

地震による鉄骨架構の損傷度についての専門家・一般人の判断

Expert and Non-expert Judgements about Earthquake Damage of Steel Frames

大井 謙一*・張 紅*

Kenichi OHI and Hong ZHANG

1. はじめに

建物の安全性を検討する場合に使用限界状態と終局限界状態とが考慮される。使用限界状態は建物のサービスabilityの問題であり、終局限界状態は構造物の崩壊やその他の形の損傷によって、人命や財産に危険をもたらす状態のことである。重力など持続的に働く作用に対しては、構造物の終局限界状態は最大耐力に達する状態として、客観的に明解に定義されるが、地震など「一過性」のある動的作用に対しては完全倒壊に至るまでのある状態となり、また余震や被災後の2次災害の防止を考慮すると、どのような状態を終局限界状態とすべきか議論の分かれるところである。それは、経済情勢・社会通念や構造設計に関わる専門家の常識や主観的な工学的判断等に依存するところが多い。このような構造物の設計や損傷評価に関わる曖昧性を定量化し、コンセンサスを得るための手段としてアンケート調査が利用されることがある。本報では、鉄骨建物の被災度・損傷度の予測や数量化に役立てるため、終局限界状態を判定する際の損傷度の決定について、専門家や一般人がどのような因子を重視しているか、大地震のもとでどの程度の損傷度が許容されるか等について、アンケート調査を行った結果を報告する。

2. アンケートの実施及び回答者の状況

アンケート調査は1993年6月9日、10日の両日開催された“生研公開”の際、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。

回答者は全部で91名である。質問6では、回答者の職種を尋ねた。職種によって、以下に示すように区分した。

「構造実務」19名は構造設計に携わる実務者、「構造研究」23名は大学や建設系民間企業の技術研究所等での構造

*東京大学生産技術研究所 第5部

工学研究者、「構造学生」21名は構造専攻の大学院生、「一般人」28名は構造の専門家ではないが、地震災害に興味を持つ人々である。

3. アンケート調査の内容及び回答状況

1) 具体的な履歴曲線についての判断

質問1～質問3では、図1に示す地震中の建物の抵抗力(復元力)と揺れ(変位)の関係の実験履歴曲線から判断される損傷度のイメージおよび損傷度を表現する際に用いる言葉との対応等を尋ねた。

【質問1. 図1の地震応答結果は履歴曲線から判断される限り、どの程度の損傷度と判断されますか? 尺度として、「健全・軽微・小破・中破・大破・倒壊」等の言葉に対応する数値あるいはその中間値を用いること。】

質問1の回答結果を表1にまとめている。各回答者グループの多数が選択した言葉はケースC以外では、一致している。すなわち、ケースAは「健全」、ケースBは「軽微」、ケースDは「中破」、ケースEは「大破」、ケースFは「倒壊」である。ケースCにおいては、「構造実務」と「構造研究」の構造専門家がわずかの人数差で「中破」と判断し、「構造学生」と「一般人」がわずかの人数差で「小破」と判断した。また、「構造学生」と「一般人」は構造専門家に比べて回答のばらつきが大きいことがわかる。

【質問2. 履歴曲線のみから判断される限り、図1の地震応答結果は、南関東地震や東海地震等の大地震に対する一般建物の損傷度として、許容できると思いますか?】

図2は各履歴曲線の地震応答量に対して、「許容できない」損傷度と判断された回答の割合をプロットしたものである。「耐力劣化率」および「残留変形角」については、「許容できない」という回答割合がこれらの応答量の単調増加関数になっている。「最大変形角」または「累積塑性

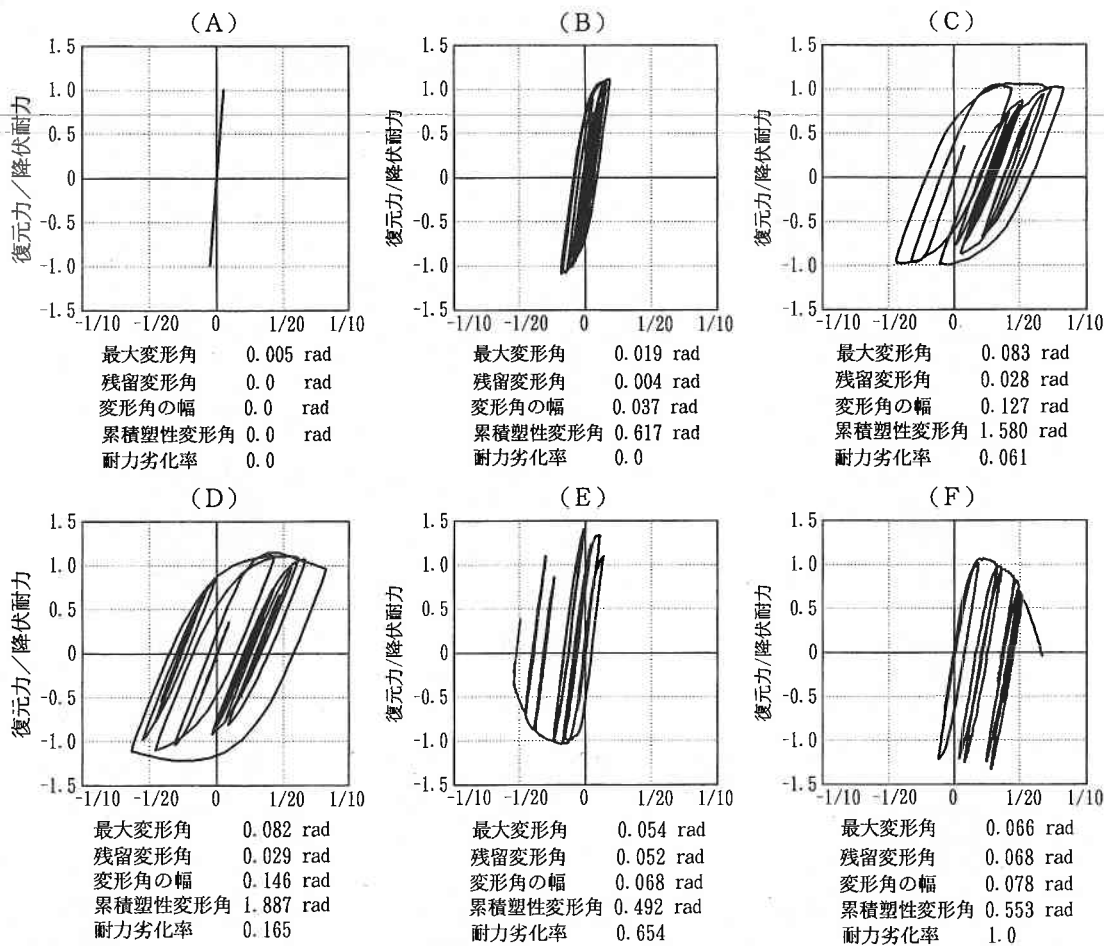


図1 アンケートで呈示した鉄骨架構の実験履歴曲線

変形角”については、その大小と「許容できない」という回答割合の大小が一致していない例がある。たとえば“最大変形角”と“耐力劣化率”の大小が逆転している場合、後者の方が優先的に判断に反映されている。

【質問3. 余震等を考慮する場合、上記の建物は被災直後、立入禁止にした方がよいと思いますか？】

図3は質問3の回答結果を同様にプロットしたものである。図2と比較すると、判断の条件として、「立入禁止にすべき」が「許容できない」より、若干厳しい条件であることがわかる。すなわち、大地震に対する損傷度としては許容できるが、被災直後立入禁止にすべきであるような状況がある。これは、2次災害を極力防ぎたいという考え方が回答者にあるためと考えられる。

2) 応答量の概念についての判断

質問4では、上記の実験履歴曲線と関係なく、図4に示す複数の地震応答量、すなわち、耐力劣化率 γ 、最大変形角 θ_{max} 、変形角の幅 θ_{ra} 、累積塑性変形角 $\sum |\Delta \theta_p|$

および残留変形角 θ_{rd} について、損傷度を定める際の重要度をペア比較マトリックスの形式で尋ねた。回答する際に下記の数字を用いた。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、2,4,6,8-中間値。

この回答を分析する際に、階層分析法 AHP を用いた。まず、Thomas L. Satty が提唱した階層分析法 AHP (Analytic Hierarchy Process) の原理¹⁾について、簡単に説明する。

a_i の a_j に対する重要度を a_{ij} とすれば、 n 個の評価対象、 a_1, a_2, \dots, a_n のペア比較マトリックスは $[A] = [a_{ij}]$ となる。各対象に対する評価の重みを w_1, w_2, \dots, w_n とすれば、 $A = [a_{ij}]$ は $[w_i/w_j]$ になる。また、ペア比較マトリックス $[A]$ に重み列ベクトル $\{w\} = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ を掛けると、次式の固有値問題になる。

$$([A] - \lambda [I]) \{w\} = \{0\} \quad \dots\dots(1)$$

研究速報

表1 各履歴曲線と損傷度を表現する用語との対応(質問1)

履歴曲線	下記の数値(0~10)に対応して、図1の地震応答結果は履歴曲線から判断される限り、どの程度の損傷度と判定されるか?										平均		
	0-健全	1-中間値	2-軽微	3-中間値	4-小破	5-中間値	6-中破	7-中間値	8-大破	9-中間値	10-倒壊		
A	19(100%)										構造実務	0.0	0.09
	22(93%)	1(4%)									構造研究	0.04	
	20(92%)	1(4%)									構造学生	0.05	
	24(88%)	2(7%)	2(7%)								一般人	0.21	
B	1(5%)		12(63%)	2(11%)	4(21%)							2.42	2.49
		1(4%)	12(52%)	1(4%)	6(26%)	1(4%)	2(9%)					3.00	
	1(5%)	5(24%)	12(57%)		2(10%)	1(5%)						2.00	
	5(18%)	3(11%)	12(43%)		6(21%)				1(4%)	1(4%)		2.50	
C				2(11%)	5(26%)		11(56%)	1(5%)				5.21	5.25
					8(35%)	2(9%)	9(39%)	1(4%)	3(13%)			5.52	
			1(4%)		3(13%)		6(29%)		5(24%)	1(5%)		5.71	
			6(21%)	1(4%)	10(36%)	1(4%)	5(18%)		4(14%)	1(4%)		4.71	
D					3(18%)	1(5%)	8(42%)	2(11%)	4(21%)		1(5%)	6.37	6.35
					1(4%)	1(4%)	12(52%)	3(13%)	7(31%)			6.70	
					2(10%)	4(19%)	8(36%)		6(29%)	1(5%)		6.38	
		1(4%)	3(11%)		3(11%)	1(4%)	10(36%)	1(4%)	6(21%)		3(11%)	6.04	
E				1(5%)	1(5%)		1(5%)		10(53%)	2(11%)	4(21%)	7.95	7.57
					5(24%)		5(24%)	1(5%)	7(33%)	1(5%)	2(10%)	8.70	
					1(4%)	5(18%)	6(21%)	1(4%)	9(32%)	2(7%)	4(14%)	7.00	
									14(61%)	2(9%)	7(30%)	8.76	
F	構造実務								1(5%)	18(95%)		9.95	9.00
	構造研究								2(9%)	21(91%)		9.83	
	構造学生					1(5%)	3(14%)	2(10%)	1(5%)	14(67%)		8.52	
	一般人		1(4%)	1(4%)	2(7%)	1(4%)	3(11%)		4(14%)	3(11%)	13(46%)	8.04	

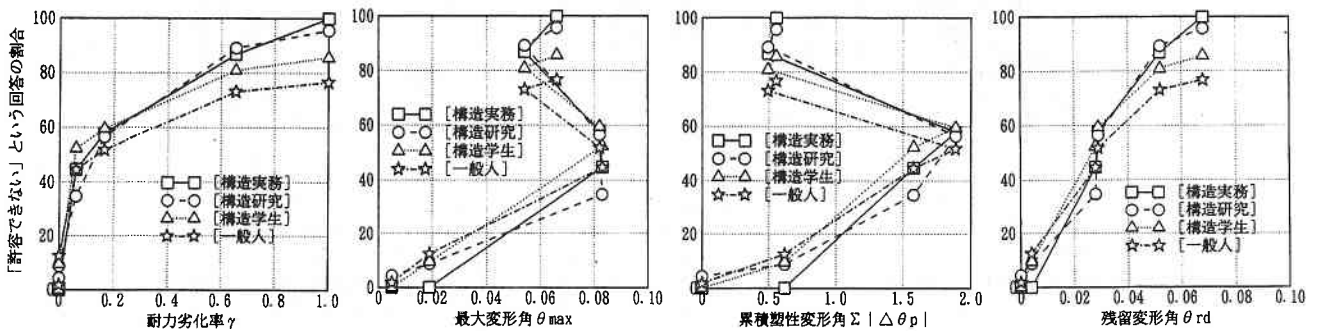


図2 大地震で許容できないという回答割合と応答量との関係(質問2)

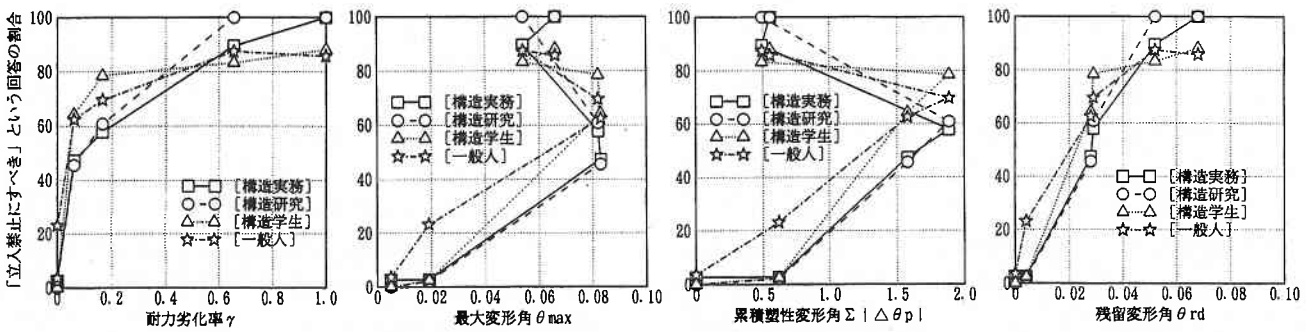


図3 被災後立入禁止にすべきという回答割合と応答量との関係(質問3)

ここに、 λ は $[A]$ の固有値、 $[I]$ は単位行列、そして $\{w\}$ は $[A]$ の固有ベクトルとなる。 $[A]$ の主対角要素の和は n であるから、ただ1つ零でない $[A]$ の固有値を λ_{max} とおけば、

$$\lambda_{max} = n \quad \dots\dots(2)$$

となる。

ところで実際にアンケート等で主観的に $[A]$ を作成してもらっても、必ずしも上記の理論どおりに $[A]$ が構成されることはない。これは回答者の答えが整合していないためで、一般に、 $\lambda_{max} \geq n$ である。これから、首尾一貫性尺度として、Satty は次式の整合度(コンシステンシー指

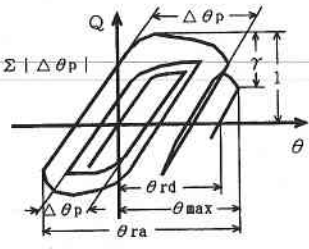


図4 重要度ペア比較に用いた応答量 (質問4)

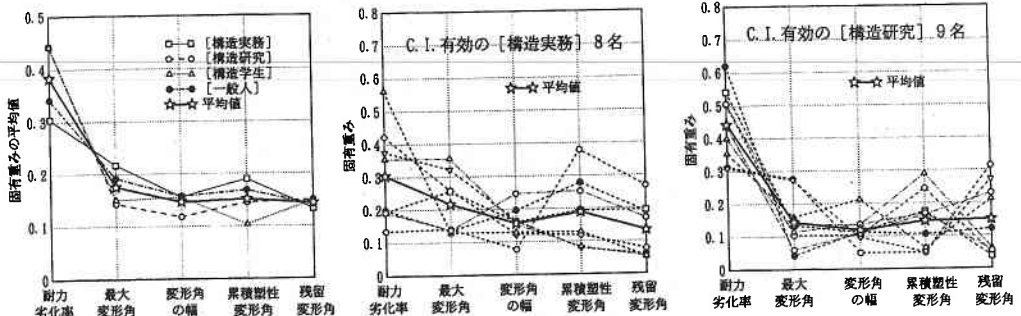


図5 重要度ペア比較における各応答量の固有重み (質問4)

表2 重要度ペア比較における首尾一貫性 (C.I.) (質問4)

分類	回答者全員			C.I. ≤ 0.1 の回答者	
	合計	無回答	回答	C.I. 平均値	人数
構造実務	19	2	17	0.248838	8名
構造研究	23	3	20	0.157972	9名
構造学生	21	1	20	0.129128	12名
一般人	28	6	22	0.238451	7名
合計	91	12	79	0.193597	36名

数, consistency index) を提案している.

$$C.I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \dots (3)$$

さらに, Satty は C.I. ≤ 0.1 であれば有効 (合格) とすることを経験より提案している.

本報では, まず回答者全員に対して, ペア比較マトリックス [A] の C.I. 指数を算出する. 表2の中で注目されるのは, 構造専門家より, 「構造学生」の C.I. 平均値や有効者の割合が良好で, 整合性が高いことである. これは学生達が年齢的に若く, 経験に照らすというより論理やポリシーを重んずる傾向があるためであろう. 次に, 各グループの C.I. 有効者の回答とその平均値を図5にまとめる. 図5より, 各変数の固有重みは大略“耐力劣化率” 0.4, “最大変形角” 0.15, “変形角の幅” 0.15, “累積塑性変形角” 0.15, “残留変形角” 0.15 程度である. すなわち, 損傷度の判断において, これらの変数の中では, “耐力劣化率” が最も重要な因子となっていることがわかった.

【質問5. 建物の被災度・損傷度を判定するには上記履歴曲線の情報だけでは, 不十分と考えられます. この他に必要と考えられる情報は何ですか? (以下に示す4つの選択枝あり) 複数の場合は, 重要な順に順位をつけてください.】

質問5において構造専門家 (「構造実務」と「構造研究」) の回答を図6にまとめている. 履歴曲線以外に重要な情報としては, 接合部の破断・変形の状況 (略称“接合

	第1位	第2位	第3位	第4位
接合部	53%	21%	15%	6%
座屈	17%	39%	24%	9%
地盤	29%	19%	36%	51%
仕上		8%	7%	34%
無回答		13%	18%	

図6 履歴曲線以外で重要な情報の順位 (質問5)

部”), 構造部材の局部座屈・横座屈の状況 (略称“座屈”), 基礎・周辺地盤の状況 (略称“地盤”) および非構造材・仕上げ等の損傷状況 (略称“仕上”) の順番で選択されている.

4. 結 び

限られた標本数のアンケート調査結果であるが, 鉄骨架構の大地震に対する損傷度の判定について“耐力劣化率”が比較的重要な因子となり, それが10%を超えるものについて, 専門家の半数以上が大地震に対する鉄骨一般建物の損傷度として許容できないと判断する傾向が観察された. 今後, このような主観的判断のほか応答量の予測誤差等の客観的変動も合わせ考慮して, より有効な耐震終局限界状態関数の構成法を提案する予定である.

謝辞: 本研究の一部は平成4年度文部省科学研究費補助金・一般研究 (C) 「鉄骨架構の地震応答実験・観測資料に基づく耐震終局限界状態関数の最適構成法」 (研究代表者: 大井謙一, No. 04650513) の助成を受けた. また, 貴重な時間を割き, アンケートに協力された回答者の方々に深甚の謝意を表する. (1993年12月10日受理)

参 考 文 献

1) Satty, T.L.: The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill, 1980