

シリーズ「新・強震動地震学基礎講座」

(第2回) 震度に関するいろいろ

強震動委員会 横井俊明 (建築研究所国際地震工学センター)

読者の大多数が既に御存知のように、地殻内の破壊現象としての地震の規模はマグニチュードで示される。マグニチュードの決定法は複数あり、同じ地震で複数のマグニチュードが発表されることも珍しくない。震源の物理現象が主たる興味の対象となる場合には、物理的な意味のはっきりしているモーメント・マグニチュード (Mw) が使われる。一方、地表の地震動 (震源から伝播してくる地震波によって発生する地表の揺れ) は、同じ地震によっても、観測場所により、強弱も性質も異なる。複雑な地震動を建物被害等と結び付けて端的に表現するために、「震度」が古くから使われてきた。

19世紀末、地震観測の黎明期に、Rossi-Forel 震度階 (Michele Stefano Conte de Rossi (イタリア) と François-Alphonse Forel (スイス), 1873年) や、Melcalli 震度階 (Giuseppe Mercalli (イタリア), 1884年) が考案された。後者は何度か改訂され、Harry O. Wood と Frank Neumann による 1931年版は Mercalli-Wood-Neumann (MWN) 震度階と呼ばれる。1956年には、Charles Richter (ローカルマグニチュードの創始者と同一人物) により再び改訂された (MM56 と書かれることもある)。これらは主として米国やその影響の強い国々で使われている。その具体的な説明文は、例えば、<https://earthquake.usgs.gov/learn/topics/mercalli.php> で見ることができる。

1964年には、より定量的な指標として、Sergei Medvedev (ソ連)、Wilhelm Sponheuer (東ドイツ) 及び Vít Kárník (チェコスロバキア) により、MSK64 震度階が提唱された (例えば、http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/4_voll_A2-143.pdf)。これは主として旧ソビエト連邦とヨーロッパで使われ、何回かのマイナーな改訂を経て、1988年から European Seismological Commission により全面改訂が始まり、1998年に European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98) として出版され、各国語版が Web で公開されている (例えば、<http://www.gfz-potsdam.de/ems98/>)。

一方、日本では、関谷清景による 4段階の震度階 (1884) に始まり、1898年の 7段階への改訂を経て、福井地震 (1948) を契機として震度 7 が加えられた 8段階の震度階が 1949年に成立した。これら気象庁震度階について、より詳しく知りたい方は、例えば <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/study-panel/shindo-kentokai/hensen.pdf> を参照されたい。

jp/svd/eqev/data/study-panel/shindo-kentokai/hensen.pdf を参照されたい。

上記の震度階は共通して、低震度は観測員の体感、高震度は被害状況により震度を決めている (気象庁震度階は高震度でも体感の記載がある)。計器による観測が今よりずっと大変で、観測点分布も粗かった時代には、これは唯一可能な選択であったであろう。こうして、人間の体感や建物 (特に日本では大多数を占める木造住宅群) の応答特性が、地震動の指標である震度に関わってくる。震度観測の機械計測化に関する検討は 1985年頃に開始され、1995年兵庫県南部地震を経て、1996年に気象庁震度は全面的に「計測震度」化された。その際、それ以前の震度との間にギャップが生じないようにデータ処理法が調整された (http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/kaisetsu/calc_sindo.htm)。その結果、上記の体感や建物の応答特性と震度との関係が計測震度へと受け継がれた。つまり、計測震度は、自動化以前の日本の木造住宅群の被害と震度の関係に適合するように作られている、と言うことができる。

震度が被害との相関を持つべきとの前提に立てば、対象とする建物群により (対象国・地域の大多数を占めるのが木造か、あるいはレンガ造やブロック造か、あるいは、多くの建物の耐震性が高いのか低いのか、等々)、異なる定義やデータ処理が必要となることは想像に難くない。開発途上国対象の技術援助等で震度決定の自動化技術を供与する際には、結果的に同じ方法で良いとなる場合が無いとまでは言い切れないとしても、少なくとも日本の計測震度の現地適用の妥当性を確認する手続きは必要であろう。

さて、どんな震度の算定法が良いのか、という問いは、地震動の破壊能力を端的に示す指標として何が良いのか、という地震工学における問いと表裏一体の関係にある。地震動の定量化への工学分野からのアプローチとしては、例えば George W. Housner が提唱した SI 値 (Spectral Intensity, 1961年) があげられる。これは 0.1秒 (10Hz) から 2.5秒の範囲での速度応答スペクトル (減衰 20%) の平均値であり、一般的な構造物にどの程度の被害が生じるかの指標として使われている。しかし、固有周期の長い構造物に対しては有効な指標とはならないことも知られている。また強震記録の存在が前提となる。

対象となる建物の応答特性が通常の住宅群と異なる例としては、気象庁の「長周期地震動階級」があげられる。これは、計測震度とは異なり絶対速度応答スペクトルに基づいて決定されるが、「地震動の大きさの指標」という意味では、高層建物等に特化した震度（指標）の一種であると考えられることもできる。

一口に建物群と言っても様々な材料や様式が存在する上に施工精度や維持管理の質、新旧の別等もとても一定とは言えないのが実状である。それが故に、応答特性のばらつきに加えて耐震性の高低の違いも大きい。地震動に対して脆弱なレンガ造やブロック造、はたまた専門知識無しで建てられた住宅が主流な開発途上国での震災の場合には、住宅等の被害状況からは、日本の場合と同様な地震動推定をできない場合も少なくない。そういう場合、道路盛土等土構造物や保護工の無い斜面等、自然状態により近いものを見れば、どの位の地震動だったかをある程度の精度で推定できると言われている。この考え方に立てば、建築技術が未発達だった時代の文書記録からの地震動の推定や、地層に残された痕跡からの文明発祥以前の地震動の定量化ができるかもしれない。第17回国際第四紀学連合（INQUA、2007年）で改訂された Environmental Seismic Intensity-2007（ESI2007、例えば、<http://www.isprambiente.gov.it/files/progetti/inqua/esi-eee-volume-april-2012.pdf>）は、この考え方で理解することができる。ESI2007に関しては、以前ロシアの研究者に「普通の建物はMSK64のIX～X程度で全部被災して、それ以上の高震度推定には使えないから、自然環境への影響を見た方が良いのです」と言われて絶句した記憶がある。MSK64のIX～Xの境目は、気象庁震度では6弱程度にあたり、今日の日本ではこの程度以上の地震動に対して被害の心配をし始める。（まだまだ改善すべき点が残っているとはいえ）如何に日本の耐震化が進んでいるかを明確に示すエピソードである。この状況は、日本で地震学と地震工学が始まって以来、世代を超えて営々と続けられてきた努力の成果である。中でも1981年の建築基準法施行令の改正（新耐震）が現存する建物にとっての近年の大きな節目であり、1981年以後に建てられたものは、以前のものに比べて、耐震性がはっきりと向上していることが知られている。そして、地震保険の建築年割引は、この年を境目として適用される。また、実際の被災建物調査により、1981年以降の建物は、（施工不良等を除いて）稀にしか被災していないことが明らかにされている（2016年熊本地震の例、<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/publications/data/173/index.html>）。このように建物の耐震性は、時の経過と共に向上してきた。建物の被害と、地震動の指標の一つである震度との関係も、当然時の経過と共に変化して行く（同じ震度でも被害が少なく

なって行く）と考えられる。現在の気象庁震度階級関連解説表の住宅・建物への状況は、それらの耐震性の高低に分類して書かれている。今後、既存不適格と呼ばれる古くて耐震性の低い建物は老朽化により漸減していき、耐震性の低い建物のための記載が不要となる日が来るのであろう。

さて、1995年兵庫県南部地震以降の数千点に及ぶ強震観測点の全国展開で、甚大な被害を受けた地域での強震記録が得られるようになり、同程度の計測震度でも建物被害が大きく異なる場合が知られるようになった。それが、建物の応答特性のばらつきに起因するものなのか、はたまた浅部地盤の不均質が原因である地震動の性質の空間変動によるのか、は事例毎に定量的に検討して行かなければならない問題である。あるいは、すっぱりどちらかと言えるものではなく、地盤と建物の動的相互作用の問題なのかも知れない。これは、地表が揺れて（地震動）から建物が揺れて壊れる（被害）までの間に建物と地盤双方の性質で決まる周波数特性を持つフィルターが介在する重要な、そして未だ未解明な部分がある現象である。

どういう性質をもった地震動が建物を壊すのかを建物の破壊メカニズムに踏み込んで検討した例である境（2009日本地震工学会誌）は、「1～2秒に大きな弾性応答（スペクトル）をもった地震動が木造建物、中低層非木造建物といった、日本の大部分を占める建物に対して大きな被害を引き起こす」と述べている。このような知見に基づいて境他（2004日本建築学会構造系論文集、第585号）は、震度の大きさに従って対象とする地震動の周期を変化させて震度を算定するアルゴリズムを提案している。ところで、木造建物、中低層非木造建物の固有周期は0.2秒～0.5秒程度であるので、弾性領域の共振現象では上記は説明できない。これについて、境（2009）は、「被害を受けると（塑性化して）周期が伸びる、ではなく、いきなり被害を受けたとしたときの周期で応答する」可能性を示唆している。大振幅の地震動による、あびせ倒しみたいなイメージなのだろうか？（例えば、Hall, J.F. et al., Earthquake Spectra, Vol. 11, No. 4, 1995）

上記は、地震動が収まるまでの記録全体に基づくものであるが、リアルタイム地震学分野では、揺れ続けている途中でも時刻毎の地震動の破壊能力を示すことができる指標として、例えばリアルタイム震度（中村 2007日本地震工学会論文集 第7巻）が提案されている。その定義から、地震動の継続時間の影響は取り込まれてはいないように思われるが、これと計測震度との相関が良いことから、そもそも継続時間の情報は破壊能力の指標設定に必要なのか、という疑問が生じる。

いきなり建物を破壊し、破壊能力に継続時間があまり重要でない地震動とは、どんなものであろうか？ 大振幅で

エネルギーが第1波に集中している震源近傍地震動であれば、この条件を満たすのかも知れない。

上記で概観したように、地震動の破壊能力の指標やその一つと考えられる震度については、今日でも検討が続いている。ここでは言及しなかったが、加速度最大値、速度最大値、バンドパスフィルターをかけた加速度最大値、速度応答スペクトル最大値等、震度とは呼ばれない様々な地震動のパラメーターも、地震動の強烈さや破壊能力の指標と

して広く使われている。地震動自体が非常に複雑で、いろいろなタイプがあることに加え、被災する対象である建物の応答特性や耐震性が多岐に渉ることを考えると、特定の震度階、あるいは指標で全てを言い表そうとするのがそもそも無理で、目的と対象によって例えば計測震度を使う、あるいは他の破壊能力指標を選択する、というのが、今日の状況では合理的であると思われる。