

Air-des 工法による液状化対策の試験施工

～全国初となる河川堤防への適用性検証～

徳島河川国道事務所 流域治水課 橋田 水輝
徳島河川国道事務所 流域治水課長 道谷 健太郎
徳島河川国道事務所 流域治水係長 梅田 涼平

旧吉野川・今切川の河川堤防における耐震対策の必要延長は長く、事業費も膨大であることから、効果的・効率的な整備に向け、最新の知見を踏まえた対策工の検討が急務である。当事務所では、令和元年度に「旧吉野川・今切川 河川堤防の耐震対策に関する技術検討会」を設置し、議論を重ねてきた。

令和2年度に実施された第2回会議では、合理的対策工として空気注入不飽和化工法（以下 Air-des 工法）が提示され、今後の課題とされた。本稿では、令和7年度の実施を目指す Air-des 工法の試験施工計画およびモニタリング計画について報告する。

キーワード 河川堤防、液状化、耐震対策、空気注入不飽和化工法（Air-des 工法）

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、今後30年以内に高確率で発生するとされている南海トラフ地震に対し、津波による被災防止を目的として耐震対策を進めている。

令和6年5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）」に基づく液状化対策必要延長は約16km残されている（図-1）。今後は、高価な固結工法、鋼管工法などの適用区間が長大になると想定されており、対策完了までに要する総事業費は540億円程度が見込まれ、現状の予算ベース（約10億円/年）では事業完了までに約54年を要する試算となる。このように、河川堤防の耐震対策に係るコストおよび工期の縮減は、今後の河川管理における大きな課題である。

「旧吉野川・今切川 河川堤防の耐震対策に関する技術検討会」においては、これらの課題に対し「液状化判定方法の見直し」及び「新工法の採用」の二点から検討中である。本稿では、後者の取り組みのうち、令和7年度の試験施工を目指す Air-des 工法について報告する。

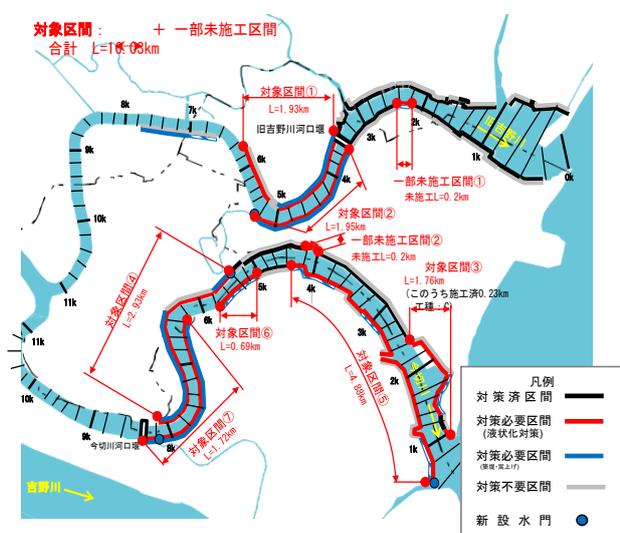


図-1 旧吉野川・今切川の耐震対策の現状

2. Air-des 工法の概要

Air-des 工法とは、液状化が発生する可能性がある飽和地盤に対して、空気を注入することで不飽和化を促し、液状化を抑制する技術である。間隙の5~10%程度を空気に置換することで、地盤の基本的な特性はそのままに、液状化抵抗のみを向上させる(図-2)。平成20年度より四国地方整備局を含めた産・官・学による共同開発が進められており、これまでに数度にわたる現場実証実験が行われてきた。

本工法は、空気の注入にボーリングマシンを使用し、既設構造物を供用したまま施工可能であるため、大規模な仮設や現堤防の撤去を必要とせず、従来の工法と比較してコスト及び工期の大幅な削減に寄与することが期待されている。しかし、これまでに河川堤防への施工を行った事例は見られず、適用性に関する知見は不足している。次項からは、本工法の河川堤防に対する適用性検証を目的とした試験施工計画について述べる。

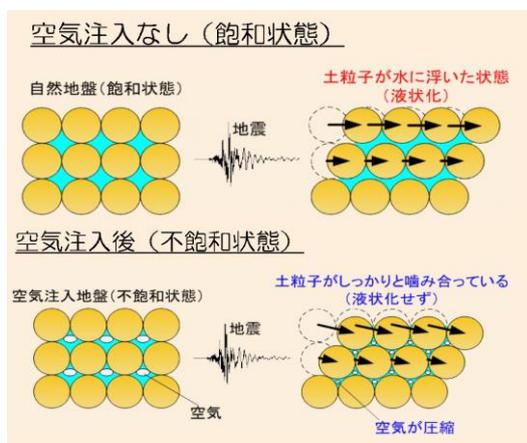


図-2 Air-des 工法による改良イメージ²⁾

3. 試験施工計画概要

(1) 試験施工の目的

前述の通り、本工法は過去にも実証実験を経てきたが、河川堤防への適用事例は未だ無く、「河川堤防の液状化対策の手引き」¹⁾にも具体的な記載は見られない。また、実用化にあたっては、地下水流動に伴う空気の長期持続性に関する知見の不足が課題とされている。本試験施工およびモニタリングは、本工法の早期実用化に向け、河川堤防への適用性の検証と、空気の長期持続性に関する知見の収集を行うものである。

(2) 施工箇所の選定

試験施工箇所は、施工の容易性およびコストを鑑み選出した。一次選定では現整備計画で対策を位置づけている区間を、二次選定では後背地に人家が連坦する区間等を除外した。また、施工箇所は旧吉野川・今切川の代表的な地層構成であることを条件とした。この結果、旧吉野川の左岸 4k800 が選定された。なお、残留変形解析手法(以下 ALID)による予測解析の結果、同箇所は L2-1 地震動に対して堤体の沈下が許容量を超過し、対策が必要であることが確認された。

(3) 試験施工方法・設計フロー

試験施工計画は Air-des 工法技術マニュアル³⁾に基づき策定した。注入圧力については、既設構造物への影響を考慮し、土の骨格構造を乱さない範囲内である静水圧+有効上載圧の1/2を上限とした。上

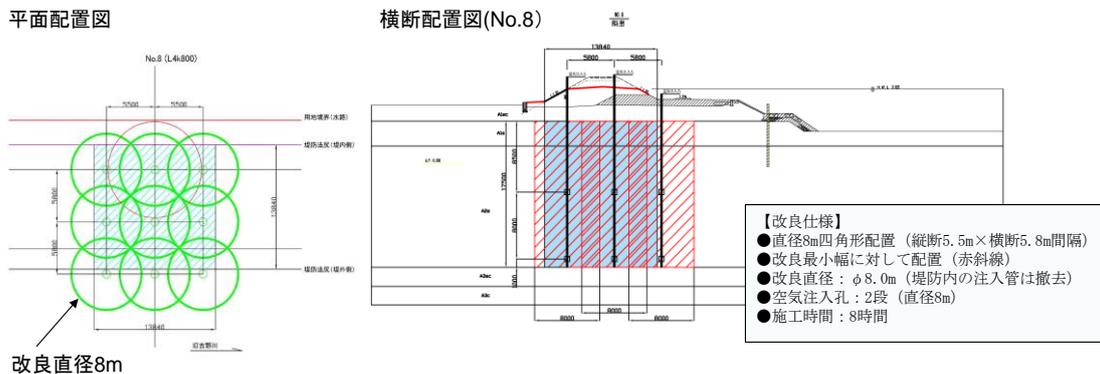


図-3 試験施工における改良範囲の平面・横断配置図

記注入圧力を元に、L1地震動に対する液状化安全率 (FL1=1.2) および必要飽和度 (L1地震動に対して液状化しないために必要な飽和度, $S_r = 99\%$) を設定した。保水性試験で算出した残留飽和度の結果から、設計飽和度 (L2-1地震動に対する耐震照査に用いる飽和度, $S_r = 95\%$) を設定した。改良領域は事務連絡に則り法尻間の液状化層 (A1s層, A2s層) とし、効果をALIDにより確認した。平面割り付けは改良直径8mを全9カ所、縦断・横断方向に未改良部が生じないように配置した (図-3)。その他空気注入諸元の設定には、気液二相流解析を使用した。本施工にあたっては、事前注入試験を実施し、空気注入諸元の妥当性を評価する。事前注入試験で問題が見られた場合、諸元を調整する。

4. 予測解析結果

ALIDの結果、本工法は、河川堤防に対して改良効果を発揮する可能性が示唆された。無対策の場合、L2-1地震動に対する堤防天端沈下量は2.53m程度となり、許容沈下量 (1.74m) を超過した。一方、改良後の条件では、沈下量は0.34m程度となり、許容量を満足する結果となった (図-4)。

気液二相流解析の結果、空気は注入後10日程度で安定し、約50年後まで堤防下に残存する可能性が示唆された (図-5)。50年経過後は、A.P.-5m付近から徐々に飽和度の上昇が進展した。一方、100年経過後もA1s層の上部には空気が残存が見られ、改良効果が持続する可能性が示唆された。なお、解析

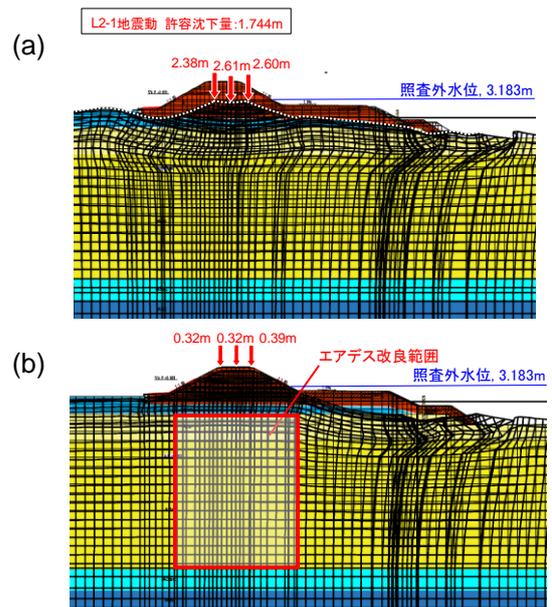


図-4 L2-1地震動に対する予測沈下量 (ALID)
(a) Air-des 施工前 (b) Air-des 施工後

の結果、50年後、70年後、100年後の沈下量はそれぞれ0.66m, 1.21m, 1.37m程度となり、いずれもL2地震動に対する許容沈下量 (1.74m) を満たす結果となった。

5. モニタリング計画

長期モニタリングでは、注入した空気の長期飽和度の確認が焦点となる。Air-des マニュアルでは、施工後の飽和度の確認方法として凍結サンプリングが挙げられている。しかし、試験施工では長期間にわたる連続的なデータの取得が求められるため、長期観測に適したPS検層およびRI測定の種類を選定した。PS検層ではP波速度の変化より空気の侵入

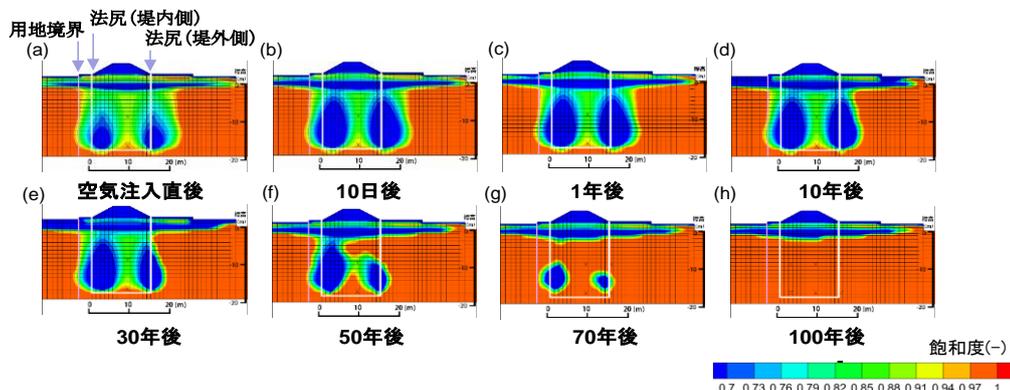


図-5 長期飽和度の予測解析結果 (気液二相流解析)

状態を定性的に評価し、RI 測定では、 γ 線の計測により飽和度を定量的に測定する。飽和度測定は改良範囲の 4 隅で実施する（図-6）。地下水流動に対する空気の長期持続性を評価するため、水位計を設置し、地下水流向並びに流速を把握する。水位観測は現堤防周辺の 5 箇所に加え、河川水位の測定用として堤外側に 1 箇所設置する。地震が発生した場合の効果検証のため、横断測量により沈下量を測定する。測線は対策済み区間と未対策区間の各 1 箇所に設定し、地表面沈下量を比較する。同様に、地震時の液状化層の状態を把握するため、水圧計を設置し、間隙水圧を測定する。

より短期間で長期持続性の評価を行うため、改良直径を抑えた施工を近傍の箇所で行い、飽和度のモニタリングを実施する（図-6）。改良直径は試験施工の直径 8 m×9 孔に対し、直径 5 m×1 孔とし、別途注入諸元を設定した。結果は施工後 5 年で整理し、注入空気の長期維持性の把握と、以降のモニタリング計画のキャリブレーションを目的とした解析を実施する。

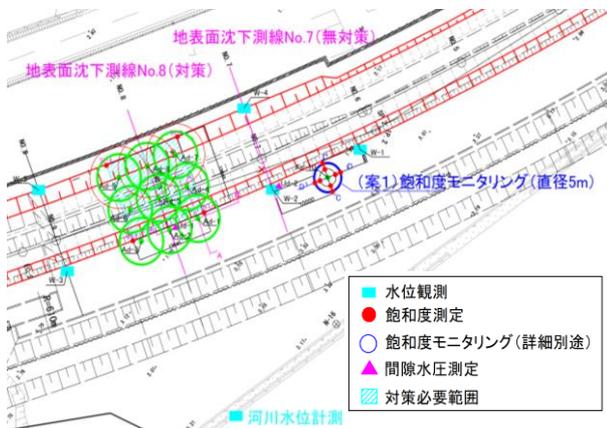


図-6 モニタリング配置計画

6. 費用および工期の概算比較

費用及び工期について、従来工法である固化工法と比較を行った。旧吉野川・今切川で今後対策が必要な区間について、L2 対策完了まで従来工法を使用した場合と、現整備計画で定められている 2003 中防二連動対策完了以降の残区間を Air-des 工法に

置き換えた場合の概算工費を比較した結果、前者は総額 535.3 億円程度が見込まれたのに対し、後者は約 272.5 億円とおおよそ 50% の費用削減効果が期待できることが明らかとなった。同様に、工期に関しては約 26 年の短縮が見込める結果となった（図-7）。

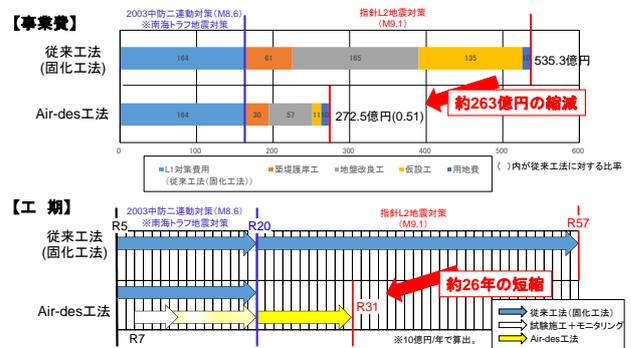


図-7 旧吉野川・今切川における耐震対策完了までの事業費および工期の概算

7. まとめ

本稿では、当事務所が全国に先駆けて河川堤防への適用性検証を予定する Air-des 工法について報告した。予測解析の結果、本工法は河川堤防において液状化の発生を抑制し、耐震対策工として所要の効果を発揮する可能性が示唆された。また、本工法の採用により、耐震対策に係る費用および工期の大幅な縮減・短縮が見込まれることが明らかとなった。以上より、本工法は河川堤防の耐震対策を取り巻く課題の解決に寄与する可能性が示唆された。

当事務所では引き続き、試験施工およびモニタリングによる知見の蓄積を通して、本工法の早期の実用化を目指す。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人土木研究所：河川堤防の液状化対策の手引き（平成 28 年 3 月）
- 2) Air-des 工法研究会：空気注入不飽和工法
- 3) Air-des 工法研究会：空気注入不飽和工法（Air-des 工法）技術マニュアル（平成 30 年 6 月）