

河口部・地盤沈下地域における 早期効果発現のための地盤沈下対策

水井 涼

元 木曾川下流河川事務所 工務課（〒511-0002 三重県桑名市大字福島465）

現 中部地方整備局 企画部 技術管理課（〒460-0001 愛知県名古屋市中区三の丸2-5-1）

木曾三川下流部は、日本最大級のゼロメートル地帯に位置し、地震時には基礎地盤の液状化が生じやすい地域である。木曾川下流河川事務所管内では、将来発生が危惧される南海トラフ巨大地震に対し、地域の安全を確保するため、高潮区間全域で耐震対策を進めているが、コスト、施工性に課題があり、事業が長期化する恐れがあった。本稿では、これらの課題をかかえる中、対策効果の早期発現を目的に、近年実施してきた対策及び今後の対策方針を示す。

キーワード 液状化対策、天端直下改良、天端盛土、木曾三川下流部

1. はじめに

木曾三川下流部は、海面に近い標高を有する区域が多く、いわゆる日本最大級のゼロメートル地帯として知られている。1959年の伊勢湾台風来襲時には、堤防が複数箇所で破堤、広範囲で浸水被害が発生した。

伊勢湾台風と同規模の台風が来襲しても被害を生じさせないことを目的に復旧、築造された現在の高潮堤防であるが、基礎地盤の液状化層が厚く、今後発生が予測されている南海トラフ巨大地震発生時には広範囲で液状化、堤防沈下することが分かっている。

木曾川下流河川事務所では、こうした地域特性を踏まえつつ、地震時の被害最小化を目的として耐震対策事業を実施しているところであるが、早期事業効果発現、コスト等の観点から、課題が多い実情を抱えている。

2. 堤体構造および整備履歴の整理

木曾三川下流部の堤防は、伊勢湾台風被害の復旧をはじめ、地域の治水条件や社会的要請に応じて、長期間にわたり段階的な整備が進められてきた経緯を有している。そのため、堤体断面は、一様な構造となっておらず、使用材料、締固め状況の違い、旧護岸が存在するなど、堤体内部の性状には区間ごとの差異が生じている。

堤体内部に複数の施工年代に対応する層が存在することは地震時における応力伝達や変形の現れ方に影響を及ぼす可能性があるため、堤体挙動を検討する際の前提条件として整理しておくことが重要となる。

また、耐震対策事業として、地盤改良、天端盛土を実施している区間もあることから、これらの対策工の施工状況についても適切に照査等に反映する必要がある。

る。

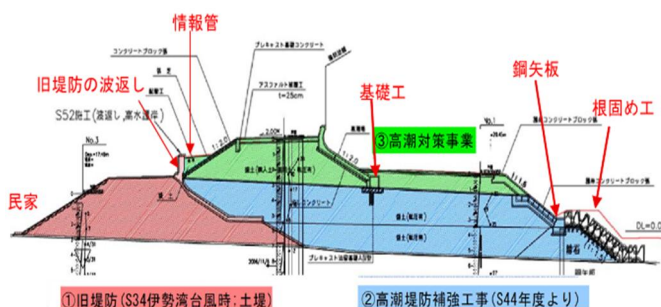


図-1 木曾三川下流部築堤履歴

3. 地震時に想定される堤体沈下と天端高への影響

地震時には、基礎地盤と堤体の構造に応じて、変形が生じることとなる。特に基礎地盤の液状化層が厚い場合には、堤体の沈下量は顕著となる。

こうした沈下は、地震動の規模や継続時間など、複数の要因が関係して現れるものであり、必ずしも一様な形で生じるとは限らない。

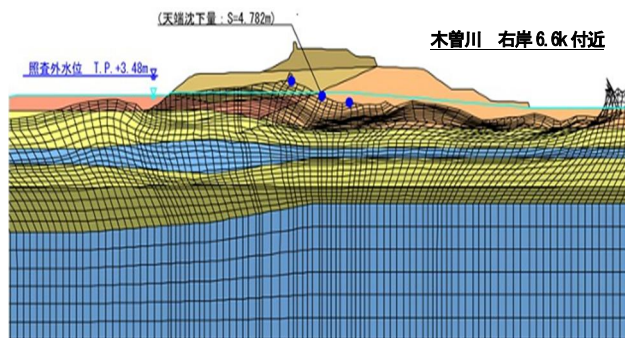


図-2 地震時変形モード

地震時の実現象を再現し、対策を検討することを考

えれば、前述した基礎地盤の性状、対策工の有無等を踏まえた上で、複数パターンの地震時の挙動を確認することが理想であるが、コスト面から現実的ではない。

このような実情は木曽川下流管内に限った事情ではなく、国土交通省では標準化された耐震照査に関する河川構造物の耐震性能照査指針、河川堤防の耐震点検マニュアル、河川堤防の液状化対策の手引き（以下、指針という。）を公表しており、直轄水系ではこれらに基づく照査、対策設計を実施することとしている。

4. 早期効果発現を踏まえた地盤沈下対策の考え方

(1) 地盤改良必要箇所の考え方

耐震対策必要箇所は、指針に基づき、地震時における沈下後堤防高を評価し、照査外水位と比較した結果、必要な高さが確保されない区間として抽出される。さらに、対策工法の選定にあたっては、想定する工法を反映した断面条件を設定し、静的自重変形解析（以下、ALIDという。）による解析を実施することで、地震後の沈下挙動を評価する。

その結果として、沈下後の堤防高が照査外水位を上回ることを確認した上で工法を決定し、その後、詳細設計へと進めることになる。このように、対策の必要性および有効性は、照査結果に基づき段階的に判断される。

(2) 過去に実施されてきた地盤改良対策の整理

木曽三川下流部では、これまで一部区間において、川表法尻および川裏法尻付近における地盤改良対策が段階的に実施されてきた。

これらの対策は、地震時に生じる地盤の剛性低下や支持力低下の影響を低減し、堤体全体の沈下および変形を抑制する考え方に基づくものである。

具体的には、深層混合処理工法や静的締固め砂杭工法（SAVE-CP工法）等が対象とする地盤条件や施工環境に応じて採用されてきた。

しかしながら、従来適用されてきた対策では、川表川裏の両側対策が必要となる場合が多く、改良対象範囲が広がることから施工量が増大し、結果として事業期間の長期化および事業費の増加が不可避となる。

このため、全区間に対して同様の対策を適用することは、現実的な制約（予算・期間）の中では困難であるという課題があった。さらに、特に川裏側に着目すると、堤内地には住宅地が近接しており、施工時の振動や変位による影響が懸念され、また、川裏には兼用道路が存在する区間も多く、施工機械の配置や交通確保の観点から施工条件が大きく制約される。このような社会条件および施工条件は、単に技術的な成立性のみではなく、実施可能性そのものに影響を与える要因である。

こうした状況を踏まえ、2020年度から2025年度にかけて、まずは天端盛土を実施することにより、堤防高を確保することとした。この対策は、地盤改良に比べて施工が比較的容易であり、事業効果を早期に発現させ

る観点から有効な手段である。

都市河川等では、堤防天端が兼用道路として使用される場合もあるが、木曽川下流管内においては、このような事情がなく、短期間で長区間の施工が可能であるといった現場実情からもこの対策が採用されている。その後、天端盛土による効果を反映した上で再度照査を行った結果、追加の地盤改良が必要な区間は約2.7 kmと整理された。この段階で、初期段階に比べて対策対象範囲が明確化され、より合理的な検討が可能となった。

(3) 検討結果を踏まえた対策位置の再整理

地震時に基礎地盤が液状化した場合、堤体が沈みこむと同時に基礎地盤は側方流動する。一方、川表川裏の両側対策を実施した場合、基礎地盤の変位が制限されることにより、堤体の沈下が抑制される。また、浸透対策という観点からも、地中に難透水性の柱を設置するともいえることから、川表からの地下水浸透によるパイピング等の可能性が低くなる。

ここで、沈下後堤防高を確保することのみを目的にすると、堤防天端直下で改良を施すことが最も効果的であると想定される。

両側対策の変形モードを図-3、天端直下対策の変形モードを図-4に示す。図-3はALIDによる地震後の変形図であり、対策していない天端直下が沈下し、堤防を川表、川裏の両側に押し出すような変形モードを示している。一方、図-4によると、地山状態で液状化抵抗が小さいBs1層に引っ張られるように川裏側に向かって沈下する傾向が確認できるが、堤防天端は変形量が小さく、越水に対する耐震性能は確保されることが確認できる。

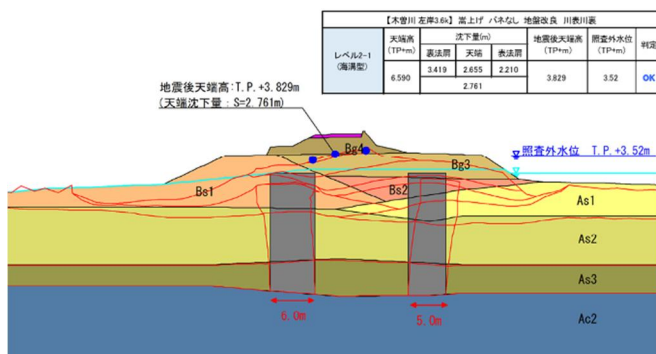


図-3 両側対策の変形モード

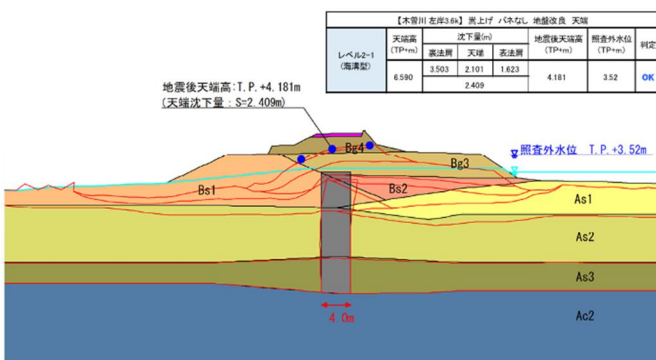


図-4 天端直下対策の変形モード

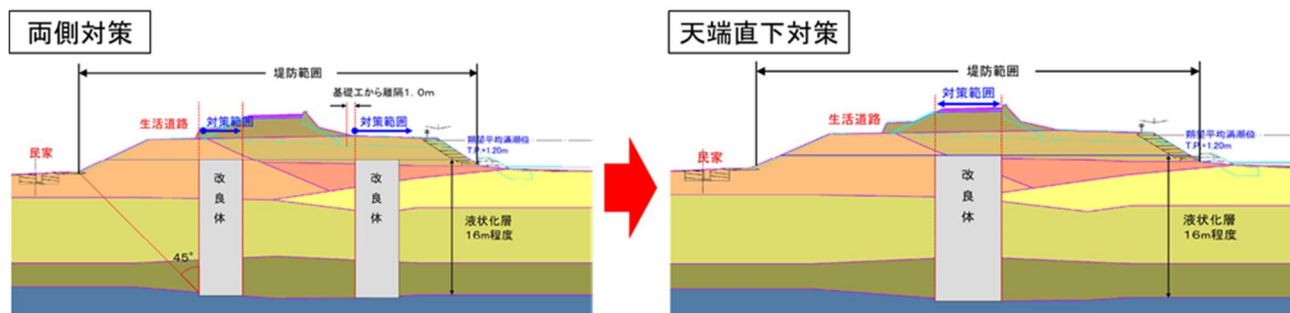


図-5 地盤改良の対策位置の変遷

「手引き」における堤体直下の対策は、堤防直下の全面改良（図-5）であり、最も高い効果を得られることは確実であるが施工には堤防撤去が必要となり、現実的ではない。3.にて述べたとおり、直轄河川では、「手引き」に基づく照査、対策工設計を実施することとしている。前述した天端直下対策は「手引き」にはない手法である。しかしながら前例がない訳ではなく、文献「河川堤防の調査・検討から維持管理まで」には、天端直下対策を行った事例と、留意点等が紹介されている。

この中で課題とされているのは、改良箇所の安全性は確保されるものの、未改良箇所では変位が大きくなるため、この差により堤防が外形を保持できない可能性が高いことであった。また、浸透性能の低下についても言及されている。

これまでの地盤沈下対策では、堤体全体の安定性を確保する観点から、川表側および川裏側の両側を対象とした地盤改良対策が主として検討・実施されてきた。

しかし、コスト、事業損失リスクといった課題が多く、対策が遅々として進まない実情があった。

本対象区間においては、高潮堤防として三面張構造が整備されていることから、浸透に対する抵抗性が確保されており、浸透破壊に対するリスクは相対的に低いといえる。

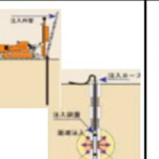
早期事業効果発現の観点からも、対策効果がより直接的に現れる位置に対して対策を集約することが望ましい。このことから、本研究では、対策位置を堤体中央部、すなわち天端直下に絞り込む考え方について整理を行う。

(4) 対策工法の比較検討

検討結果を踏まえ、地盤沈下対策として適用可能な工法について、比較検討を行った。ここでは、工法の網羅的な整理ではなく、堤防天端という限られた施工スペースでの実施であり、かつ、堤体土質の攪乱を最小限に抑えなければならないことを念頭に検討する。

耐震対策工法の比較にあたっては、表-1に示すとおり、静的締固め砂杭工法、深層混合処理工法（2軸・単軸・硬質地盤対応型）、砂圧入式静的締固め工法、注

表-1 耐震対策工法の比較

工法番号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
	静的締固め砂杭工法	深層混合処理工法 2軸	深層混合処理工法 単軸	深層混合処理工法 硬質地盤対応型	砂圧入式 静的締固め工法	注入固化工法	補助工法
		φ1600mm×2軸	φ1600mm	φ1600mm×2軸			オールケーシング
工 法							
施工機	・大型施工機 ・狭隘地での適用は困難	・大型施工機 ・狭隘地での適用は困難	・大型施工機 ・狭隘地での適用は困難	・大型施工機 ・狭隘地での適用は困難	・小型施工機 ・斜め施工も可能	・小型施工機 ・斜め施工も可能	・大型施工機 ・狭隘地での適用は困難
施工時変位	・周辺変位の影響あり ・施設の近接部は変位対策が必要	・施工に伴う周辺変位は小さい	・施工に伴う周辺変位は小さい	・施工に伴う周辺変位は小さい	・周辺変位の影響あり ・施設の近接部は変位対策が必要	・ほとんどない	・ほとんどない
支障物適用範囲	・適用不可	・適用不可	・適用不可	・適用の可能性あり （地中支障物の径、内容、量によって、施工可否の検討が必要）	・適用可	・適用可	—
概略事業費	1,796 千円/m	2,673 千円/m	3,001 千円/m	4,999 千円/m	5,950 千円/m	9,678 千円/m	16,665 千円/m
当該地への適用	×	×	×	×	○	○	×
	・天端等の狭隘な箇所では適用不可 ・旧堤等の支障物は貫入不能	・天端等の狭隘な箇所では適用不可 ・旧堤等の支障物は貫入不能	・天端等の狭隘な箇所では適用不可 ・旧堤等の支障物は貫入不能	・天端等の狭隘な箇所では適用不可 ・旧堤等の支障物は貫入不能			・天端等の狭隘な箇所では適用不可

入固化工法等、複数の地盤改良工法について、施工機械の規模、施工時の周辺変位、支障物への適用性、概略事業費および当該地への適用性といった観点から整理を行った。

その結果、大型施工機を用いる工法では、施工に伴う周辺地盤への影響や、天端部などの狭隘な箇所での施工性に制約があることが確認された。

一方、小型施工機を用いる工法では、施工時の周辺変位が小さい、あるいはほとんど生じないとされており、狭隘な施工条件への適用性に優れることが示されている。

特に、天端部を対象とした地盤改良を検討する場合には、天端等の狭隘な箇所での施工可能であること、施工時の周辺変位が小さいこと、施工量を抑制できることが重要な選定条件となる。

これらの条件を踏まえて比較検討を行った結果、天端直下を対象とした地盤改良工法の中でも、施工性および周辺環境への影響に配慮した工法として、砂圧入式静的締固め工法（SAVE-SP工法）が適していると判断した。

本研究では、耐震対策工法の比較結果を踏まえ、早期効果発現が求められる条件下における対策工法として SAVE-SP工法を選定した。

(5) 天端直下改良による早期効果発現性

上記の比較検討を踏まえ、本研究では、天端直下を対象とした地盤改良工法である SAVE-SP 工法に着目する。

SAVE-SP工法は、地盤中に水、流動化剤、遅効性塑性化剤とともに混練された砂（流動化砂）を所定の深度まで貫入されたロッドの先端までポンプ圧送し、地中に排出・圧入し地盤を締固める工法である。

本工法は、対策範囲を天端直下に限定できることから、施工範囲を合理的に設定することが可能となる。

天端直下改良を適用することにより、従来の川表・川裏の両側を対象とした対策と比較して、対策範囲を合理的に絞り込むことが可能となる。

その結果、検討条件によっては施工量の大幅な縮減が図られる。本研究で対象とした条件においては、対策位置の見直しにより、施工量が概ね半減する結果となっている。施工量の縮減は、施工期間の短縮や施工工程の簡素化につながり、地盤改良効果が発現するまでの時間を短縮する要因となる。

このことは、早期効果発現性の向上に直接的に寄与するものと考えられる。

(6) 早期効果発現の観点から整理した地盤沈下対策

以上の検討結果を踏まえると、天端直下改良

（SAVE-SP 工法）への対策シフトは、天端高に対して影響の大きい部位に対策を集中させるとともに、施工量の縮減を通じて対策効果の早期発現を図る考え方として整理できる。

地盤沈下対策は、前章までに整理した沈下挙動および天端高への影響を前提とし、早期に治水機能を確保するという観点から、対策位置および対策工法を再整理したものである。

天端直下改良を適用することにより、沈下抑制効果と施工性の両立が図られ、早期効果発現性の高い対策となることを示した。

5. まとめ

本論文では、木曾三川下流部の地域特性および堤体構造、これまでの整備履歴を踏まえ、堤体の高さを安定的に維持していくという観点から、地震時に生じ得る堤体沈下とその抑制について整理を行った。

本地域は、日本最大級のゼロメートル地帯を有し、伊勢湾台風をはじめとする過去の災害を契機として段階的に堤防整備が進められてきた経緯を持つ。

一方で、築堤履歴が複雑であることや、基礎地盤に液状化が懸念される層が分布していることから、地震時の堤体挙動については引き続き検討が必要とされている。

堤体沈下は、地震時の地盤挙動に起因して生じる可能性があり、その現れ方によっては天端高に影響を及ぼすことがある。特に、沈下が地震直後から比較的短期間に現れる場合には、堤防の管理上の判断に関係する場面も想定される。

このため、沈下挙動をできるだけ早期に抑制するという視点は、堤体高さの維持を考えるうえで重要な検討要素の一つといえる。

木曾三川下流部では、これまで天端盛土と並行して、川表側および川裏側において地盤改良が段階的に実施されてきた。これらの地盤改良は、浸透対策や変形抑制など、区間ごとの課題に応じて導入されてきたものであり、堤防整備の中で継続的に位置づけられてきた取り組みである。

また、地盤改良を検討する際には、堤防裏側に住宅地や既存構造物が連続して分布している地域条件を考慮することも重要となる。沈下抑制の効果を期待しつつ、周辺環境への影響に配慮した改良位置や工法の検討が求められる場面もあると考えられる。

このような条件を踏まえ、区間ごとの特性に応じた検討を行っていくことが、堤防の安定的な管理につながるものと考えられる。

以上の整理から、木曾三川下流部における堤体管理においては、地域特性や築堤履歴を前提としつつ、地震時の堤体沈下をどのように抑制し、天端高を安定的に維持していくかという視点が引き続き重要である。

本対策は、現時点において実施可能な範囲での合理的な対応を示したものであり、これをもって地盤改良対策が完了するものではない。

今後は、斜め打ち施工等の追加的手法を含め、対策

範囲の拡大や補完的な改良を段階的に検討していく必要がある。

一方で、限られた予算および期間の中で、優先度を明確にしながら対策を進めることは極めて重要である。

本研究で整理した手法は、そのような段階的整備の一つの考え方として位置づけられるものであり、実務における意思決定プロセスの一例を示すものである。

本論文で示した整理が、今後の地盤沈下対策を検討する際の基礎的な資料の一つとして活用されることを期待する。

謝辞：本研究を進めるにあたり、ご指導・ご助言をいただきました木曽川下流河川事務所 工務課の皆様に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) (国研)土木研究所 地質・地盤研究グループ土質・振動 チーム：土木研究所資料 河川堤防の液状化対策の手引き(改訂版)，R6.5
- 2) 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－Ⅱ.堤防編－，H28.3
- 3) 河川堤防の調査・検討から維持管理まで：公益社団法人地盤工学会