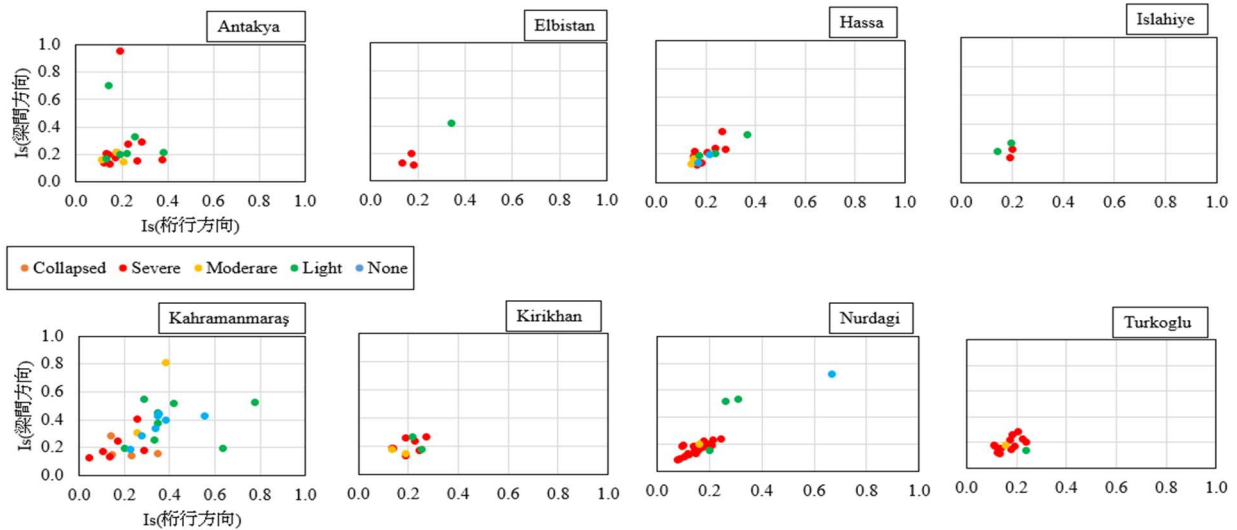


図-11 トルコ地震  $I_s$  町別

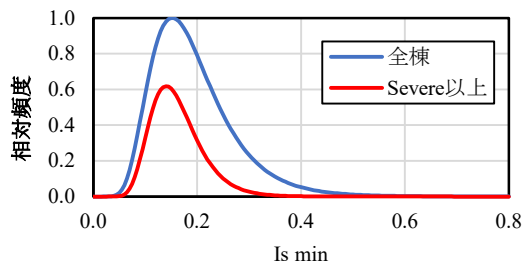


図-12 トルコ地震  $I_{s \min}$  対数正規分布

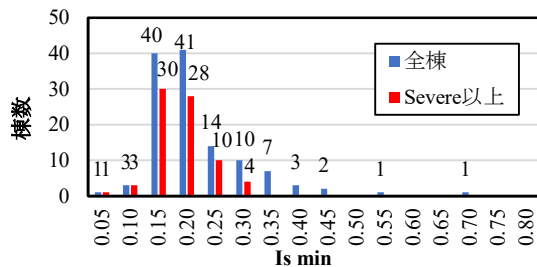


図-13 トルコ地震  $I_{s \min}$  区間別棟数

表-2 トルコ地震  $I_{s \min}$  平均と標準偏差

	平均	標準偏差
全棟	0.194	0.090
Severe 以上	0.161	0.046

## 5. 兵庫県南部地震とトルコ地震の比較

ここでは、トルコと日本の一次診断における  $I_s$  の値がどの程度違うのか、参考までに比較を行った。

### 5.1 兵庫県南部地震の概要

1995年1月17日、淡路島北部を震源とするマグニチュード7.3の大地震が発生した。都市直下型地震であり、甚大な人的被害と家屋の倒壊・焼失といった様々な被害を引き起こした。

### 5.2 兵庫県南部地震の建物データの概要

本研究では岡田らの論文<sup>9)</sup>の建物データを用いた。5階建て以下106棟のうち、11棟が倒壊、16棟が大破、40棟が中破、12棟が小破、18棟が軽微、9棟が無被害であった。被害レベル区分は、被災区分判定を使用している<sup>10)11)</sup>。また106棟のうち86棟が、耐震基準改定の1981年以前に建設されたものである<sup>9)</sup>。

### 5.3 両地震での被害建物の耐震性能の比較

兵庫県南部地震被害建物の  $I_s$  と、トルコ地震被害建物の  $I_s$  を、横軸を桁行方向、縦軸を梁間方向としてプロットした(図-14)。兵庫県南部地震被害建物は桁行方向に弱い傾向がある。これは、対象建物が学校であり、桁行方向には壁が少ない作りになっていることが原因として挙げられる<sup>4)</sup>。  $I_s$  が梁間方向で0.8を超えている建物でも大破、倒壊の被害がある原因としては、耐震基準改定の1981年以前に建設された建物が多いことが挙げられる。また、トルコの建築物は剛構造よりも柔構造を優先して設計されているため、柱や壁の面積が小さく  $I_s$  の値が小さいと考えられる。一方、日本の建築物は剛構造を優先しており、壁や柱の面積が相対的に大きいという点で、表-3の  $I_s$  の違いが生じていると考えられる。

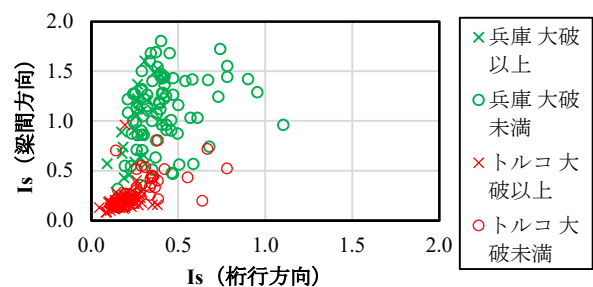


図-14 2地震  $I_{s \min}$  比較<sup>9)</sup>

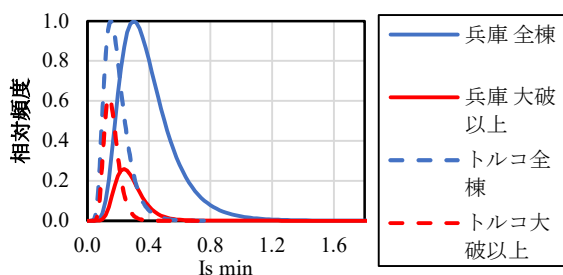


図-15 2地震  $I_{s \min}$  対数正規分布の比較

表-3 2地震  $I_{s \min}$  平均と標準偏差

	平均	標準偏差
兵庫 全棟	0.400	0.187
兵庫 大破以上	0.277	0.077
トルコ 全棟	0.194	0.090
トルコ 大破以上	0.161	0.046

## 6. 結論

2023年2月6日にトルコで発生した地震の被害状況の把握と、被害建物の耐震性能の検討を行った。

志賀マップでは、被害レベル Severe の建物はせん断応力度が日本の建物と比較すると2~3倍程度大きく、壁率は全ての建物で  $30 \text{ cm}^2/\text{m}^2$  以下であり、Aゾーンに属していた。このことから、志賀マップにおける被害建物と無被害建物の区別であるA、Bゾーンの判定は、トルコの建物の耐震性能を評価するのにも有用だと言えると考えられる。

$I_s$ を用いた耐震診断では、全棟の  $I_{s \min}$  の平均がおおよそ0.2であり、また  $I_s$  が0.4を超える建物は被害をほとんど受けていなかった。一次診断の基準である0.8とは差があるが、兵庫県南部地震被害建物は  $I_s=0.5$  以上で大破の被害がないことが岡田らの論文<sup>9)</sup>で述べられている。基準値0.8は、実際に大破の被害がなかった  $I_s$  値より安全側をとり、ばらつきを考慮していると考えられ、大破を免れる目安となる  $I_s$  値としては、大きな差はない。

トルコ地震で被災した建物を日本の兵庫県南部地震で被災した建物と比較すると、トルコの建物の  $I_s$  (一次診断) は日本の約半分であり、トルコの建物は柱や壁の面積が小さく、設計において剛構造よりも柔構造が重要と考えられていることが分かる。本研究では、志賀マップや一次耐震診断といった基本的なアプローチで耐震性能を評価した。今後の研究では、より詳細な把握のため、二次耐震診断を用いた建物の分析に取り組んでいく予定である。

## 謝辞

カンタベリー大学の Santiago Pujol 教授と ACI 調査チ

ームには、トルコ地震で被害を受けた建物のデータを収集し、本研究に貴重なデータを共有していただいたことに、厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) AFAD: <https://deprem.afad.gov.tr/event-instrumenta> (閲覧日: 2024年1月5日)
- 2) 志賀 敏男: 鉄筋コンクリート造建物の震害と壁量, コンクリート工学, Vol28, No.9, 1990.9
- 3) 一般財団法人 日本建築防災協会, 国土交通大臣指定耐震改修支援センター: 2001年改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・耐震改修設計指針・同解説, 2001
- 4) Alwashali, H. and Ushio, H.: Assessing Seismic Capacity of RC Buildings in 2023 Turkey Earthquake and Comparison with Past Earthquakes, The 16th Japan Earthquake Engineering Symposium, 2023
- 5) Pujol, S., Bedirhanoglu, I., Donmez, C., Dowgala, J.D., Eryilmaz-Yildirim, M., Klaboe, K., Koroglu, F.B., Lequesne, R.D., Ozturk, B., Pledger, L. and Sonmez, E.: Quantitative evaluation of the damage to RC buildings caused by the 2023 southeast Turkey earthquake sequence, Earthquake Spectra, p.87552930231211208. 2024
- 6) ACI Committee 133: [https://www.dropbox.com/sh/6cmdgd82n9ufxr/AACt-1rberSKM4fFFaDeL3\\_5a?dl=0](https://www.dropbox.com/sh/6cmdgd82n9ufxr/AACt-1rberSKM4fFFaDeL3_5a?dl=0) (閲覧日: 2024年3月12日)
- 7) 柴田 明德: 最新耐震構造解析 (第3版・補訂版), 森北出版株式会社, 2021
- 8) Alwashali Hamood: 発展途上国における非強化石積み充填材を使用した鉄筋コンクリート建物の耐震性能評価, 博士号 東北大学論文第4章, 2018
- 9) T. Okada, T. Kabeyasawa, Y. Nakano, M. Maeda, and T. Nakamura. "Improvement of seismic performance of reinforced concrete school buildings in Japan-Part 1 damage survey and performance evaluation after 1995 Hyogo-ken Nambu earthquake." In Proc. of 12th World Conference on Earthquake Engineering. 2000
- 10) 一般社団法人 日本建築学会: 兵庫県南部地震調査報告 建築編-2 プレストレストコンクリート造建築物 鉄骨鉄筋コンクリート建築物 壁構造建築物, 1998
- 11) 一般財団法人 日本建築防災協会: 震災建築物の被災度判定および復旧技術指針, 1991