

特集：既設構造物の耐震補強技術

大地震に対する河川堤防の耐震対策工の設計法 — 液状化対策工の設計法の概要 —

谷本俊輔* 中島 進** 中田芳貴*** 森 啓年**** 佐々木哲也*****

1. はじめに

河川構造物の耐震性能照査指針（案）・同解説（以下、指針という）においては、堤防に対し、地震後の越流による二次災害という最悪の事態を回避すべく、レベル2地震動に対して堤防が満たすべき耐震性能とその照査方法が規定されている¹⁾。すなわち、地震により沈下した堤防天端の高さを地盤変形解析により算出するとともに、地震から応急復旧までの間に想定しておくべき河川の水位を算出し、両者を比較することで堤防の耐震性能の照査がなされる。

堤防の液状化対策においても、設計では堤防の沈下抑制効果の適切な評価が必要となる。しかし、対策工法によっては、地盤変形解析のみによる設計が必ずしも適切であるとはいえない。各工法の原理や地震時挙動に照らし、対策効果を確実に発揮させるための前提条件としての照査や、対策がなされた堤防の沈下量を適切に算定するための解析手法に応じた前提条件としての照査がなされて、初めて一定の信頼性を有する適切な設計技術として成立することになる。

現在、土木研究所土質・振動チームでは、レベル2地震動に対する既設堤防の液状化対策工の設計法について検討を行っており、今年度末を目途にマニュアルとしてとりまとめるべく作業を進めているところである。本報では、大地震時の液状化対策工設計法の骨子として、現在作成中のマニュアルの基本理念や工法ごとに必要な照査項目を紹介する。

2. 液状化対策の方針と工法

2.1 液状化対策の方針

指針および現在作成中のマニュアルでは、過去の堤防の大規模な地震被害の経験を踏まえ、堤防の地震被害の要因として、基礎地盤の液状化に主眼を置いている。そこで、まず、基礎地盤の液状化による堤防の変形状況の例として、図-1に示す動的遠心模型実験のスケッチを見てみると、液状化により軟化した基礎地盤

が、堤防の自重により水平方向の伸張を伴って鉛直方向に圧縮することで、堤防天端に沈下が生じていることが分かる。これが液状化による一般的な地震時の堤防の変形メカニズムである。また、堤体内に描かれている変位ベクトルは、堤体が左右に伸張変形していることを示しており、実際の地震では、これが堤体のすべりや天端の亀裂・陥没といった変状を誘引する。

これに対し、これまでの堤防の液状化対策は、堤体内に異物を混在させることで堤防機能に悪影響を及ぼすこと等への配慮から、堤防のり尻付近に実施されてきた²⁾。図-1に示す堤防の変形メカニズムから考えると、のり尻付近に講じられる液状化対策工には、液状化層の下面以深まで根入れをして反力を得ることで、基礎地盤の側方変形を抑制し、堤防の沈下を抑制する効果を期待することができる。さらに、のり尻付近であれば施工後の出来形・品質管理も比較的容易である。このため、現在作成中のマニュアルにおいてものり尻部の液状化対策を基本とする方針である。

2.2 液状化対策工法の種類と選定

現在作成中のマニュアルで主に対象とする堤防の液状化対策工法を図-2に示す。

まず、基本的な工法として、のり面の緩勾配化や押え盛土等によって液状化層の上載圧を増しつつ堤防の安定性を向上させるといった単純な方法(盛土工法)がある。対策効果はさほど大きくないが、原理が明確でかつ施工が容易であり、経済的にも優れる。

基礎地盤の液状化対策工法としては、様々な工法が提案されているが、河川堤防に対する適用実績が多いものとして、セメント等の安定材を地盤に混合させて固結させる工法(固結工法)、地盤の密度増大を図るこ

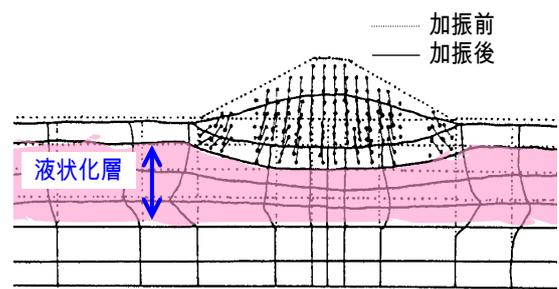


図-1 動的遠心模型実験による堤防の変形状況の例

Seismic design of countermeasures for river levees to large earthquakes – Outline of the design method for countermeasures against liquefaction –

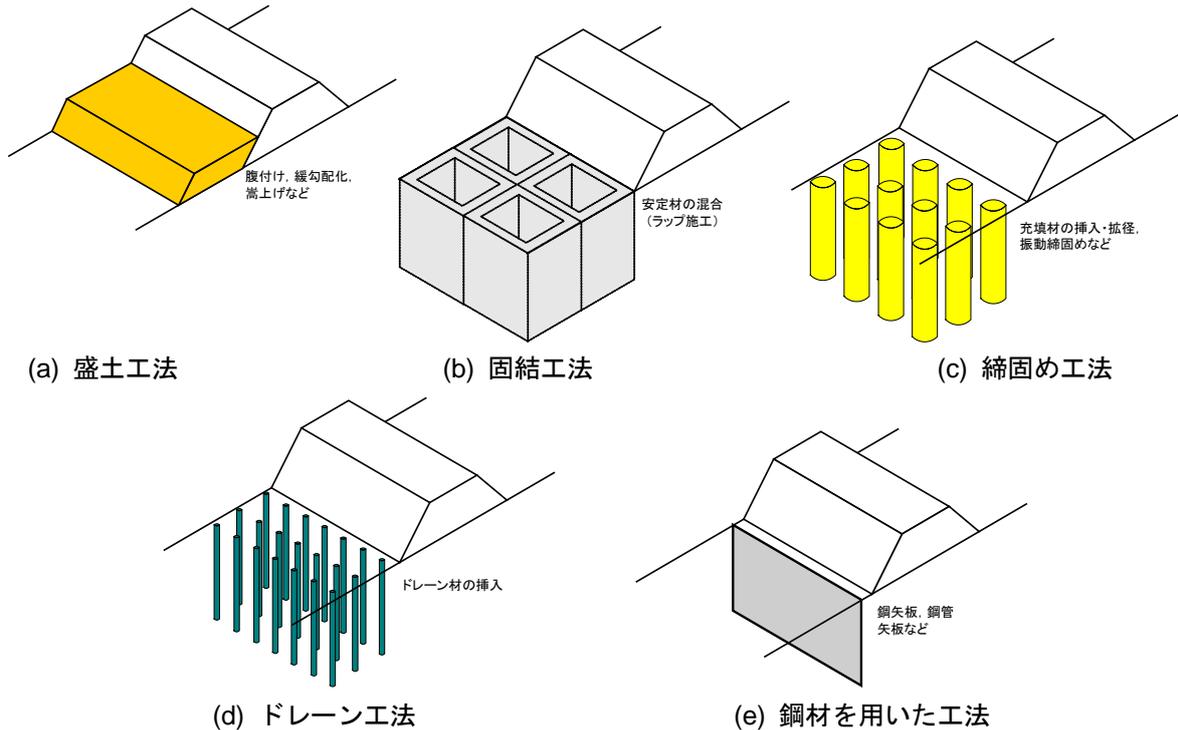


図-2 堤防の液状化対策工法の例

とで液状化に対する強度を増加させる工法(締固め工法)、地震時に生じる過剰間隙水圧の消散を促進する工法(ドレーン工法)、基礎地盤の液状化による側方変形を矢板等の鋼材により構造的に抑制する方法(鋼材を用いた工法)の4種類がある。

次に工法の選定にあたっての観点について述べると、まずは施工能力や施工時の空間的制限の問題から適用可能な工法が絞られ、その他の要因として、騒音・振動・地下水遮断の影響などの環境的要因や、長期耐久性、経済性、破壊に至るまでのねばり、治水機能に及ぼす影響(豪雨・洪水に対する安全性)等について考慮する必要がある。ここで、破壊に至るまでのねばりとは、万が一、想定以上の地震動を受けた場合の対策工の破壊・大変形に対する余裕のことを表す。

3. 液状化対策工法の設計法

3.1 設計法の枠組み

図-3に、堤防の液状化対策工に関する従来設計法²⁾とレベル2地震時の設計法³⁾の概念を比較する。

従来設計法においては、①円弧すべり計算による対策後の堤防の全体安定照査とともに、工法に応じて②対策工の滑動・転倒・支持などの外的安定照査、③対策工に生じる応力度に関する内的安定照査(許容応力度照査)が行われていた。また、液状化を抑制する工法である固結工法、締固め工法およびドレーン工法(図-2(b)、(c)および(d))については、④対策範囲内の

地盤に液状化を発生させない、具体的には、液状化に対する抵抗率 F_L を1.1以上あるいは過剰間隙水圧比 R_u を0.5以下におさめることが求められていた。

これに対し、大地震時に変形を許容する設計法では、堤防の全体安定(①)と対策工の外的安定(②)が、⑤堤防天端の沈下量照査によって代替されることになる。また、液状化対策工法に関しては、大地震に対して、対策領域内の地盤に液状化を全く生じさせない方針が成立しえない場合が少なくない。しかし、対策領域内に液状化が生じたとしてもその程度が抑制され、これによって基礎地盤の側方変形、堤防天端の沈下が抑制されれば、本来の対策工の設置目的にかなうものと見なされ、さらには、その挙動を設計計算で追跡することができるならば、対策領域内における液状化の発生を許容する設計方針が成立しうる。ただし、対策工の内的安定(③)については、一定の損傷を許容するという考え方もあるが、現時点では限界状態の設定方法やそこまでの挙動を追跡するための計算手法も十分に整備されていないことから、基礎地盤の側方変形抑制効果の確実性を得るための前提条件として、従来どおり満足させるべきであると考えられる。

また、堤防の沈下量照査の方法には、大別して静的照査法と動的照査法がある。以前、土木研究所では、堤防の液状化対策工法の設計法に用いるための簡易な動的照査法の開発を行ってきた³⁾。しかし、実務者への便に配慮し、現在、液状化対策工の設計にあたって

も静的照査法を適用することを基本とし、適用にあたっての前提条件について検討を行っているところである。

以降では、2.2節に述べた各工法の設計法について、現時点における見通しを述べておく。

3.2 固結工法

固結工法は、地盤に安定材を混合させて剛性の高いブロック状の固化体を形成することで基礎地盤の側方変形を抑制する工法であり、深層混合処理工法のように地中にソイルセメント柱を形成する工法では、ラップ施工が必須条件となる。設計計算における照査項目は、堤防天端の沈下量、固化体の内的安定の2項目となり、前者に対しては地盤変形解析、後者に対しては安定計算モデルが用いられることになる。

ここで、図-4に示すように、偏土圧を受ける固化体には、地震時の繰返し荷重の作用により一方向に変位が累積する。この累積変位は、本来的には静的解析により追跡することが困難である。しかし、ある程度以上の改良幅や根入れ深さを確保することで、ある程度の外的安定性を与え、累積変位を微小なものに抑制すれば、静的解析の適用も可能になるものと考えられる。このような観点から、静的照査法の適用範囲とそれを満たすための外的安定の考え方を、内的安定の照査方法と合わせて、現在検討を行っているところである。

3.3 締固め工法

締固め工法は、原地盤への充填材(砂、グラウトなど)の挿入・拡径や振動締固めなどによって原地盤の密度を増加させることで、対策領域の液状化強度を高め、基礎地盤の側方変形を抑制する工法である。設計にあたっては、対策領域内の液状化強度の増加に関する評価が重要となる。

対策領域内の密度増加の効果は、現在、N値の増加として評価とされるが、充填材の挿入・拡径に伴う側圧増加や、地盤と充填材が一体的に挙動することによる複合地盤的な効果など、液状化強度の増加に資する実際の対策効果を十分に評価できていないとの指摘もある(例えば4)。これらの具体的な評価方法は施工法によって異なり、より合理的な対策効果の評価に関する技術開発は各工法の開発者による努力に期待するところであるが、現在の評価法により得られる改良後N値から改良後の液状化強度を評価しておけば、少なくとも締固めによって増加した液状化強度は安全側に評価され、地盤変形解析において堤防の沈下量を安全側に評価することができる。したがって、締固め工法につ

いては、対策領域における液状化の発生を許容した設計が成立しうると考えている。

ただし、この場合の照査項目は堤防天端の沈下量のみとなるのに対し、例えば代表的な締固め工法であるサンドコンパクションパイル工法では設計によって対策領域、砂杭打設間隔を決める必要があるが、これら諸元を地盤変形解析による計算のみから決めることとなってしまう点が実務上煩雑となる。

3.4 ドレーン工法

ドレーン工法は、ドレーン材を地中に挿入することで過剰間隙水圧の消散を促進する工法である。間隙水

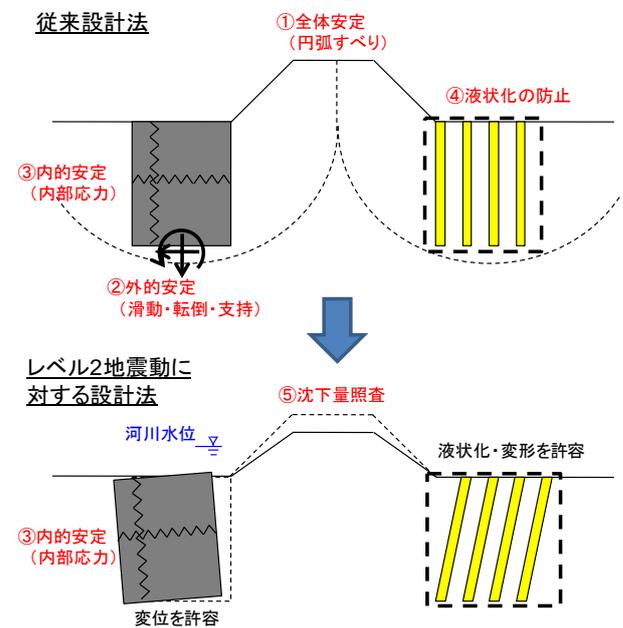


図-3 堤防の液状化対策工設計法の概念の新旧比較

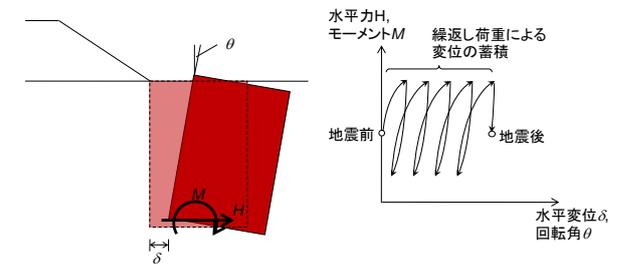


図-4 固化体の変位累積挙動のイメージ

圧消散効果を評価するにあたっては、原地盤の繰返しせん断後の体積圧縮係数 m_v (動的 m_v)および透水係数 k の評価が重要となる。

既往の研究⁵⁾によれば、繰返しせん断後の砂の体積圧縮係数 m_v は、過剰間隙水圧比 R_u が0.3ないしは0.5以下であれば通常の圧密試験で得られる体積圧縮係数(静的 m_v)とほぼ同程度の値を示し、体積圧縮量が小さなものにとどまる。一方、それ以上の過剰間隙水圧が

生じた場合には動的 m_v を得るための特殊な土質試験が必要となる。また、対策領域内の土の液状化強度は対策前後で不変であるが、そのような土において過剰間隙水圧がわずかに低下したとしても、その力学特性は時々刻々と複雑に変化し、対策効果の評価が極めて困難なものとなる。このため、従来どおり、対策領域内における過剰間隙水圧比 R_u を0.5以下におさめるようにドレーンの材料、径、打設間隔を決定するのがよい。その上で、地盤変形解析によって対策領域を決定するという設計手順となることが想定される。

3.5 鋼材を用いた工法

鋼材を用いた工法は、堤防のり尻に鋼矢板、鋼管矢板等を打設し、鋼材の剛性によって基礎地盤の側方変形を抑制する工法である。

まず、液状化層の下層以深に十分な鋼材の根入れ長を与えるべきである点は従来と同じである。地震により鋼材に塑性変形が生じた場合、基礎地盤の側方変位の確実な抑制が困難となるため、鋼材については、レベル2地震時においても塑性化を生じさせないように設計することが必要となる。そして、堤防の沈下量照査として、鋼材の弾性変形が基礎地盤の側方変形に及ぼす影響を含め、地盤変形解析による評価がなされることになる。

4. まとめ

本報では、大地震時の液状化対策工設計法の骨子として、現在作成中のマニュアルの基本理念や工法ごとに必要な照査項目について述べた。現在、設計法の詳細について検討・とりまとめを行っているところであり、今年度末のマニュアル完成を目指している。なお、

検討状況によっては、内容に多少の修正がなされる可能性をあることを断っておく。

液状化対策工法は数多く提案されているが、大地震時の挙動とその評価については未だ十分に解明されておらず、合理化の余地が残されている。また、多様な現場条件に対応していくためには、さらなる対策メニューの充実化を図る必要があると考えているところである。このため、現在のとりまとめ方針や今後の方向性について議論を深めるためにも、読者から多様なご意見を賜ることができれば幸いである。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局治水課：河川構造物の耐震性能照査指針（案）・同解説、2007.3
- 2) 松尾修、島津多賀夫：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、No.3513、1997.10
- 3) 石原雅規、岡村未対、田村敬一、杉田秀樹：地震時変形を考慮した河川堤防の液状化対策工設計法、土木技術資料、Vol.46、No.10、pp.48-53、2004.10
- 4) 原田健二：締固め改良地盤における改良効果のN値による評価、基礎工、Vol.31、No.2、pp.87-89、2003.2
- 5) 大野義朗、伊藤克彦、大北康治：碎石ドレーン工法の間隙水圧消散解析に用いる体積圧縮係数について、第18回土質工学研究発表会発表講演集、pp.575-576、1983.6

谷本俊輔*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所材料地盤研究グループ土質・振動チーム 研究員
Shunsuke TANIMOTO

中島 進**



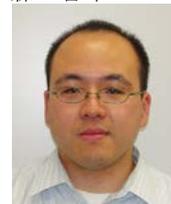
独立行政法人土木研究所つくば中央研究所材料地盤研究グループ土質・振動チーム 専門研究員
Susumu NAKAJIMA

中田芳貴***



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所材料地盤研究グループ土質・振動チーム 交流研究員
Yoshitaka NAKATA

森 啓年****



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所材料地盤研究グループ土質・振動チーム 主任研究員
Hirotooshi MORI

佐々木哲也*****



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所材料地盤研究グループ土質・振動チーム 上席研究員
Tetsuya SASAKI