

港湾における液状化対策技術の現状と動向(1)

対策の考え方と対策技術の現状

山崎 浩之

Hiroyuki YAMAZAKI

正会員 運輸省 港湾技術研究所
土質部 動土質研究室長

現在までに、液状化対策がなされた施設とそうでない施設では、液状化の有無で地震による被害に大きな差があることが確認され、液状化対策の有効性

が確認されてきている。港湾施設における液状化対策技術の現状と動向と題して2号にわたり報告するが、本号では液状化対策技術の現状について述べる。

港湾施設と地盤の液状化の関わり

地盤の液状化現象というのは、平常時は堅固だった地盤が、地震により液体のような現象として知られている。液状化現象の発生メカニズムを簡単に述べると次のようである。水で飽和した砂地盤が大きな揺れを受けると、地盤を構成する砂粒の骨格構造が崩れて砂粒子間（間隙）に砂粒が落ち込もうとして地盤内に過剰間隙水圧が発生、蓄積される。過剰間隙水圧が地震前の地盤の有効上載圧と等しくなった場合には、土粒子間に働く有効応力はゼロとなり、砂粒が水に浮いた泥水のような状態、すなわち液状化状態となる。図-1はこのような液状化の発生過程の概念図である¹⁾。

したがって液状化現象が発生すると、泥水のようなので軽いものは浮き上がり、重たいものは沈むことになる。あるいは、地盤の一部の層が液状化するとその層の強度はゼロなので、上層の地盤が低い方へ滑る側方流動という現象が起こる。

このような液状化現象が起こりやすいのは、緩く堆積した砂地盤で、地下水位が高いところである。港湾施設は海に面することからその地盤は、地下水位は高く、多くは砂質土を埋立てた地盤や沖積地盤ということから堆積状態は緩いことが多い。そのため、過去の港湾における地震による被害では、液状化が原因となって被災した事例が多い。写真-1, 2, 3は兵庫県南部地震での被災

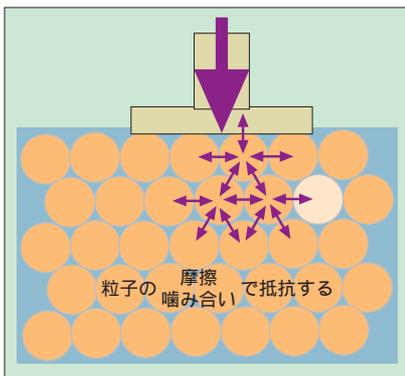


図-1 (a) 地盤内の砂粒子配列の概念図

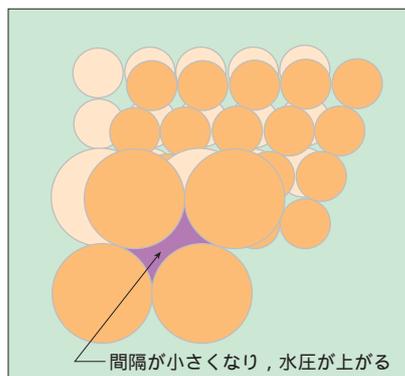


図-1 (b) 地震時の粒子配列の変形



図-1 (c) 液状化状態の概念図



写真-1 地盤の水没



写真-2 陥没と舗装の亀裂



写真-3 液状化による噴砂

で、水没、陥没、液状化による噴砂状況である。大袈裟かもしれないが、港湾施設というのは液状化が発生しやすいところで建設する宿命を背負っているといえる。したがって、港湾施設の建設においては液状化現象をどのように克服するかは重要な命題の一つであり、そのため港湾施設の技術基準にはかなり早い時期に液状化の予測判定手法が明示された。そして、液状化をどのように予測するかだけでなく、発生すると予測された場合の対応、すなわち液状化対策についても早くから技術開発、実施がなされ、多くの知見が蓄積されてきた。

港湾施設における液状化対策の位置づけ²⁾

港湾施設における液状化の取扱いは、図-2 (a), (b) に示す粒度で液状化の可能性のある土とそうでないものを判断し、可能性があるとなった土については、図-2 (c) に示す等価加速度（地震外力）と等価 N 値（地盤の締めり具合）から、対象地盤の液状化の予測を行うこととなっている。対象地盤が液状化すると予測された場合には、「必要に応じ構造物の設計の際に液状化の影響を考慮する」と港湾施設の技術基準¹⁾に書かれており、影響をどのように考慮するかが液状化対策に関わる場所である。

港湾施設においては、地震に対しては、図-3 のような検討過程で設計がなされる。図-3 で示されるように、設計の手順には、通常地震であるレベル1 に対する施設と、兵庫県南部地震のようなレベル2 に対応した耐震強化施設に対しての、2 つの設計の流れがある。レベル1 に対しては健全性を損なわないように設計し、レベル2 については変位等の多少の被害は認めるが施設の所期

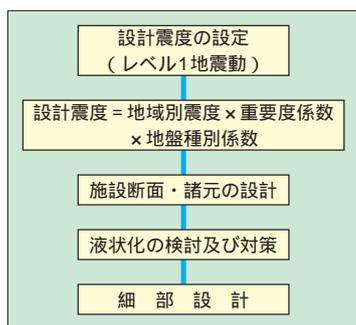


図-3 (a) レベル1地震動に対する港湾施設設計の手順

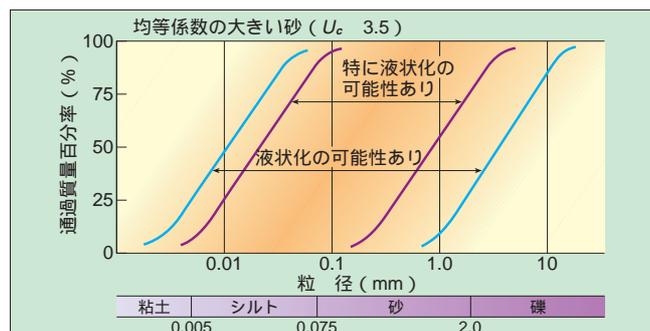


図-2 (a) 液状化の可能性のある範囲 (U_c 3.5)

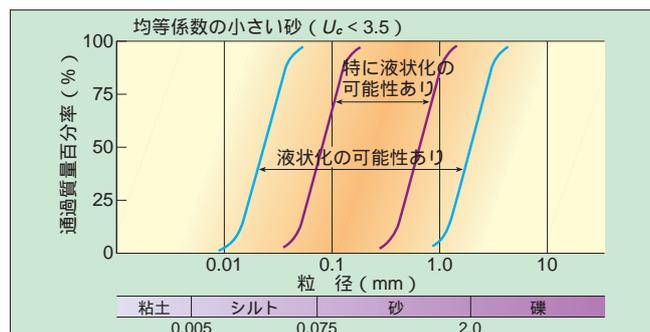


図-2 (b) 液状化の可能性のある範囲 (U_c < 3.5)

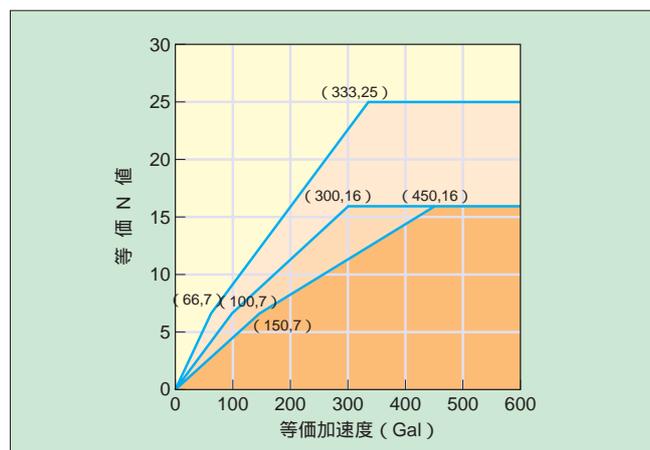


図-2 (c) 等価N値と等価加速度による液状化の可能性の区分

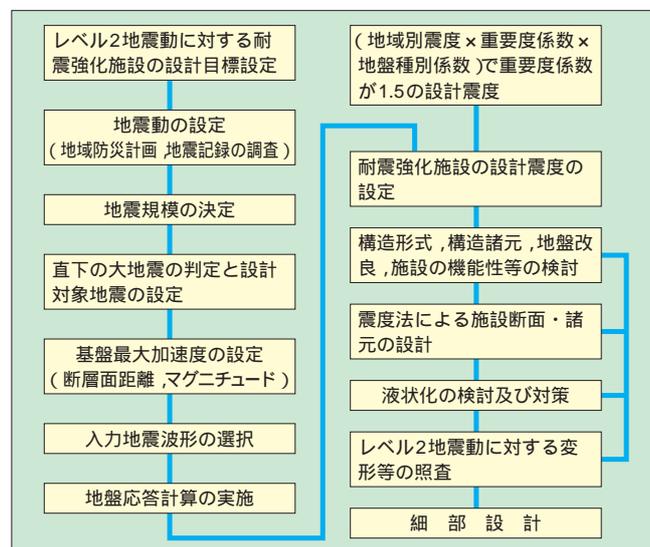


図-3 (b) レベル2地震動に対する耐震強化岸壁の設計手順

の使用目的を損なわないように設計することとなっている。図-3 から、レベル1 地震に対しても、レベル2 地震に対しても液状化の検討および対策が必ずなされることがわかる。したがって、港湾施設においては地盤の液状化を起こさないということが設計における前提、標準である。この前提を設けた背景には、過去の地震、例えば兵庫県南部地震で、液状化あるいは側方流動に起因した被害が多く見られ、レベル1、レベル2 に対する設計の目的達成のためには、液状化の発生を防ぐことが不可欠と認識されたことによる。この前提が守られない場合には、次善の策として設計において液状化、これに伴う側方流動を許容した設計を行うことになる。例えば、レベル2 のような大きな地震動を想定した場合には液状化を認めた設計を行わざるを得ないことがある。すなわち、液状化対策を行っても対象地震力が非常に大きいため液状化を防ぐことができない場合がある。このような場合には、地盤が液状化しても施設の機能が確保されるか、例えば防波護岸であれば必要な護岸天端高が確保されるかなど、を数値計算、模型試験などで確認して対応することになる。

液状化対策技術（工法）の種類³⁾

図-4 に示すように、液状化対策工法はその原理から、締固め工法、間隙水圧消散工法、固結工法、地下水位低下工法、置換工法、せん断変形抑制工法、および構造的対策の7つに大きく分けられる。締固め工法は地盤の密度を上げて液状化抵抗を増加させるものである。間隙水圧消散工法は砂質地盤内に礫杭などによる透水性の高いドレーンを設け、地震時に発生する過剰間隙水圧を消散させて液状化を防ぐものである。固結工法は土にセメントなどの固化材を添加して地盤を固結させて液状化を防ぐものである。地下水位低下工法は、地盤内の間隙水を排除して液状化を防ぐものである。置換工法は礫などの液状化しない材料に地盤を置き換えるものである。せん断変形抑制工法は連続地中壁などで地盤を囲い、地震時の地盤のせん断変形を抑制して液状化を防ぐものである。構造的対策は、例えば杭などを構造物の下部に設け、地盤が液状化しても杭と基礎で構造物を支えて液状化による被害を防ぐものである。ここで、資料としては古くなるが、地盤工学会は平成2年までの工事実績を調べており、工事件数（全体で305件）では締固め工法が59%、間隙水圧消散工法が33%を占めており、改良体積では締固め工法が74%を占めている。したがって、液状化対策としては、締固め工法と間隙水圧消散工法の2つが代表的といえる。

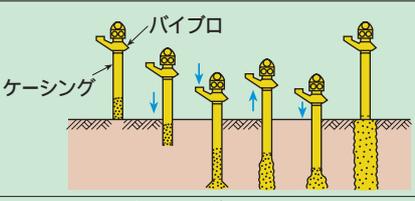
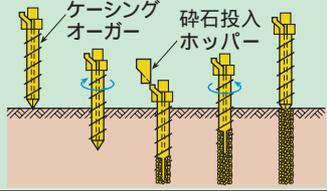
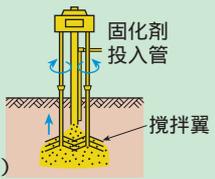
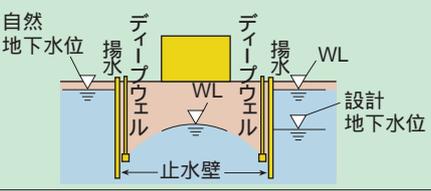
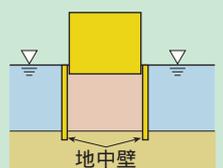
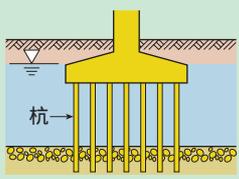
工法の原理	工法の概要図（一例）
締固め	
間隙水圧消散	
固結	
地下水位低下	
置換	
せん断変形抑制	
構造的対策	

図-4 液状化対策の種類

一般的な液状化対策例⁴⁾

港湾の代表的施設である岸壁の背後地盤を対象として液状化対策を行う場合について述べる。図-5 に示すように、岸壁直背後には裏込めと呼ばれるものが設けられるのが一般で、この部分は割石などの液状化しない材料で作られる。その背後に砂質土で裏埋めと呼ばれるものが造成され、これが液状化検討・対策の対象となる。この部分を対策するにあたっては前述したように種々の工法があるが、締固め工法あるいは間隙水圧消散工法が使われることが多い。図-5 の場合には間隙水圧消散工法と締

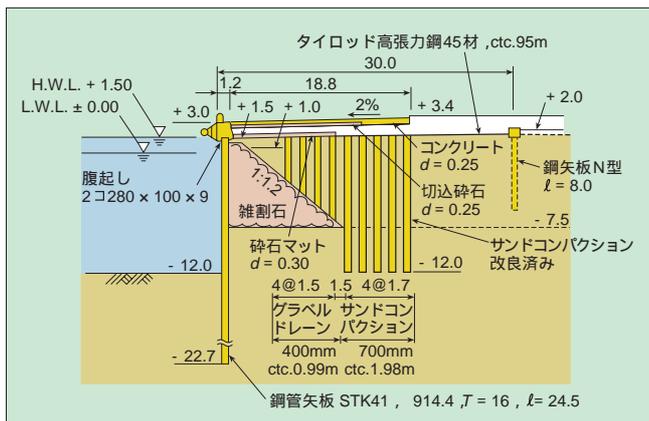


図-5 液状化対策の例1

固め工法が併用されている。締固め工法では、図-2において想定される等価加速度に対して液状化しない等価N値になるように締固めがなされる。一方、間隙水圧消散工法では砂質地盤内に排水性の高いドレーン材（砂質地盤と比較して通常1000倍以上の透水係数）が設けられる。ここで、図-5において2種類の工法が併用される理由はそれぞれ以下のような短所があるからである。締固め工法では施工時に地盤内に大きな振動、水平荷重が発生するので、これを矢板の近くで使用すると矢板に悪影響を及ぼす可能性がある。したがって、矢板に近い部分ではこのような振動などの発生が少ない工法、あるいは振動の緩衝としての工法が適用され、この場合は間隙水圧消散工法が採用されている。間隙水圧消散工法についてはドレーン材でない砂質土部分はそれだけ取り出せば液状化強度は上がっておらず、ドレーン材の機能に不具合があれば液状化してしまうことと、想定以上の地震が発生した場合に急激に大きな変位が発生してねばり強さに欠ける。このような2種類の工法の利点、欠点を考慮して、単独あるいは併用で液状化対策がなされることが多い。

状況に応じた液状化対策の事例⁵⁾

通常は締固め工法や間隙水圧消散工法が採用されるが、状況に応じて他工法が採用される。ここでは、兵庫県南部地震で大きな被災を受けた六甲アイランドの岸壁

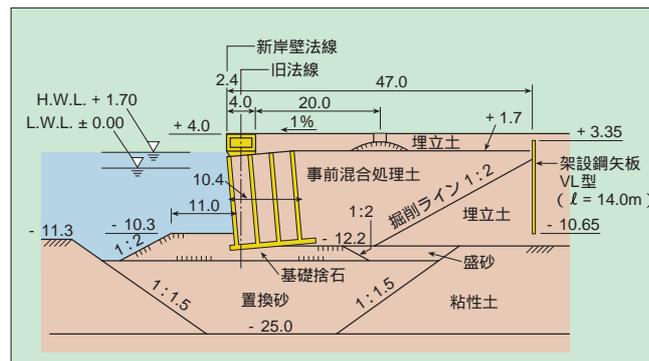


図-6 液状化対策の例2

復旧工事での事例を紹介する。図-6は復旧断面であるが、地震による岸壁の被災形態は、ケーソンが2m程度前にせり出して前面に傾いた状態となり、背後の埋立て地盤も2m程度沈下した。復旧にあたっては、次のような3つの条件があった。ケーソンは傾いたままで据え直さない。ケーソン背後地盤は液状化対策を行う。設計震度を上げるのでケーソンに作用する土圧を低減させる。これらの条件のうち、土圧低減が工法決定の最も大きな制約となった。締固め工法でもN値が増加し、それに伴ってせん断抵抗角が増加するので主動土圧が低減されるが、この事例では不十分であった。そこで、採用されたのは事前混合処理工法である。同工法はセメント添加による付着力で液状化を防止するだけでなく、付着力成分で主動土圧を大幅に低減できる特徴を有しており、図-6のように適用された。

以上、本号では液状化対策の現状を述べたが、次号ではその実際の効果と動向について述べる。

参考文献

- 1 - 沿岸開発技術研究センター：埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版），pp.4～7，1997
- 2 - 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（上巻），pp.257～258，1999
- 3 - 地盤工学会：液状化対策の調査・設計から施工まで，pp.138～166，1993
- 4 - 文献1），pp.246～247，1997
- 5 - 及川研，松永康男：神戸港・岸壁の震災復旧工事における地盤改良，土木技術，Vol.51，pp.56～63，1996