

地震による液状化地盤の側方流動と液状化防止法試案

Lateral Spreading of Seismically Liquefied Ground and Methods for Preventing Liquefaction

白石 俊 多 (しらいし しゅんた)

多士不動産(株) 代表取締役会長

1. 新潟地震

1964 (昭和39) 年 6 月 16 日に発生した新潟地震の直後、筆者は被災地を視察して地盤の液状化¹⁾による特異な被害の凄まじさに驚嘆した。

浜田ら²⁾によると新潟地震では、信濃川河岸の液状化による流心方向への地盤流動は、萬代橋上流側兩岸および昭和大桥上流側左岸で 8 m を超えたという。

萬代橋の上流約 1.1 km の位置にあった鋼管杭列を基礎とする昭和大桥は、河床地盤が液状化し流心方向へ数 m 流動したために右岸寄りの橋桁 5 連が落橋したが、ニューマチックケーソン 7 基を基礎とする萬代橋の主径間の 6 連の固定アーチは安泰であった。

2. 既往の大地震の地盤液状化による被害

表一 1 に示すように、安政³⁾、濃尾⁴⁾、関東⁵⁾、福井⁶⁾、新潟、兵庫県南部^{8)~10)}等の大地震では、流動する液状化層上にある非液状化層の側方移動が被害を拡大した。

これらの地震は、震央が比較的罹災都市に近い直下型とよばれる濃尾大震災を除き比較的リヒタースケールの小さいものであって、日本海溝の近くに震央がある遠海型のスケールの大きい地震ではない。遠海型の地震も安政年代以来数回あったが、大都市を直撃していない。

東京の下町のほぼ全域は、1603 (慶長 8) 年に神田山 (今の駿河台) を掘り崩して築地近辺の入江を埋立てて以来、陸上で掘り崩した土砂を海中に投入した埋立地であって粘着力に乏しく地震時に液状化しやすい。

濃尾平野はほぼ全域が緩い沖積砂質土層により覆われているために、濃尾大震災の時濃尾平野全域に激しい液状化が発生した。

我が国最大の沖積平野である濃尾平野では、昭和 30 年以降の地下水の過剰揚水による大規模な地盤沈下があり、濃尾平野内に我が国最大のゼロメートル地帯が出現した。

このゼロメートル地帯内の木曾、長良、揖斐等の諸河川では、河口部の堤内地側地表面の標高が中等海水面より 2.0~3.0 m 低い。

このようなゼロメートル地帯は、東京の下町や大阪などにもあるが、将来激震に襲われたときに堤防が地盤液状化により破堤し市街地に奔流が走り地下街、地下鉄道内などで多数の溺死者がでる大惨害発生のおそれがある。

関東大震災では、東京の下町のほぼ全域が埋立地であったので下町全域に激しい地盤の液状化と側方移動が発生したと考えられるが、地震と大火災による犠牲者が余りにも多かったので震災 60 余年後の面接調査⁷⁾では生存者が少なく、液状化の全容を明らかにできなかった。

安政大震災でも関東大震災でも、建物の倒壊戸数が下町に極めて多く山の手では少なかった。下町に極めて多い家屋倒壊の主な原因は、下町地盤の液状化と液状化層の側方流動にあったものと考えられる。

兵庫県南部地震直後に筆者は被災地を視察したが、震央の東方約 42 km の震度 5 の強震区域内にある山陽新幹線の大阪市内の高架橋基礎周囲地盤が液状化し、液状化した地盤は西北方向の神崎川寄りに側方移動し数十基の高架橋橋脚が線路方向に若干動いた形跡が観察された。

神崎川橋梁の東南約 300 m の位置にある山陽新幹線の加島架道橋は、阪神高速道路の高架上をまたぐ高橋脚上の架道橋であるが、この強震による残留変位が無かった。

これは加島架道橋がニューマチックケーソンを基礎とするため、基礎施工中に発生した圧縮空気微小気泡が施工後 27 年間基礎周囲に滞留していてクッションの作用をし周囲地盤の液状化を阻止したゆえと考えられる。

加島架道橋基礎周囲地盤の空気が混入した砂質土試料を、基礎地盤コンサルタンツ(株)が開発した特殊なサンプリングシステムにより採取し、採取した試料土の飽和度を測定したところ飽和度は 90% 以下であって、地盤が液状化しなかったことを裏付けた⁸⁾。

表一 1 既往の大震災の状況

地震名	安政大震災	濃尾大震災	関東大震災	福井地震	新潟地震	兵庫県南部地震
発生年	1855(安政2)	1891(明治24)	1923(大正12)	1948(昭和23)	1964(昭和39)	1995(平成7)
最大震度階	VI	VII	横浜でVII	VI	V	VII
犠牲者数	6,757人	7,880人	142,807人	3,858人	26人	6,427人
火災の程度	下町ほぼ全焼	岐阜市ほぼ全焼	焼失 447,000余戸	焼失 3,722戸	小火	焼失6,000余戸
全滅家屋数	14,346戸	142,177戸	焼失共 580,400戸	36,184戸	1,960戸	全半壊共
半滅家屋数	約50,000戸	80,324戸	約 120,600戸	11,816戸	6,640戸	250,000戸以上
液状化地域	下町ほぼ全域	濃尾平野ほぼ全域	東京の下町ほぼ全域	福井平野ほぼ全域	新潟市全域	沖積低地全域
地割れ噴砂	下町ほぼ全域	濃尾平野ほぼ全域	東京の下町ほぼ全域	福井平野ほぼ全域	新潟市全域	沖積低地全域

上述のように加島架道橋の橋脚頂面は地震前の位置より動かなかったが、加島架道橋に接続する高架橋が前述のように線路方向に動き、加島架道橋の橋脚頂面上の橋桁が西北方向へ強く動いたため、橋桁端の杓座面のコンクリートが破損しかなりの修理を要したようである。

その後に行われた日本圧気技術協会の調査報告⁹⁾などの記録を筆者の被災地視察の結果と照合して検討したが、兵庫県南部地震の試練を受けた305基のニューマチックケーソンを基礎とする構造物には、倒壊等修復不能な致命的被害が皆無であることを確認した¹⁰⁾。

道路や鉄道の高架橋では橋桁に固定された床板またはロングレールにより数十連の橋桁が橋軸方向に固く連結されているので、連続高架橋の基礎周囲地盤の液状化による側方移動が原因の橋軸方向の橋桁の移動により、相当に強固であって地震後の残留変位がない橋脚が連鎖的に損壊した例が加島架道橋以外にもあったようである。

このような連鎖的損壊は、海岸寄りの沖積地盤上の高架橋に多くあったものと考えられる。

3. 液状化地盤の側方流動は平坦な場所でも起きる

兵庫県南部地震の被害を教訓として改訂された道路橋示方書¹¹⁾では、液状化した地盤の設計上の土質諸定数を低減させることを規定しているほかに、液状化した地盤が側方流動するのは海岸線から100 m 以内の範囲であって、この側方流動による二次元的な受働土圧相当の大きい横圧を橋脚基礎に作用させて設計するように規定している。

しかし、液状化による地盤流動は、水際線から100 m 以上離れた平坦な場所でも、生じる可能性がある。

また、流動長が数十 cm と短い場合でも、流動する液状化層の上に乗り移動する地下水面上の非液状化層が地下埋設物等の地中物体に及ぼす土圧は強大なもので、二次元的な受働土圧よりかなり大きいものと思われる。

兵庫県南部地震で水道管等の地下埋設物が寸断され、地震により発生した火災の消火に十分な水が得られなかったのも、液状化による地盤の側方移動の結果である。

このように、構造物基礎、地下鉄道、地下埋設物等に接して液状化のおそれがある土層がある場合には、液状化土層上にある非液状化層の側方移動による三次元的な受働土圧相当の強大な横圧力が作用することが考えられる。

ゆえに、このような強大な横圧力に耐え得るように地下構造物を補強するか、または液状化のおそれがある土層に液状化を防止する方法をあらかじめ講じておく必要がある。

しかし、特殊の場所を除き液状化のおそれがある土層がどの方向へ流動するか、または流動しないかを、地上で簡単に判定する方法はない。したがって、地下に液状化のおそれがある土層がある場合には、液状化を防止する方法をあらかじめ講じておくのが最もよいと考えられる。

道路橋示方書も鉄道設計標準¹²⁾も、将来再改定する機会には重要な構造物の基礎地盤に液状化しやすい土層がある場合に対して、その土層の液状化を防止する方法をあらかじめ講じるように基準を改訂することが望まれる。

4. 地震時地盤液状化の防止方法

地震時における地盤の液状化を防止する方法には、大きく分けて地盤を圧密または固結する地盤強化方法と、地盤土の飽和度を低下させる方法とが考えられる。

地盤強化方法には、サンドコンパクションパイル工法等によって地盤の密度を高める方法や薬液注入等地盤を固結する方法とがあるが、いずれもかなり高価な方法であって使用機械も機高が大きいものであるため、広範囲または多地点あるいは空高が低い地点における地盤液状化防止には適さない。

以下に述べる地盤土の飽和度を低下させる方法は、使用設備が小規模かつ安価であって使用機器の高さが低いので、広範囲または多地点あるいは空高が低い場所における使用にも適するものと考えられる。

地盤土の飽和度を低下させる方法には、圧縮空気を地中に吹き込んで無数の微小気泡からなる空気混入範囲を地中に造成する方法と、多量の空気が溶存する水を地中に浸透させる方法とが考えられる。

圧縮空気を地中に吹き込む方法は、複数のウェルポイント管類似の微細網目のストレーナーを備えた空気吹込み管および集気管を図-1に示すように数 m の距離 L 、間隔 S に交互に配列して地中に設置し、空気吹込み管から吹き込んだ空気を集気管に向けて横方向に地中を浸透させ集気管から上方の大気中に排気する操作を、空気吹込み処理深さ d を数段に分割して空気吹込み操作を1段ずつ繰り返し、空気が微小気泡の形で十分に混入した範囲を造成する方法である。

地中に吹き込まれた圧縮空気は、その浮力により地下水を上昇し大気中に散逸しようとするが、あらかじめ気密性被覆により地表面を覆い、気密性被覆の周囲を地下水面に達する遮断壁で囲い、空気が大気中や遮断壁外に散逸することを防ぎ所定範囲内に一様に浸透させる。

図-1は、吹き込んだ空気を集気管に向けて横方向に地中を浸透させ集気管から上方の大気中に排気する操作を繰り返して所定の深さ d まで空気が混入した範囲を

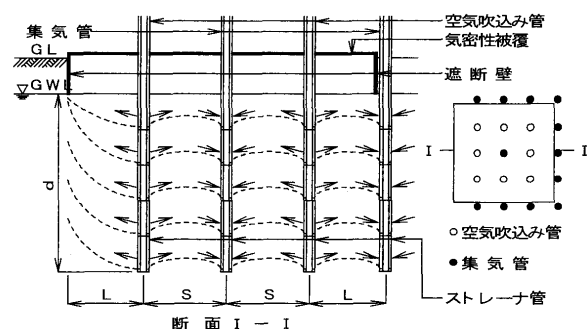


図-1 空気吹込み設備

造成する作業が終わった状態の模式図である。

この方法では、酸素欠乏空気が発生するおそれがある場合に備えて、1回の空気吹込み操作が終了する度に集気管からの排気の酸素濃度を測定し、酸素濃度が平常値より低い場合は平常値を回復するまで空気を地中に十分に循環させ、酸素欠乏事故の発生を未然に防止する。

空気混入範囲の空気の大部分は微小気泡の形をとり、気泡周囲の地下水が流動しない限り、微小気泡は半永久的に最初に土粒子群内に閉じ込められた位置に止まるので、空気混入範囲内の地盤土の飽和度は変化しない。

図—1は、標準的な空気吹込み処理の模式図であるが、各種基礎周囲地盤に対する応用方法や杭間地盤に対する応用方法も、原理的には図—1に示す方法と同様である。

浅い井戸が都市部でも一般に用いられていた半世紀以上の昔と異なり、浅い井戸がほとんど用いられなくなった現在の都市部では、特殊な場所を除き浅部砂質土層内の地下水は流動していない。

5. 定常的浸透水流がある場所の液状化予防方法

東京の下町や濃尾平野などのゼロメートル地帯内の河川堤防、防潮堤、防潮護岸壁の基礎地盤中には、水位が高い河海側から地面が低い堤内側へ向けて定常的な浸透水流が流入している。定常的な浸透水流が存在する地盤中に図—1に示す方法によって空気混入範囲を造成しても、空気混入範囲内の空気が浸透水流中に徐々に溶解し去ることにより飽和度は徐々に上昇し、最終的には地震時における地盤液状化防止の効果を失う。

浅岡 顕¹³⁾によると都市部を貫流する河川の水にはほぼ飽和または過飽和の空気が溶存し、堤防内を浸透する間に気泡が発生し気泡が堤内側端の遮水壁（図—2中に鎖線で示す）に沿う上昇浸透水流がボイリングを助勢し、このボイリングにより堤体から多量の土砂が排出されるため堤体内に空洞が生じ、堤体の劣化を招くという。

図—2に模式的に示すように、堤防の堤内側法尻に流下してきた気泡を含む浸透水流を適当な粒度分布のフィルター材を詰めた盲溝に集水し、盲溝中に敷設した多孔管を通じて下水道または雨水渠に排水すれば、ボイリングによる堤体の劣化を防ぐことが出来ると考えられる。

堤防の堤内側付近に適当な下水道または雨水渠がないかまたはそれらの排水路が十分に深くない場合には、堤

体排水用の十分に深い排水渠を別に設置する必要がある。

図—2に示すように水道水を曝気処理して貯水槽に溜め、間欠的に地中に浸透させれば、曝気処理した水道水中にはほぼ飽和または過飽和状態の溶存空気があるので、流入端から流出端に至る間に水圧が低下するに従い溶存空気が溶出して気泡を形成するものと考えられる。

河海側の多孔管内外の水圧を相等しくする必要があるので、この水圧調整装置は複雑を避けるため図示しない。

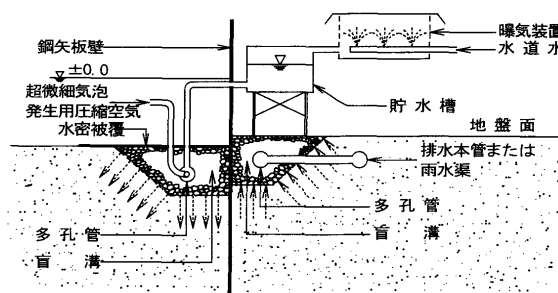
水道水中にはほぼ飽和または過飽和状態の溶存空気がある場合でも、浸透経路上に気泡の核となるような微細粒子がないと気泡は形成されない。図—2に示す圧縮空気の多孔管内に同心円状に配置した吹出し端で圧縮空気がセラミック等の微細フィルターを通じて微細気泡となって吹き出され、この微細気泡が気泡形成の核となる。

河水を地中に浸透させることも考えられるが、河水中のごみやシルトを自動的に除去する高価な精密装置の維持費も割高であるので河水を使用する方法は推奨しない。

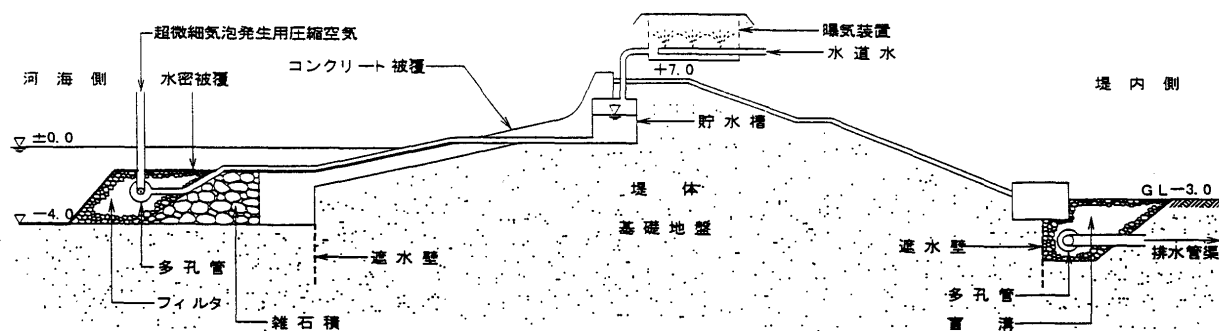
浸透経路上に溶出した空気は微小気泡の形で地下水中に分布し、空気溶有水が絶えず補給されるので浸透経路上の地盤の飽和度は低下することがあっても、向上することはない。

そして、地盤土の粒度分布、 N 値等にもよるが飽和度が85%以下に半永久的に保たれば、震度7の激震による基礎地盤および堤体の地震時液状化を防止できるものと考えられる。

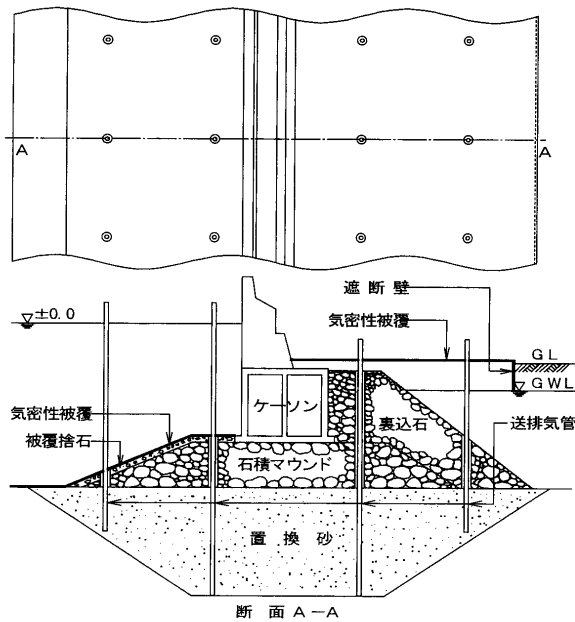
以上に述べたような堤防の地震時液状化防止法と同様な方法により、図—3に示すように曝気処理した空気をほぼ飽和または過飽和状態で溶存する水道水を防潮護岸壁の基礎地盤中に浸透させることにより地盤土の飽和度を85%以下に半永久的に保てば、防潮護岸壁の基礎地盤の激震による液状化を防止できるものと考えられる。



図—3 ゼロメートル地域周囲の鋼矢板護岸壁



図—2 ゼロメートル地域周囲の堤防の液状化防止法



図—4 ゼロメートル地盤内重力式護岸壁の液状化防止法

ゼロメートル地域周囲の防潮護岸壁の場合の問題は、堤内側に壁面に沿って上昇浸透水流が生じるとボーリングが起きて護岸壁地下地盤から土砂を排出し護岸壁の基礎地盤を劣化させるおそれがある点にある。

このボーリングによる基礎地盤の劣化を防ぐには、堤防の場合の堤内端遮水壁に対して設置したものと同様な適当な粒度分布のフィルター材を詰めた盲溝中に浸透水流を集水し、図—3に示すように盲溝中に敷設した多孔管を通じて下水道または雨水渠に排水すれば、ボーリングによる基礎地盤の劣化を防ぐことができると考えられる。

図—4に示すような重力式護岸壁の最大の欠点は、地震時に基礎捨石を支持する置換え砂が液状化しやすいことにある。この型の護岸壁に対する液状化防止法は、まず図—4に模式的に示すように空気吹込み管および集気管を配置してケーソンおよび裏込め石下の置換え砂中に微細気泡からなる空気混入範囲を造成すると同時に、ケーソンの背面地盤にも空気を吹き込み、粒度分布、 N 値等にもよるが地盤土の飽和度が85%以下の空気混入範囲を造成しておき、河海側の空気吹込み管から曝気処理して空気を飽和または過飽和状態で溶存する水道水を、定常的または間欠的に流入させる方法が考えられる。

以上、図—2～4に示したような装置は、公共的な河川管理者の理解と完全な合意を得てから河川管理機関の管理下に置き、水道水を間欠的に地中に流し込む自動装置も定期的に点検、整備する等、装置の管理に万全を期することが望ましい。

濃尾平野や東京の下町などのゼロメートル地域の激震による破堤災害を最小限度に止めるためには、空気を溶存する水を地中に浸透させる方法の有効性を実証することが最重要課題である。

6. 実証実験の実施

以上述べた地盤土の飽和度を低下させた状態を半永久的に保つことによる地震時の地盤液状化防止方法の実証実験の実施は、すでに活動的な地位から引退した老齢の筆者がよく行い得ることではない。この実証実験の実施については、次世代を背負って立つ優秀な地盤技術者諸兄に期待するところが大きい。

本稿に述べた地震時地盤液状化防止方法および設備については、紙数の制約上詳細を省略した部分が多い。これら詳細を省略した部分についても、筆者の手元にはすべての部分の詳細に関する成案がある。

本稿に述べた地震時地盤液状化防止方法の実証実験を実施する意志と実行力を有する地盤技術家がおられるなら、遠慮なく筆者に連絡されたい。実証実験を本当に実施する方には、筆者はできるだけの協力を惜しまない。

7. むすび

この小文中に提案した方法が、さらに専門的に検討される端緒となり、提案中の欠点、誤り等が摘出され、改良されて実用できるものになることが切望される。

終わりに、下記参考文献の著者諸兄、特に地盤液状化に関し有益な助言を賜った吉見吉昭博士、鉄道総合技術研究所の諸兄、基礎地盤コンサルタンツ(株)の酒井運雄技術本部長および日本圧気技術協会の浅間達夫博士に深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 吉見吉昭：砂地盤の液状化，土木基礎シリーズ，技報堂，pp. 5～18, 1991.
- 2) 浜田政則・安田 進・磯山龍二・恵本克則：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，第376号/Ⅲ-6，pp. 211～220, 1986.
- 3) 東京都編：安政烈震誌，東京都，pp. 2～29, 1977.
- 4) 東海三県地盤沈下調査会編：濃尾平野の地盤沈下と地下水，名古屋大学出版会，pp. 1～54, 1985.
- 5) 土木学会編：大正十二年関東大地震震害調査報告，第一巻，土木学会，pp. 1～8, 1925.
- 6) 福井市編：福井烈震誌，福井市，pp. 107～115，pp. 241～267, 1951.
- 7) 東京都土木技術研究所編著：東京低地の液状化予測，土質工学会，pp. 41～52, 1987.
- 8) 鉄道総合技術研究所：ケーソン周囲地盤の飽和度測定調査・試験，(株)白石委託研究，pp. 1～17, 1997.
- 9) 日本圧気技術協会編：兵庫県南部地震におけるニューマチック・ケーソン基礎の概括的状況報告書，日本圧気技術協会，pp. 1～117, 1996.
- 10) 白石俊多：ニューマチックケーソンは激震を耐え抜いた，基礎工，総合土木研究所，Vol. 25, No. 9, pp. 120～128, 1997.
- 11) 日本道路協会編：道路橋示方書・同解説，Ⅰ共通編 Ⅳ下部構造編，丸善，pp. 120～121，pp. 235～237, 1997.
- 12) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説，丸善，pp. 97～102, 1997.
- 13) 浅岡 顕：密な砂浸透過程での気泡発生メカニズムの検討，資料の収集，解析に基づく自然災害に対するリスクの比較研究，研究代表者 高木不折，NoA-10，pp. 128～145, 1992.

(原稿受理 1998.12.11)