

# 河川堤防の液状化対策の高度化に向けた取組み

石原雅規・佐々木哲也

## 1. はじめに

平成24年の河川構造物の耐震性能照査指針II.堤防編の改定では、東北地方太平洋沖地震による河川堤防の被災で多く確認された堤体の液状化に対する照査が加えられた。しかし、基礎地盤と堤体の液状化は同じ液状化という現象であるにもかかわらず、地盤変形解析技術の限界から異なる照査方法を用いる等、喫緊に対応すべき課題が残されていた。その後、基礎地盤と堤体の液状化を一体的に解析することが可能となる等の技術の進展があったことから、平成28年に河川構造物の耐震性能照査指針II.堤防編（国土交通省水管理・国土保全局治水課、以下「指針(2016)」という。）<sup>1)</sup>が改定された。

この改定に合わせ、土木研究所では指針(2016)に対応した対策工の設計法等を含む河川堤防の液状化対策の手引き（以下「手引き(2016)」という。）<sup>2)</sup>を刊行した。

指針(2016)の改定や手引き(2016)によって解決した課題の中には、1995年兵庫県南部地震直後の耐震点検や対策の設計法に遡る課題も含まれている。そこで本報文では、兵庫県南部地震後から現在に至るまでの耐震点検と液状化対策の設計に関わる技術と基準の経緯を紹介し、その上で、指針(2016)改定等に向けて筆者らが行った検討内容を説明する。さらに現状の技術水準を踏まえ今後取り組むべき課題を示す。

## 2. 河川堤防の耐震点検及び対策の経緯

### 2.1 1995年兵庫県南部地震後（平成7年～）

兵庫県南部地震による淀川の被災を契機として、河川堤防を含む河川構造物の耐震点検<sup>3)</sup>と点検結果に基づいた対策が始められた。

耐震点検は、液状化によって沈下した堤防を河川の流水が越流し、二次被害のおそれがある区間を抽出するものである。当時は、液状化によって

沈下した堤防の高さを直接的に求める実用的方法が無かった。このため、既往の実被災箇所等の円弧すべり安全率と沈下率（沈下量/堤防高さ）の関係から、液状化によって沈下した堤防の高さを間接的に算出する方法が用いられていた。なお、点検において安全率を算出する際の水平震度は、中規模地震動（レベル1地震動相当）の0.15程度であった。

点検の結果に基づいて、「河川堤防の液状化対策工法設計施工マニュアル（案）」（以下「対策マニュアル（1997）」という。）<sup>4)</sup>に従って、地盤改良や鋼矢板の打設などの基礎地盤の液状化対策が実施された。対策工の設計では、対策工の安定性（例えば、固結工法では滑動・転倒・支持の外的安定性や拔出しせん断等の内的安定性）と堤防の安定性（中規模地震動に対する円弧すべり安全率の確保）の2項目を検討し、対策工の仕様が決定されていた。

### 2.2 河川構造物の耐震性能照査指針（平成19年）

平成19年に、レベル2地震動に対応した河川堤防を含む河川構造物の耐震性能照査指針が策定された。液状化によって沈下した堤防を津波を含む河川の流水が越流し、二次被害が生じることを防止するという耐震点検の考え方は踏襲された。

レベル2地震動に対応するにあたって、照査方法としては、研究開発状況を踏まえ、上述した従前の間接的方法から、直接的に堤防の沈下量を算定できる地盤変形解析に差し替えられた。

一方で、レベル2地震動に対応した対策工の設計方法は示されておらず、耐震点検のみが先行的に実施された。

### 2.3 東日本大震災直後（平成24年）

平成23年東北地方太平洋沖地震によって多くの箇所で河川堤防に変状が生じた。それらの箇所には、堤体の液状化による変状が多く含まれていた<sup>5)</sup>ことを受け、それまで主に対象とされてきた基礎地盤の液状化だけでなく、堤体の液状化に対する点検も必要となった。ところが、実務で実績の多い地盤変形解析（有限要素法を用いた自重変

Approaches to Improve Design Method of Countermeasure for Liquefaction of Levee

形解析)を用いて、堤体の液状化による被災事例の再現解析を実施した結果、沈下量を過小評価する傾向が顕著(図-2(a)45度線以下の点)であった。そこで、止むを得ず、堤体の液状化に対する点検は地盤変形解析によらずに、被災事例から得られためり込み沈下量や飽和層厚に基づく方法を提案し採用された。

基礎地盤の液状化に関しては、堤体の液状化とは逆に沈下量を過大評価する傾向が確認されたが、安全側に評価されることから、従来どおり地盤変形解析を使うこととなった。

東北地方太平洋沖地震による堤防の甚大な被害を受けて、東海・東南海・南海地震の影響を受ける地域等では点検だけでなく対策も実施する必要性が生じたことから、対策の設計方法を示す必要に迫られた。しかし、レベル2地震動に対応した設計方法は存在しなかったため、当面、基礎地盤の液状化対策の設計・施工には、対策マニュアル(1997)を用いることとされた。これは、対策マニュアル(1997)に従って設計・施工された対策工が東北地方太平洋沖地震において効果を発揮したことから、レベル2地震動に対しても一定の効果があると考えられるためである。また、堤体の液状化に対しては、ドレーン工などで堤体内の水位を下げられる場合には浸透流解析を用いてドレーン工の大きさを決定するが、下げられない場合にはドレーン工等を仕様規定で設計する方法を提案し採用された。

堤体の液状化の過小評価と基礎地盤の液状化の過大評価、対策工のレベル2地震動に対応した設計方法は、次の改定に向けての課題とされた。

### 3. 東日本大震災後の抜本的な指針改定

東日本大震災の経験から明らかとなっていた前述の課題に関して、一定の結論が得られたことから、平成28年3月に河川堤防の耐震性能照査指針II.堤防編が改定された。改定のポイントは、3.1~3.3の3項目である。

#### 3.1 レベル2-1地震動の見直し

道路橋示方書V.耐震設計編(平成24年)に規定されているレベル2タイプI地震動と同じ地震動にレベル2-1地震動が地域別補正係数とともに引き上げられた。

#### 3.2 液状化判定における細粒分補正

$M$ 値から繰返し三軸強度比を算定する式が、図-1に示すように、細粒分含有率による補正係数を中心に、基本曲線を含め改定された。

地盤変形解析が基礎地盤の液状化を含む場合に過大な沈下量となる根本的な理由は、液状化判定法の問題である。しかし、液状化判定法を抜本的に改良するのは難しく、結論が得られた細粒分含有率による補正による改良が中心となった。

この改良だけで対応できない沈下量の過大評価に関しては、3.3に示す地盤変形解析方法の改良で対応した。

東日本大震災後に堤防被災箇所採取した乱れの少ない試料を用いて繰返し三軸試験を実施した。これまで細粒分の少ない土を中心に $M$ 値と繰返し三軸強度比の関係を整理してきたが、この時、追加した試験結果には比較的細粒分を多く含むものが多数含まれていた。以前の $M$ 値と繰返し三軸強度比の関係を比較すると、データを追加した細粒分の多い範囲において、高い強度比が得られる関係となっている。

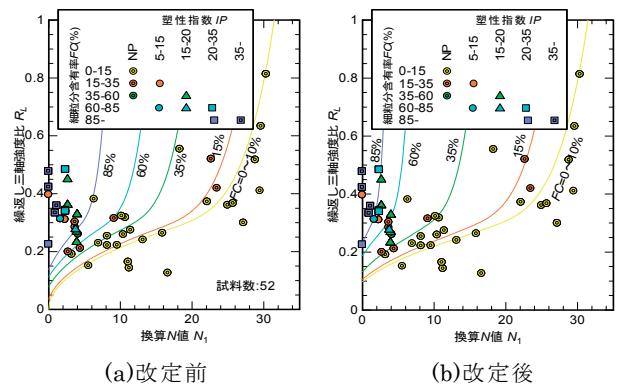


図-1 繰返し三軸強度比と換算 $M$ 値の関係

#### 3.3 堤体と基礎地盤の一体的な解析(地盤変形解析方法の改良)

堤体の液状化では沈下量の過小評価、基礎地盤の液状化では過大評価という2つの課題があった。点検や設計で広く利用されることを考えれば、これらの課題に対する解析方法の改良は、できるだけ単純なものが望ましい。

そこで筆者らは、堤体の液状化について、地盤調査で確認された地下水位よりも高い位置に解析上の地下水位を設定し、より地表に近い範囲を液状化層として扱う方法を提案した<sup>6)</sup>。地下水位より上の一定の範囲は、飽和度が高く、強い地震動によって液状化することや、地下水位以下の液状

化層からの水圧伝播の影響も考慮したものである。

基礎地盤の液状化に関しては、液状化層のせん断剛性の補正（拘束圧補正）を提案した<sup>7)</sup>。液状化判定では深い砂層も液状化層と判定されることも多いが、深い砂層が堤防の変状に寄与したとは考えづらい被災が多かった。その理由として、地盤の造成年代の影響や過剰間隙水圧が地表に向かって消散する結果、浅い層ほど液状化しやすく、液状化状態が継続することが考えられる。そこで、深い液状化層において、液状化時のせん断剛性に、鉛直有効応力の大きさに応じた補正係数を乗じることで、深い液状化層の変形を低減することとした。解析で得られる沈下量が過大とならないようにすれば、対策が必要な延長の低減に繋がるだけでなく、対策の設計にも利用することを念頭に置けば、個別の対策コストを低減することにも繋がる。

堤体、基礎地盤に係る解析方法の改良は、いずれも堤体・基礎地盤の違いを意識することなく利用できるようになった点も、実務に供するに当たっては重要な点である。

東北地方太平洋沖地震などの27事例について、従前の方法と、3.2及び3.3に示した細粒分補正、地下水位の設定、拘束圧補正を行った場合で沈下量を比較した結果を図-2に示す。従前に比べ大幅に改善されていることが分かる。

このように堤体と基礎地盤の液状化が同じ方法で一體的に解析できるようになり、さらに精度が向上したことを踏まえ、指針(2016)では堤体の液状化も基礎地盤と同様、地盤変形解析によって地震後の堤防高さを算出する方法に改定された。

#### 4. 手引きの作成のポイント

手引き(2016)は、約20年に渡って河川堤防の液状化対策工を設計・施工する際に利用されてきた対策マニュアル(1997)の大幅改定版である。平成19年の指針策定により、対策工の設計でも、レベル2地震動を考慮した性能規定化された方法が求められていた(2.2参照)。しかし、対策を施した堤防への地盤変形解析の適用性の検証が不十分であったことから、遠心模型実験を対象に検証を行った。その結果、限界はあるものの、対策工種毎や対策の規模による傾向は再現可能なことが分かり、地盤変形解析を導入することとした。

#### 4.1 設計手順

図-3に対策マニュアル(1997)と手引き(2016)における設計手順の概略比較を示す。大きな変更は、対策工の設計にも地盤変形解析を用いたレベル2地震動に対する耐震性能照査を導入（性能規定化）した点と、洪水時の浸透安全性の照査を追加した点である。

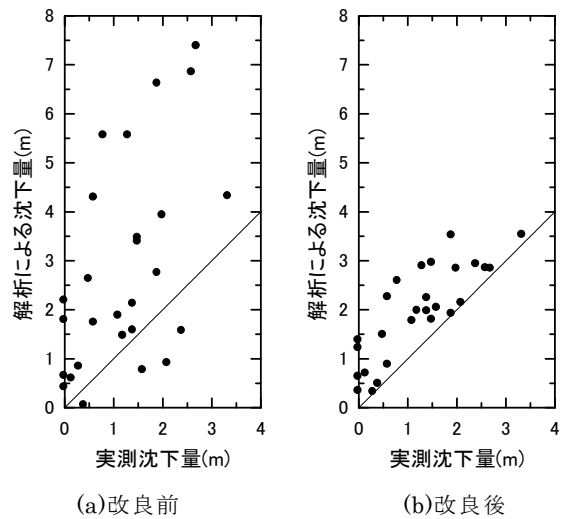


図-2 被災事例の実測と解析の沈下量の関係

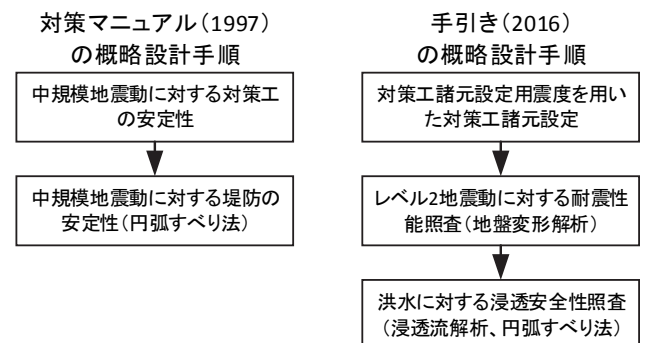


図-3 設計手順の概略比較

対策マニュアル(1997)の中規模地震動に対する対策工の安定性と手引き(2016)の対策工諸元設定の検討内容はほぼ同じである。対策マニュアル(1997)に従って設計・施工された対策が東北地方太平洋沖地震で効果を発揮したことや地盤変形解析の適用限界を考慮し、位置づけを変えて残した。

浸透安全性に関しては、留意事項として示されていたものを、照査を実施することとした。すべりに対する安全率や基盤漏水に関する指標を液状化対策の前後で比較し、悪化する場合にはのり尻ドレーン工などの浸透対策の併用等を明確化したものである。

#### 4.2 液状化対策の位置

基礎地盤の液状化による堤防の沈下を抑制する



には、堤防直下の改良が最も効果的である。

ところが、図-4に示すように円弧すべり法では円弧にかからない部分の改良効果は評価されないため、堤防直下の地盤改良を対策マニュアル(1997)では設計できなかった。

地盤変形解析を導入したことによって、堤防直下の改良効果を評価することが可能となった。また、対策マニュアル(1997)では、川表川裏の両側に液状化層が存在すれば両のり尻の対策が必要となる場合がほとんどだったが、手引き(2016)では液状化層の厚さや変形のバランス等を勘案した上で、片側対策も可能とした。このように性能規定の結果、設計の自由度が増し、設計担当者の工夫が可能となった。

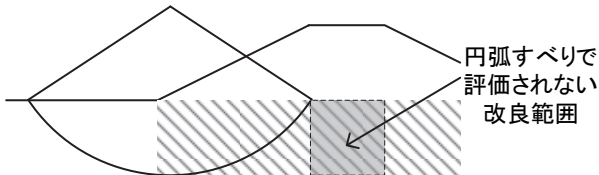


図-4 対策工の位置と円弧すべりの関係

#### 4.3 固結工法の諸元設定

対策マニュアル(1997)では、特に液状化層の下の支持層が粘性土層の場合に、固結工法による対策工が極端に大きなものとなることがあった。その他にも幾つか課題があり、これらを解消した。

模型実験等により検証を行った上で、液状化層から対策工壁面に作用する鉛直土圧を液状化の程度に応じて低減するとともに、対策工の慣性力等の動的成分への低減係数の導入、直接基礎と同じ荷重の偏心傾斜を考慮した極限支持力による照査に変更した<sup>8)</sup>。このような変更の結果、試算の範囲では、対策工が極端に大きくなることが抑制され、対策マニュアル(1997)よりも全般的に対策規模が小さくなる傾向となった。

### 5. 今後の課題と対応

以上示したとおり、地盤変形解析に拘束圧補正を導入することによって、地盤変形解析の精度向上を図り、対策が必要な区間の抽出や対策工の設計がより合理的にできるようになった。しかし、これは本来、液状化判定法の高度化によって対応すべき部分が大きい。深い液状化層が液状化しにくい、堤防等の構造物への影響が少ない理由とし

ては、地盤の造成年代等の影響が指摘されている。土木研究所では、このような影響を直接評価するための現位置試験法の開発等、液状化判定法の高度化に取り組んでいる所である。

また、沈下した堤防の浸透安全性に関して不明な点が多く、地震の度に、復旧方法や管理水準の設定に関して現場で議論が起きている状況があるため、沈下した堤防の浸透安全性に関する検討も行っている。

上記以外にも多くの課題が残されているため、指針や手引きの改定に資する研究・開発を継続的に進めていく予定である。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局治水課：河川構造物の耐震性能照査指針 II.堤防編、最終改正 2016
- 2) 土木研究所：河川堤防の液状化対策の手引き、土木研究所資料第4332号、2016
- 3) 建設省河川局治水課：河川堤防耐震点検マニュアル・解説、1995
- 4) 土木研究所：河川堤防の液状化対策工法設計施工マニュアル(案)、土木研究所資料、第3513号、1997
- 5) 河川堤防耐震対策緊急検討委員会：東日本大震災を踏まえた今後の河川堤防の耐震対策の進め方について報告書、2011
- 6) 脇中ら：東日本大震災における堤体の液状化による河川堤防の被害事例解析、第48回地盤工学研究発表会、2013
- 7) 脇中ら：造成年代等を考慮した河川堤防の液状化被害事例再現解析、第49回地盤工学研究発表会、2014
- 8) 地蔵ら：堤防の液状化対策としてのり尻直下地盤を改良する場合の固結工法の安定検討、第71回土木学会年次学術講演会、2016

石原雅規



土木研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム 主任研究員  
Masanori ISHIHARA

佐々木哲也



土木研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム 上席研究員  
Tetsuya SASAKI