

地震直後に建物の被害程度を自動的に判断する被災度判定装置

楠 浩一

東京大学 地震研究所 教授



1 はじめに

日本は世界有数の地震国である。したがって、世界でも最も厳しい耐震基準を用いている。その地震の強さは、関東大震災を引き起こした1923年大正関東地震級を想定している。つまり、大正関東地震が再び起こった場合にも、人命を損なわないことを目標耐震性能としている。

2 巨大地震と被災建築物の危険度

大正関東地震が発生した当時、東京大学地震研究所には地震の揺れを観測する地震計はすでに設置されていた。しかし、残念ながらその揺れの大きさは当時の想定を超えていたため、記録はふり切れている。その後の研究から、最大の地動加速度はおよそ250～400cm/sec²であったと想定されている。

一方、建物の揺れは地表面での揺れ方と同じではなく、風で竹がしなるように地震により揺れる時には建物もしなっており、地表の揺れよりも増幅される。その増幅率は2.5～4倍と言われ、大正関東地震を想定した場合、建物の揺れの大きさはおよそ1,000cm/sec²、つまりおよそ1Gとなる。これは加速度の大きさとなるが、地震時に建物に作用する力は慣性力であり、その大きさは建物の重さに加速度をかけたものに等しい。要するに、1Gの地震力を想定するということは、建物にその重さと同じだけの力が横に作用しても、人に危害を与えるような倒壊などを発生させないことが目標となる。この極めて大きな地震力に対して、建物を無損傷にとどめることは、非常に困難であり、不経済でもある。車が衝突するとき、ボン

ネットが安全に変形して壊れることにより、その衝突エネルギーを吸収するように、建物も安全に損傷を生じさせることで地震のエネルギーを消費するように設計する方法を採用し、必要な強度を合理的に低減している。

そのため仮に建物が最新の耐震基準に則って設計されていたとしても、大正関東地震級の地震に対して無被害にとどまるというわけでは必ずしもなく、むしろ損傷は生じると考えられる。そうすると、巨大地震が発生した際には、壁などにひび割れが生じたり、ほんの少し建物が傾いたりすることも考えられる。巨大地震が発生すると、その後しばらくは大きな余震が続く。余震による二次被害を防ぐためにも、建物に損傷があるのか、損傷がある場合は引き続き使用して問題ないのかを早急に判断する必要がある。そのため、建設省（当時）は昭和61年（1986年）に「建築物の震災復旧マニュアル（案）」を取りまとめた。

この中で、「応急危険度判定においては、被災建築物について、余震等による倒壊危険性及び落下物による危険性を調査し、その結果に基づき、危険度を「危険」、「要注意」、「安全」の3区分により判定する。被災度区分判定においては、被災状況を調査し、その被災度を「軽微」、「小破」、「中破」、「大破」、「倒壊など」の5区分により判定する。さらに、その被災度と当該地域の震度階から、復旧をするに当たっての補強等の可否を判定する。」とある。

3 応急危険度判定

応急危険度判定では、地震発生後に判定士が建物1棟1棟を目視により調査を行い、その危険度

を3段階に分類し、その結果を図-1に示すステッカーを用いて建物の入り口などに表示する。判定士は、講習を受け、各自治体に登録されたボランティアが主である。判定は、地震発生後おおむね4日で完了することを目標としている。しかし、表-1に示す過去の応急危険度判定実績のように、実際に必要となった日数はさらに長く、災害によっては数か月を要している。これは、①応急危険判定実施の決定とそのチームを組織することに時間がかかる、②対象地域の絞り込みに時間がかかる、③調査も目視によるため時間がかかる、といった理由が考えられる。

目視では主に柱や壁などの鉛直材を中心にそのひび割れの発生具合の確認と残留のひび割れ幅を計測するが、住人が不在で鍵がかかっている場合は内部の部材は調査できない。そもそも、仕上げがついているとひび割れ自体を確認できない。ま

た、超高層建物など、10階を上回るような建物は何れも、応急危険度判定マニュアルの対象外である。

4 観測記録を用いた被災度の判定

建物の揺れを観測する加速度計は、1台で数百万円と高価な計測器であった。ゆえに、利用はもっぱら理学的な研究目的で、建物の揺れを測ることは原理的には可能でも、実際には行われてこなかった。また、一般的には加速度の値を1秒間に100回程度計測する。計測機器間の時刻同期の精度を保証するため、計測器は専用のケーブルでつなぐ必要があり、設置も容易ではなかった。しかし、MEMS型のセンサーが開発され、加速度チップが携帯電話などにも用いられるようになると、加速度計の値段は1台が10万円を下回るなど、非常に安価となってきた。また、インターネットの普及とインターネット回線を用いた時刻同期技術の開発により、接続に専用線も不要となった。これにより、建物の揺れの常時観測が現実味を帯びてきた。

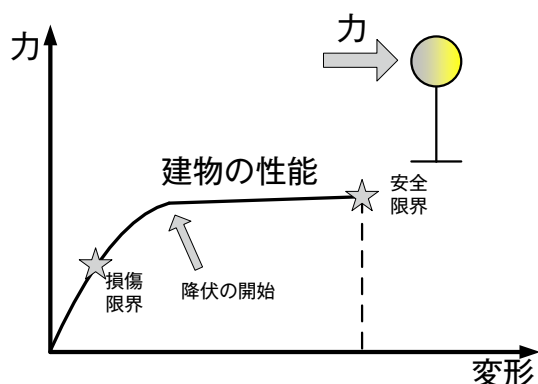
建物に力が作用すると、図-2に示すように、やがて建物に損傷が発生して建物の力と変形の関係は、その傾きが小さくなり始める。やがて中の



【図-1 応急危険度判定で用いるステッカー】

日付	地震名	期間	判定者数	棟数	調査済	要注意	危険
H7.1.7	兵庫県南部地震	23日	6,466	46,610	30,832	9,302	6,476
H12.12.6	鳥取県西部地震	24日	332	4,080	2,138	1,499	443
H13.3.25	芸予地震	19日	636	1,763	674	921	168
H15.7.26	宮城県北部地震	8日	743	7,245	3,804	2,181	1,260
H16.10.23	新潟県中越地震	18日	3,821	36,143	19,778	11,122	5,243
H17.3.20	福岡県西方沖地震	19日	444	3,148	1,500	1,131	517
H19.3.25	能登半島地震	6日	391	7,600	4,800	1,571	1,229
H19.7.16	新潟県中越地震	8日	約2,800	34,048	20,150	8,943	4,995
H20.6.15	岩手宮城内陸地震	10日	475	2,978	2,197	564	217
東北地方太平洋沖地震							
H23.3.11	宮城県	2か月	2,955	50,721	37,968	7,553	5,200
	福島県	2.5か月	2,053	15,807	5,775	6,718	3,314

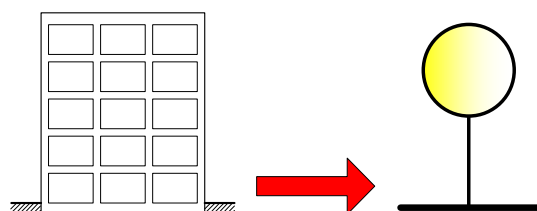
【表-1 過去の応急危険度判定実績】



【図-2 建物の力と変形の関係】

鉄筋が強度に達して鉛のように伸び始めると（降伏と呼ぶ）、もはやその傾きは極めて小さくなる。そうすると、加速度、つまり力だけを計測しても建物が降伏した以降はうまく損傷を把握できない。

2000年に建築基準法は改正され、限界耐力計算法という構造計算方法が追加された。この方法は、建物の各階の力と変形をコンピュータにより計算し、その結果を、図-3に示すように1階建ての建물에単純化し（これを縮約と呼ぶ）、一つの力と変形の関係（これを性能曲線と呼ぶ）で表して、建物の性能を評価する方法である。建設省建築研究所（当時、現 国立研究開発法人建築研究所）にいた筆者らは、一連の法改正と基準解説書の整備がおおむね終わったところに、「この手法は、建物の各階の加速度を計測すれば、全く同じ方法で建物の損傷程度を評価できるのではないか」と着想するに至った。つまり、変形だけ、力だけ、ではなく、力と変形の関係を観測から求めようという方法である。この方法に必要なものは、各階の加速度と変形だけであり、あらかじめ建物をコンピュータの中にモデル化したりする必



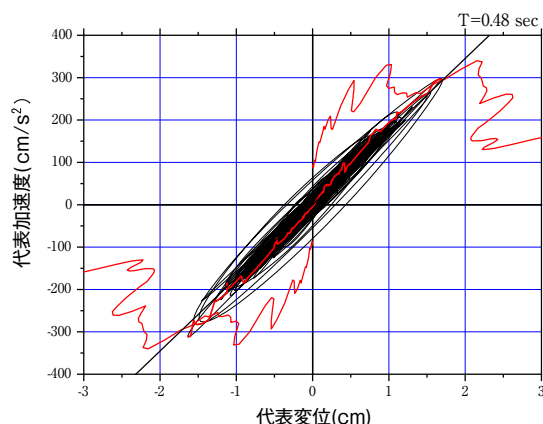
【図-3 建物の縮約】

要もない。

しかしここで、大きな問題に直面した。それは、「どのようにして建物の変形を得るか」である。加速度計はすでに小型化され、小さな箱程度の大きさになっているが、変形を測るためには「変位計」を計測したい場所に設置する必要がある。これは建物の使用上、極めて邪魔であるため、変位は加速度を2階積分して求めることとした。

だが現実には、加速度を2階積分して変位を得ることが困難であることは当時では常識であった。特に建物に損傷が生じて非線形化した場合、不可能と言ってよかった。これは、加速度記録に含まれる極めて微小な誤差が2階積分で劇的に増加するためである。しかもこの誤差は、センサーチップの非線形性や回路接続部の電氣的ノイズなど、簡単に除去できるものではなかった。この問題に直面した筆者は、確率論的な方法やトレンド分析のような方法など、いろいろと試したものの、全自動で安定して変位を得る方法は見つけれなかった。転機が訪れたのは、たまたま立ち寄った大型書店で、情報工学分野の棚からたまたま手に取った「Wavelet変換」を用いた画像圧縮方法に関する教科書であった。詳細は割愛するが、このWavelet変換を用いることで、十分な精度で加速度から安定して変位を計測できるようになった。センサーなどを用いた建物の被災度の判定技術は、「構造ヘルスマニタリング」と呼ばれ、現在、活発に研究開発が行われている。

その後、性能曲線と建物が破壊に至る変形から、建物の被災度を被災度区分判定と同じ定義で「軽微」、「小破」、「中破」、「大破」、「倒壊など」の5区分に自動的に分類する方法を確立し、建物の被災度を地震直後に自動的に判定するシステムを確立した。現在、このシステムは国内外50を上回る建物に設置され、そのデータは24時間、地震研究所の地震被害判定サーバーに収集している。ひとたび地震が発生すると、その被災度を自動判定し、メールで通知する。その一例として、東北地方太平洋沖地震の際に横浜国立大学建築学棟で自動計算された性能曲線を図-4に示す。図から、力と変形の関係が途中から低下している



【図-4 観測例】

が、大きく傾きが低下することはなく、その被災度は軽微と判定された。後日行った目視による被害調査によると、建物の地下階に軽微なひび割れ

がある程度であり、判定結果の妥当性が確認された。なお、建物が破壊に至るまでの有効性については、実大三次元震動破壊実験施設 E-Defense などを用いて、実験的に確認している。

5 おわりに

地震災害が発生した時、被害状況の迅速な把握はその第一歩である。これまでの目視による応急危険度判定では、予測されている首都直下の地震や東海・東南海・南海連動地震においては立ち行かない。そのため、日本建築防災協会では「応急危険度判定基準に基づく構造モニタリングシステム技術評価」を開始し、有効な技術の評価と普及を図っている。構造ヘルスマモニタリングのさらなる普及が望まれる。