

井口 道雄 氏

東京理科大学 名誉教授



地盤を強くしなければ 耐震性能は不十分

東日本大震災から2年たった今も、液状化しやすい軟弱地盤に対するエンドユーザーの不安は強い。事実、日本では人口が集中する大都市の多くが、地盤の軟らかい沖積平野にある。近い将来、それらの大都市が首都直下型地震や東南海地震に見舞われる確率が高まっているにもかかわらず、地盤の改良や補強に対する意識はまだ低いといわざるを得ない。建築構造と地震の関連性を長く研究してきた井口道雄氏に、地盤をどのようにとらえ、地震にどう備えるべきなのかを聞いた。

—— 東日本大震災で起つた大規模な液状化現象を目の当たりにして、多くの設計者や市民が地盤に危機感を抱くようになりました。専門家から見て、現状はどう映りますか？

井口 液状化現象は大きな話題になり、関心も高まつたと思いますが、残念ながら、地盤に対する認識や対策は必ずしも十分ではありません。それは、設計者や市民だけでなく、行政にもいえることです。

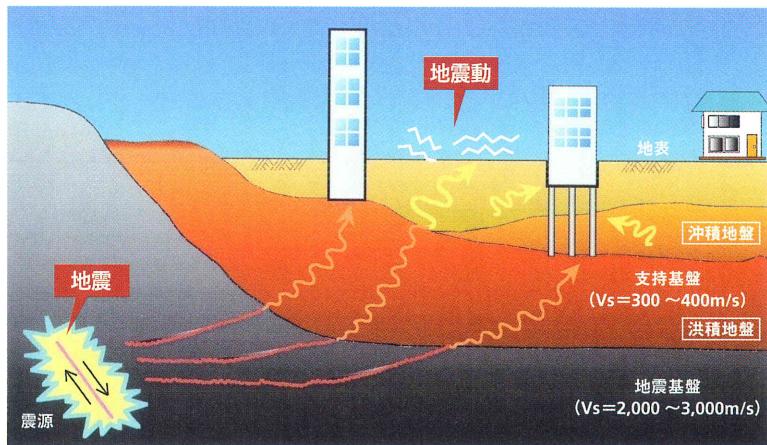
たとえば、多くの自治体が、それぞれの基準で、耐震補強に対する助成、補助制度を設けていますが、それらは専ら「建物」に適用されるものです。どの自治体も、「地盤」の補強や改良は助成・補助の対象にしていません。しかし、どんなに建物を堅固にしても、足元の地盤が弱いままでは、根本的な耐震性能は確保できません。そのことがなかなか理解されないのは残念ですが、それが現状です。

—— 最近は戸建住宅でも、事前に地盤を調査し、必要に応じて地盤を改良・補強するケースが増えています。低地や臨海部をはじめ、地盤の改良・補強が必要な敷地は相当あるはずです。

井口 最近は、さまざまな地盤改良・補強の技術や工法が出てきました。実際に、液状化の起こりやすい軟弱地盤

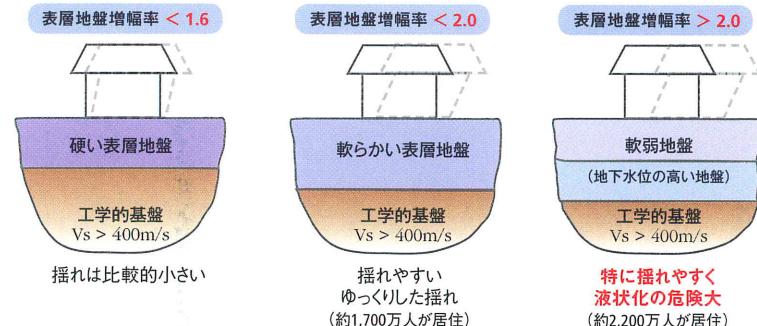
■ 図1 「地震」と「地震動」の違いを理解する

プレート境界や断層が一緒に滑ることで「地震」が起きると、その波動が四方八方に伝わっていく。その一部は地表に届いて、揺れが感じられる。この揺れを「地震動」という



■図2 建物の揺れの度合いを示す「表層地盤増幅率」

[表層地盤增幅率と建物の揺れ方]



地盤の硬さを示す「表層地盤増幅率」と、建物の揺れとの関係。表層地盤増幅率が高いほど建物の揺れは大きく、液状化現象も発生しやすい。主なエリアの表層地盤増幅率は、(独)防災科学技術研究所が公表している。

「地震動の增幅と長周期化」

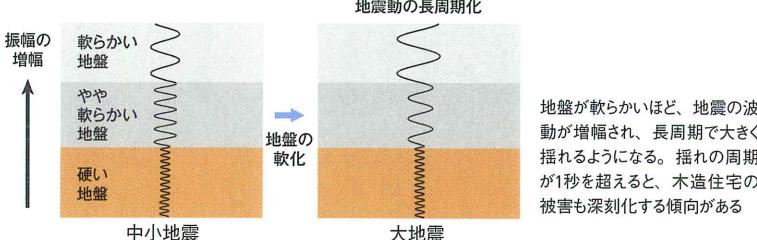


図3 必ずしも比例しない震度と建物被害

	最大加速度 (gal)	最大速度 (cm/sec)	震度	全壊 建物数	表層地盤 増幅率	東日本大震災の後、宮城県の隣接する2市の中心部で確認された全壊建物数は、震度レベルとは比例せず、代わりに表層地盤増幅率との関連性が見られた
栗原市 築館	2,933	94	7	47棟 [※1]	1.02～ 1.32	▶最大加速度と速度はK-netによる 栗原市の被害は主に迫川(はさまがわ)流域の軟弱地盤(堆積土)に集中
大崎市 古川	572	98	6強	297棟 [※2]	1.72	

*1: 河北新報二七-2011年6月9日

※2：建築学会地震災害調査速報

このページの資料提供：井口道雄／東京理科大学

や、支持耐力が低い敷地では、木造住宅を建てる場合でも、表層地盤改良や、10～30cm程度の鋼管杭を支持地盤に打ち込むスクリューパイル工法などが、よく使われるようになっています。

——戸建住宅のような規模で、地盤改良・補強の費用負担は厳しいですね。

助制度を設けて、少しでも多くの敷地の耐震性能が向上するよう取り組んでほしいのですが、必ずしも認識は十分ではありません。

——地盤の性質と、建物の地
度合いとの間には、何か法則
「表層地盤増幅率」に着目を

井口 耐震設計を考えるうえで、それは重要な視点です。それを考えるためには、基礎知識を確認してみましょう。まずは、「地震」と「地震動」という2つの言葉です。みなさんは、その違いを説明できますか？**【図1】**

東日本大震災の後、宮城県の隣接する2市の中心部で確認された全壊建物数は、震度レベルとは比例せず、代わりに表層地盤増幅率との関連性が目られた

- ▶最大加速度と速度はK-netによる
- ▶栗原市の被害は主に迫川(はさまがわ)流域の軟弱地盤(堆積土)に集中
- ▶古川駅周辺で液状化発生

「いくら建物を頑丈にしても、足元の地盤が弱くては耐えられない」

界や断層が滑って、溜まっていたひずみが一気に解放される現象をいいます。一方の「地震動」は、地震で発生した波動が地中を伝わり、地表に届いて起きる「揺れ」です。地震が発生したとき私たちが感じる揺れは、地震動なのです。

——とすると、建物の揺れも、地震動の影響を受けるわけですね？

井口 ですから、地震動が建物にどんな悪さをするのかを知ることが大切です。地震動を決める要因は、大きくなっています。震源で分類できます。1つは、震源でのプレートや断層の滑り方です。ゆっくり滑ったのか、急激に滑ったのか。あるいは、どの方向に滑ったのかも関係します。2つめは、震源から地表面まで、どういう経路で、どのくらいの距離を、波動が伝わったのかです。3つめの要因は、私たちが最も関心を持つべきもので、地表面に近い地盤です。硬いのか、軟らかいのか。そして、それはどのくらいの厚さなのかといった地盤の性質です。

——軟らかい地層が厚く堆積している



P・R・O・F・I・L・E

井口道雄（いぐち・みちお）

1940年生まれ。'64年早稲田大学理工学部建築学科卒業。'66年早稲田大学理工学研究科修士課程修了。'74年東京理科大学理工学部建築学科助教授。'78年カリフォルニア大学サンディエゴ校客員研究员。'85年東京理科大学教授。2008年同名誉教授。'12年早稲田大学理工学術院招聘研究员。専門は建築構造・材料。主に、建物と地盤の動的相互作用などをテーマに研究。工学博士。

ほど、地震時の揺れは大きくなりますか？

井口 まだ耳慣れない言葉かもしれません、「表層地盤増幅率」という指標があります。地表面に近い地盤の弱さを示すもので、地盤が軟弱であるほど大きな数値で表されます。一般に、表層地盤増幅率が1.6未満ならば、硬い地盤です。逆に、1.6から2.0までの地盤は軟らかく、地震時にゆっくりと大きくなっています。さらに、その数値が2.0を超える地盤は、特に揺れやすく、液状化の発生確率が高い軟弱地盤とされます。**[13頁・図2]**

震度レベルと建物被害は必ずしも比例しない

——お馴染みの「震度」は、地盤の性質や建物の被害と関係するものではないのですか？

井口 「震度」は、各地に設置された震度計で、地面の揺れを自動的に計測し、気象庁が10段階で発表します。その際、地面の揺れのなかの「加速度記録」を用いるのですが、地震動が建物

に及ぼす影響は、加速度だけで決まるわけではありません。つまり、震度のレベルが、被害の大小に必ずしも比例するわけではないのです。

そのことを示す興味深いデータがあります。東日本大震災の揺れで、宮城县の栗原市と大崎市の中心部が受けた被害の違いです。両市とも宮城県の内陸にあり、互いに隣接しています。栗原市の築館地区は震度7、大崎市の古川地区は震度6強でした。ところが、全壊した建物の数を見ると、築館地区の47棟に対して、古川地区は29棟と震度が1段階低かった古川地区的ほうが多いのです。震度と建物の被害とが、必ずしも比例しないことを示す典型的例です。**[13頁・図3]**。では、震度ではなく、表層地盤増幅率で見るとどうなるでしょうか。築館地区の表層地盤増幅率は1・02～1・32、古川地区は1・72で、古川地区的ほうが地表に近い地盤は弱い。そして、実際に地震で全壊した建物の数も、そのデータを裏付けるものになっています。

——日本には、表層地盤増幅率の高い地盤がけつこうありますよね？

井口 液状化のおそれが高い表層地盤増幅率20超のエリアも多くあり、人口にすると約2千200万人が住んでいると

されます。1.6～2.0のエリアでも約1千700万人。つまり、約4千万人の人が、地震で大きく揺れる地盤の上に住んでいるのです。

表層地盤増幅率という指標はまだ浸透していませんが、将来的には、土地ごとにその数値を把握したうえで建物の耐震性能を確保する設計に移行していく必要があると思います。

**耐震性能は3つの要素
バランスのよい配置計画**

——そういう現状にあって、建物の耐震性能を高めるにはどうすればよいのでしょうか？

井口 まずは、東日本大震災などの被害から得た教訓を、改めて意識することが大切です【図4】。そのうえで、

建物の耐震性能を考えるとき、大きく3つの要素があります。「最大耐力」と「韌性（ねばり）」、そして「地震エネルギー吸収性能」です【図5】。最大耐力とは外力に対してどこまでもちこたえられるか。韌性は、変形に対するねばりです。木造住宅の場合、水平方向に120分の1まで変形しても損傷を起こさない「損傷限界」と、さらに30

分の1まで変形が進んでも人命にかかる損傷にならない「安全限界」があります。もう1つのエネルギーの吸収性能というのは、建物に入つてくる地震エネルギーを、できるだけ主体構造以外の部分で消費させてしまう方法です。

——免震や制振などが、そうした技術に当てはまりますか。

井口 そうですね。粘弹性制振装置など、エネルギー吸収性能を高める装置や仕組みは、いろいろと考案されています。ただし、それらの装置や仕組みを使うのは、建物の基礎や本体が適切につくられていることが大前提です。基礎についていえば、ベタ基礎などの頑丈なものが定着しており、理想的なレベルに来ています。建物本体は、バランスのとれた構造体にするべきです。建物は、ねじる力に対しても強くありません。大きな開口があるなどの原因で構造のバランスが片寄っていると、ねじれの力が働くことになります。

こうした構造体に装置や仕組みを入れても、思ったように力が伝わらないこともあります。装置類は、バランスの取れた構造体をあくまで補完するものと考えたほうがよいでしょう。安全を確保し、安心して暮らせる環境を提供することが、設計者の使命ですから。

■図4 地震被害から得られた教訓

東日本大震災による建物被害からは、改めて多くの教訓が得られた。とりわけ急務といえるのは、1981年以前の旧耐震基準で建てられ、現状が既存不適格となっている建物の耐震改修・補強だ。また、地盤の弱い敷地に対する抜本的な耐震対策も急がれる

- **老朽住宅の耐震化** ……既存不適格建物(1981年以前に築造)の耐震化
- **耐震要素(壁・筋かい…)**のバランスよい配置 ……ねじれの防止
- **室内の耐震化** ……家具の固定・転倒防止
- **地盤の地震対策(地盤変状対策)**
- **造成地・地盤が悪い所での木造建物被害の防止**
- **地震動と建物被害との関係の理解**
- **建物の中にシェルター(“地震の間”)を!** ……建物内部に避難場所確保

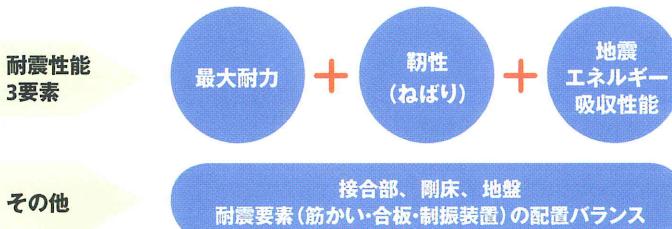
緊急地震速報を活用した対応

[3.11東日本大震災直後の井口家の様子]



東京都内にある井口氏の自宅で見られた東日本大震災の影響。地震の揺れを受けて、階段室の塗り壁材が粉状にこぼれ落ちたり、書棚の転倒防止金具が引き伸ばされました。こうした現象は、それぞれの部位が地震エネルギーを消費し、減衰させたことを意味する

■図5 建物の耐震性能を決める3要素



建物の耐震性能は、「最大耐力」「韌性（ねばり）」「地震エネルギー吸収性能」の3つで決まる。それらを補完するものとして、バランスのとれた構造計画などが挙げられる

このページの資料提供：井口道雄／東京理科大学