

耐震対策済み堤防の再評価・再補強に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 22～平 24

担当チーム：地質・地盤研究グループ（土質・振動）

研究担当者：佐々木哲也，石原雅規，谷本俊輔

【要旨】

兵庫県南部地震(H7)以降、我が国では河川堤防の耐震対策が進められた。対策工法はのり尻に地盤改良や構造体を構築するものであり、中規模地震動（レベル1地震動）に対し、堤防・基礎地盤・対策工の全体安定や対策工自体の外的・内的安定を確保するように諸元が設定されていた。一方、現在、大規模地震動（レベル2地震動）に対する堤防の安全性を改めて評価すべく、直轄河川において耐震点検が進められているが、その中で、耐震対策済み区間の堤防の点検にあたっては、地震動の増加によって根入れ深さが不足するケース、内部破壊が生じるケースなどが存在することで、どの程度の効果を期待できるかが不明である。

そこで、本研究は、レベル1地震動を想定して設計・施工された河川堤防の耐震対策工について、レベル2地震動に対する耐震性の再評価およびレベル2地震動に対して耐震性が不十分と判断された場合の再補強法について検討を行うものである。平成24年度は、堤防の既設対策工の諸元実態調査の結果を整理するとともに、東北地方太平洋沖地震において効果を発揮した対策工に関する事例分析および数値解析、対策済み堤防の再補強法に関する検討を行った。キーワード：河川堤防，液状化対策，レベル2地震動

1. はじめに

平成7年兵庫県南部地震を受けて、河川堤防の耐震点検および対策が緊急的に進められたが、当時の設計において考慮されていた地震動は、今日的に見れば中規模であり概ねレベル1地震動（以下、L1）に相当する。一方で、今日ではレベル2地震動（以下、L2）を対象とした堤防の耐震性評価が求められる¹⁾。しかし、L1に対して設計された耐震対策工はL2に対して外的安定・内的安定等を満足せず、地震時挙動が不安定となることが考えられ、耐震性の評価が困難となることも考えられる。本研究は、L1に対して設計・対策された堤防の耐震性の評価法についての検討を行うものである。

2. 対策済み堤防の諸元実態調査

2.1. はじめに

堤防の地震被害は主として液状化に起因して生じることから、堤防の耐震対策としては液状化対策が行われる。2011年東北地方太平洋沖地震では、堤体下部の飽和域に液状化が生じることで著しい被害を受ける堤防が数多く見られ、これを踏まえて堤体の液状化に着目した耐震点検、対策が行われるようになった。しかし、上記地震の以前から行われてきた耐震点検・対策は、主として基礎地盤の液状化に着目して行われてきた。したがって、本研究で対象とする堤防の耐震対策工法は、基礎地盤に対

して行われる液状化対策工法である。

そこで、河川堤防に対して行われてきた代表的な耐震対策工法を図-2.1に示す。大別すると、地盤の密度増大を図るこ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）、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）、基礎地盤の液状化

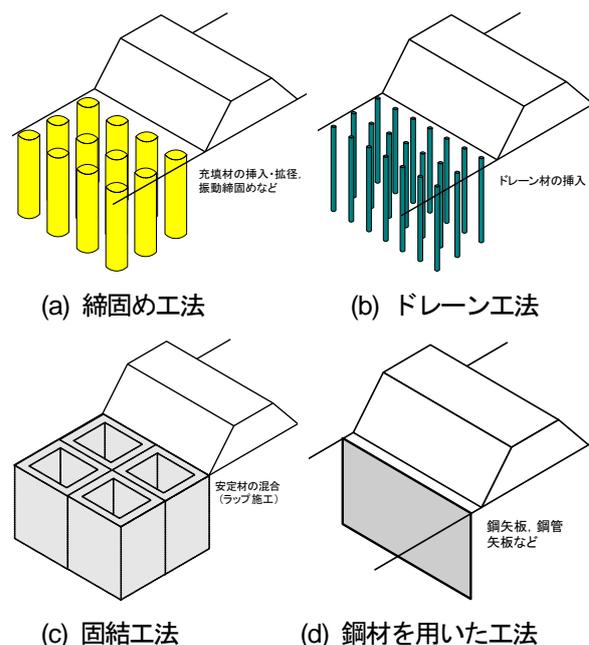


図-2.1 河川堤防の耐震対策工法の例

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。これらの対策工は、既設の堤防に適用するものであることから、堤防の直下を避け、のり尻付近に設置される。堤防の直下の液状化層が堤防の自重を支持しつつ軟化することで生じる側方伸張変形を抑制しようという考え方である。設計にあたっては、円弧すべり計算による堤防の全体安定照査とともに、工法に応じて、対策工の滑動、転倒、支持といった外的安定照査、対策工に生じる応力度に関する内的安定照査や、対策範囲内の地盤に液状化が発生しないことの照査が行われてきた。これらの照査にあたって

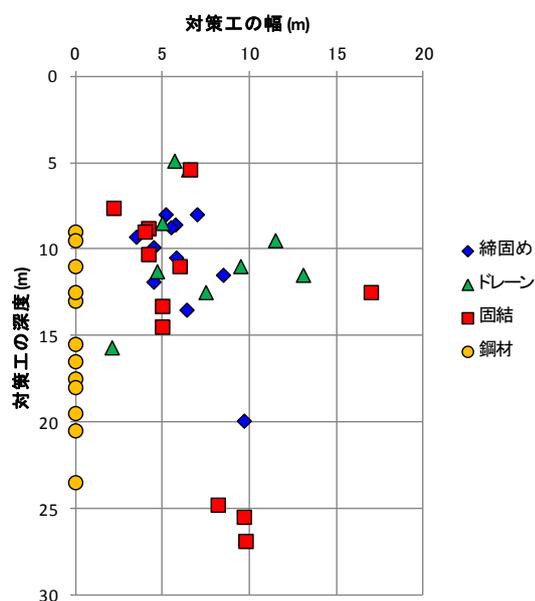


図-2.2 耐震対策工の寸法

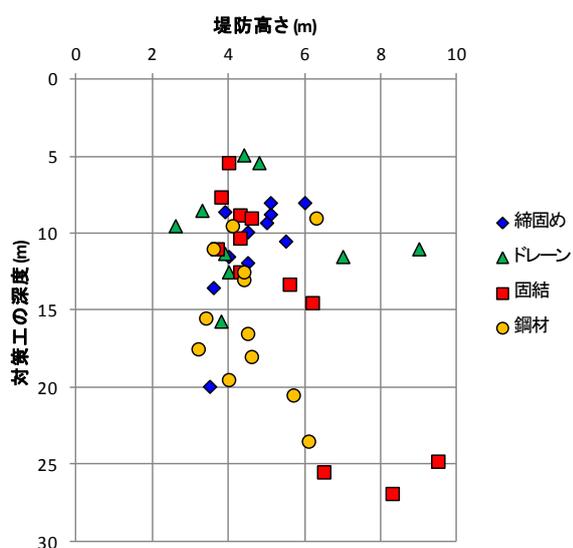


図-2.3 堤防高さ と 対策工の深度の関係

は、L1相当の設計水平震度が考慮されてきた。

このような堤防の耐震対策工の耐震性を調べるためには、実態としてどのような諸元の対策工が適用されているかを把握することが重要である。そこで、本研究では、上記に示した設計法により設計された対策工が実際にどのような寸法、強度等の諸元を有し、どのように河川堤防に適用されてきたかについて、実態調査を行った。調査対象は、直轄河川における計44断面の堤防である。調査対象断面の対策工法に偏りが生じないように、4工法について各10断面程度ずつ抜き取り調査を行った。結果として、締固め工法11断面、ドレーン工法9断面、固結工法12断面、鋼材を用いた工法12断面について、データを収集することができた。

2.2. 全体的な傾向

全工法について、耐震対策工の幅と深度の関係を図-2.2に示す。鋼材を用いた工法については、対策工の幅は便宜的にゼロとしてプロットしている。また、締固め工法、ドレーン工法、固結工法に関する対策工の深度としては施工下面深度をプロットしているため、対策工の上部に空打ち区間がある場合は対策工の高さと一致しない。

締固め工法、ドレーン工法については、締固め工法における1事例を除き、対策工の深さは比較的小さく、概ね15m以浅である。ドレーン工法については、深くなるほど排水距離が長くなり、過剰間隙水圧の消散効果が低下するためであると考えられる。締固め工法の深度が比較的小さいことの原因ははっきりしないが、河口付近で深部に軟弱粘性土層が厚く堆積し、軟弱粘性土層も含めた改良が必要となるような場合には粘性土層で締固め効果を得ることができないため、選定されなかったこと等が考えられる。一方、固結工法、鋼材を用いた工法については、深さ20mを超える事例もいくつか存在する。その理由としては、緩い砂質土層、軟弱粘性土層のいずれに対しても適用可能であることが考えられる。対策工の幅と深度の関係に着目すると、対策工法による傾向の違いは特に認められないが、対策工の幅は深度に対して概ね0.3~1.3倍、平均的に2/3倍程度である。

次に、堤防高さ と 対策工の深度の関係を図-2.3に示す。ここでも対策工法による違いは特に認められないが、堤防高さが大きくなるほど対策工の深度が深くなっているという一定の傾向が認められる。この他にも、最深部の液状化層の下面がどこに位置するかという点も、対策工の寸法の大きな決定要因となっているものと考えられるが、各堤防断面における液状化層の位置を特定するための十分なデータを得ることができなかったことから、こ

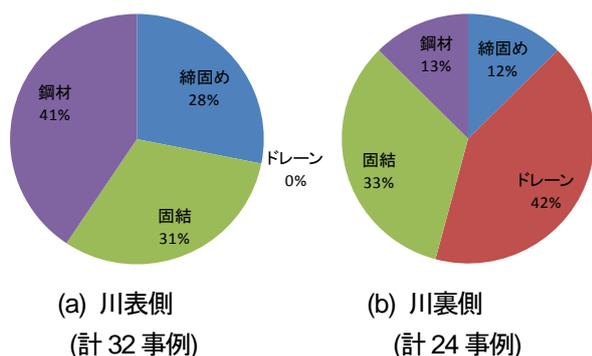


図-2.4 耐震対策工の配置

こには結果を示すことができていない。

耐震対策工には、固結工法、鋼材を用いた工法のように基礎地盤の透水性を低下させる工法と、ドレーン工法のように基礎地盤の透水性を高める工法があるため、河川堤防の耐震対策の検討にあたっては、耐震地策の効果だけでなく、高水時の浸透特性に悪影響を及ぼさないように配慮することが求められる。そこで、各対策工が川表側、川裏側にいずれに適用されているかについて調べた結果を図-2.4 に示す。なお、同図の下方に示す事例数の総和が 56 事例となっており、データ収集を行った断面数 (44 断面) を超えているが、これは、1 断面であっても川表側・川裏側のそれぞれに対策工が設けられている事例があったためである。

ドレーン工法については、川表側に設けられている事例は確認されなかった。これは、表のり尻付近の透水性を高めることで、高水時に浸透水を呼び込むことを避けるための配慮であると考えられる。締固め工法が堤防の浸透特性に与える影響については、砂杭を打設することで透水性が高まるのか、密度が増大することで透水性が低下するのかは現地状況によって異なると考えられるが、本調査の結果としては、川表側に配置されているケースの方が多かった。

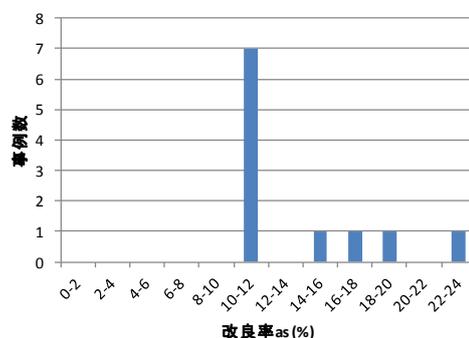
一方、透水性を低下させる固結工法、鋼材を用いた工法については、川表側、川裏側のいずれにも配置されている。堤防の浸透特性への影響も考えられる一方で、所定の耐震対策効果を得るためにやむを得ず選定したケースや、堤内側の用地制限が厳しいため施工スペースの小さな鋼材を用いた工法を選定せざるを得なかったケースなどがあったものと思慮される。

2.3. 締固め工法

締固め工法については 11 事例を収集した。

締固め工法の改良率 a_s の頻度分布を図-2.5 に示す。改良率は 10~24% の範囲にあるが、大半は 10~12% であっ

た。平面配置としては正方形配置が 10 事例、長方形配置が 1 事例であり、三角形配置、矩形配置の事例は見られなかった。パイル径は 0.35m の断面が 1 事例あったことを除けば、全て 0.70m であった。

図-2.5 締固め工法の改良率 a_s

2.4. ドレーン工法

ドレーン工法については 9 事例を収集した。

全てのケースについて、ドレーン材は 7 号砕石、ドレーン径は 0.5m、打設形状は正方形配置であった。ドレーンの打設間隔は 1.0~1.8m の範囲であった (図-2.6)。

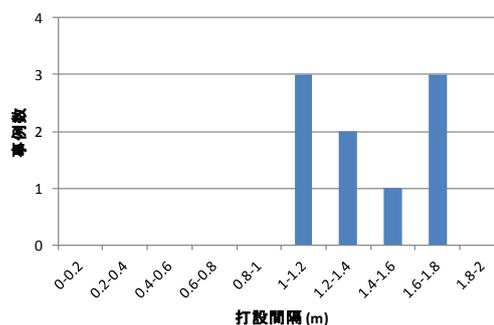


図-2.6 ドレーンの打設間隔 S

2.5. 固結工法

固結工法については 12 事例を収集した。

固結工法の打設形状は、全ての事例について格子状であった。改良強度 q_{ua} は 200~280kN/m² が 3 事例、490~600kN/m² が 6 事例、無回答が 3 事例であった。図-2.7 に示す改良体の寸法との関係を見ると、 $q_{ua} = 200 \sim 280 \text{kN/m}^2$ の事例は改良体の深度が 15m 以下、改良幅が 6m 以下と比較的寸法の小さなものに限定されている。

改良率は 50~74% の範囲であった。パイル径は 0.7~1.5m の範囲にあるが、1.0m のものが 9 事例と多数を占めていた。ラップ長は 0.2m のものがほとんどであったが、1 事例のみ、0.086m のケースがあった。

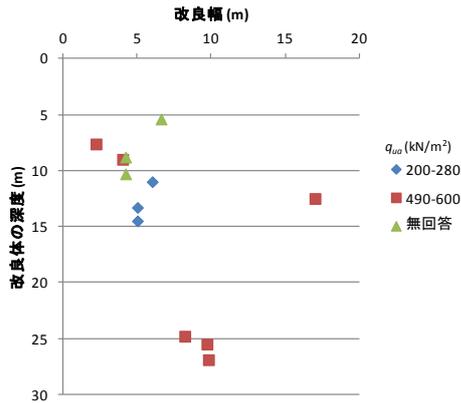


図-2.7 改良体の寸法と設計強度 q_{u0} の関係

2.6. 鋼材を用いた工法

鋼材の種類はいずれも鋼矢板であり、鋼管杭を用いている事例はなかった。また、いずれも自立式であり、控え式、アースアンカー式等の事例は見られなかった。

鋼材の規格を図-2.8、鋼矢板の型を図-2.9に示す。鋼材の規格はSY295が8事例と大半を占めており、SYW390が2事例、無回答が2事例であった。鋼矢板の型式はⅡ～Ⅳw型と多様である。

排水機能の有無については、有、無がいずれも6事例ずつであった。排水部材の断面寸法は無回答の1ケースを除き全て0.15×0.075mであり、排水部材の設置方向は自由地盤側が3ケース、両側が2ケース、無回答が1ケースであった。

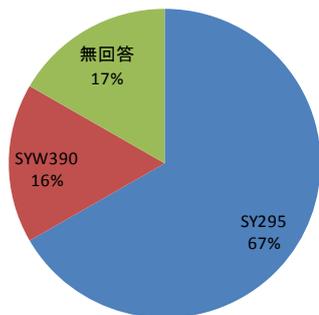


図-2.8 鋼材の規格

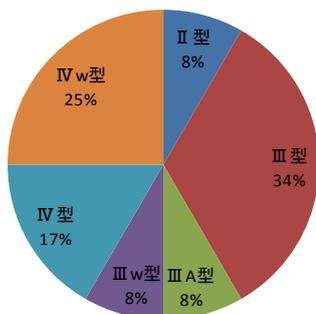


図-2.9 鋼矢板の型

3. 対策工が効果を発揮した事例に関する調査・解析

3.1. 東北地方太平洋沖地震を受けた対策済み堤防の全体状況

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、東北地方、関東地方の広域にわたって強い地震動が観測された。耐震対策がなされた堤防が強い地震動を受けた事例も存在するが、結果としてはいずれの箇所についても堤防に顕著な変状が生じることはなく、対策工法が効果を発揮したものと考えられる。

図-3.1、写真-3.1に代表的な対策箇所の断面図、被災後の状況を示す。当該箇所では川裏側の尻部にグラベルドレーンによる液状化対策が実施されている。被災後の状況から、目立った変状は認められていない。

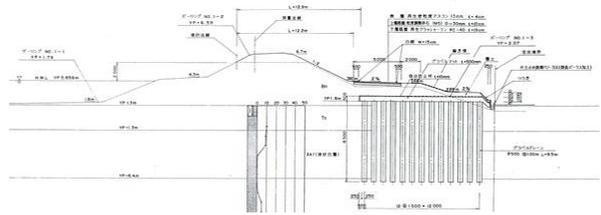


図-3.1 利根川右岸 27.75k-51m～28.0k-1m における断面図（グラベルドレーンによる対策）²⁾



写真-3.1 液状化対策実施箇所の状況（利根川右岸 27.75k-51m～28.0k-1m）²⁾

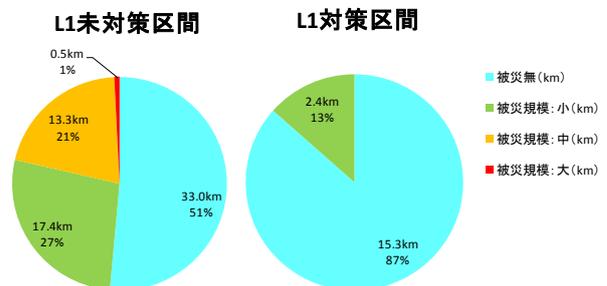


図-3.2 レベル1地震動に対する要対策区間における堤防の被災状況²⁾

図-3.2は、中規模地震動に対する耐震点検により対策が必要と判定された箇所のうち、対策済み箇所と未対策箇所における、今回の地震における被災程度の割合を整

理したものである。未対策箇所においては何らかの被災が49%に生じ、大規模および中規模被災を合わせて22%程度生じているのに対し、対策箇所では小規模被災が13%生じているのみで、大規模、中規模被災は生じていない。今回の地震では、一部の地域ではレベル1地震動を大きく超える地震動が観測された地域もあるが、兵庫県南部地震以降に進められてきたレベル1地震動に対する液状化対策が、今回の地震に対して効果を発揮したといえると考えられる。

この他にも、耐震対策ではなく、漏水対策として設置されていた遮水矢板が、堤防の変状を抑制したと見られる事例も数多く見受けられた。いずれにせよ、実際に発生した大規模地震の結果は、現在の堤防の液状化対策工法の設計法には大きな安全余裕が存在することを強く示唆するものであった。

以降では、このような堤防の中からいくつかの代表例を選び、解析的検討を行った結果を示す。

3.2. 効果を発揮した対策工に関する安定計算

堤防の変状を抑制した矢板工を対象に、従来設計法で用いられる安定計算法を適用した試算を行った結果を示す。計算対象とした堤防の断面図を図-3.3に示す。本地点では、天端の沈下、縦断亀裂や裏のり尻のはらみ出しが確認されているが、表のり尻付近には遮水矢板が打設されており、川表側での変状は認められなかった。

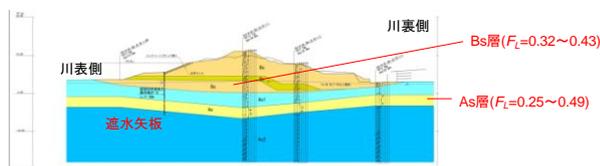


図-3.3 矢板の安定計算を行った堤防の断面図

液状化を生じうる砂質土層としては、堤体 (Bs 層) の下部と基礎地盤の As 層であり、近傍の強震記録に基づいて液状化判定を行うと、それぞれ $F_L = 0.32 \sim 0.43$, $F_L = 0.25 \sim 0.49$ が得られ、いずれも液状化が生じると判定される。

これに対し、従来設計法における安定計算法、すなわち、液状化が生じる層ではほぼ等方応力状態となることに起因して生じる漸増成分土圧と、液状化した土の地震時動水圧に対応した振動成分土圧の両者を作用させる、いわゆる土水圧法を適用した。計算は3ケースについて実施し、各ケースの計算条件は、Case1: Bs層とAs層の全てに液状化が生じると考えたもの、Case2: Bs層のみに液状化が生じると考えたもの、Case3: Bs層の上半分程度のみ液状化が生じると考えたものである。

安定計算の結果、矢板頭部の水平変位量として、Case1

で2272.2cm, Case2で15.3cm, Case3で4.6cmが得られた。実際に本地点の表のり尻に生じた水平変位量は明らかではないが、少なくともCase1の計算結果は実際の地震後の状況と大きく乖離している。このことから、従来設計法で用いられている液状化判定、あるいは安定計算の方法に大きな安全余裕が存在することが分かる。

3.3. 効果を発揮した対策工に関する有効応力解析

3.3.1 解析対象とした堤防

次に、地震による堤防の変状を抑制した対策工を対象に、有効応力解析を行った結果を示す。本報では、小貝川右岸31.8kp付近(上蛇地先)に関する解析結果を示す。被災状況を図-3.4に示す。本地点は、堤内地盤に三日月湖が残存していることから旧河道であるは明らかであり、現堤防と旧河道が交差する箇所付近において局所的に、天端の陥没、天端から裏のりにわたる縦断亀裂等の変状が生じた。天端の沈下量は最も大きな箇所でも40cm程度である。また、堤内側の三日月湖の矢板護岸に大きな残留水平変位が生じたが、一方で、川表側には顕著な変状が確認されず、変状は川裏側に集中して生じていた。

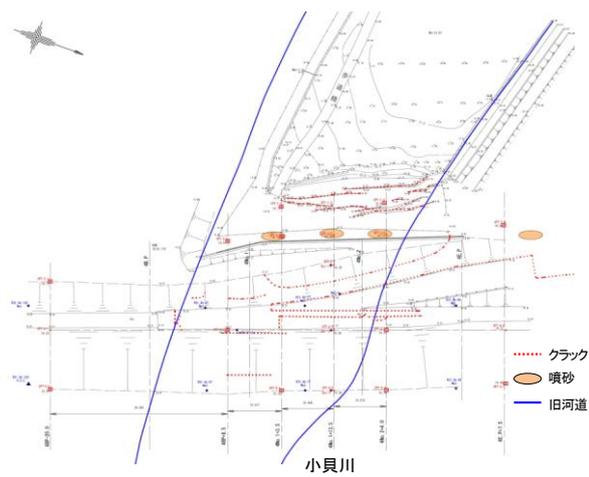
図-3.5に示す地質断面図のうち、Bs層は旧河道を埋めた際の埋土であり、その下に河川の氾濫による堆積物と見られるAs層が存在する。地震後に裏のり尻付近に噴砂痕が見られたことから、Bs層あるいはAs層に液状化が生じたものと考えられる。表のり尻には遮水矢板(II型, $L=12.5\text{m}$)が設置されている。これは耐震性の向上を意図して設置されたものではないが、液状化が生じたBs層あるいはAs層が川表側~川裏側にかけて広く分布する一方で、川表側に顕著な変状が生じなかったことから考えると、遮水矢板が川表側への変状を抑制したのと考えられる。

3.3.2 解析手法

解析には、土・水連成弾塑性有限要素解析コードLIQCAを用いた。砂質土層には砂の弾塑性構成モデル、粘性土層には粘土の粘弾塑性構成モデルを適用した。土の材料定数の設定にあたっては、要素シミュレーション(数値計算の上で行う室内土質試験)を行い、当該地点で採取した試料の非排水繰返し三軸試験結果のほか、岩崎・龍岡¹⁾、谷本ら⁴⁾等の試験データに概ね適合するように設定した。

矢板は弾性はり要素としてモデル化した。はり要素と周辺地盤のメッシュの間には、ジョイント要素を配置することはせず、節点を共有させた。

解析領域の側方および下面の境界条件は粘性境界、非排水境界とした。また、矢板の周囲は非排水境界とし、地下水位上面は排水境界とした。



(a) 平面図



(b) 天端付近の状況
図-3.4 被災状況

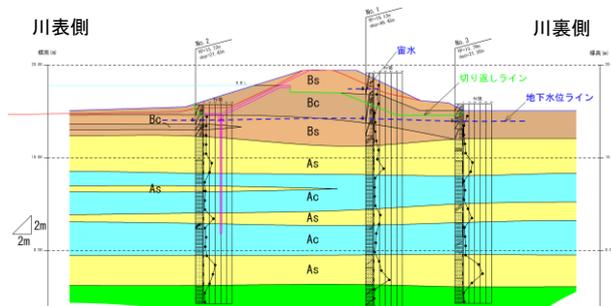


図-3.5 地質断面図

入力地震動は、本地点に比較的近い KiK-NET 石下⁵⁾で観測された2011年東北地方太平洋沖地震(本震)の地震記録から、吉田・末富が提案する等価線形化法 DYNEQ⁶⁾により工学的基盤面における地震動波形を算出し、これを解析領域の下面に入力した。

解析ケースは、川表側の矢板の条件を3とおりに変化させた3ケースとした。すなわち、Case1は当時の遮水矢板(II型, L=12.5m)がある場合、Case2は遮水矢板が設けられていなかった場合、Case3は液状化対策として設計された鋼材が設けられていたものと仮定した場合の3パターンである。Case3は河川堤防の液状化対策工法設

計・施工マニュアル⁷⁾⁸⁾に基づいて設計したものであり、結果として鋼材の諸元は全長 25.5m の鋼管矢板 (L75×75×9 900-16) となった。

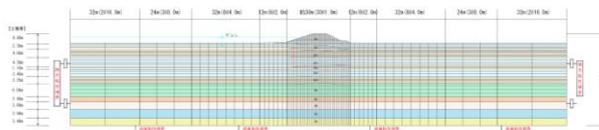
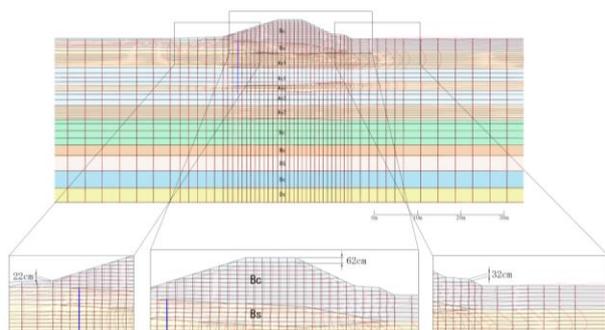


図-3.6 解析モデル

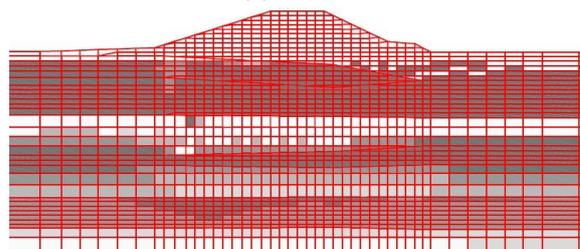
3.3.3 被災状況の再現および試算の結果

Case1の解析結果を図-3.7に示す。図-3.7(b)より、Bs層, As1層, As2層の過剰間隙水圧が著しく上昇し、これらの土層に液状化が生じていることが分かる。川表側では、旧河道の埋土のうち砂質土であるBs層が厚く分布し、液状化層厚が大きいものの、Bs層, As1層が堤防の外側にはらみ出すような変形が小さく、遮水矢板が変形を抑制している。一方、川裏側では、液状化したAs1層が堤防の外側にはらみ出すような変形が大きく、結果として、表のりよりも裏のりの方が大きな残留変位が生じる結果となった。天端の沈下量は68cmと算出され、実測値の40cmと比べても概ね一致した。

これに対し、遮水矢板がない状態を想定したCase2、液状化対策として25.5mの鋼管矢板(L75×75×9 900-16)が設置された状態を想定したCase3の解析結果をそれぞれ図-3.8図-3.9に示す。Case2では、As1層が川表側においても堤防の外側に大きくはらみ出すように変形し、結果として天端の沈下量はCase1より大きくなっている。

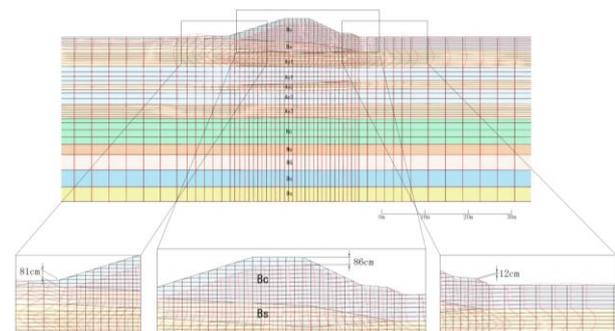


(a) 変形図

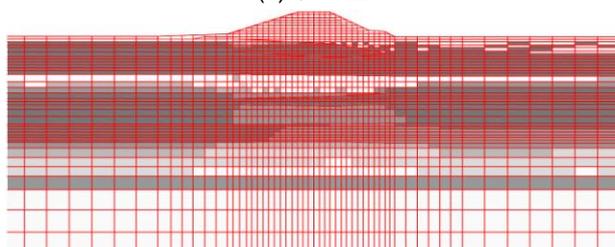


(b) 過剰間隙水圧比の最大値分布

図-3.7 Case1の解析結果

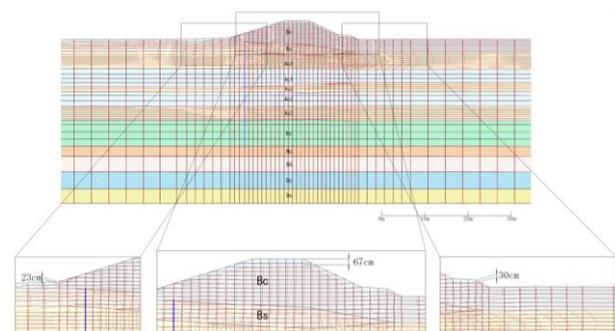


(a) 変形図

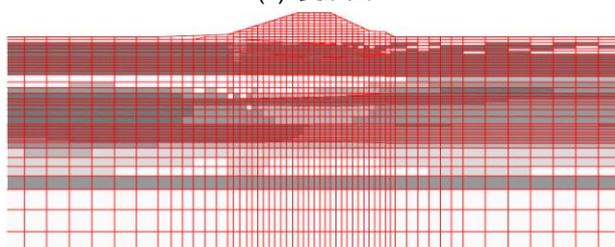


(b) 過剰間隙水圧比の最大値分布

図-3.8 Case2の解析結果



(a) 変形図



(b) 過剰間隙水圧比の最大値分布

図-3.9 Case3の解析結果

これは、表のり尻に設置されていた遮水矢板が、基礎地盤の側方伸張変形を抑制する効果があったことを意味する。写真-3.2は、本堤防の応急復旧として、表のりの表土の切り返しを行っている状況であるが、遮水矢板の設置位置から川側（写真の右側）の護岸上面がわずかに隆起している状況が見て取れる。この様子から、実際にも堤体直下の地盤が側方に伸張変形しようとし、これを遮水矢板が川側の地盤の受働抵抗を得て抑制したものと考

えられる。



写真-3.2 応急復旧時における表のり尻付近の状況

次に、遮水矢板の代わりに鋼管矢板が設けられていたとした Case3 の解析結果を見ると、天端の沈下量、変形モードともに、現況断面の Case1 とほぼ同様であることが分かる。これは、中規模地震動を考慮して行うこれまでの液状化対策工法の設計法に、非常に大きな安全余裕があることを意味し、設計法の合理化の余地があると言える。

3.4. まとめ

東北地方太平洋沖地震における実事例とその解析結果、あるいは、過年度に実施した遠心実験の結果を踏まえると、従来設計法で設計された耐震対策工は大きな安全余裕を有しており、レベル2地震動に対しても十分な耐震性を有しているものと結論付けることができる。

しかし、本研究による検討結果は、現行の液状化判定法や対策工の安定計算法など、耐震対策工の設計法に改善の余地があることを示唆するものでもあった。当面、耐震対策を新たに進めていくにあたって従来設計法を適用していくことは可能であると考えられるが、設計法の改善に向けた研究を引き続き進めていくことが必要である。

4. 対策済み堤防の再補強に関する検討

4.1. 再補強の方法

前章までの検討結果より、一般には対策済み堤防に対して追加対策を実施することの必要性は必ずしも高くはない。しかし、個々の現場における特殊な状況等のため再補強が必要と判断されるケースや、新たに対策を実施

する場合でも対策工設計のさらなる合理化を図るためのヒントを得ることを目的として、本研究では、対策済み堤防に対する再補強の方法について検討を行った。

対策済み堤防の再補強の方法としては、大別すると、①堤体直下の地盤改良を行う方法、②のり尻に追加対策工を設ける方法の2つが挙げられる。以下、これらの方法の詳細について述べる。

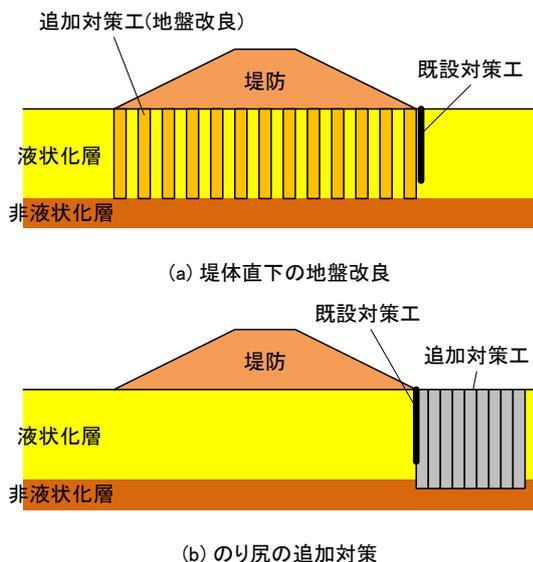


図-4.2 対策済み堤防の再補強の方法

4.2 堤体直下の地盤改良

堤体直下の液状化層に地盤改良を行い、液状化の発生を抑制することで、堤防の沈下等の発生を抑制する方法である。堤体直下の地盤の液状化に伴う側方伸張変形をのり尻で抑制する従来の対策工法とは異なり、原因となる堤体直下の地盤の液状化を抑制することで側方伸張変形自体を生じさせないため、確実な対策効果が期待される。

主として適用可能な工法としては、締固め工法および固結工法が考えられる。ドレーン工法については、地震時に液状化層から排出された間隙水が堤体下部に集中して流入するなど、堤体の地震時安定性に悪影響を及ぼすことが懸念されるため、適用には十分な注意が必要となる。確実な効果を得るための改良範囲の設定方法としては、改良幅を両のり尻間(堤防の敷幅)とし、改良深度を最深部の液状化層の下面とすることになる。こうすれば、改良範囲内における液状化を抑制するような改良率等の設定を行うだけで、堤防の地震時安定性が得られることになり、設計も極めて容易となる。

想定される一般的な施工手順としては、図-4.1 および次のとおりである。

(1) 川表側に二重矢板、土のう等による仮締切りを設け

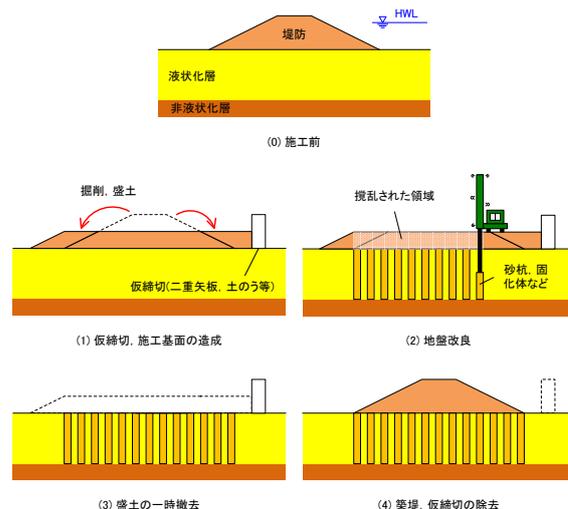


図-4.1 堤体直下の地盤改良の施工手順

- る。また、盛土の上部を掘削して両のり尻付近に盛土を行うことで、平坦な施工基面を造成する。
- (2) 施工基面上から液状化層の改良を行う。このとき、盛土部には施工によって攪乱された領域が残存する。
- (3)~(4) 攪乱領域が残存する盛土の切り返しを行い、仮締切りを撤去する。

一般的な固結工法のように基礎地盤の透水性を低下させる工法を適用する場合は、堤体内に浸透した水が排出されにくくなり、堤体内に高い浸潤面が形成されることも考えられるため、必要に応じて裏のり尻部にドレーン工を設けるといった配慮も必要となる。

一般に、締固め改良や固化改良(深層混合処理工法、浅層混合処理工法)を行う場合は、土被りのごく浅い位置(一般に2~3m程度)では地盤の盛り上がりやゆるみが生じるため、十分な改良を行うことができない。施工基面を基礎地盤上面より上方に設けるのはこのためである。このように十分に改良されない領域は、施工により攪乱された領域として残存するため、このまま盛土を行うと耐浸透性が低下することが懸念される。このため、地盤改良の実施後に切り返しを行うことが必要となる。

前述のように確実な対策効果が得られ、設計が容易である一方で、大規模な土工事を必要とすること、改良範囲が大きくなることから、経済性の観点からは必ずしも有利にならない場合もあると考えられる。この点を合理化するため、改良範囲をどこまで縮減することができるかという問題である。例えば、改良範囲の下にある程度の液状化層を残すことや、複数の液状化層がある場合に中間非液状化層に改良体を着底することで十分な対策効果を得ることができるかについて、今後、検証していくことが必要である。また、のり面が緩勾配で敷幅が大き

表-4.1 既設対策工とのり尻の追加対策工の組合せ

		追加対策工			
		締固め	ドレーン	固化	鋼材
既設対策工	締固め	△	○	○	○
	ドレーン	△	○	○	○
	固化	×	×	△	○
	鋼材	○	○	○	○

○: 適用可能、△: 条件によっては適用可能、×: 適用不可能

い堤防に対して改良幅を縮小させたときにどのような不具合が生じるかについても、今後の課題である。

この他、液状化層が非常に浅い位置のみに限定的に存在し、浅層混合処理工法を適用する場合に、改良体が非常に薄い版状となるケースが考えられ、このような改良体が盛土の自重や地震の影響等によって内部破壊を生じることも考えられる。非常に薄い版状の改良体の内部破壊が堤防機能に悪影響を及ぼすかどうか、悪影響を及ぼすのであればどの程度の改良層厚を確保すべきかといった点も、今後検討すべき課題である。

4.3. のり尻に追加対策工を設ける方法

のり尻に追加対策工を設ける場合、既設対策工と追加対策工の工法の組合せにより、適・不適がある。これを表4.1に整理した。

既設対策工が締固め工法やドレーン工法の場合は、地盤を固化させているわけではないため、追加対策の実施が比較的容易である。一方、既設対策工が固結工法の場合、強度が大きいため撤去・破壊することが難しく、また、一定の改良幅を有するため追加対策工を施工する場所がないため、追加対策の実施に困難を伴うことが分かる。既設対策工が鋼材を用いた工法の場合は、対策工の幅が非常に小さいことから、用地制限がなければ追加対策の実施は容易である。

追加対策工の観点から見ると、鋼材を用いた工法は、対策工の幅が小さいことから、どのような既設対策工に対しても比較的適用しやすい。また、固結工法については、既設対策工を破壊しながら新たに改良することも可能であるため、比較的適用しやすい。一方、締固め工法やドレーン工法については、すでに対策された領域内に適用してもさらなる対策効果を発揮することが期待できないことから、比較的適用しにくい。

5. まとめ

本研究は、兵庫県南部地震以降に進められた河川堤防の耐震対策工について、今日的に考慮することが求められるレベル2地震動に対する対策効果の再評価、耐震性

が不足すると判断された場合の再補強の方法について検討を行うものである。得られた知見の概略をまとめると、以下のとおりである。

- 既設対策工の適用実態を調査し、各対策工の適用方法、寸法、仕様等を整理した。この結果は、対策済み堤防の耐震性に関する検討を進めていく上での重要な基礎資料となるものである。
- 東北地方太平洋沖地震において効果を発揮した堤防の対策工に関する解析を行った。その結果、のり尻部に設置された遮水矢板であっても、その有無によって堤防の変形量に差が生じ、遮水矢板が堤防の地震被害の軽減に寄与したと考えられること、仮に耐震対策工として鋼管矢板が設置されていたとした場合でも、遮水矢板が設置されている場合と対策効果に著しい差が生じないという結果が得られた。これは、対策工の設計法に大きな安全余裕があり、設計法に合理化の余地があることを示唆するものである。
- 対策済み堤防の再補強方法を2種類に大別し、それぞれについて、適用性、利点・難点、適用上の注意事項、今後の課題等を整理した。

参考文献

- 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・解説，2012.2.
- 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.
- 岩崎敏男，龍岡文夫，高木義和：地盤の動的変形特性に関する研究(II) -広範囲なひずみ領域における砂の動的変形特性，土木研究所報告，No.153，1980.3.
- 谷本俊輔，杉田秀樹，佐々木哲也，中島進：凍結試料から得られた複数のひずみレベルに対する液状化強度曲線の簡易推定式，日本地震工学会・大会-2008 梗概集，2008.
- 独立行政法人防災科学技術研究所：強震観測網 (K-NET, KiK-NET)
- 吉田望，末富岩雄：DYNEQ A computer program for DYNAMIC response of level ground by Equivalent linear method Version3.25，2004.9.
- 建設省土木研究所耐震技術研究センター動土質研究室：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.
- 建設省土木研究所耐震技術研究センター動土質研究室：河川堤防の液状化対策工法設計施工マニュアル (案) 部分改訂版 (設計編 鋼材を用いた対策工法)，1998.10.

RESEARCH ON RE-EVALUATION AND RE-RETROFITTING OF SEISMIC COUNTERMEASURED RIVER LEVEE

Abstract : After 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, The seismic countermeasure for river levee was advanced in the whole country. Construction method of the countermeasure performs installation of ground improvement or structure on the end of slope, and the countermeasure was designed in consideration of the middle-scale earthquake motion (Level 1 earthquake ground motion). On the other hand, recently, although evaluation of seismic performance for the levees against a large-scale earthquake motion (Level 2 earthquake ground motion) is advanced in the river which a country manages, it is unknown what seismic performance the levee by which countermeasures were taken by the conventional method has. This study examines re-evaluation of seismic performance and re-retrofitting method of seismic countermeasured river levee which was designed by the conventional method against large earthquake motion. In FY 2012, we examined arrangement of investigation results of the specifications of countermeasures designed by the conventional method, the numerical analysis about countermeasure which demonstrated the effect in the off the Off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, and re-retrofitting method of seismic countermeasured river levee.

Key Words : River levee, countermeasure for liquefaction, Level 2 earthquake ground motion