

巻頭言

古くて新しいテーマ 「地盤と地震被害の関連」について

中央大学名誉教授
國 生 剛 治

昔から軟弱地盤は地震に弱く、地盤の良い所と悪い所で被害に大きな違いが現われると言われてきた。とくに1923年の関東地震の経験がその大きな根拠になっているように思われる。木造家屋については、墨田区から東側のいわゆる下町が山の手台地に比べて被害が大きく、それが下町一帯の大火災に繋がった。下町では軟弱な沖積層がゆっくりした周期で揺れ、共振しやすい老朽木造家屋の被害を大きくした可能性がある。また隅田川から江戸川にはさまれた下町の広い地域で液状化が発生した。つまり液状化がおきるような軟弱地盤において、山の手に比べて木造家屋の被害が多かったことになる。この地震以来、わが国では軟弱地盤は地震に弱く被害が集中するとの考えが、一般の人たちだけでなく専門家にも広く受け入れられてきた。

1995年の兵庫県南部地震では老朽木造家屋の倒壊などで6000人以上の方の生命が失われたが、その被害はいわゆる「震災の帯」とよばれた幅1キロメートル長さ十数キロメートルの細長い範囲に集中していたことは記憶に新しい。多数の近代的ビルの破損、地下鉄駅の破損や高架の阪神高速道路の倒壊などもこの中に含まれている。ところがこの震災の帯は地震に弱いとされてきたような軟弱地盤ではなく、六甲山麓から旧海岸線までなだらかな勾配でつづく扇状地性の比較的良好な地盤であった。六甲山に近づくと被害はなくなる一方で、旧海岸線から軟弱粘土上に埋立造成した人工地盤に入るとやはり上部構造物の揺れによる被害はほとんど目立たなくなり、液状化による地盤被害が主になる。埋立地・人工島には老朽木造建物はなかったが、鉄骨や鉄筋コンクリートによる近代的ビルについては地震の揺れそのものによる破損は埋立地ではほぼ皆無であり、震災の帯と好対照を示した。高架道路についても震災の帯ではピルツ橋脚の倒壊だけでなく多くの構造形式のRC橋脚が破損した。一方、海岸沿いの軟弱地盤では橋脚を支える多数の杭基礎が液状化や流動で破損したり亀裂が入ったりしたが、地面から上の脚の損傷はほとんど見られなかった。

震災の帯に激しい震動被害が集中した第一の原因としては地震断層のほぼ直上に位置し

ていた可能性が考えられる。しかしそこからせいぜい 1 km 程度しか離れていない海岸沿いの埋立地盤の上部構造物に揺れの直接的被害が見られなかった原因は、そこで起きた激しい液状化と密接に関係している。実際、新潟地震・日本海中部地震や東日本大震災などにおいても、液状化したところでは揺れによる建物の被害はほとんど見られないことが指摘できる。

一般的に軟弱地盤で地震の揺れが硬い地盤より増幅することは簡単な理論で説明できる。しかし理論計算では土は線形弾性体と仮定しているのに対し、揺れが大きくなり繰返し回数が増すほどに、弾性定数が低下し損失エネルギーが増加してくるため、増幅率が低下傾向となる。液状化のような強い非線形破壊現象によって、地震の揺れが地表では小さくなる可能性については、土の動力学を扱う研究者の間では1970年代ころより模型実験やコンピュータによる計算によって指摘されていた^{例えば1)}。しかし、多くの地震学や地震工学の専門家は実際にそのようなことが起きるとは考えていなかったようである。神戸の地震がこれを変えた。

この地震で得られた神戸ポートアイランドの鉛直アレー記録によれば地中84 m 深さで 0.5 g 以上の加速度が地表で 0.3 g 以下に低減した。表面十数メートルが埋立まさ土であり、ここが激しく液状化したために地表の揺れが大幅に下がったのである。つまり強地震時には軟弱地盤の揺れが硬質地盤より大きくなるとは限らないことになる。それでは「軟弱地盤の方が地震被害が大きい」とされてきた根拠は何なのか。古来より言われてきた常識の意味を地震の揺れと被害メカニズムの関係にまで遡って考え直してみる必要がある。

地震に対する構造物設計は、歴史的に静的震度法に始まり、加速度による力の釣合いの考え方がとられてきた。実際、我々が地震被害を語る場合、まず加速度の大きさで考える習慣がついている。しかし地震による構造物の被害は、必ずしも加速度の大きさだけでは決まらないことが近年の地震記録や地震被害から明らかになってきた。地震計の設置密度が近年飛躍的に上がったこともあって、記録される地震最大加速度は年と共に右上がりの傾向で、1 g を遥かに超えた記録が多数得られている。それにも拘らず、その周辺での地震被害は意外なほど少ないケースが見られる。例えば1994年ノースリッジ地震で 1.8 g を記録した Tarzana 地点、2004年中越地震で 1.7 g を記録した十日町、2011年東北地方太平洋沖地震で 2.7 g を記録した築館などである。

地震被害は構造物に生じるひずみの大きさと決定されることは誰もが認める議論の出発点である。構造物に発生するせん断ひずみ γ は、上部構造物を極端に単純化して水平地盤のような横長のせん断振動系を考え、SH 波の鉛直伝播により震動することを想定した場合、構造物を進行する波の粒子速度 \dot{u} と等価なS波伝播速度 V_s により $\gamma = \dot{u}/V_s$ で表される。もちろん上部構造物は横長のせん断振動系よりは縦長の曲げ振動系に近いものも多いが、

基本的特性は類似していると考えられよう。つまり加速度よりは粒子速度がひずみつまり破壊に直結していることになる。また粒子速度 \dot{u} の 2 乗に波動インピーダンス ρV_s を乗ずると波動エネルギーフラックス $\dot{E} = dE/dt = \rho V_s \dot{u}^2$ となるため、波動エネルギー流量やそれを時間積分した累積エネルギー $E = \rho V_s \int \dot{u}^2 dt$ も地震被害に直結しているといえる。つまり加速度よりは、構造物ひずみとの結びつきが強い粒子速度や地震波動エネルギーによって地震被害が支配されると言える。ちなみに上記のようなエネルギーの表示式は以前から地震学の論文にはしばしば登場しているが^{例えば2)}、工学の分野ではあまり使われては来なかった。

そのうち、建築物のような比較的減衰が小さく共振し易い構造物では、1 回のピークひずみにより破壊が決定される傾向が強い³⁾。一方、マッシュで減衰が大きい擁壁・ケーソン岸壁や盛土・斜面などにおいては、1 回のピークひずみよりは多数回のひずみの累積が破壊につながる。たとえば地盤の液状化や斜面崩壊では震動繰り返し効果によるひずみの累積が大きな影響をおよぼすため、1 サイクルごとのエネルギーよりは、繰り返し载荷による累積エネルギーで構造物の破壊を評価する方が適している。したがって土構造物・地盤の場合は、地震波に含まれる個々の波をあまり気にすることなく、累積エネルギーを用いた簡便な設計が可能と考えられる。

ところで、実地盤中のエネルギーフローを多数の強震鉛直アレー観測記録を使って計算すると、表層・基盤間のインピーダンス比が小さくなるほど地表への上昇エネルギーが小さくなる明瞭な傾向が見られる⁴⁾。つまり基盤に同じ地震エネルギーが与えられた場合、地表では V_s 値の小さな軟弱地盤の方が硬質地盤より上昇エネルギーが小さくなることを意味している。これは、軟弱地盤ほど地震被害が大きくなるこのこれまで広く受け入れられてきた認識とは整合していないように見える。以下ではこの点について多少考えてみたい。

まず軟弱地盤ほど地震被害が大きくなるこの従来からの認識の根拠を吟味する必要がある。元来、地震被害は上部構造物本体と基礎地盤とに関わるものがあるが、そのような区別はされないで議論されることが多い。これまで一括で地震被害とされてきたものの中にライフラインや基礎の被害など地盤に起因したものが多く含まれていることが考えられる。それ以外にも不同沈下や側方流動などの地盤変形が上部構造の被害につながっている可能性もある。地震被害の統計分析や解釈に当たっては、SSI (地盤-構造物相互作用) のような両者が関わり分離が難しいものは別としても、地盤による被害か上部構造自体の地震慣性力による被害かを可能な限り峻別することが重要である。

そのうち地盤被害に絞って考えるために、地盤を図 1 のように表層地盤と基盤 (それぞれの地盤密度は ρ_1 と ρ_2 、S 波速度は V_{s1} と V_{s2} からなる水平 2 層系で単純化し、そこを鉛直方向に伝播する SH 波について考えてみよう。表層地盤の上昇波の粒子速度 \dot{u} とせん断ひずみ γ の関係は前述のせん断振動系構造物と同様に $\gamma = \dot{u}/V_s$ となるから、表層の上昇エネ

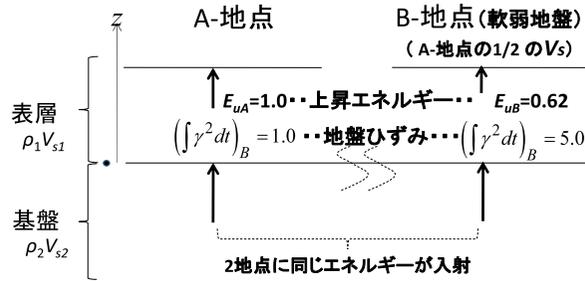


図1 2層系地盤の2地点A,Bでの上昇エネルギーの比較

ルギー E_{u1} は次式最右辺の形で表わすことができる⁵⁾。

$$E_{u1} = \rho_1 V_{s1} \int (\dot{u})^2 dt = \rho_1 V_{s1}^3 \int \gamma^2 dt \quad (1)$$

したがって、上昇エネルギー E_{u1} を $\rho_1 V_{s1}^3$ で除することにより次の式が得られる。

$$\int \gamma^2 dt = E_{u1} / \rho_1 V_{s1}^3 \quad (2)$$

この式の左辺は、一つの地震動によって表層地盤に生じるひずみ γ の時間累積効果を表わす「累積ひずみパラメータ」と見なすことができ、これが大きいほど地盤被害が生じやすいと考えられる。

図1のようにサイトAとサイトBの2層系地盤において、Bの方がAに比べ表層の V_s のみが $(V_{s1})_B / (V_{s1})_A = 1/2$ と軟弱でその他はすべて同一条件の場合に、基盤から同じ上昇エネルギー量 $(E_{u2})_B / (E_{u2})_A = 1$ が入射することを考える。表層・基盤間のインピーダンス比 $\alpha = \rho_1 V_{s1} / \rho_2 V_{s2}$ は2サイト間で $\alpha_B / \alpha_A = 1/2$ であり、また多地点の鉛直アレー地震データから表層・基盤間の上昇エネルギー比 $\beta = E_{u1} / E_{u2}$ と同区間のインピーダンス比 α の間にはおおよそ $\beta = \alpha^{0.7}$ の関係が見出されていることから⁵⁾

$$\beta_B / \beta_A = (E_{u1} / E_{u2})_B / (E_{u1} / E_{u2})_A = (E_{u1})_B / (E_{u1})_A = (\alpha_B / \alpha_A)^{0.70} = (1/2)^{0.70} = 0.62$$

となり、表層地盤中の上昇エネルギー E_{u1} はBではAに比べ0.62倍と小さくなる。一方、累積ひずみパラメータの2地点間の比は次式で計算される。

$$\left(\int \gamma^2 dt \right)_B / \left(\int \gamma^2 dt \right)_A = \left[(E_{u1})_B / (E_{u1})_A \right] / \left[(\rho_1 V_{s1}^3)_B / (\rho_1 V_{s1}^3)_A \right] = 0.62 / (1/2)^3 = 5.0$$

つまり V_s が $1/2$ の軟弱地盤Bの方が上昇エネルギーは小さくても地盤ひずみが大きく地盤被害は生じやすくなり、被害実態と矛盾しないと考えることができる。

一方、関東地震での軟弱地盤の家屋被害については、地表への上昇エネルギーは小さくても地盤の非線形化により卓越振動数が低くなり、建物の共振現象により特に老朽木造家

屋が被災し易くなった可能性が考えられる。強い地震動を受けた場合に、軟弱地盤になるほど上部構造物自体の震動被害が大きくなる傾向が存在するかについて、最近の地震被害のケーススタディーではむしろ逆の傾向を指摘する研究もいくつか見られる⁶⁻⁸⁾。地震被害を地盤被害と構造物自体の被害に峻別したさらなる実証研究が待たれるが、軟弱地盤において上昇エネルギーに減少傾向が表れることと地震被害の実体とは矛盾しないと言えるのではないだろうか。

以上をまとめると、本文のタイトル「地盤と地震被害の関連」については、軟弱地盤の方が地震被害が大きいとの従来からの常識は地盤被害あるいはそれに起因した上部構造物被害については間違いないと思われる。一方、上部構造本体の地震慣性力被害に対してはそのSSIが関わる共振特性や強度・剛性などが関わりを持つと考えられる。軟弱地盤で共振しやすい老朽木造家屋の問題は防災上依然として重大であるものの、近年の耐震設計された構造物が設計条件を超える地震に会った場合、良好な地盤ほど被害が少ないとは限らないと言えそうである。

参考文献：

- 1) 國生剛治・岩楯敏広 (1979)：軟弱地盤の非線形震動特性についての模型振動実験と解析，土木学会論文報告集，第285号，57-67.
- 2) Bath M. (1956): Earthquake energy and magnitude, *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol.23, No.10 115-16
- 3) 國生剛治, 本山隆一, 万谷昌吾, 本山 寛(2004):表層地盤における地震波のエネルギーフローと性能設計, 日本地震工学会論文集, 第4巻, 第4号, 1-20.
- 4) 國生剛治, 鈴木 拓(2011):強地震鉛直アレー記録に基づいた地盤中の波動エネルギーフロー, 日本地震工学会論文集 第11巻, 第1号, 14-31.
- 5) 國生剛治, 鈴木 拓(2012):強地震鉛直アレー記録に基づいた地盤中の波動エネルギーフロー(補遺), 日本地震工学会論文集 第12巻, 第7号, 62-68.
- 6) Suetomi, I. and Yoshida, N. (1998): Nonlinear behavior of surface deposit during the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake, *Special Issue, Soils and Foundations*, 11-22.
- 7) Trifunac, M. D. and Todorovska, M. I. (2004): 1971 San Fernando and 1994 Northridge, California, earthquakes: did the zones with severely damaged buildings reoccur?, *Soil Dynamics & Earthquake Engineering, Elsevier*, 24, 225-239.
- 8) Bakir, B. S., Yilmaz, M. T., Yakut, A. and Gulkan, P. (2005): Re-examination of damage distribution in Adapazari: Geotechnical considerations, *Engineering Structures, Elsevier*, 27, 1002-1013.