

旧吉野川の地震津波対策における 繰り返し非排水三軸試験及び振動式コーン試験 を活用したコスト縮減の取り組み

徳島河川国道事務所 流域治水課 宮内 俊晴
徳島河川国道事務所 流域治水課長 林 昌宏
徳島河川国道事務所 流域治水課 流域治水係長 池田 恭平

今後30年以内に発生する確率が約70%~80%とされる南海トラフ地震への対策として、旧吉野川、今切川の堤防について耐震対策を行う必要がある。早期の対策完了が望まれる一方で、耐震対策が必要な区間の延長が長く、改良規模が大きくなるため、コスト縮減及び工程短縮が必要となっている。この課題に対して現在進めている、土木研究所で開発中である振動式コーン試験の結果を用いた液状化判定を活用した、繰り返し非排水三軸試験による耐震対策設計の最適化の取組について報告する。

キーワード 耐震, 河川堤防, 液状化, 振動式コーン試験

1. はじめに

徳島河川国道事務所においては、旧吉野川、今切川の堤防について、平成23年に発生した東北地方太平洋沖地震を受けて既存の地震津波対策必要区間の見直しを行い、平成24年よりこの対策を進めている。この対策の中で、計画津波による被害を防止するため、液状化等により被災する可能性のある堤防については液状化対策を実施している。

令和5年6月現在、旧吉野川、今切川において「河川構造物の耐震性能照査指針・解説 II. 堤防編（国土交通省水管理・国土保全局治水課，H28.3）¹⁾」に基づく液状化の対策必要延長は約16 km 残っている（図-1 参照）。また、対策区間においては家屋連単地や工業団地が堤防背後に隣接し、高価な固結工法等の適用区間の延長が長くなることが想定されることから、対策に要する事業費は540億円程度（内、地盤改良工は約45%に相当）が見込まれ、現状の予算ベースで整

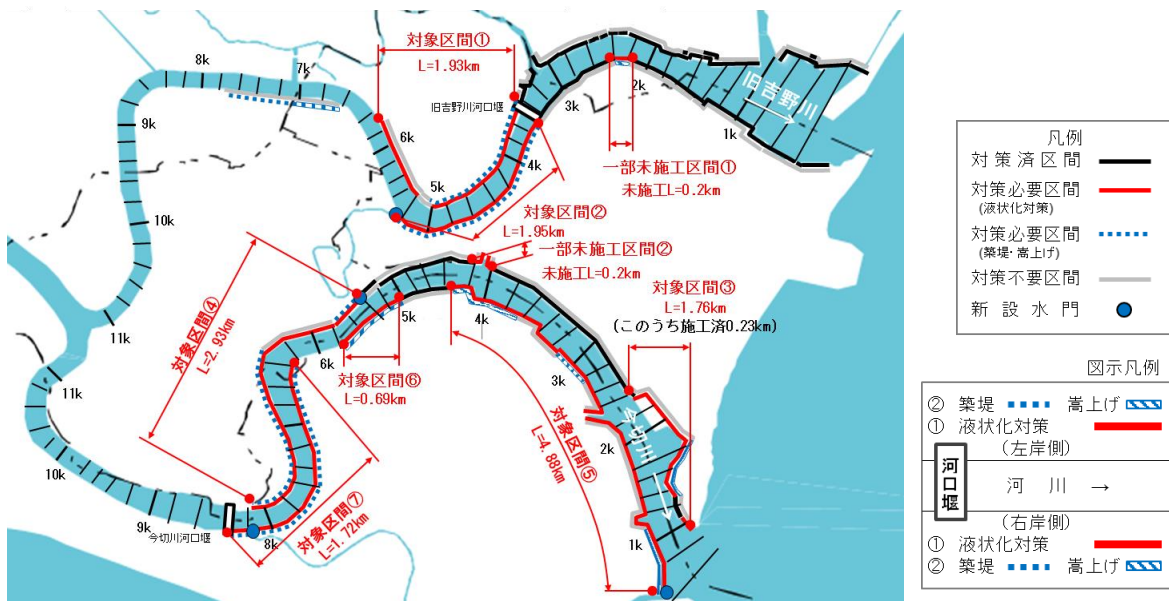


図-1 旧吉野川、今切川における耐震対策の状況

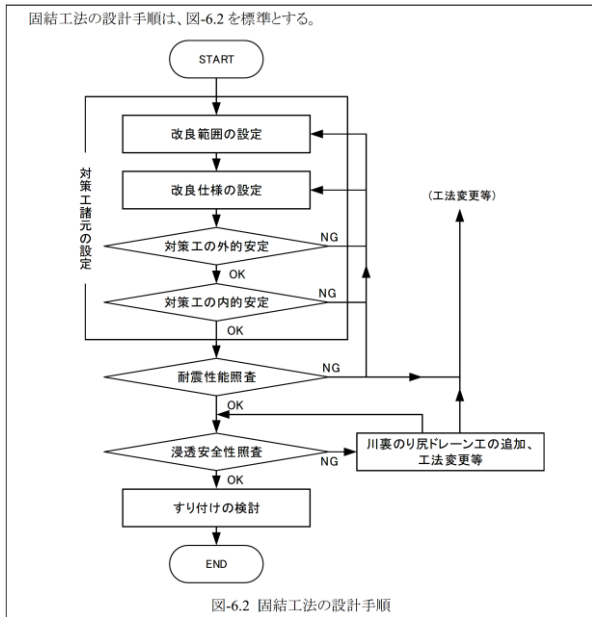


図-2 固結工法の設計手順（河川堤防の液状化対策の手引き（H28.3）³⁾ p.43）

備した場合に事業完了まで50年以上が必要となる。

徳島河川国道事務所においては耐震対策のコスト縮減及び工程短縮の課題に対し、「液状化判定方法の見直し」及び「新工法の採用」の二点から検討を行っている。本稿では、令和3年度より今切川において地質調査、検討に着手している前者の取組について報告する。

2. 液状化判定方法の見直しによる課題へのアプローチ

「液状化対策技術検討会議」検討成果（国土交通省液状化対策技術検討会議, H23.8）²⁾ においては、平成23年東北地方太平洋沖地震後に液状化判定法の検証及び今後の課題についてとりまとめている。この成果では、実際には液状化が発生していないにもかかわらず「液状化する」と判定されるケース（いわゆる空振り）が相当数確認され、検討を継続する必要性が指摘された一方で、実際に液状化が発生したものの「液状化しない」と判定されるケース（いわゆる見逃し）は確認されず、標準貫入試験結果（N値）を用いた液状化判定法について直ちに見直す必要性は低いと報告されている。

「河川堤防の液状化対策の手引き（国立研究開発法人土木研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム, H28.3）³⁾ においては、液状化強度比の算定はN値や細粒分含有率等を用いる簡便法を基本としているが、その手法の根拠となっている研究資料⁴⁾にお

いてもさらなる精度向上、合理化の余地が残されているとされている。また、この地域には、液状化の発生が懸念される厚い砂質土層(A2s)と、その下方にシルトを多く含む地層(A3sc)が存在する地点が多く、液状化対策を合理的に進めるためには、液状化対策工の下面深度をいかに見極めるか、すなわち、これらの地層境界付近における液状化特性をいかに精度よく把握できるかが重要となる。

以上より、簡便法に基づき過大に安全側に液状化判定が行われている区間がある場合、改良範囲の設定（図-2 参照）に用いる液状化判定の最適化により、非液状化層が増え、改良深度を縮小することで、事業費の縮減及び事業期間の短縮につながる事が期待できる。

3. 液状化判定の最適化の手法

簡便法においては、N値を用いて繰り返し三軸強度比を推定していることから、液状化判定を最適化するに当たり、繰り返し非排水三軸試験を用いる詳細な液状化判定を行うことが有効であると考えた。

ただし、繰り返し非排水三軸試験は標準貫入試験と比して高価である。加えて、繰り返し非排水三軸試験の結果に対しては試料採取時の乱れが強く影響するため、本業務においては砂質土に対し一般的に用いられるサンプリング方法であるトリプルサンプリングではなく、GPサンプリングを用いることとした。このサンプリング手法は、1本あたりの費用がトリプルサンプリングと比べて10倍以上と非常に高価であるため、対策必要延長が長大である旧吉野川、今切川において、1 m 毎の各深度に対して適用することは現実的でない。

このような課題に対応すべく、高品質なサンプルを用いた繰り返し非排水三軸試験を含む室内試験に

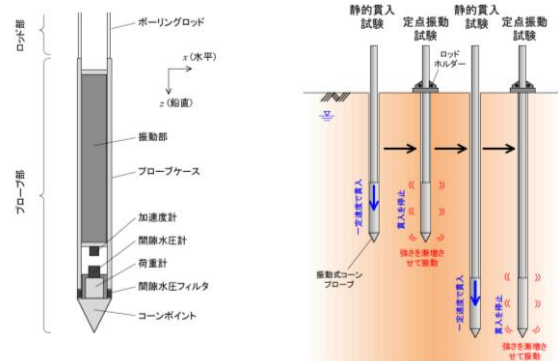


図-3 振動式コーンプローブの概要（左）及び振動式コーン試験の概念図（右）

代わり、これらを必要としない原位置での試験によって液状化強度比を求める手法「振動式コーン試験」の開発が現在、国立研究開発法人土木研究所で進められている。

振動式コーン試験とは、振動装置を内蔵したプローブを地中に圧入した後に振動させることで液状化を発生させ、液状化発生時の振動強さ等から液状化強度比を算出する原位置液状化試験法である（図-3参照）。

現状、振動式コーン試験については、得られた値の解析手法が内包する問題に起因したデータのばらつきが課題となっており、簡便法に代わる液状化強度比算出手法にその結果を用いるには十分な信頼性が得られていないが、少なくとも液状化の生じやすい地層、生じにくい地層の違いを計測データから明瞭に確認することができる。

4. 実施位置の選定とねらい

上記を踏まえ本業務においては、高価な繰り返し非排水三軸試験の実施位置を絞り込むために、簡便法によって過大となっている可能性がある位置の推定手法として、振動式コーン試験を活用することとした。

振動式コーン試験結果を用いてA2s層とA3sc層の境界付近における液状化層下面深度を探る。具体には、算出した液状化強度比及び簡便法による液状化強度比を用いてそれぞれ液状化判定を行い、両者を比較した際に簡便法によって過小なFL値が算出されていると考えられる位置を見出す。このようにして絞り込んだ位置に対して、液状化層下面深度を上方に設定できるか否かを検討するため、GPサンプリング、繰り返し非排水三軸試験を行うこととした。このうち、両者ともにFL値が1を上回る見込みのない位置や、

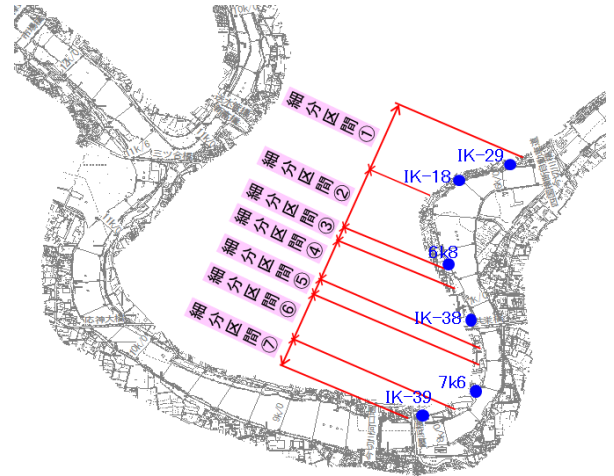


図-4 今切川左岸中島地区における振動式コーン試験実施箇所

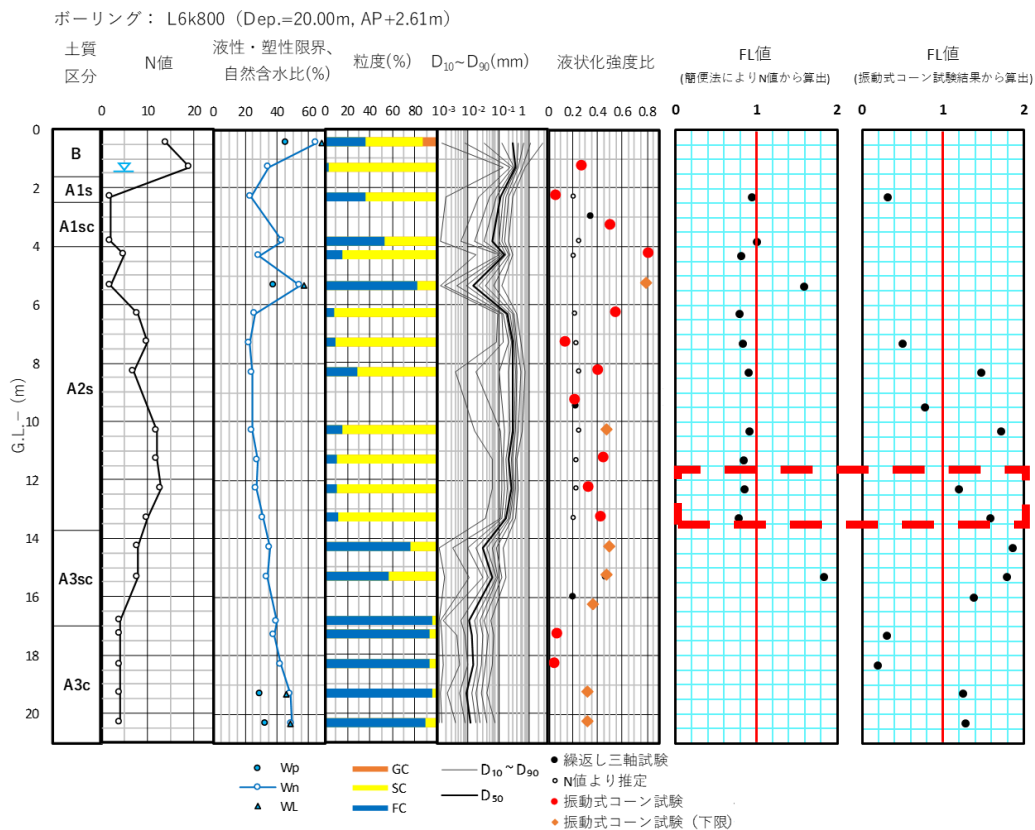


図-5 今切川 L6k800 地点におけるボーリング結果および FL 値

同位置より浅い位置については、改良深度の縮小に寄与しないため繰り返し非排水三軸試験を行わないこととした。

5. 液状化判定及び事業費の感度分析

今切川左岸の中島地区において、振動式コーン試験を実施した。試験の実施箇所を図-4に示す。また、今切川L6k800地点における液状化判定（FL値）について図-5に示す。改良深度に影響する下端から順にFL値を比較すると、A2s層下端からの2点、深度13.3 m及び12.3 mにおいて簡便法により安全側に液状化判定が行われている可能性が見て取れる。振動式コーン試験の結果を用いて算出したFL値がより真値に近い場合、当該深度において繰り返し非排水三軸試験を行って判定が覆り、改良深度を2 m程度浅くすることが期待できる。

続いて、事業費の縮減額の概略算出を行った。なお、令和5年6月時点において繰り返し非排水三軸試験の結果が出ていないため、振動式コーン試験による液状化判定を参考に、改良深度が浅くなった場合を仮定した。簡便法に基づく従来の杭長と期待延長の単価（表-6）の差から、細分区間毎の工事費縮減額を算出した結果、表-7の通りとなった。これを見ると、中島地区における工事費の縮減額は約6億円となることがわかり、これを旧吉野川、今切川全体の対象区間に当てはめると約33億円相当となる。中島地区における振動式コーン試験、繰り返し非排水三軸試験、GPサンプリング等に係る費用は、工事費縮減額の1%

表-6 事業費の感度分析に用いた改良体の単価

杭長	単価	備考
L=10m	104,100円/本	
L=11m	105,800円/本	
L=12m	122,100円/本	日当たり施工量の変わり目なので単価が大きく変わる。
L=13m	123,700円/本	
L=14m	145,600円/本	日当たり施工量の変わり目なので単価が大きく変わる。
L=15m	147,300円/本	

※スラリ-攪拌工法 杭径φ1300 単軸施工 セメント添加量0.12t/m

程度であり、液状化判定見直しのための追加費用を考慮した上でもコスト縮減が認められる。加えて、全ての位置において繰り返し非排水三軸試験及びGPサンプリングを行った場合の費用は工事費縮減額の13%程度であり、振動式コーン試験の活用によって、調査費が1%程度まで縮減できることとなった。

6. おわりに

令和5年6月時点における事業費の感度分析によって、簡便法に基づく液状化判定を最適化することにより工事費の縮減が見込める可能性を示した。今後、繰り返し非排水三軸試験の結果を用いて対策の改良深度を縮小することで、同対策におけるコスト縮減及び工程短縮を行うことが可能となる。

また、液状化判定方法の見直しと並行して新工法の採用の検討についても行い、さらなる対策のコスト縮減及び工程短縮を図ることで、旧吉野川、今切川における堤防の耐震化を進めることが求められる。

将来的には、振動式コーン試験及び非排水三軸試験の結果が蓄積されることで振動式コーン試験を用いた液状化判定の妥当性が示されれば、簡便法よりも適切で、繰り返し非排水三軸試験を用いるよりも安価な液状化判定法の確立が期待できる。

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II 堤防編,2016.
- 国土交通省液状化対策技術検討会議：「液状化対策技術検討会議」検討成果,2011.
- 国立研究開発法人土木研究所地質・地盤研究グループ 土質・振動チーム：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.
- 国立研究開発法人土木研究所：細粒分を含む砂の液状化強度の評価法に関する再検討，土木研究所資料，第4352号，2016.

表-7 今切川左岸中島地区における事業費の感度分析

区分	延長	使用Bor	杭長	期待延長	コスト縮減	m当たり杭本数	工事費縮減額
細分①	L=620m	IK-29、IK-18	L=15m	L=10m	43,200円/本	4.773本/m	1.28億円/式
細分②	L=580m	6k8	L=14m	L=12m	23,500円/本	4.773本/m	0.65億円/式
細分③	L=100m	IK-38	L=14m	L=10m	41,500円/本	4.773本/m	0.20億円/式
細分④	L=580m	IK-38	L=14m	L=10m	41,500円/本	4.773本/m	1.15億円/式
細分⑤	L=140m	IK-38	L=14m	L=10m	41,500円/本	4.773本/m	0.28億円/式
細分⑥	L=360m	7k6	L=12m	-	-	-	-
細分⑦	L=240m	IK-39	L=12m	-	-	-	-
直接工事費縮減額							3.56億円/式
工事費縮減額(×1.7)							6.05億円/式