



地表の微振動を利用した震災予測

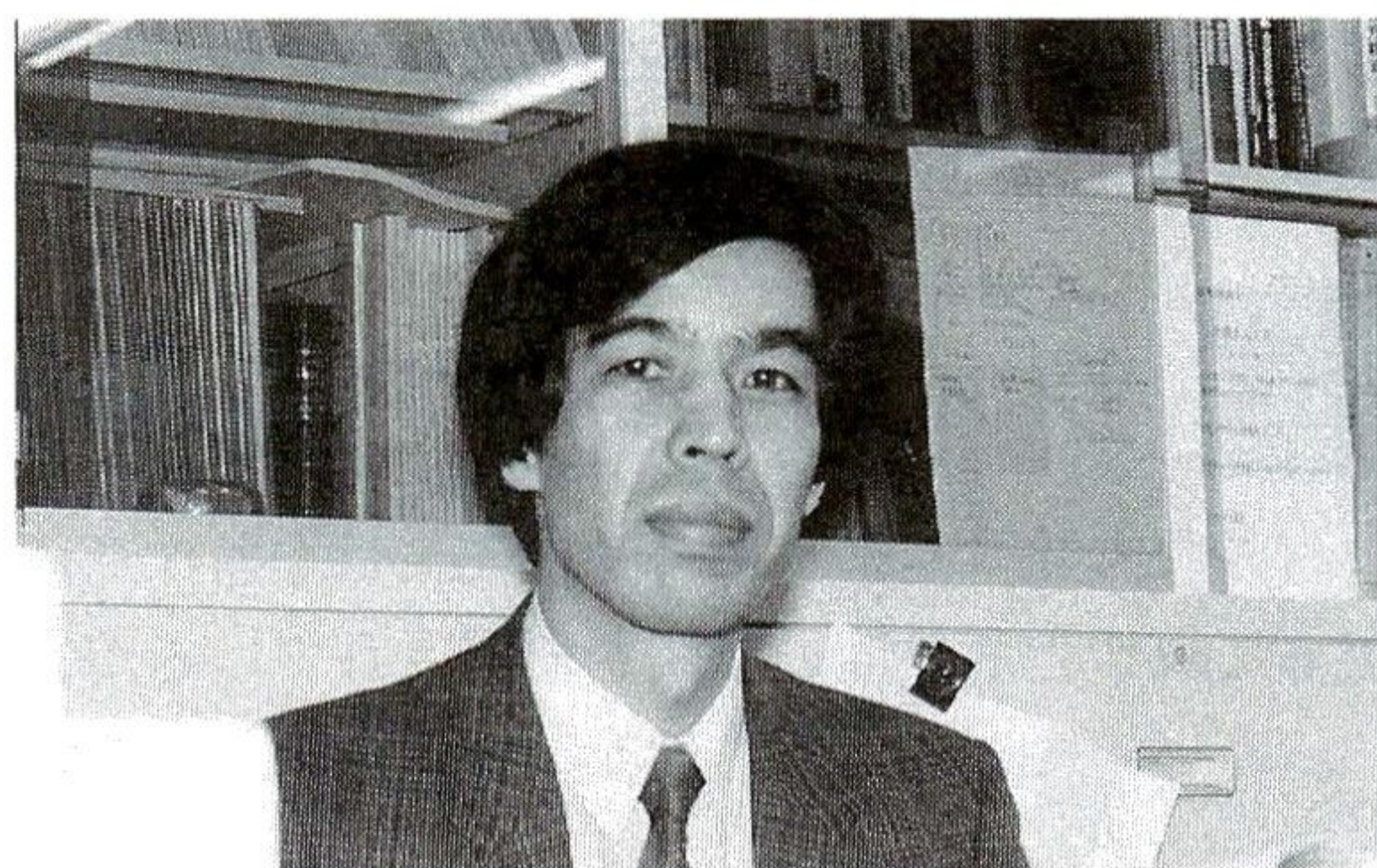
—— 時松研究室～建築学科 ——

1989年10月17日、サンフランシスコで大地震が発生した。マグニチュード6.9、死者270人、負傷者1400人にもものぼる大災害であった。

一般に、地震による被害は揺れの大きさに依存し、揺れの大きさは震源の深さや震源地からの距離、そして地盤のかたさなどによって決まる。地盤のやわらかい場所では揺れは大きく、逆にかたい岩盤があるような所では、当然、揺れは小さくなる。

この大地震は建築物の破壊にとどまらず、通信マヒ、大停電、電話網の寸断を引き起こした。さらに「地盤の液状化」という現象も見られ、その被害に拍車をかけた。

これらの被害を最小限に食い止めるためには、あらかじめその危険を予測しておく必要がある。そして、その予測手段の一つとして地盤探査とい



時松 孝次 助教授

う方法がある。これは地盤の性質や構造を調べることによって、地震における地盤の振る舞いを予測しようというものだ。今回は、この方法によって主に液状化の危険度予測を研究していらっしゃる時松助教授にお話を伺うことにした。



建物が沈む——「液状化現象」のメカニズム

地震災害の原因の一つに地盤の液状化現象というものがあり、これはたいてい砂地盤で生じる。ところで皆さんは、砂地盤の中にはふつうどれくらいの水分が含まれているかご存知だろうか。およそ、砂の体積1に対して、水が0.6～1の割合で含まれている。つまり我々が想像する以上に、多

くの水分が地盤の中にあるわけである。実はこの水分が、地盤の液状化に大きく関わってくるのだが、液状化とはいったいどんな現象なのかを紹介することにしよう。

通常、砂地盤は図1-(a)のように、砂の粒子と粒子が互いに接触し合い、その隙間に水が介在している。このとき、上部から圧力が加わっても力が粒子間を伝達していき、地盤が壊れることはない。ところが地震が発生すると図1-(b)のように砂粒子がバラバラになり、粒子間の接触がなくなるため、粒子が水中を自由に移動できるようになる状態になり、あらゆる

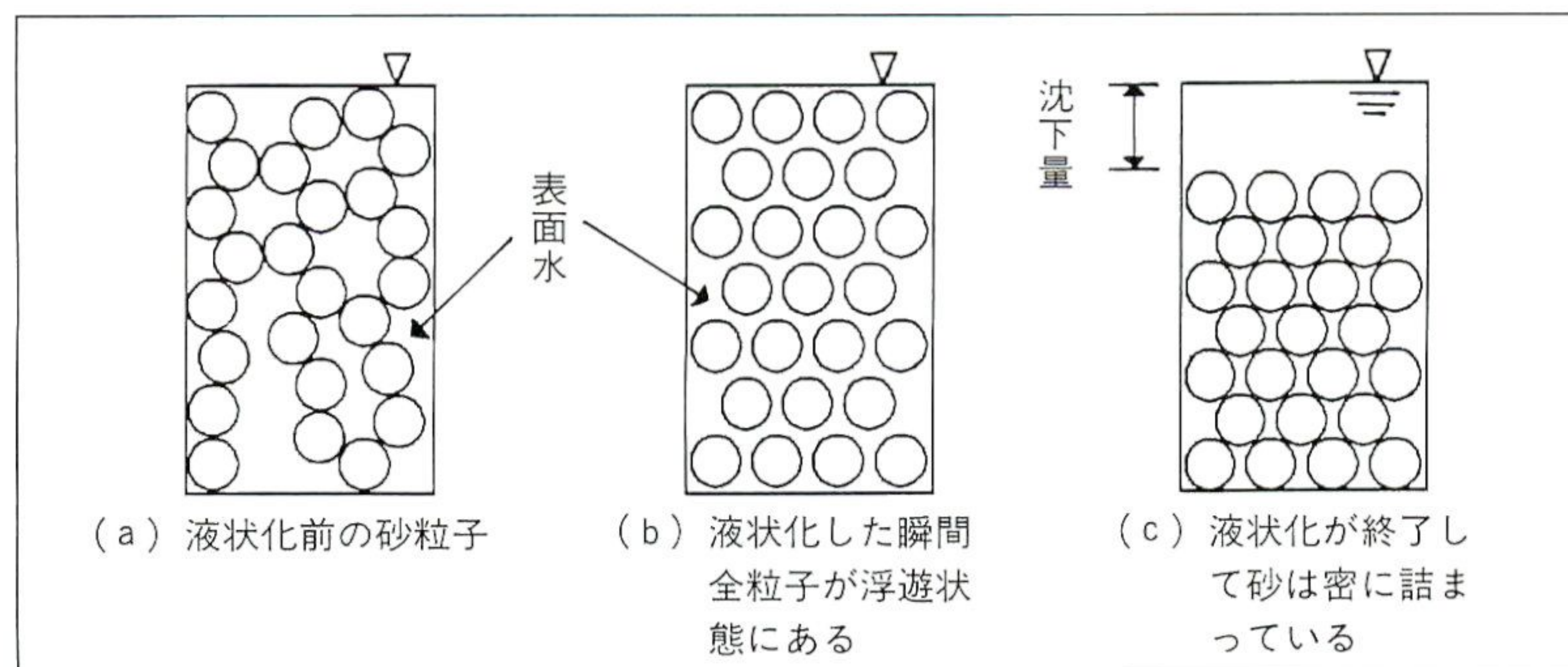


図1 液状化の発生から終了までの過程

変形が可能となる。すると建築物によって上からかかる力は砂粒子では負担できなくなり、地盤中の水が負担することになる。その結果、水圧が上がり地面から水が吹き出す。やがて図1-(c)のように砂粒子が密になって再構成され、全地盤が沈下してそれに伴い建築物も傾斜したり、沈下したりする。

この一連の変化を液状化現象という。これが砂地盤でよく生じるのは、粘度と異なって砂粒子が粘着力を持たず、バラバラになりやすいためである。

レイリー波で液状化の危険を予測する

冒頭にも述べたように、時松先生は地盤探査によって液状化危険度の予測を研究されているが、いったいどのようにして地盤の性質を調べるのだろうか。

地盤のかたさによって地震が発生したときの揺れ方はちがってくる。特に表層のかたさ、やわらかさによって揺れは大きく異なるそう。そのため表層の地盤構造が分かれば、各々の場所によっ

て液状化現象は水の多く含まれるゆるい地震で起こりやすく、粒子の密度が高く、しまった地盤では生じにくい。さらに、地震の揺れが小さいときには液状化しにくいので、地震の大きさも液状化の重要な要因になる。

そこで時松先生は、ある場所における地盤のしまり具合と地震時の地盤の揺れやすさの両方を設定することで、簡単な調査によって液状化の危険性を予測できないだろうかとお考えになったのである。

て揺れの大きさがある程度予測できるというわけである。

地震が起きたときに生ずるS波やP波は皆さんもよくご存知であろう。S波は横波、すなわち横揺れを生じる波であり、地震災害の主な原因である。このS波の伝播速度は、媒質である地盤の性質によって固有の値を取る。例えば地下深い、かたい地盤の中では数km/sにも及び、やわらかい表層では100m/sぐらいになる。また、これらの地層の組み合わせから、地震による揺れの増幅のされ方も変化する。S波速度は地盤のしまり具合、すなわち液状化のしやすさとも関係がある。このため、S波の速度構造（地中におけるS波の伝播速度分布）が決定できれば、地盤の液状化に対する抵抗、地震の揺れの大きさ、そしてそれによる被害の大きさも予測できることになる。

ある地盤のS波速度構造を決定する方法にはいろいろなものがあるが、その中に、レイリー波という、物体の表面で観測される波を使う方法がある。

レイリー波は地盤表面に沿って伝播する表面波の一種で、S波やP波と違い、伝播速度 c が波長 λ や周波数 f によって変わってくるというものである。一方、S波やP波は実体波と言って、媒質の性質により伝播速度が決まっており、周波数などに依存しない。

では表面波がどのようなものなのか、例を挙げて説明しよう。

水面に小石を投げ込むと波が同心円状に輪を描いて広がっていく。これが表面波の一種で、伝播速度がさほど大きくないことは想像できると思う。

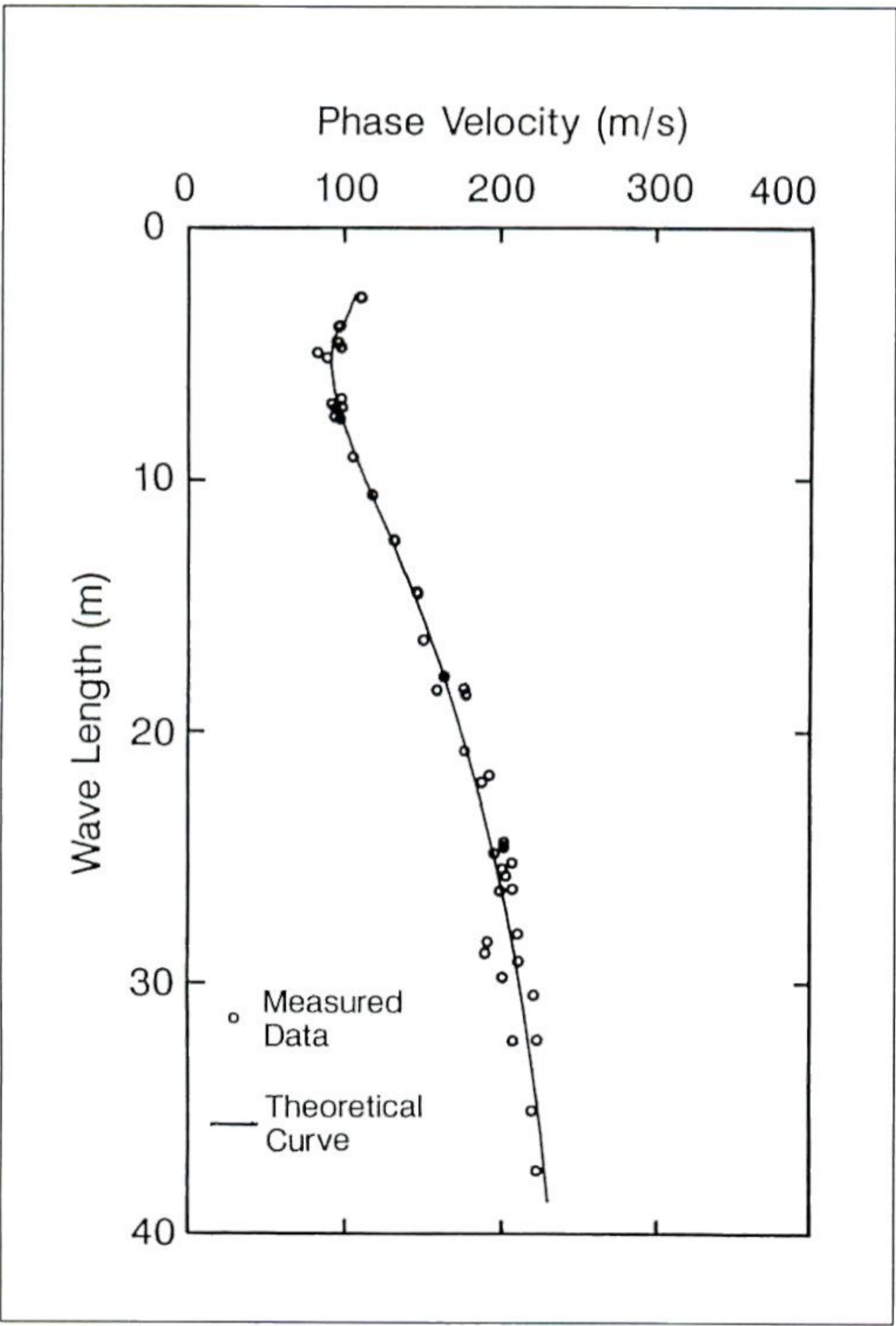


図2 レイリー波分散曲線

また波長が短いため、水中の深部まで影響を及ぼすような波ではない。ところが津波になると波長が長くなり、速い速度で波が伝わっていく。津波の場合は、波長が長いため水中のかなり深いところまで影響を及ぼしながら伝わっていく。要するに、同じ水という媒質を伝播する波であるが、波長によってその伝播速度が異なるということだ。これが表面波の大きな特徴で、たいていは波長が長いほどその伝播速度も大きくなる。

媒質が例のように水だったりするときは深さによって密度の差はあまりないが、地盤の場合では一般に深い所ほどかたくなっている。したがって波長の短いレイリー波は表層の性質を反映し、波長の長いレイリー波は、より深部に存在する地盤の性質を反映した伝播速度を持つ。

さて、このレイリー波を起こすために、起振機を使って地盤を波長の短い波で振動させたとする。このとき表層のみを伝わる波ができるが、先に述べたように、それは表層の性質を反映してある速度が決まってくる。あるいは波長の長い波を出せば、表層から深部までの構造を表すような速度で伝播する。伝播速度 c 、波長 λ 、周波数 f の間には、 $c = f\lambda$ という関係がある。縦軸に λ 、横軸に c をとれば、 λ に依存して c が決まるため、 λ の値をいろいろ変えて地盤を振動させ、その伝播速度 c を測定すれば図2のような曲線が描ける。これをレイリー波分散曲線といい、傾きがちょうど f

になっている。前述したように、一般に波長が長いほど速度が大きいので、これは右下がりの曲線になる。

ある地盤構造を想定すると、理論的にその地盤におけるS波の速度構造や分散曲線を求めることができる。したがって、測定の結果得られた分散曲線を逆解析することで、そのような分散曲線を持つS波の速度構造が決定でき、地盤構造が解明できることになる(図3参照)。つまり地表での測定だけで地盤内部の構造が分かるというわけだ。

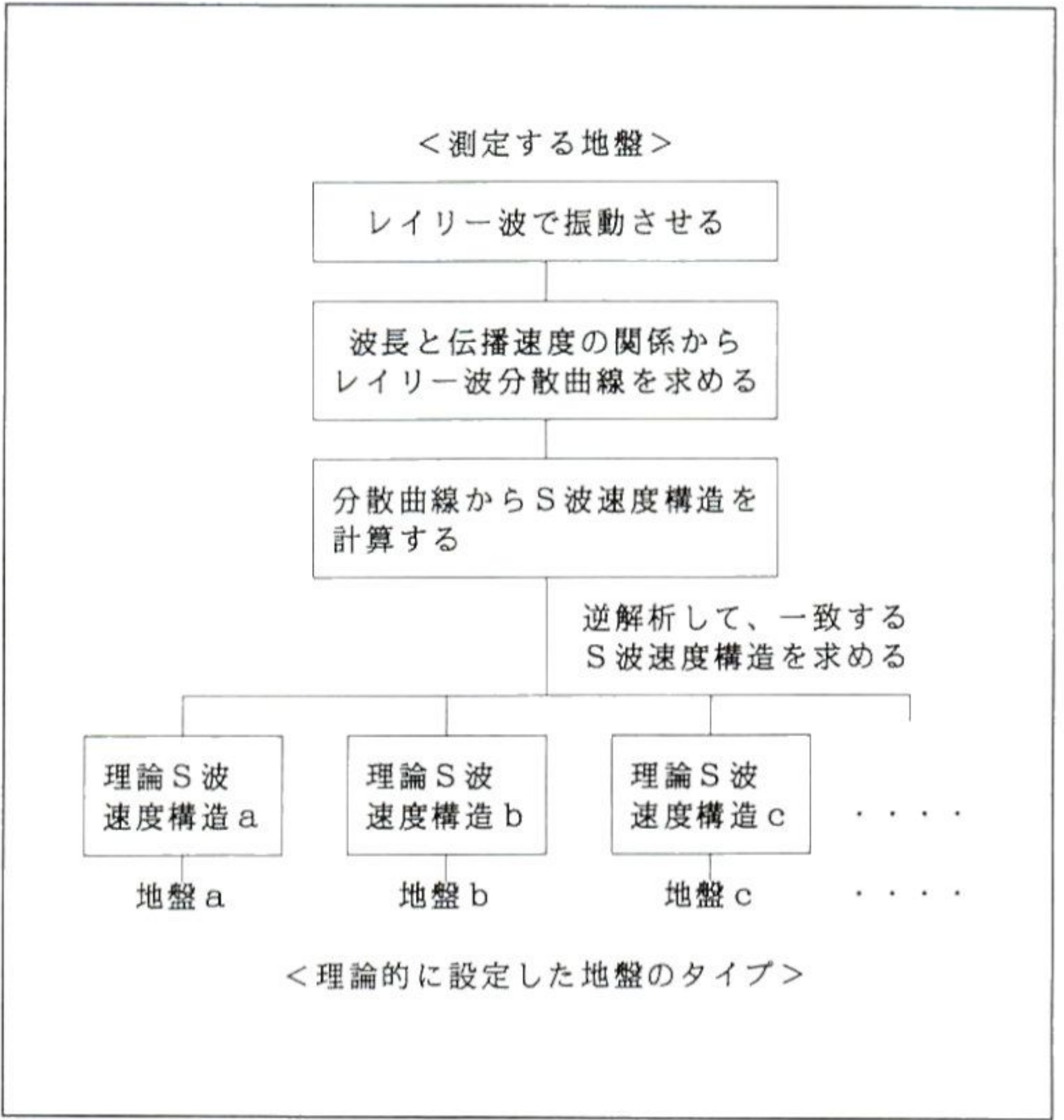


図3 地盤構造の求め方



地表から地盤の内部構造を探る

さて、レイリー波を使った測定は実際どのようにして行うのだろうか。まず、図4を参照して頂きたい。

起振機やハンマーを用いて地表の一点に鉛直方向の振動を起こし、起振機の放射線上に2つのセンサーを置き、鉛直方向と放射線方向の振動を計測する。この手順で分散曲線が求まり、地下20mぐらいまでの地盤構造が解明できるという。しかし正しい分散曲線を求めるためには、測定波長とセンサー間の距離にもいろいろな条件が必要となり、起振機が発生させることのできる周波数の範囲にも限りがあるため、この方法では測定できる地盤の深さにも限界がある。

例えば地下100mぐらいの構造を調査しようとす

ると、波長の長い波、すなわち周波数が1～5 Hzぐらいまでの波が必要で、起振機では発生させるのが難しいので、自然に存在する微動を利用するそう。地盤は、我々が感じないような小さな揺れで、常に振動している。これが微動で、波長が長いので、深い地盤を調査するのに役立つというわけである。

ところで、液状化の危険度を測るためにその他の方法はないのだろうか。

地盤調査の一つに標準貫入試験というものがある。約63.5kgのハンマーでボーリング用のロッドを何回か叩いて、そのロッドが30cm貫入するのに要する回数をN値として地盤の抵抗を測定するものである。しかしこの方法では地盤の応答特性に

影響するS波速度構造は求められない。また、S波速度構造を求める既往の地盤探査では、深い層まで地盤をボーリングする必要がある。一方、先ほどの微動を利用する方法は、ボーリングを必要とせず、地表で行えるため効率的である。

「地盤探査にはもちろん多くの方法がある。でもそれぞれに良い部分、そうでない部分があるわけだから、そこはうまく使い分けることですね。」と、時松先生はおっしゃっていた。

また、これからこの研究の展望は、という質問に対して「測定解析方法にも、まだ不完全な部分がある。また従来のやり方では、異なった種類の地盤が三次元的にどのように分布しているか、というような情報は得られない。そういったことが課題ですね。でも今はかなり、コンピュータの性能が、現場処理の面で向上しているので期待できるのではないかと思います。」とおっしゃった。

最近では、特に微動を利用した研究をされ、セ

ンサーの数を増やして微動を測定するなど、いろいろと工夫されているようである。これからの研究で、より一般的な地盤構造の解明が期待できそうである。

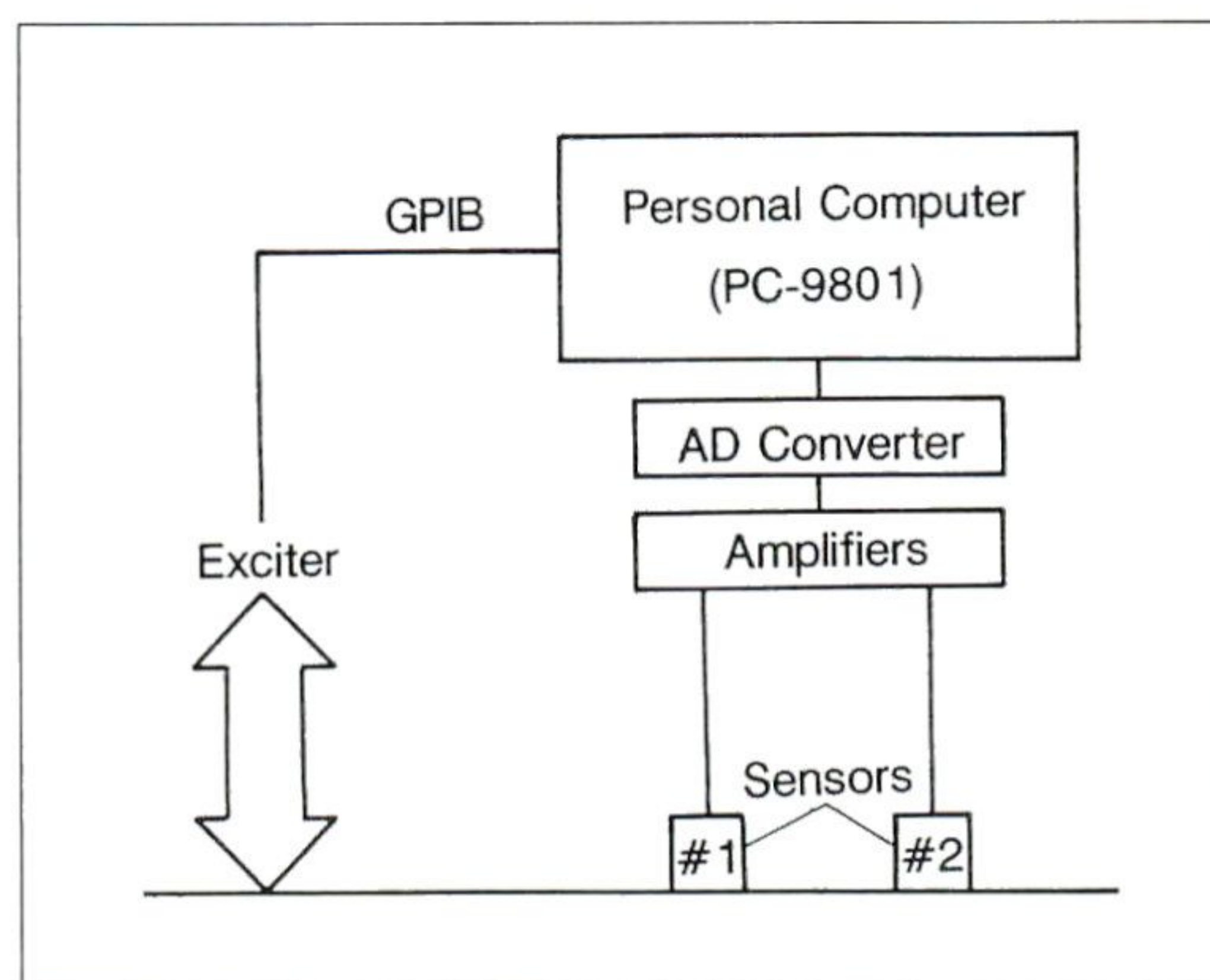


図4 レイリー波探査システム



なぜ建築学科で地盤探査の研究を？

皆さんは建築学科に対してどのようなイメージを持つだろうか。デザインなど比較的スマートな研究をすぐ思いつく人も多いかも知れないが、実際にはデザインの他にも建築史、建築計画、材料、構造、環境といった分野がある。

今回取材させて頂いた時松研究室では、地震や地盤という、かなり土木に近く建築学科では珍しいテーマを扱っている。今まで紹介してきたように、地震、地盤という観点から災害予測をしたり、地震時における地盤の増幅特性や構造物と地盤の相互作用などの研究をしている。

どういうきっかけでこれらのテーマを研究されるようになったのか、時松先生にお聞きしてみた。「昔は、液状化について研究していました。でも

専門が少しずつ変わっていき、その後でサンフランシスコの大地震が起きたんです。このとき水道やガス、電気、電話などのライフラインが大被害を受けていてね。現代の建築物は構造の面から見るとかなりの耐震性があるのだけれども、ライフラインが破壊されると、社会的には都市全体の機能が低下してしまうことになる。それで、いかにそれを予測して震災を最小限におさえるか、と考えたのです。」

そこで時松先生は、簡単な調査によって地盤構造を知る必要性を感じられた。また、アメリカにもそれらの構造を測ったデータがなかったことから、先生自ら地盤探査の研究を始められたそうである。



研究室見聞録—時松先生にお聞きしました

時松研究室には学部生と大学院生が、あわせて9人いる。まだ研究室に所属していない学生にとっては、研究室でどんなことがされているのか良く分からない部分も多いと思う。そこで時松先生にいろいろとお話を伺った。

—学生達は研究室に所属すると、今までどう変わりますか。

どこの研究室でも共通していることだと思うんだけど、修士の学生達には卒論で研究したことや現在、研究していることなどについて学会で発表してもらうようにしている。それから、学会はふ

つう東京では催されないから、研究室のみんなで遠出したりすることもありますね。

——時松研究室の特徴のようなものは。

地震に関する研究を扱っているので海外へ調査しに行くこともありますね。例えば、1990年にフィリピンのルソン島で地震が発生したとき、やはり液状化が起きたんです。そこでみんなで調査しに行こうということになって、研究室の何人かでフィリピンまで行きました。でも飲み水が身体に合わなかったり、体調を悪くして調査中ずっと熱を出していた学生もいました。ある意味では良い経験だったと思うんですが。

——国立大学の研究室という面で不自由なことはありますか。

やっぱり研究費が少ないな。それと研究スペースが狭いと思う。今後、若い世代の人々が大学に残って研究することを考えたら、もう少し充実した環境にしないとね。それから、大学の研究室として企業をリードしていくのは頭脳しかない。アイデアとかオリジナリティーを持った人たちがの



アラスカ地震で起きた液状化による被害

びのびと活躍できるような環境にしないとイケませんね。

——最後に、時松先生が学生に望むことは。

若いときには、しっかり勉強してください。結局、ほとんど若いときに得た基礎学力で、将来、生きて行かなければならない。若いときにはいろいろなことを吸収できるけれど、大人になると、時間がかかるんです。これは私自身の反省事項でもあるんですが！

取材中の先生のお話の中で、私が気づいたことがいくつかある。ひとつは、時松先生が単に地盤構造の調査についての研究をされているだけでなく、その調査方法をいかに簡単なものにするか、という点について留意しながら研究を進められているということである。今まで紹介してきたような地盤探査を実用的な面に応用していくためにも、これは重要なことである。先生の研究者としての着眼の鋭さに感心させられた。

そして、世界の各地から液状化の被害が報告される度に、すぐに現地へ調査に向かわれる先生の活動的な一面をうかがうことができた。

最後に、私達の取材に快く応じて下さった時松先生と研究室の方々に深く感謝したいと思います。

(高橋)

