

第3回

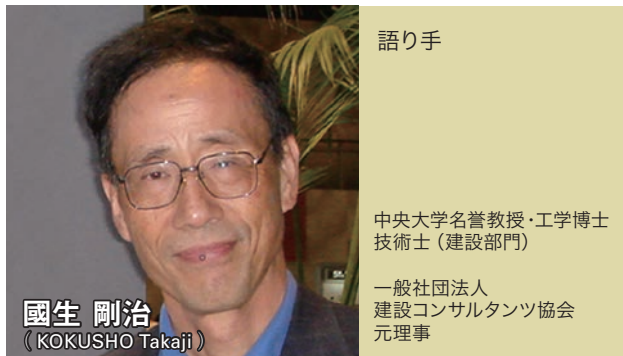
このコーナーでは「日本が目指すべき姿と社会のあり方、そこで必要とされるインフラの実現に向けた方策、そしてその際に果たすべき建設コンサルタントの役割とは」をテーマに、各専門分野の視点からの提言を掲載しています。

一般常識「軟弱地盤ほど地震被害は大きくなる」は本当か

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れると言われてきた。特にその大きな根拠になっているように思われる1923年の関東地震では、軟弱地盤地域の墨田区から東側のいわゆる下町で、山の手台地に比べて木造家屋の被害が大きく、それが大火災に繋がった。この地震以来、我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6,000人以上の方の生命が失われたが、その被害は「震災の帯」とよばれた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、地下鉄駅の破損や阪神高速の高架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。六甲山に近づくとも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、液状化による被害が主になる。この一帯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も地震の揺れそのものによる破損は皆無であり、震災の帯と好対照を示した。高架道路については震災の帯でピルツ橋脚（橋桁と橋脚が一体構造で形状がドイツ語のキノコ（ピルツ）に似る）区間の連続的な倒壊が注目を集め上部構造の問題点がクローズアップされたが、実際には写真1に例示するように、それ以外の構造形式のRC橋脚もかなりの被害を蒙った。その一方で、旧海底軟弱地盤を埋め立てた地域では地盤の液状化や流動による橋脚基礎の破損や橋桁の落下が発生したものの、写真2の例のように、地上の橋脚には損傷が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1km程度しか離れていない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



1944年、千葉県生まれ。1967年、東京大学工学部土木工学科卒業。1969年、同大学大学院工学系研究科修士課程修了。1975年、米国Duke大学工学系研究科修士課程修了。1969～1996年、財団法人電力中央研究所勤務。1987～1990年、東京大学工学部非常勤講師。1994～1995年、茨城大学工学部非常勤講師。1996年より中央大学理工学部教授。土木学会や地盤工学会より論文賞、技術賞等を受賞。最近は「エネルギーによる地盤液状化、斜面の地震時流動距離評価法、地震波動の増幅とエネルギー」の研究を続ける。著書に『液状化現象』・『地震地盤動力学の基礎』鹿島出版会。

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、液状化したエリアでは揺れによる建物の被害はほとんど見られなかったことが指摘できる。液状化のような地盤の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きたが、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。しかし神戸の地震がこの状況を変えた。神戸ポートアイランドの鉛直アレー観測記録^{注1)}によれば、地中84mの深さで0.5g以上の加速度が地表で0.3g以下に低減した。表面十数mを覆う埋立まさ土の激しい液状化やその直下の軟弱粘土の非線形化により、地表の揺れが大幅に下がったのである。

それではこのような現象が実際に起こり得ることが認識された現時点で、「軟弱地盤の方が地震被害は大きくなる」と言われてきた常識の意味を改めて考えてみよう。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ている。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、1g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、その周辺での実際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（アメリカ、ロサンゼルス市）で1.8gを記録したターザーナ（Tarzana）、2004年中越地震で1.7gを記録した十日町、2011年東北地方太平洋沖地震で2.7gを記録した築館などである。

この議論において、地震被害は構造物に生じるひずみの大きさに決定されることは誰しもが認める出発点となる。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、地震主要動の主体であるSH波（水平方向に振動するせん断波）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。つまり加速度よりは速度 $\dot{u}$ がひずみ γ の大きさ、つまり破壊に直結していることになる。また地震波動の速度 $\dot{u}$ の2乗と波動インピーダンス^{注2)}の掛け算で計算されるエネルギー流速や、それを地震継続時間について積分した累積エネルギー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速度や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。このうち、エネルギーで考える場合、マッシブ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、例えば液状化現象のように多数回の累積ひずみが破壊につながるため、繰り返し载荷による累積エネルギーで破壊を評価することができる。

ところで、実際に地盤中を伝わる波動エネルギーを多数の強地震について鉛直アレー観測記録を使って計算すると、液状化発生の有無に関わらず表層・基盤間のインピーダンス比が小さくなるほど地表への波動エネルギーが小さくなる明瞭な傾向が見られる¹⁾。つまり基盤に同じ地震エネルギーを与えた場合、地表の V_s の小さな軟弱地盤の方が硬質地盤より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一般常識とは整合していないように見える。

例えばA、Bの2地点で、Bの方がAに比べ表層の V_s が1/2の軟弱地盤を考えた場合、表層地盤中の波動エネルギーは多くの地中観測記録の分析結果に基づけば、BではAに比べ0.6倍程度と小さくなる²⁾。それにも



写真1 神戸三宮付近の非埋立地盤では高架道路橋脚の破線で囲んだ部分に揺れの被害が見られた



写真2 地盤の不同沈下が生じた埋立地盤では類似の高架道路橋脚に揺れの被害が全く見られなかった

関わらず実効的な地盤ひずみは軟弱地盤Bの方が2倍以上発生することになる²⁾。つまりエネルギーは小さくても地盤ひずみが大きくなって地盤被害は生じやすくなり、被害実態と矛盾しないことになる。

元来、地震被害には上部構造物本体の地震慣性力によるものと基礎地盤に起因するものがあるが、そのような区別をされないで議論されることが多い。一括りに地震被害とされたものの中にライフラインや建物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地盤変形が上部構造の被害を引き起こした場合も考えられる。地震被害の解釈に当たっては、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峻別することが重要である。

一方、関東地震の下町の家屋被害については、地表への波動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か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一般的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散見される。

以上、古くからの一般常識「軟弱地盤ほど地震被害は大きくなる」について、地盤の被害あるいはそれに起因した上部構造物被害に関しては地震波動エネルギーの検討からもその根拠が裏付けられる。一方、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、近年増加している耐震設計された構造物が設計条件を超える地震にあった場合、良好な地盤ほど揺れによる直接的被害が少ないとは限らないと言えそうである。

注1) 鉛直アレー観測記録：同一地点で地表とボーリング孔中に設置した複数の地震計での同時地震観測記録

注2) 波動インピーダンス：地震波が伝播する地盤の密度とS波速度 V_s の乗算値

<参考文献>

- 1) 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
- 2) 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