

木曽三川下流部における注入固化工法の設計手法の検討

のぐちさとみ なかやまひろくに かいつかまさくに やましたけんたろう
野口聖実¹・中山敬邦²・貝塚正邦¹・山下賢太郎¹・

¹八千代エンジニアリング株式会社 名古屋支店（〒460-0004 愛知県名古屋市中区新栄町2-9）

²八千代エンジニアリング株式会社 名古屋支店（〒540-0001 大阪府大阪市中央区城見1-4-70）

木曽三川下流部は、日本有数のゼロメートル地帯であることから、南海トラフ等のL2地震で堤防が損壊し、その後洪水が発生するとはん濫により堤内地へ甚大な被害を及ぼすおそれがある。様々な施工制約条件がある木曽三川下流部では、施工設備が小規模である注入固化工法の適用が必要な状況である。しかし、本工法はH28に改訂された手引き¹⁾で、固結工法の汎用的な設計手法の適用は困難とされ、その設計手法は定められていない。そこで、本検討において注入固化工法適用地盤を対象に土質試験を実施し、改良体の確実な形成及び液状化対策としての妥当性を検証し、改良体の物性値設定の設計手法及び解析手法を提案した。

Key Words : 木曽三川下流部, 液状化対策, 地盤改良, 注入固化工法,

1. はじめに

木曽三川下流部の特徴は、濃尾平野が広がっており、緩い砂層(As1, As2)が10～15m分布していること(図- 1)、日本有数のゼロメートル地帯であることにある。このため、今後南海トラフ巨大地震等でL2地震が発生した際には、堤防が変形・沈下する可能性があり、その後洪水・津波が発生すれば決壊により、市街地へ甚大なはん濫被害を及ぼすと想定されている。このような状況から、木曽三川下流部では、高潮堤防の地震対策事業を鋭意進めてきており、川表対策では深層混合処理工法が確実性やコスト面で標準工法になっている。しかし、堤内地側の家屋・鉄塔近接区間や狭隘箇所等の様々な制約により施工ヤードが制限される場合は、深層混合処理工法の適用が困難であった。また、川裏対策で実績の多い締固め工法は、施工ヤードは相対的に小規模となるが、地盤変位を伴うため家屋に影響が生じ、事業遅延等の問題が発生している。そこで、施工設備及び施工ヤードが小規模で、かつ地盤変位を生じさせない注入固化工法を適用する必要がある。

注入固化工法は水ガラスを主体とした恒久薬液を土粒子間隙に注入し、地盤を固化させる工法である。本工法は、施工設備が小規模で、周辺への地盤変位が生じない等利点がある一方、注入材が空隙の大きい部位へ選択的に侵入する傾向があるため、対象部全体の改良が不確実とされている(表- 1)。また、手

引き¹⁾では本工法は恒久薬液を注入するため固結工法に分類されているが、その一方で深層混合処理工法等の固結工法の汎用的な設計手法は、改良体の不確実性により適用困難と評価され、その設計手法は明確に定められていない。しかし、浸透固化処理工法技術マニュアル²⁾には、本工法の港湾施設への液状化対策としての実績が多数示されており、東日本大震災後の施工信頼性も概ね確認できている。

本検討の目的は、木曽三川下流部における地震対策での注入固化工法採用にあたり、改良体の確実な形成及び液状化対策としての妥当性を検証し、その設計手法を提案することにあつた。

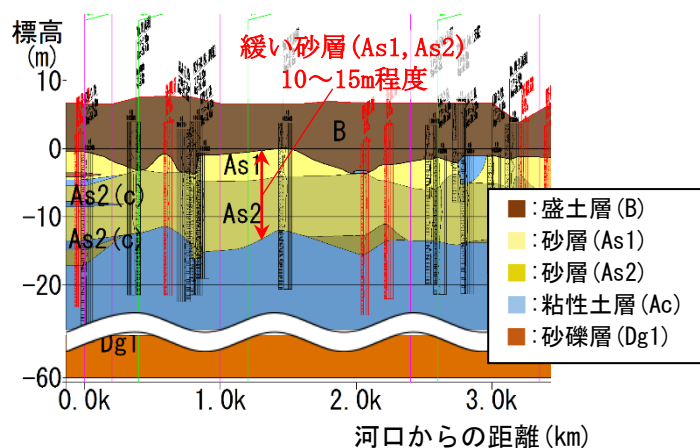


図- 1 木曽川右岸地質縦断面図(抜粋)

表- 1 地盤改良工法種類比較表（改良幅が小さい場合）

	深層混合処理工法（固結工法）	締固め工法	注入固化工法（固結工法）
施工イメージ図			
施工設備	大規模	大～中規模	小規模
必要ヤード	中規模	大～中規模	小規模
改良の方法	機械攪拌で、固化材と現地地盤を均質化する。 【木曽三川の川表での採用多数】	地盤内に砂を圧入し砂杭を造成することで、周辺地盤を締固める。 【木曽三川の川裏での採用多数】	薬液を空隙へ低圧注入し、固化する。空隙が小さい箇所及び細粒分に入り難い。
地盤変位	小さい	大きい	小さい
コスト	低 (改良幅による)	中～低 (改良幅による)	中～低 (改良幅による)

2. 検討内容

(1) 注入固化工法の品質検証

改良体の品質検証のために汎用的な試験である一軸圧縮試験及び改良体挙動を把握できる特徴的な中空ねじりせん断試験、繰返し非排水三軸試験を、実施工において実施した。

a) 改良体の確実な形成

改良体の確実な形成を検証するために、注入固化工法施工後にサンプリングした供試体を用いて一軸圧縮試験を実施した。調査位置図を図- 2、図- 3に示す。平面位置としては改良体の配列ラップの少ない施工端部2箇所(A1, C23)、深度方向には上層の礫層や下層の細粒分の多い層を避ける位置3箇所(の計6箇所)を選定した。サンプリング作業の安全性等に配慮し、調査地点を決定している。

試験結果を表- 2に示す。全ての供試体において設計基準強度($q_u=41\text{kN/m}^2$)を満足する強度($q_u=70\sim 150\text{kN/m}^2$ 程度)となり、改良端部においても確実に施工が来ていることを確認した。なお、一軸圧縮試験後の供試体は自立しており、せん断抵抗角は改良前と変わらず、粘着力が増加する²⁾という注入固化工法の特徴も確認できた。

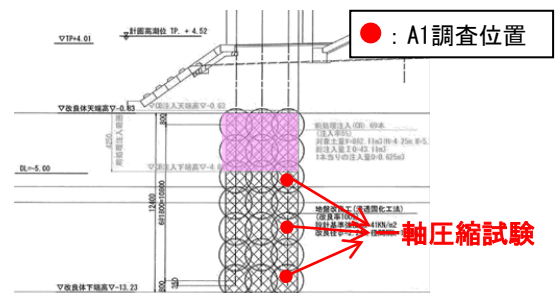


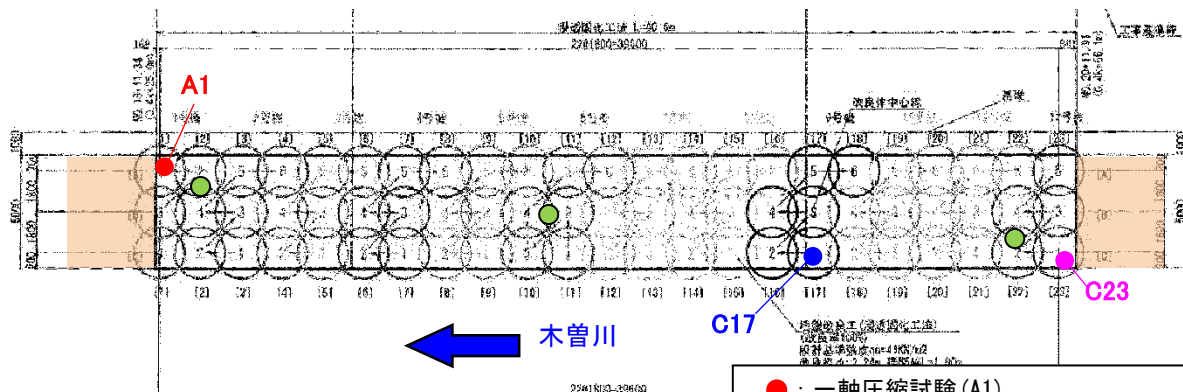
図- 2 深度方向調査箇所（例：A1）

表- 2 一軸圧縮試験結果

A-1	一軸圧縮強度(kN/m ²)				備考
試験位置	供試体1	供試体2	供試体3	平均	
上層	132	132	130	131	
中層	113	140	208	154	
下層	111	209	124	148	

C-23	一軸圧縮強度(kN/m ²)				備考
試験位置	供試体1	供試体2	供試体3	平均	
上層	146	127	78	117	
中層	97	83	116	99	
下層	98	67	54	73	

※設計基準強度 ($q_u=41\text{kN/m}^2$)



- ※ 1 : 過年度において深層混合処理工法で改良済み
 ※ 2 : 工事による事後試料採取位置

図- 3 調査位置図（平面図）



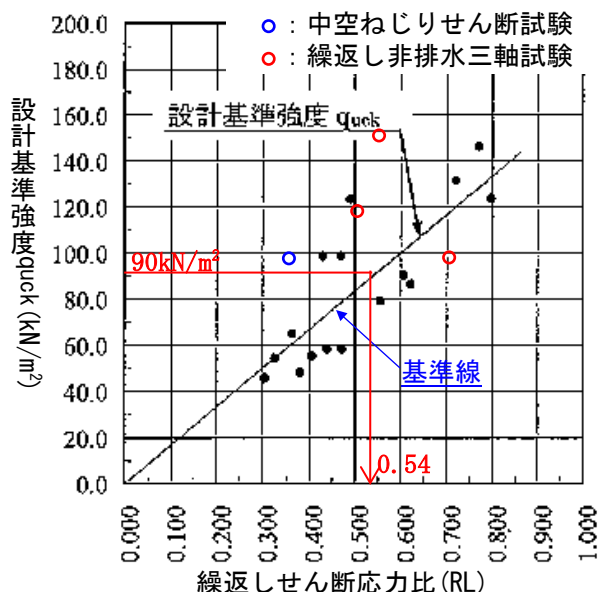


図-7 設計基準強度と繰返しせん断応力比関係²⁾

(2) 注入固化工法の設計手法

前項より、注入固化工法の改良体が靱性挙動を示したことから、締固め工法と同様な地盤強度を増加させる工法として取り扱うことができると判断した。

締固め工法は、改良体を液状化要素と評価し、有限要素法を用いた自重変形解析法により諸元を設定する。同様に注入固化工法で静的解析を実施する。解析で用いる物性値は、一軸圧縮強度試験で得られた一軸圧縮強度 90kN/m^2 とし、図-7の基準線を基に繰返しせん断応力比RLを0.54として計算を行う。静的解析において変更した条件を表-3に示す。その他の土質定数については、原地盤の定数を使用するものとする。

本検討では、沈下量が大きいL2-1地震動で照査外水位がT.P.+3.54mの断面において解析を実施した。図-8に①無処理地盤、②注入固化工法、③締固め工法による解析結果を示す。対策工改良幅を4mにすることで、沈下後の堤防天端高が照査外水位を上回り、耐震性能を満足する結果となった。また、変形図を比較すると、両工法とも変形が類似している。

以上より、注入固化工法の設計手法として、改良体を液状化要素と評価し、静的解析で諸元設定する締固め工法と同様な手法とする。また、耐震性能を満足するため液状化対策としての効果を発現できることを確認した。

表-3 解析変更条件

	注入固化 (固結工法)	注入固化 (締固め工法)	締固め
モデル	非連成要素	液状化要素	液状化要素
繰返しせん断応力比RL	0.28 (解析では不使用)	0.54	0.46
設定方法	マニュアル ²⁾	本検討	改良率及び改良後N値

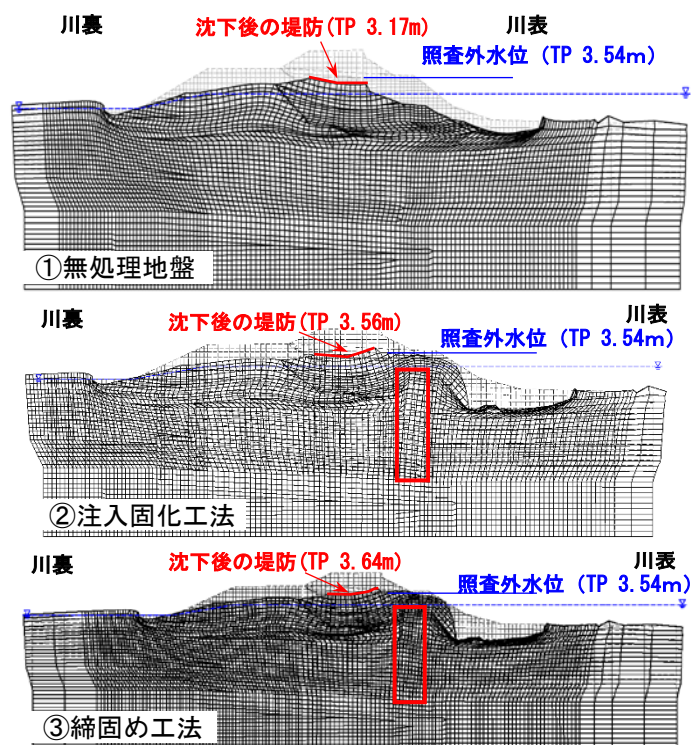


図-8 静的解析結果

3. まとめ

本検討では、注入固化工法の改良体形成の確実性及び液状化対策としての妥当性を証明し、改良体の物性値設定の設計手法及び解析手法を提案した。しかし、設計基準強度と実地盤強度が乖離していた場合に、現段階では一般的な改良土における基準線(図-7)を用いて設計強度を設定しているため、必要以上の強度が発現し、強度が過大になってしまうことが課題である。

今後は、設計基準強度 qu 及び繰返しせん断応力比RLのデータを蓄積し、土地・地盤に適した基準線を設定することで設計の精度向上を図ることが必要である。なお、本手法検討に際しては、土木研究所地質・地盤研究グループへの技術相談を実施しアドバイスを頂いた。

また、全国的にも洪水はん濫原にある堤防の耐震対策はほとんど進捗していない状況にある。これから全国で耐震事業が進められていく中で、本検討成果は木曽三川下流部以外においても、注入固化工法を採用する場合は効果的対策に寄与すると考える。

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) 財団法人 沿岸技術研究センター，浸透固化処理工法技術マニュアル（2010年版），平成22年6月
- 3) 仙頭紀明，有本拓麻，林健太郎：強震時における溶液型薬液改良砂の非排水繰返しせん断特性，第50回地盤工学研究発表会資料，pp.601-602，2015
- 4) 社団法人地盤工学会 土質試験の方法と解説－第一回改訂版－，2000