

鉄骨造骨組の地震被災度に関するアンケート調査

A Survey of Judgements on Earthquake Damage-degrees of Steel Frames

大 井 謙 一*・伊 藤 拓 海*

Kenichi OHI and Takumi ITO

1. は じ め に

建物の耐震設計では、使用限界状態と終局限界状態が考慮される。使用限界状態設計は建物の使用性の問題であり、終局限界状態は構造物の崩壊などにより、人命に危険をもたらす状態のことである。一般的に、終局限界状態設計は大地震に対して構造部材が終局状態に達し、構造物が倒壊にいたるまでの状態を対象にすることが多い。しかし、余震、被災後の2次被害の発生を考慮すると、どのような状態を終局限界状態とすべきかは議論の分かれるところであり、構造設計者などの各専門家の経験や工学的判断、価値観などに依存するところが大きい。そのため、構造設計を行う際には各専門家により終局限界状態が多様に設定されていることが考えられる。このような観点から終局限界状態を設定する際に判断の対象となる構造物の被災度・損傷度の評価に関する曖昧性を定量的に評価し、多様な耐震設計論におけるコンセンサスの醸成を行うための基礎資料を作成することを目的とする。

また、日本では1995年に阪神淡路大震災を経験し、都市部の構造物が多種多様の被害状態を露呈する形となり、建築構造関係者のみならず、一般人の耐震設計への関心を刺激することとなった。そこで、骨組の損傷に関する意識が、震災前後でどのような変化があったのかもあわせて調査する。

2. アンケート調査の概要

2.1 アンケート調査

本研究の目的は、耐震設計、終局限界状態における構造物の被災度・損傷度に対する判断や評価を行うことを第一としているため、直接的な評価方法が必要である。そこで、地震を経験した構造物の情報を提示し、被災度・損傷度に対する判断や評価についての解答を求めるアンケート調査

*東京大学生産技術研究所 情報・システム大部門

を行った。アンケート調査は1993年及び、1999年の“生産技術研究所一般公開”の際に、耐震構造学研究グループの研究成果展示場への来訪者に依頼したものである。なお、展示場への来訪者は建築構造の専門家だけでなく、耐震工学に関心を持っている一般人まで幅広い。そのため、職業別に耐震設計における意識の相違を調査・評価する。アンケート調査時には回答者の職種を尋ねており、回答結果にもとづいて以下のように職種を区分した。

「構造実務」は構造設計に携わる実務者、「構造研究者」は大学や建設系民間企業の研究所などの構造工学研究者、「構造学生」は構造専攻の大学院生・大学生、「一般人」は構造の専門家ではないが、地震災害や耐震工学に興味を持っている人々である。以下、「構造実務」と「構造研究者」を「専門家」とみなすことにする。なお、「一般人」に対してはアンケート結果に影響の出ない程度に、呈示した鉄骨架構造履歴曲線(図1)中の縦軸(復元力)と横軸(変形

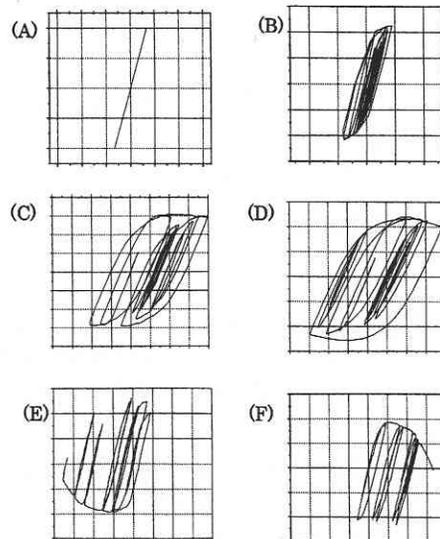


図1 アンケートで呈示した鉄骨架構造の実験履歴曲線

角)の意味の説明を行った。(標本数:震災前1993年91名(うち一般人28名),震災後1999年73名(うち一般人15名))

2.2 アンケート項目

十数年来,著者らの研究室では,各種の鋼構造骨組模型を対象に,実地震波を用いたオンライン地震応答実験を実施しており,これらのデータはパソコンのハード上に格納されデータベース化されている(SCARLET)¹⁾。本アンケートはこの地震応答実験データベースにもとづいて,地震応答履歴曲線(図1)と応答量諸元データを使用し,これらの情報から被災度・損傷度の判断を尋ねる項目を中心に作成されており,地震応答履歴曲線についての判断,応答量の概念,被災度・損傷度を判断する際に履歴曲線以外に必要な情報を問うものである。アンケート調査時に呈示した履歴曲線は,弾性範囲に留まる(A),復元力消失点に達する(F),並びに両者の中間的な損傷レベルと考えられる(B),(C),(D),(E)を選定した。なお,構造物の被災度・損傷度の評価を行う際の閲覧資料としては,履歴曲線よりも損傷状況の写真,あるいは図面のほうが適していると考えられるが,地震を経験した構造骨組の示す地震応答量などの工学的データから,被災度・損傷度を表現する評価指標を作成することを主眼にし,今回の調査では地震応答履歴曲線と応答量諸元データのみを被験者に呈示した。

3. 結果と考察

3.1 アンケート回答結果

(質問:地震応答結果の履歴曲線から判断する限り,建物の被災度・損傷度はどれほどであるか)

地震応答履歴曲線から判断される被災度・損傷度を問う質問では,建物の被災度・損傷度のイメージを健全~倒壊という分類に分けて10段階で評価する。表1に「専門家」と「一般人」のアンケート結果を示している。

表1 各履歴曲線の被災度・損傷度に対するイメージの変化

専門家	履歴曲線	A	B	C	D	E	F
震災前	平均値	0	2.42	5.21	6.37	7.95	9.95
(1993年)	標準偏差	0	0.99	1.2	1.53	1.82	0.22
震災後	平均値	0.18	2.17	6.36	7.55	9.18	10
(1999年)	標準偏差	0.39	0.9	1.61	1.44	0.94	0
一般人	履歴曲線	A	B	C	D	E	F
震災前	平均値	0.21	2.5	4.71	6.04	7	8.04
(1993年)	標準偏差	0.56	2.34	2.17	2.38	2.07	2.46
震災後	平均値	0	1.2	4.8	5.4	8.33	9.73
(1999年)	標準偏差	0	0.91	1.47	1.36	1.14	0.68

被災度・損傷度を表現する言葉・数字

0(健全):2(軽微):4(小破):6(中破):8(大破):10(倒壊)

震災前後における被災度・損傷度に対するイメージの変化として,小破以上(モデルC~F)と感ずる場合には,被災度・損傷度を表現する数字の平均値が増加していることが確認できる。また,標準偏差から判断される回答のばらつきは,一般人の場合には震災前では大きければつきが全体的に確認されたが,震災後ではばらつきが大きく減少していることが確認できた。

(質問:地震応答結果が大地震に対する建物の損傷として許容できるものであるか)

建物の大地震時における被害として許容できるかどうかを問う質問である。質問1と関連付けて考察すると,被災度・損傷度を小さく評価したケースについては,許容できないという割合が少なくなり,被災度・損傷度を大きく評価したケースについては許容できないと回答されている。震災前後を比較すると,被災度・損傷度を小さく評価したケースに対しては,許容できないという割合が若干減少している傾向があり,被災度・損傷度を大きく評価したケースに対しては許容できないという割合が増加している(図2)。

3.2 応答量の概念についての判断

被災度・損傷度を決定する際には,履歴曲線だけでなく複数の応答量,すなわち耐力劣化率 γ ,最大変形角 θ_{max} ,塑性変形角 θ_{ra} ,残留変形 θ_{rd} ,累積塑性変形角 $\Sigma\theta_p$ などをもとに判断されることが考えられる。本アンケート調査では,これらの情報が被災度・損傷度を決定する際の判断基準としての重要度を検討するために,ペア比較マトリクスの形式で重要度を尋ねた。Thomas L. Sattyが提唱した階層分析法AHP(Analytic Hierarchy Process)²⁾を用いてこの回答を分析する。

図3は階層分析法の結果を示すもので,地震応答量の被災度・損傷度決定時の重要度を示している。この図より,震災の前後に関係なく耐力劣化率が重要な判断材料になっていることがわかる。また,震災後の結果では,震災前に

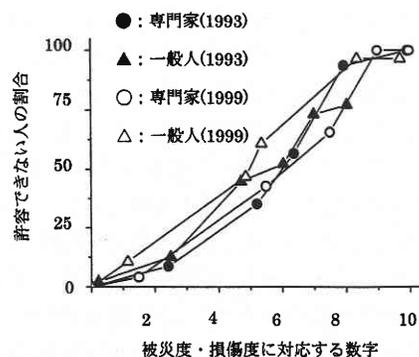


図2 大地震に対して許容できないという回答率

研 究 速 報

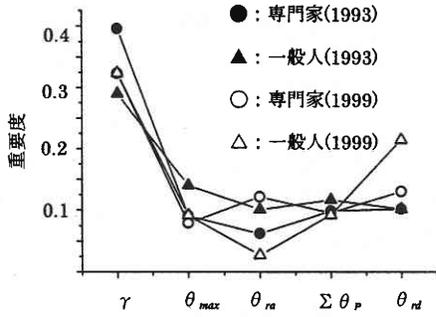


図3 地震応答量の重要度

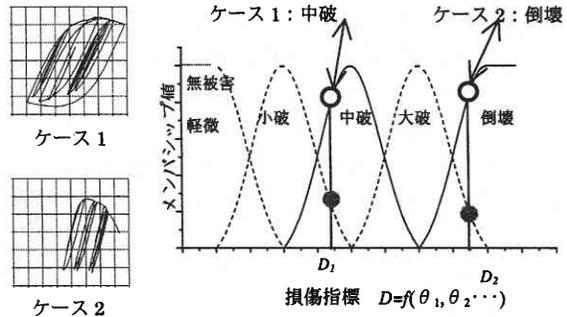


図4 被災度・損傷度のファジィモデル

比べて残留変形角を重要視している傾向があることを示している。また、「専門家」と「一般人」の相違点として、震災後の結果において「専門家」が塑性変形角の幅を「一般人」に比べて重要視していることもわかる。

3.3 人間の感覚量に基づく被災度・損傷度のファジィモデル

人間の感覚、あるいは種々の意思決定の際には曖昧性が存在することは明らかである。そのため、今回のようなアンケート調査でも被験者の多様な意思決定が行われていると推定される。そこで、この種の意思決定メカニズムにファジィ推論のモデルを当てはめることで被災度・損傷度を決定する際の新しいルール作成に役立てることを考える。

建造物の安全性診断において、ファジィ理論を損傷度解析に応用した研究が十数年前から行われている^{3~6)}。この種の解析は、震災後に被害を受けた建造物に対する損傷度診断として行われるものである。ファジィ理論を応用した損傷度解析は、従来の損傷度診断に比べ、損傷要因のカテゴリー化や損傷評価に関する曖昧性、複雑性に対してファジィ集合を導入し、この種の曖昧性や複雑性を含む形で損傷度解析を実行できるため、種々の判断時における意思決定を考慮した手法である。具体的には、頂上事象を損傷評価とする Fault Tree を作成し、ファジィ量で定義された言語変数で各要因を評価し、ファジィ演算により損傷度を推論する手法⁴⁾、また数量化理論において、説明変数としての損傷要因をカテゴリー化する際に、ファジィ量を導入することで各カテゴリーへの所属度という形で外的基準としての損傷度評価を推論する手法^{5,6)} などがある。なお、損傷度として出力される評価関数はファジィ量であり、損傷度を表す典型的なメンバシップ関数を予め用意しておき、類似度を計算することで損傷度を評価する。

本稿のファジィモデルは、ある地震応答量から作成される損傷指標 $D = f(\theta_1, \theta_2, \dots)$ が与えられたときに、損傷指標 D と被災度・損傷度をファジィ量で予想するモデルである (図4)。ここで被災度・損傷度は無被害～倒壊までの言葉で表すものとし、損傷指標値と対応させる。つま

り、損傷指標値が大きいほど建造物の被災度・損傷度が大きいことになる。図中に示すケース1, 2の損傷指標値が D_1, D_2 であるとする、図中の○印のメンバシップ値が得られる。その中でメンバシップ値がもっとも大きな値を持つファジィ量を持つことになる。つまり、ケース1は「中破」、ケース2は「倒壊」になる。

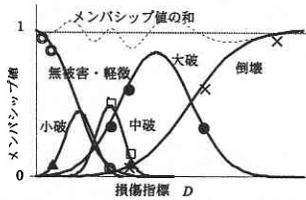
図3に示した地震応答量の重要度の重みを専門家の平均的な値について示すと、 $w_\gamma = 0.4, w_{\theta_{max}} = w_{\theta_{ra}} = w_{\Sigma\theta_p} = w_{\theta_{rd}} = 0.15$ となる。これらの重みの意味としては、応答量 a と応答量 b とのペア比較で比較したとき、応答量 a の方が応答量 b より w_a/w_b 倍 (1:同じくらい重要, 3:やや重要, 5:かなり重要, 7:非常に重要, 9:極めて重要) 重要であると意識されているという意味である。また $\gamma, \theta_{max}, \theta_{ra}, \theta_{rd}, \Sigma\theta_p$ などの応答量も互いに独立ではなく、ある相関関係があるのは明白である。例えば、耐力劣化率 γ を予測する際には $\theta_{max}, \theta_{ra}, \theta_{rd}, \Sigma\theta_p$ などの応答量の関数と考えることもできる。一方、最も重要と考えられている耐力劣化率 γ のみを損傷指標とすると、これは0でない値を持つのは、通常大破～中破程度以上の比較的大きな損傷度の場合であり、 $\gamma = 0$ に対しては軽微、小破、中破などの被災度・損傷度の違いを表現するのは不可能である。そこで耐力劣化率 γ ほど重要ではないと意識されている応答量の中から θ_{max} を選び、 θ_{max} が 1/10 に達するとほぼ $\gamma = 1$ に匹敵すると仮定して、さらに両者の重要度の重みを考慮した凸結合で損傷指標 D を仮に表現するとすると、次式のようになる。

$$D = \frac{0.4}{0.4 + 0.15} \times \gamma + \frac{0.15}{0.4 + 0.15} \times \left(\frac{\theta_{max}}{0.1} \right) = 0.73 \cdot \gamma + 2.7 \cdot \theta_{max} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 γ と θ_{max} も多くの場合は正の相関があることに注意する。 $\gamma \Rightarrow 1 \Rightarrow \theta_{max} \Rightarrow 0.1$ となると、上記の損傷指標は $D \Rightarrow 1.0$ になる。なお、式 (1) で表される損傷指標値は耐力劣化率 γ 、最大変形角 θ_{max} の地震応答量を含むため、

実際の震後判定に応用するのは困難である。実際の震後判定に応用するには、 γ に替えて観測された損傷程度の区分や接合部の破断率に変更する必要があると、 θ_{max} に替えて残留変形角 θ_{rd} をパラメータにすべきであろう。

(1) 式の損傷指標は、想定地震に対する構造物の応答評価を行って γ , θ_{max} の応答を求めた場合に、それがどのような被災度・損傷度と判断されるかの目安として使うこと



被災度・損傷度のメンバシップ関数 $D = 0.73 \cdot \gamma + 2.7 \cdot \theta_{max}$

無被害・軽微 (シグモイド関数): $m_B(D)_{\text{無被害・軽微}} = \frac{1.108}{1 + \exp\left(\frac{D-0.136}{0.054}\right)} - 0.006$

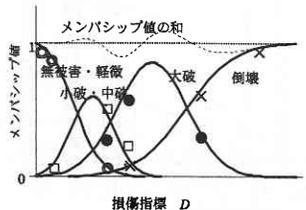
小破 (ガウス関数): $m_B(D)_{\text{小破}} = 0.506 \cdot \exp\left(-\frac{2(D-0.159)^2}{0.011}\right)$

中破 (ガウス関数): $m_B(D)_{\text{中破}} = 0.546 \cdot \exp\left(-\frac{2(D-0.272)^2}{0.009}\right)$

大破 (ガウス関数): $m_B(D)_{\text{大破}} = 0.862 \cdot \exp\left(-\frac{2(D-0.446)^2}{0.072}\right)$

倒壊 (シグモイド関数): $m_B(D)_{\text{倒壊}} = \frac{1.040}{1 + \exp\left(\frac{D-0.576}{0.095}\right)} + 1.031$

(a) 5 区分の被災度・損傷度ファジィモデル



小破・中破 (ガウス関数): $m_B(D)_{\text{小破・中破}} = -0.003 + 0.609 \cdot \exp\left(-\frac{2(D-0.217)^2}{0.026}\right)$

無被害・軽微、大破、倒壊のメンバシップ関数は (a) と同じ関数を使用

(b) 小破・中破をまとめた場合の被災度・損傷度ファジィモデル

図5 アンケート結果 (専門家) とメンバシップ関数のフィッティング例

ができる。すなわち、アンケート結果とメンバシップ関数の関係が図5のように得られる。図5 (a) では、小破、中破のメンバシップ値が小さく、分布も類似しているため両者の区別がはっきりしない。そこで、図5 (b) に示すように小破・中破をまとめたファジィモデルを作成することで各メンバシップ関数が明確になり、被災度・損傷度の予測モデルとしてはより有用なものになると考えられる。例えば、別の構造物の地震応答量 (履歴曲線) が与えられた場合、このファジィモデルから、何割の専門家がどの被災度・損傷度と判断するかが予想できる。

4. 結 果

地震による鉄骨骨組の被災度・損傷度についての判断に関する基礎資料を作成する目的でアンケート調査を行った。震災前後における被害に対する意識の変化、また、専門家と一般人の間に被災度・損傷度に対する意思決定の相違を確認できた。また、震災後の残留変形角を重要視する傾向が強くなっていることを確認した。さらに、意思決定時のファジィ推論ルールを抽出することで、被災度・損傷度の評価に関わる工学的判断を定量化する可能性を示した。

(2000年9月29日受理)

参 考 文 献

- 1) 張紅, 大井謙一: 地震応答実験データベースによる鋼構造骨組の損傷度予測法の検討, 構造工学論文集, 1994年3月, pp. 721-730.
- 2) Satty, T.L.: The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill, 1980.
- 3) 河村廣, 谷明勲, 劉世宏: ファジィ回帰分析とファジィ統合則における RC 構造の被害因子の影響の同定-阪神大震災における事例を対象として-, 第18回情報システム利用技術シンポジウム論文集, 1995, pp. 307-312.
- 4) 白石成人, 吉田均, 橋本光行: 構造物の健全度評価へのファジィグラフの応用, 材料, 33-364, 1984, pp. 21-27.
- 5) 白石成人, 吉田均, 橋本光行: 構造物の健全度評価へのファジィ数量化理論の応用, 第30回構造工学シンポジウム講演論文集, 1984, pp. 277-294.
- 6) J. Watada: Theory of Fuzzy Multivariate Analysis and Its Applications, Doctor Thesis for Univ. of Osaka Prefecture, 1983.