

先受け用の鋼管を利用して、坑内からの水平水抜きボーリングを実施した。さらに2段ベンチ掘削時においては、前述のフットパイルの改良体に孔を設け、最深部にポンプを設置し排水を行った。3・4段ベンチの掘削においては、仮設支持杭設置のため削孔した孔を利用して簡易なウェルポイントを設け、地下水の低下を図った。

挙動予測への取り組み

地山は比較的単純な弾性体や完全弾塑性体でモデル化することが多いが、地山の不連続性、異方性等により実際の挙動が事前の解析と大きく異なる場合がある。本トンネルでも中空変位や地中変位が事前予測と差異が生じた。そこで桜井先生¹⁾の提案する異方性損傷を考慮した逆解析手法により検討を行った(図-5)。この方法はトンネル掘削による地山の塑性やゆるみの挙動を、地山の応力状態からトンネル周辺のすべり面を推定し、すべり面上でのせん断ひずみの大きさに応じて地山のせん断剛性を低下させることで表現するものである。これにより共下がり現象や地中変位(せん断すべり現象)を再現することができ、補助工法の立案の根拠となった。

現場における技術の本質

現場においては、解析的手法で解ける完全に特定された問題は少ない。解析手法は、道具としては必要である

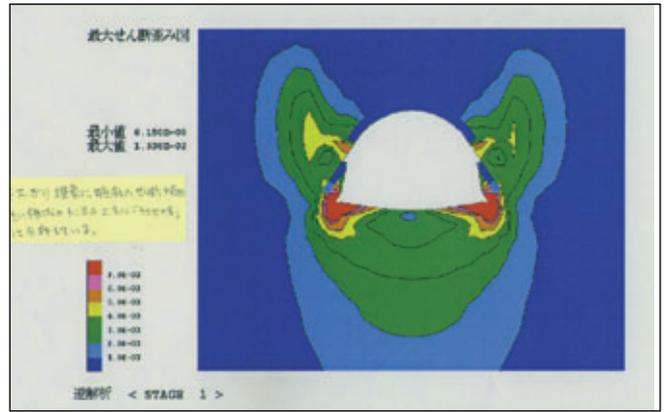


図-5 最大せん断ひずみ分布図

が、より重要なのはその結果をどのように評価し、設計施工に反映させていくかである。都市トンネルにおいては周辺構造物の許容変形量からトンネル断面や支保を決定することが多いが、トンネル形状や加背割は、掘削機のサイズ等施工の効率性に大きく関わっており、総合的な判断力が求められる。この判断力の向上のためには、現実の世界には数量化できない複雑さがあることを認識し、できるだけ積極的に注意深く現場を見ることにより直感的な感覚を磨くことも重要である。

参考文献

- 1 - 桜井・藤村・原田・岩野・加藤：土被りの浅い大断面におけるトンネルにおける地山挙動の非線形逆解析，第9回トンネル工学研究発表会論文報告集，pp.95-100，1999

液状化と流動に挑む

安田 進 Susumu YASUDA

正会員 工博

東京電機大学教授 理工学部建設環境工学科

液状化にともなう流動の問題の発生

1964年に発生した新潟地震以降、液状化に関する研究や技術開発が日米を中心に精力的に進められた。このため、1980年代にはすでに液状化に関する大方の研究は終わり、後は実務への応用のみといった雰囲気があった。ところが、1983年に発生した日本海中部地震では流動の問題が発生し、さらに1995年兵庫県南部地震では流動の問題の再認識に加えて、レベル2地震動に対する液状化の設計方法を構築する必要が出てきた。

レベル2地震動対応については、液状化の定義そのものを根本から考え直すことや、地盤や構造物の変形量を設計に取り入れる必要性に発展してきており、現在、解決の方向が模索されている途中である。本課題をいただいた時に、どちらの問題を扱おうかと悩んだが、流動の方が一応方向性が出てきているので、この問題に的を絞ることにした。なお、液状化に伴う流動の用語は側方流動とか流動化、永久変位とも呼ばれるが、この面の用語の定義に関して検討された結果¹⁾に基づいて、ここでは液状化に伴う流動と呼ばせていただく。

さて、日本海中部地震では液状化が広範囲に発生し種々の被害が生じた。その中で、能代市の緩やかな砂丘末端斜面では、液状化によりガス導管などが被害を受けた。この被災原因を調べていくうちに、どうやら液状化に伴い地盤に大きな変位が発生したのではないかと考えられるようになった。そこで、地盤の変位置分布を平板測量で求めるため、地震から1年余りたってから数人で能代に出かけた。夕方ホテルで能代市の都市計画図を見ながら雑談しているときに、地上測量ではなく地震前後の航空写真を比較することで変位置が求められないであろうか、とのアイデアが飛び出した。これが液状化に伴う流動変位置を航空写真測量で定量的に求めるようになったきっかけである。

早速、航空写真測量の専門家に変位置の分布図を作ってもらったところ、能代市では最大約5mも動いていた²⁾。それなら新潟はどうかと、新潟市の信濃川両岸の測量も行ってもらったら、何と最大で8mを超える変位置が生じていた。新潟市を2番目の対象地域に選んだのは、新潟地震の被害報告書にそれらしいことが書かれており、写真-1などにもそれを物語る被害が示されていたからである。また、筆者が学生の時に、『通船川近くの国道7号線大形地区では図-1に示すように道路が大きく蛇行した³⁾』のでこの原因を考えよ』と、先生から課題を与えられていたことが長年気になっていたためである。その意味で過去の被害報告書をじっくり読んだり、人から体験談を聞くことが大切と言える。なお、図-1の地区では、航空写真測量の結果によると微高地から放射状に最大10mも変位して、これが道路の蛇行原因であろうと、課題を与えられてから10年経ってやっと解決できた。

問題発生後から兵庫県南部地震までの研究

さて、このように数mにも及ぶ変位が発生することが定量的に明らかになったため、このメカニズムを説明し、予測・対策方法を考え出すために研究が開始された。特に(財)地震予知総合研究振興会の中に設けられ



写真-1 川岸の地盤の流動を物語る被害 (越後線信濃川橋梁, 渡辺隆博士提供)

表-1 1989年の時点で提案されていた解析的アプローチ⁴⁾

- ・有効応力解析的アプローチ
- ・地下水面以浅の非液状化層に加わる力の釣合いによるアプローチ
- ・流体モデルによるアプローチ
- ・流動説
- ・エネルギー説
- ・静的線形解析によるアプローチ
- ・静的非線形解析によるアプローチ

た研究会でメカニズムについて議論がたたかわされた。そして既往の解析手法を適用することや、新しい方法を開発する試みが行われた。その時に出された解析的アプローチを挙げてみると、表-1に示したようなものがあつた⁴⁾。

これらの説を裏づけるためには、事例の収集や模型実験を行うことが必要である。そこで、過去の事例として、1923年関東地震、1948年福井地震、1971年サンフェルナンド地震などについて研究が行われ、また、ちょうど、1990年フィリピン・ルソン島地震、1991年コスタリカ・テリーレモン地震、1993年北海道南西沖地震で流動が発生したため、これらの事例も詳しく調べられた。模型実験についても振動台実験がいくつか行われた。なお、流動が発生する地盤のタイプとして図-2に示したように、緩やかな傾斜地盤と護岸・岸壁背後地盤があることがすでにこの時点でわかっていたが、後者は地盤だけでなく護岸・岸壁の条件が加わり複雑なため、前

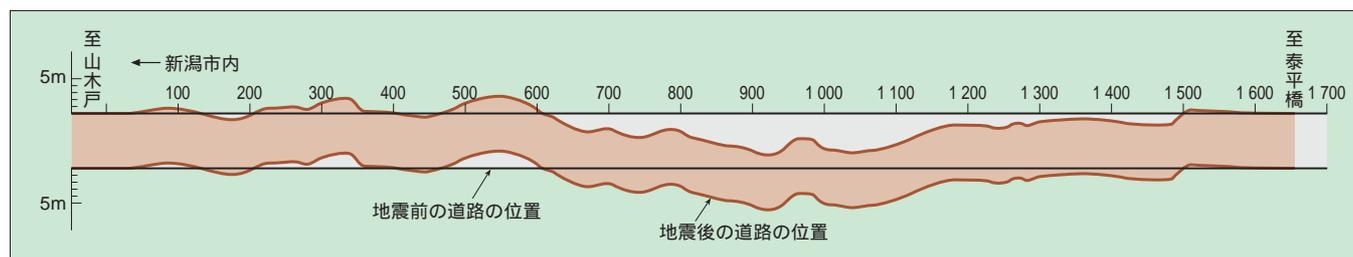


図-1 大形地区で生じた道路の蛇行²⁾

者がまず検討対象とされた。また、構造物も地中埋設管が主に対象にされた。

兵庫県南部地震以降の研究および技術開発

1995年に発生した兵庫県南部地震では、神戸およびその周辺の各地で、岸壁・護岸のはらみ出しに伴い液状化した背後地盤に流動が生じた。その流動範囲は100m程度にも及んだ。この流動による地表面の変位分布を調べるために、航空写真測量が行われたのはもちろんであるが、現地でクラックの幅と位置を測って、護岸近傍の詳細な変位分布も求められた⁵⁾。また、このような流動によって橋梁や建築物の杭基礎が数多く被害を受けたため、地震後に杭基礎の変形量やクラック発生深度などが詳しく調べられた。これらにより明らかにされた被害状況を模式的に表すと、図-2(b)となる。これらは大変貴重なデータとなった。

地震後、岸壁が大きくはらみ出した原因について、運輸省港湾技術研究所などで有効応力法による地震応答解析や振動台実験が行われた⁶⁾。これらにより岸壁がはらみ出した原因がまず説明された。岸壁・護岸のはらみ出しに伴う背後地盤の大きな流動変位や、杭基礎の被害については、理論的な検討をじっくり行う前に設計方法の開発が急いで行われた。これは、復旧に当たって対策を施した工法をとることや、東京の既設の橋梁などで至急に対策をとるため、設計方法の開発が急務とされたためである。

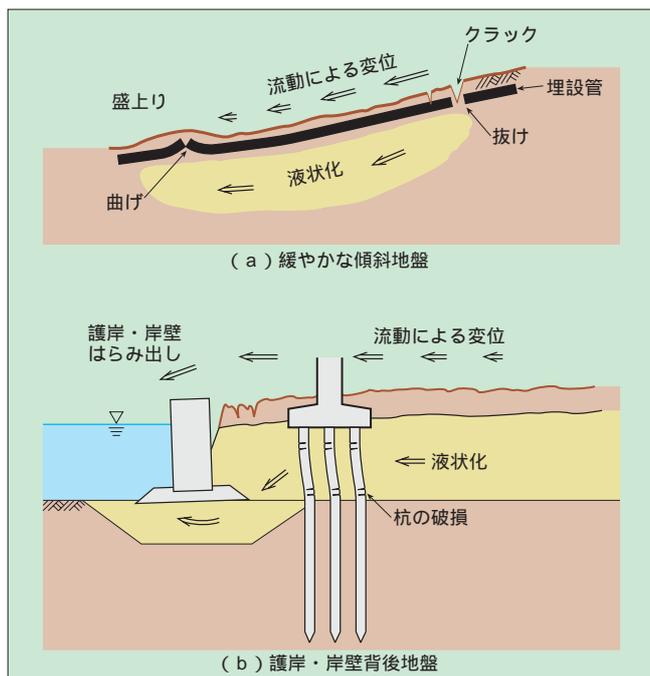


図-2 液状化に伴う流動のパターン

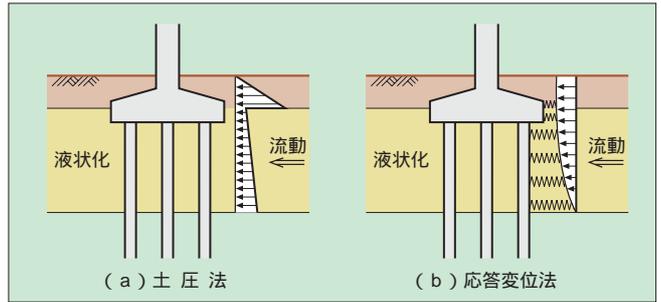


図-3 杭基礎に対する流動の影響を考慮した設計方法

表-2 流動に対する杭の設計方法の種類と課題

土圧法	応答変位法
<ul style="list-style-type: none"> 液状化層上の非液状化層が厚い場合の取り扱い 流動変位量と土圧の関係 液状化層の流動圧分布 杭近傍に対策工を設けた場合の土圧推定方法 流動力の作用面積の考え方 	<ul style="list-style-type: none"> 流動変位量および深さ方向の分布の推定方法 液状化層上および非液状化層の地盤ばねの値 流動力の作用面積の考え方

まず、道路橋示方書に流動に対する基礎の設計方法がとり入れられた。ここでは阪神高速道路の被害の分析結果をもとに、図-3(a)に示されるように土圧を加える方法がとられた。一方、高压ガス施設では、配管の設計を行うために地盤の変位量が必要であり、杭基礎の設計にもこの地盤の変位量を基にする応答変位法を用いる方法が検討された。これは図-3(b)に示すように、地盤の変位量をまず求め、地盤ばねを介して杭に加える方法である。その後もいくつかの設計基準類で、土圧法や応答変位法による設計方法が導入されてきている。両設計方法とも確立されるまでには表-2に示すように、まだいくつかの課題を今後検討していく必要がある。

さて、流動およびそれが杭基礎などに与える影響の理論的な研究も、設計方法の開発と並行していくつか行われてきた。表-1に示したように流動の発生に対し、すでにいくつかの説が出されていたが、これが整理され、流動する土を固体としてとらえる考え方と、液体としてとらえる考え方に大別して分類が行われるようになった。前者による解析方法には、主に地震応答解析による方法と、残留解析による方法が用いられるようになってきた。残留解析を利用する場合には液状化した土のせん断剛性の値が必要になる。また、この考え方に基づいた解析に対しては液状化した土の粘性係数の値が必要になる。そこで、これらの値を求めるために特殊な室内試験や事例の逆解析が行われるようになってきた。なお、このような分類およびそれによる解析方法の詳細については、文献1)に詳しく述べられているので参照していた

だきたい。この他、液状化により水膜が形成されることが大きな流動変位を生じる原因であるとの考え方も出てきている。

流動が構造物に与える影響に関しては、地盤および構造物の模型に対し1G場や遠心力場での振動台実験が多く行われるようになってきた。図4は実物大の杭に対し大型振動台実験が行われた例⁷⁾である。ここでは、深さ6m、長さ12mの地盤モデルに直径20cmの杭が設置され、実際に流動で杭が破壊するまで加振が行われた。このような実験で応答変位法に必要な地盤ばねの値が現在求められつつある。さらに、地盤ばねに関しては、兵庫県南部地震や新潟地震における被災事例の逆解析を行って求めることも行われている⁸⁾。

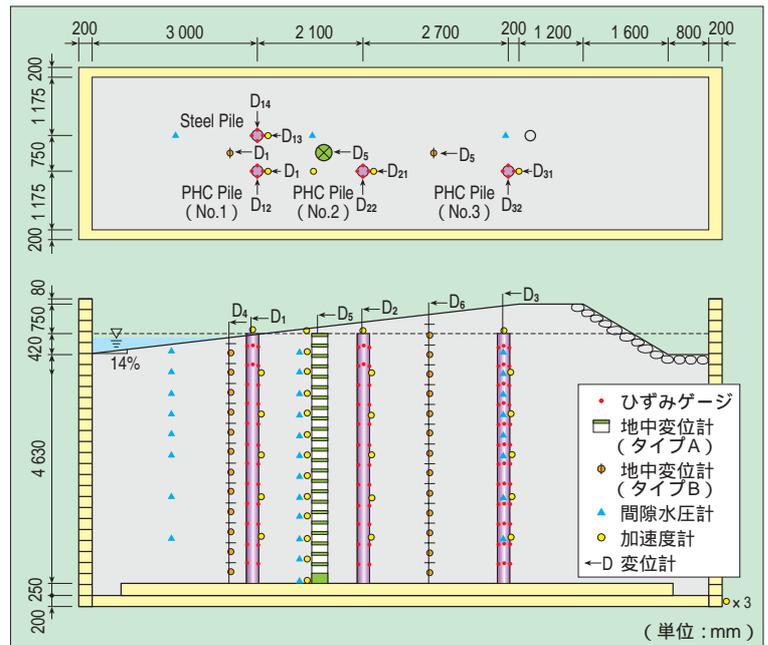


図-4 実物大の杭を用いた大型振動台実験⁷⁾

今後の方向

以上見てきたように、傾斜地盤の流動に関しては日本海中部地震を契機に、また、岸壁・護岸背後地盤の流動に関しては兵庫県南部地震を契機に、研究および技術開発が多く行われるようになった。ただし、いずれも歴史はまだ浅く、実務に取り入れられるようになってきたものの、まだ設計方法が確立されてきてはいない。今後必要と思われる研究・技術開発を列挙してみると以下のようなものがある。

- (1) 兵庫県南部地震では前述したように、膨大な貴重なデータが得られている。これを利用して今後も分析を続けることが望まれる。
- (2) 地盤の流動量やそれが構造物に与える影響は、土の種類や密度、堆積してからの年月などによって大きく異なる。したがって、兵庫県南部地震や新潟地震などの経験だけでは不十分である。このため、模型実験などで地盤および構造物の条件を多く変えた実験が行われることが望まれる。特に、実物大の実験が行われると良い。
- (3) 流動の解析に必要な液状化した土のせん断剛性や粘性係数などを求めるための、新しい現地地盤調査方法、室内試験方法の開発が望まれる。
- (4) 将来地震が発生しそうな場所に計器や構造物を設置しておき、実際に流動が発生した場合の挙動を計測することが望まれる。
- (5) 液状化の発生そのものに対するゾーニング手法はあ

る程度確立され、各自治体などで行われるようになってきた。これに加えて、流動に対してもゾーニング手法を確立し、危険度地図を作成することが望まれる。

- (6) 流動のメカニズムを考慮した合理的な対策方法を開発していく必要がある。

参考文献

- 1 - 地盤工学会：講座「液状化に伴う地盤の流動と構造物への影響」, 土と基礎, Vol.47, No.5, pp.53-58, 1999 ~ Vol.48, No.4, pp.39-45, 2000
- 2 - 浜田政則・安田進・磯山龍二・恵本克利：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 / III-6, pp.211-220, 1986
- 3 - 福岡正巳：地盤災害, 地震と地盤, 土質工学会, pp.119-140, 1965
- 4 - (財)地震予知総合研究振興会：日米共同研究 地盤変状と地中構造物の地震被害に関する研究, 1989
- 5 - Ishihara, K., Yasuda, S. and Nagase, H. :“ Soil characteristic and ground damage ”, Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17, 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, pp.109-118, 1996
- 6 - Iai, S., Ichi, K., Liu, H. and Morita, T. :“ Effective stress analyses of port structures ”, Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17, 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, No.2, pp.97-114, 1998
- 7 - Yasuda, S., Ishihara, K., Morimoto, I., Orense, R., Ikeda, M. and Tamura, S. :“ Large-scale shaking table tests on pile foundations in liquefied ground ”, 12th WCEE, Paper No.1474/5/A., 2000
- 8 - Ishihara, K. and Cubrinovski, M. :“ Soil-pile interaction in liquefied deposits undergoing lateral spreading ”, Proc. of the 11th Danube-European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp.51-64, 1998