

地盤と地震災害

片山恒雄¹⁾

1. 悪い地盤は被害が大きい

地震のとき、岡の上のしっかりしたところに比べて、海辺や川に近いところのほうが被害を受けやすいことは、昔からわかっていたに違いない。地震被害が地盤の性質によって大きく異なることは、昔の地震の記録にも残されている。最近になって震災調査が詳しく行われるようになると、せいぜい100メートルも離れると被害の程度がまるで違う場合があることが、幾つもの例からはっきりしてきた。

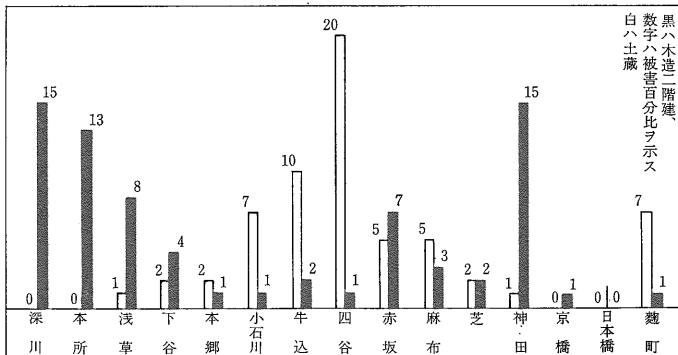
安政2年(1855年)の江戸地震M6.9は、いわゆる直下型地震であり、1万人を超える死者が出たものと考えられている。宇佐美(1983)によれば、当時の記録に、「今度の地震、山川高低の間、高地は緩く、低地は急なり」とか「昔し海辺成し地を築立し所は、おのづから地震のゆり強きごとくなり」と書かれているという。こんな経験を重ねたことによって、人びとは「堅き岩石地盤と耕地、湿地、河川流域とを対比して、前者を地盤がよい、後者を地盤が悪いと称し、建築するには前者のごとき地盤を選ぶとか、或はやむを得ず後者のごとき地盤に建てるときは、その基礎地業を可及的深くして堅き地盤に達するを可としていた」(斎田, 1935)。

1923年関東地震の後、地盤の良否と被害の関係が科学

的に議論されるようになった。たとえば、和達(1935)は「相接近した場所でありながら、同じ地震に対して揺れ方が非常に違う場合がよくある。例えばあの関東大震災の時でも、同じ東京でありながら、山の手方面と下町方面とでは地震の揺れ方がまるで嘘のように違っている。もちろん下町の方が激しい揺れ方をしたのであって、この差違はいわゆる地盤の強弱によって起こったものと言うことが出来よう」と述べ、さらに「一般に堅い地盤ではそこに起こる振動は周期は小さく、すなわち速い振動をなし、柔らかい地盤では周期が大きく、すなわち遅い振動をするもので、また一方同じような地震の波が伝わってそこにやって来た場合に、堅い地盤より、柔らかい地盤は大きく揺れるものである。俗に言われるところの地盤の『よい』とか『悪い』とか言う意味は、同じ地震に対して建物等の被害を多く受けるか受けないか、或は人体に感ずる震動の揺れ方が激しいか激しくないかによって決められるものであるが、まず大体において地盤が堅いところは『よい』ところで、柔らかいところは『悪い』ところであると言う関係になっているものと思ってよい」と続けている。

ここには、地盤の性質によって、地震動の周期と増幅率が変わるという考えが述べられている。そして、地盤に卓越周期(または固有周期)があるという概念は、構造物の固有周期が地盤の卓越周期に近いときには、共振的な現象が起り、構造物は大きな被害を受けやすくなるという考えに結びつくのである。

関東地震の際に、地盤の硬い山の手では土蔵の被害率が高く、地盤が軟弱な下町では2階建ての家の被害率が高かったという報告はよく知られている。第1図は、この違いを示すために斎田(1935)がつくったものであるが、斎田は「木造には下町は地盤悪く、土蔵煉瓦造には山の手は地盤が悪いということになる」と言っている。



第1図 関東地震のとき、土蔵は山の手で、また木造2階建ての家は下町で壊れた割合が多かった (斎田時太郎, 1935)。

1) 東京大学 生産技術研究所: 〒106 東京都港区六本木7-22-1

キーワード: 地震被害, 地盤, 液状化, ライフライン

このようにして、わが国では、地震被害を地盤の性質と関係付けて解釈することが、エンジニアにとってごく当り前のことになった。そして、その延長上で、常時微動を測って地盤の卓越周期を推定することが広く行われてきた。

構造物が地震の影響を十分考えて設計されていなかった時代は、地震動との共振という考えで被害を説明できることが多かったと思われる。しかし、法律や基準が整備され、材料や施工技術が進歩するにつれて、わが国の構造物はだんだん壊れにくくなり、「卓越周期→共振」という単純な説明は難しくなってきた。実際、1948年福井地震のときの「全壊」は、建物の軒が地面に着いたものと定義されていたが、最近ではそんな被害はほとんど見られなくなった。

2. 地盤が壊れる

1964年は、3月にアラスカ地震が、6月に新潟地震が起り、日米の地震工学の研究者をおおいに慌てさせることになった。これら2つの地震で共通に目だったのは、液状化に伴う被害である。

アラスカ地震では、住宅地の下の地盤が液状化して大きな割れ目が何条にもわたって発生し、ひな段のような地面の上におもちゃの家を転がしたような被害が起こった。一方、新潟では、鉄筋コンクリートのビルが大きく傾いたり、文字どおり底を見せてひっくり返ったりしたのである。いずれの場合も、建物が振動で壊れる前に地盤が壊れてしまった。

後から考えてみれば、米国の場合は、1906年サンフランシスコ地震のときに湾岸の埋立地を中心に広い範囲で液状化が起こっていたし、日本の場合には、1891年濃尾地震のときにも、また関東地震のときにも液状化は大規模に起こっていたのである。しかし、これらの地震のときには、地震の揺れで直接壊れた耐震性の低い建物も多かったし、地震の後で発生した火事が燃え広がったりしたため、地面で何が起こったかをきちんと見届ける余裕がなかったのであろう。

新潟地震、アラスカ地震以後、なぜ液状化が起こるか、ある地点が液状化しそうかどうかをどう判定するかについて、きわめて精力的に研究が繰り広げられた。その結果、液状化の判定に関してかなり確立した手法が得られている。

液状化は、水で飽和した緩詰めの砂地盤で起こる。したがって、液状化を起りにくくするためには、①地盤を締め固める、②地下水位を下げる、③砂地盤を粘土系の土で置き換えるのが基本である。土木・建築の構造物

は一般に規模が大きいので、上に述べた②や③の対策は難しいことが多く、対策の主流は①である。

その一方では、液状化に対して構造物の抵抗力を大きくする対策も考えられている。液状化すると、土は砂を含んだ重い流体になる。したがって、それが横に動いたり、構造物に浮力を与えたり、軽い構造物が浮き上がったりする。土そのものでできている構造物では、土が動き出さないように地中壁や矢板で囲い込んでやるのが有効だし、逆に囲い込みは土から共同溝のような構造物にかかる圧力を減らすのにも役立つ。浮上・沈下を防止・軽減するためには、液状化する土の厚さが小さいときは、構造物の下面を液状化しない土の中にしっかりと埋め込んでしまえばよい。液状化層が厚いときは、杭を液状化しない土層に打ち込むことが有効である。

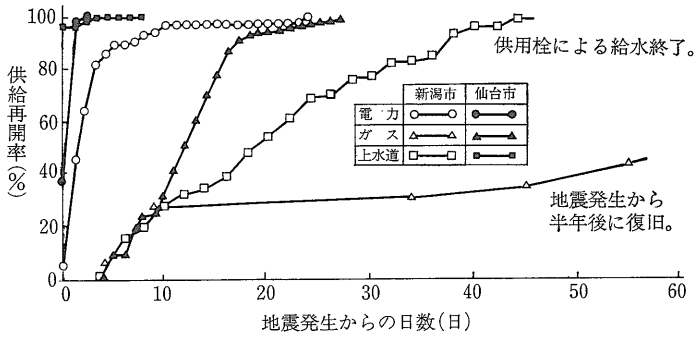
液状化しにくくする対策も、構造物に抵抗力をつける対策も、実際には文章で書いてあるほど簡単ではない。しかし、液状化の影響を工学的に許される範囲(これがまた問題なのだが)にとどめるための知識と技術は着実に積み重ねられつつある。

3. 地中のパイプ

1970年代になって、ライフラインの震害とか都市型震災とかが問題となり始めた。きっかけは1971年にロサンゼルス市の郊外に大きな被害を及ぼしたサンフェルナンド地震であった。電気・水道・ガス・電話・下水道といった、われわれの毎日の生活をサポートしているシステムが地震で被害を受けると、すぐに生死に関係するわけではないが、地震後の生活困難は予想以上のものになりそうなことに気付いたのである。まかり間違うと、都市機能の停止という事態にもなりかねない。

これら都市のライフライン(供給処理施設)のネットワークは、地中のパイプ(地下埋設管)に頼っているところが多い。地中のパイプはまわりの土にすっぽりと埋められているから、地盤の動きに支配される。

関東地震をはじめ、過去の被害地震のほとんどは地下埋設管に被害を及ぼしている。ただ、関東地震のように14万人もの方が死んだり、新潟地震のように液状化・タンク火災・橋の落下・津波による浸水といった目だつ被害が起こると、その陰になってよく見えなかったのである。もちろん都市化が進むにつれて、われわれの生活がライフラインに依存する割合が増えてきたせいもある。ライフラインの被害が非常にはっきりした形で見えだしたのが、米国ではサンフェルナンド地震、日本では1978年宮城県沖地震だったと言える。第2図は、新潟地震後の新潟市と宮城県沖地震後の仙台市におけるライフライン



第2図
新潟地震の後、新潟市の水道の復旧は1カ月、ガスは半年かかった。宮城県沖地震の仙台市の被害はずっと軽かったが、ライフラインの被害は大きな社会的注目を浴びた。

の復旧のようすを示したものである。新潟地震のほうがずっと長い復旧期間を要しているのに、宮城県沖地震のときのほうが社会的に大きな反響を呼んだ。このあたりに、都市型震災としてのライフラインの課題がはっきり現れているように思える。

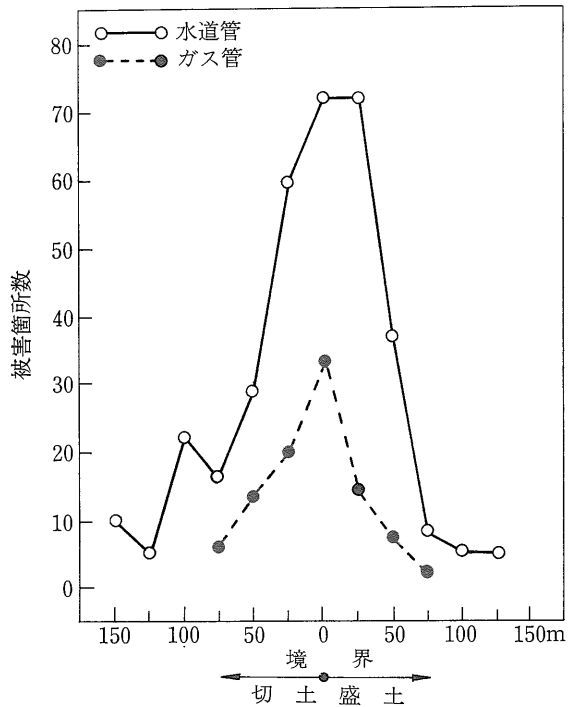
地下埋設管の地震被害と地盤の関係は、つぎの3点から議論できる。①地盤の変形が被害を引き起こす、②とくに地盤の性質が急激に変化するところが問題になりやすい、③これらのいずれにも関係するが、液状化が支配的な影響を及ぼす。

地盤の変形はいろいろな原因で起こる。もちろん地震波が地盤の中を伝わってゆくだけでも地盤は変形する。しかし、地震時の地盤ひずみを実際に測ってみると、波動が伝わるときに発生する程度のひずみでは、まず埋設管が被害を受けるようなことはなさそうである。

岡本(1971)は、関東地震による東京市内の家屋の被害と水道管の被害を比べた結果から、家屋の被害は軟らかい地盤が厚く堆積した下町で大きい、水道管の被害は山の手の台地が低地にかかる、地層の分布が錯綜しているところで著しいと述べている。この傾向は、その後の地震でも観察されており、宮城県沖地震のときの塩釜市のガス管の被害は、軟弱な地盤の厚さが急激に変わるところに多発したことが確かめられている。

結果的には地盤条件が変わるといふ範ちゅうに入ることになるのだが、同じような問題は、切土と盛土からなる造成地の切盛り境界でも観察されている。第3図は、宮城県沖地震のときに、ある造成地で発生した地下埋設管の被害を切盛り境界からの距離に対してプロットしたものである。

しかしながら、なんと言っても、地下埋設管の地震時被害にもっとも大きな影響を与えるのは、地盤の液状化である。新潟地震のとき、信濃川の両岸を中心に、広い範囲で液状化が発生した。液状化した地盤に埋められていた水道・ガス・下水道の管路はほとんど例外なく大被害を受けた。液状化の程度がとくにひどかった地域で



第3図 埋設管の被害は、切土と盛土の境界に集中して発生している(宮城県沖地震のときの泉市南光台のデータ)。

は、下水管やマンホールが地上に浮き上がったたり、両側の橋台がせりだして鋼管がへくの字型に1メートルも持ち上げられたり、継手が抜けてばらばらになったパイプが地中で行方不明になったりしたと報告されている。何千箇所も起こった直径の小さなパイプの被害の詳細は不明であるが、いちいち掘り起こして修理しては時間がかかりすぎるので、浅い位置に仮配管して道端に共用の水道栓を設け、近所の人はそこから炊事や洗濯の水を得なければならなかった。地震から1ヶ月たって、全市に水道の水が一応行きわたるようになった段階でも、市民の半分は、1,500ヶ所以上もの共用栓の水を使っていたのである。



写真1 マリーナ地区の路面には、地下の変状を思わせる亀裂や隆起が見られる（東京大学 地震研究所 伯野元彦による）。

最近の地震でも、液状化による地下埋設管の被害報告の例は多い。1989年ロマブリエタ地震で話題になった。サンフランシスコ市のマリーナ地区におけるガス管や水道管の被害は明らかに液状化の影響を強く受けている。写真1は、マリーナ地区の道路表面のようすを示したものである。路面の凹凸や歩道の縁石の変形は、その下の地盤の液状化が原因と思われ、このようなところでは地下のパイプに被害が起きていることは容易に想像できる。

液状化が発生すると、砂を含んだ水が地表に噴き出して小さな火山のような砂山を残したり、地表面を砂で覆ったりする。しかし、液状化した地盤が構造物に与えるもっとも大きな影響は、液体となった土が横方向に流れ出すことになる。このような流動が、場合によっては広い範囲にわたり数メートルの規模で起こったことを、浜田ら（1986）は、いくつかの地震について地震前後の航空写真の精密な解析から確認している。

4. 開発に伴う地盤の問題

地盤が悪いところは地震のときに被害を受けやすいことを知っていたから、土地問題に悩まされることのない時代の人たちは、岡の上の地盤のよいところに家をつくった。しかし、全国的に都市化が進み、人口や産業が都市に集中するようになると、そんなことは言っていられなくなった。

地盤の軟弱な低地にも住まなければならないし、斜面を切盛りして造成地がつくられる。海を埋め立てて工場が建てられ、最近ではこのような埋立地が、近代的な都市機能の集中した地区として開発されようとしている。いわゆる「ウォーターフロント開発」である。

また、建設技術が進歩してくると、以前には考えられ

なかったような大規模な構造物が、厚い軟弱な地盤上にもつくられるようになった。地上や地下の大型タンク、長大な橋、海底のトンネル、そして埋め立ててつくる地盤そのものが大規模な構造物と言えよう。

宮城県沖地震では、大きなすべりを生じた造成地があったし、仙台市郊外の造成宅地に家屋やライフラインの被害が集中した。1983年日本海中部地震では、もともとの水田を盛土して宅地化したところに建てられた家屋の被害が目だった。ロマブリエタ地震でひどい被害を受けたマリーナ地区も埋立地である。

サンフランシスコ湾に面した地域は、ベイマッドと呼ばれる軟らかい粘土が堆積しているところと人工的に埋め立てられた地盤からなる。これらの軟弱地盤の揺れは、海岸から離れた内陸の硬い地盤の揺れに比べて、加速度にして3倍から4倍も大きかった。液状化もあちこちで起こった。同じような煉瓦づくりの建物が、地盤のよいところではびくともしななかったのに、マリーナ地区では被害を受けた。オークランド市の2階建て高速道路の被害も、軟弱なベイマッドの厚いところで大きかった。

カリフォルニア大学パークレー校のレイモンド・シードは、「この地震でもっとも目だったことをひとつ挙げるとすれば、土質の問題だ。ものの被害と人命の損失の大部分は、軟弱な粘土層のところで起こった。被害を受けたところは、地震の影響が及んだ全面積の1パーセントにも満たないし、しかも震央から遠く離れたところなのだ」と言っている（V. FAIRWEATHER, 1990）。これは、米国の地震工学者の共通の見方のようにであり、この意味でロマブリエタ地震は、「土のエンジニアの地震（Soil Engineer's Quake）」であった（V. FAIRWEATHER, 1990）。

しかし、同時に明るいニュースもある。しっかりした基礎を持ったビルは、地盤の悪いところでほとんど被

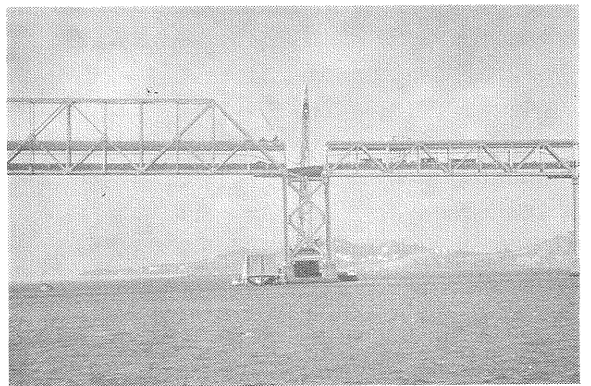


写真2 ベイエリアを東西に結ぶ動脈ベイブリッジの1スパン分が落下した。軟弱な地盤上の撓みやすい橋脚が大きく変位したことが原因の1つであろう（写真は復旧工事中のもの、Dames & Moore 社による）。

害を受けていない。同じ埋立地でも、きちんとした施工管理のもとにつくられた最近の埋立地では、明らかに軽い被害しか起こっていない。新しい技術の進歩は、目に見える効果を示したのである。

ロマブリエタ地震では、サンフランシスコとオークランドの両市を結ぶベイブリッジの1スパンが落下した(写真2)。この被害も軟弱なベイマッドに関係していたと思われる。厚い軟弱な地盤に基礎を置く橋脚が、大きな振幅で揺れたことが最大の原因であろう。最近、わが国で大スパンの橋を計画するときに、いつも一番気にしていることの1つである。1930年代にベイブリッジがつくられた頃には、地震時の橋脚の動的変位までを予測することはできなかったであろう。しかし、最近ではコンピュータによる動的解析がふつうに使われるようになった。ベイブリッジの被害は、軟弱地盤・基礎・橋脚・橋桁の全体を1つの振動系とした解析に基づいて地震時の動的応答を予測しておくことの重要性を、あらためて明らかにしたと言えよう。

ベイエリアにおけるロマブリエタ地震の被害は、わが国のウォーターフロント開発に対して、大きな社会的な関心を集めることになった。わが国でもとくに地震活動度の高い南関東地域では、東京湾岸に沿って幾つものウォーターフロント開発が進められている。このような動きに対して、かねてからその安全性を疑問視する防災関係の専門家の声がある。また、世の中には、地震が起こると、埋立地が液状化によって泥水に化すると考えている人も多いようだ。

埋立地がよい地盤でないことは確かである。しかし、いつまでも新潟地震のイメージにとらわれているだけでは、技術の進歩はない。ウォーターフロント地域には、既成の市街地にはない防災上の利点もある。延焼火災の危険性がきわめて低い地域ができる。既成の構造物に影響されない地域計画ができる。初期の段階から総合的に安全を考えることによって、既成市街地より安全性の高い都市空間をつくりだすことも可能である。今こそ、幾つもの苦い経験をもとに積み重ねてきた、地盤と地震災害に関する知識を集大成するときにきたと考えるべきであろう。

文 献

- FAIRWEATHER, V. (1990): The Next Earthquake, Civil Engineering, 60, No. 3, 54~57.
- 浜田政則・安田 進・磯山龍二・恵本克利 (1986): 液状化による地盤の永久変位の測定と考察 土木学会論文集, No. 376, 211~220.
- 岡本舜三 (1971): 耐震工学, オーム社, p. 418.
- 斎田時太郎 (1935): 耐震及び耐風家屋 防災科学(2)震災, 岩波書店, 283~322.
- 宇佐美龍夫 (1983): 東京地震地図, 新潮社, p. 110.
- 和達清夫 (1935): 地震(第1部) 防災科学(2)震災, 岩波書店, 1~80.

KATAYAMA Tsuneo(1990): Earthquake damage and soil conditions.

<受付: 1990年5月31日>