

7. 地盤を安定化させる技術

7.1 水抜き工法で安定化させる

1. はじめに

多雨地域に位置する我が国の土木・建築分野では、地下水の影響による地盤の不安定化が大きな課題となっており、地盤沈下・斜面崩壊・液状化といった地盤の不安定化リスクは、インフラの安全性や地域住民の生活に深刻な影響を与える。水抜き工法は、地下水の排出を通じて地盤の強度を高めることで、地盤不安定化リスクを回避・低減する必要不可欠な技術である。

本稿では、道路・造成地・河川堤防・トンネル工事等、多様な現場で活用されている主な水抜き工法について紹介するとともに、今後の取り組むべき課題等に関する私見を述べる。

2. 斜面の安定化

水抜き工法による斜面安定化技術は、主に地下水の排除によって間隙水圧を低減し、斜面の安定性を高めることを目的とする。工法選定にあたっては地形・地質・地下水の状況、すべり面の深さや規模、施工性・維持管理の容易さ等を考慮する必要がある。

2.1 横ボーリング工

水平またはやや上向きにボーリング孔を掘削し、ストレーナ加工した保孔管を挿入することで、地下水を排出して間隙水圧を低減し、地すべり土塊の含水比を下げる工法である（図-1¹⁾）。本工法の採用にあたっては、地形・地質・地下水調査に基づき、最適な位置・方向・本数・延長を設計する必要がある。



図-1 横ボーリング工の削孔と地下水排水の状況¹⁾



イメージ図

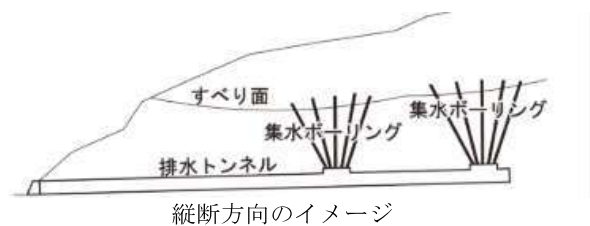


集水井から井戸への地下水排水状況

図-2 集水井工のイメージと施工完了状況写真²⁾

2.2 集水井工

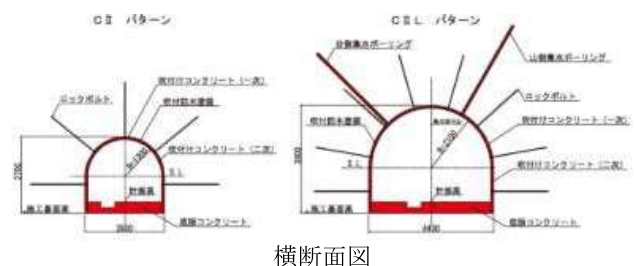
深いすべりに対応すべく内径 4.0m 程度の井戸を掘削・構築し、その井戸内から複数の集水ボーリングを設けて地下水を集水する工法である（図-2²⁾）。横ボーリング工が困難な場合に有効な工法であり、地下水位が高い場合や必要集水量が多い場合には、集水ボーリングの多段配置による効率的な集水を計画する必要がある。



縦断方向のイメージ

2.3 排水トンネル工

トンネルから集水ボーリングや集水井を連結して地下水を排水する工法で、集水範囲が広い場合や地すべり規模が大きい場合に採用される（図-3³⁾）。トンネルは、原則として不動地盤内に設置することとし、地下水脈の分布を考慮して設計する必要がある。



横断面図

図-3 排水トンネル工のイメージと横断面図³⁾



図-4 擁壁への打入ドレン（簡易水抜き管）設置状況⁴⁾

2.4 打入ドレン（簡易水抜き管）

法面や擁壁に直接打ち込む水抜き材（図-4⁴⁾）で、連続スリット状の集水口により目詰まりしにくく施工が容易であること、地下水位を下げ土の強度を向上させる効果を有することが特徴として挙げられる。

2.5 鋼管杭+水抜き（NS スロープキーパー）

小径羽根付き鋼管を斜面に回転圧入し、受圧板と水抜き孔を組み合わせることで、鋼管の引抜き抵抗と水抜き効果により斜面のすべり抵抗を向上させる工法である（図-5⁵⁾）。狭小地や施工困難な場所にも対応可能であることが特徴として挙げられる。

3. 河川堤防の安定化

水抜き工法による河川堤防の安定化技術は、堤体内部に滞留する水分や間隙水圧を効果的に排出し、堤防の安定性を高めることを目的とする。工法選定にあたっては、堤体材料、河川水位や施工性・維持管理の容易さ等を考慮する必要がある。また、斜面と異なる点として、液状化対策を目的とする場合がある。

3.1 水抜き孔の設置

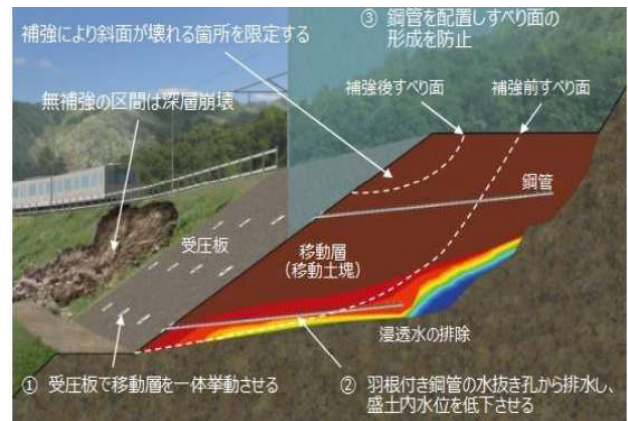
掘込河道などで残留水圧が大きくなる場合に推奨される工法であり、一般的には擁壁や護岸背面にφ50mm程度の孔を2.0～3.0m間隔で常時水位以深に設置される（図-6⁶⁾）。フィルター材との併用によって、細粒分の吸出しを防止する必要がある。また、施工時には、水抜き孔の位置・間隔・径の管理が確実に行うとともに、施工後の排水性能確認も不可欠である。

3.2 グラベルドレーン工（間隙水圧消散工）

砕石や砂利を充填した縦型・横型のドレーンを堤体内に設置することで、地震時の過剰間隙水圧を速やかに消散させて堤防の沈下や変形を抑制する工法である（図-7⁷⁾）。静的地盤変形解析等により、事前に最適な設置範囲・設置高さや対策効果等の評価が可能である。

3.3 堤体材料の効果的配置

川表側に透水性の小さい材料、川裏側に透水性の大き



斜面補強イメージ



実盛土での試験施工状況

図-5 NS スロープキーパーの概要と施工状況写真⁵⁾



図-6 河川堤防の水抜き孔設置状況⁶⁾

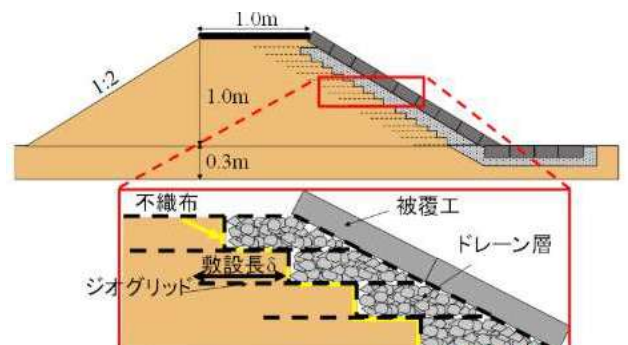


図-7 グラベルドレーン設置イメージ⁷⁾

い材料を用いることで、排水経路を確保しつつ堤体の安定性を向上させる工法である。

4. 宅地造成地の安定化

水抜き工法による宅地造成地の安定化技術は、地下水や雨水による土圧や水圧の増加を抑制し、造成地盤の安定性を高めることを目的とする。地すべり・滑動崩落・沈下のリスクがある造成地では、排水対策が非常に重要な役割を果たす。

4.1 暗渠排水工

地中に排水管や水路を埋設し、雨水や地下水を効率的に排出することで間隙水圧を低下させ、造成地盤の強度を向上させる工法である（図-8⁸⁾）。粘土質など透水性の低い地盤では、排水効果が低下することに留意する必要がある。また、透水性を高めるためには、砕石や砂利などのフィルター材を適切に選定・配置することが重要である。

4.2 擁壁背面排水工

擁壁の背面に排水管を設置し、雨水や地下水を効率的に排出することで、擁壁に作用する水圧を低減させるとともに、擁壁本体のコンクリート劣化や鉄筋腐食の防止する工法である（図-9⁹⁾）。砕石等のフィルター材や透水シートを設置による土砂や泥の流入防止、湧水が多い場合の水抜きボーリング工との併用等を検討する必要がある。

4.3 スロープ・ドレン（土留め柵）

土留めと排水を兼ねた構造で、造成地以外にも道路法肩などで使用される。従来の土留め工に排水機能を追加したものであるため、雨水や地下水を効率的に排出することによる間隙水圧の低下、造成地盤の強度向上、ならびに表層の洗掘や滑動崩壊の防止を目的とする（図-10¹⁰⁾）。降雨量 100mm/hr にも対応できる、高い排水能力を有する仕様設計が可能であるが、スロープ・ドレンによる排水を安全に処理できる側溝や集水桝との接続が不可欠となる。

5. 維持管理による排水機能の保持

水抜き工法の維持管理における重要な事項は、排水機能の低下を未然に防ぎ、斜面崩壊や河川堤防・宅地造成地のすべりといった災害を予防し続けることである。

排水管の最も重要な維持管理項目は目詰まりであり、この発生要因は以下のとおりである。

- (1)鉄細菌の繁殖：地下水中の鉄細菌の増殖により、水酸化鉄等の沈殿物が孔内に蓄積。
- (2)藻類・植物体の侵入：地表付近から侵入した植物性物質が孔内に堆積。
- (3)土砂や微粒子の流入：粘土や砂の孔内への流れ込み。以降では、排水機能を保持すべく維持管理項目を示す。



図-8 暗渠排水管の設置状況⁸⁾

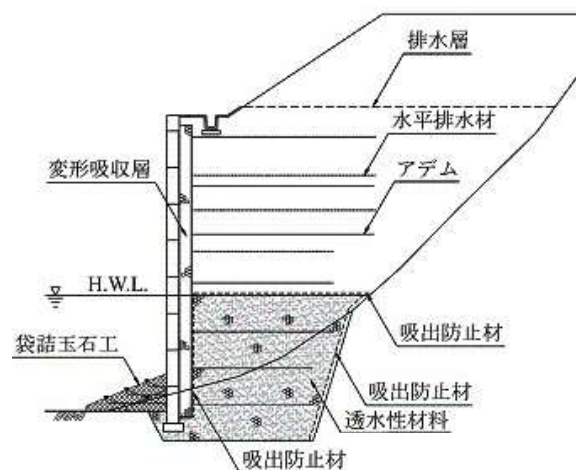


図-9 擁壁背面排水の設置イメージ⁹⁾



図-10 スロープ・ドレンの設置状況¹⁰⁾

5.1 目詰まりの防止

5.1.1 排水管（水抜きパイプ）の点検と洗浄

排水管が土砂や鉄バクテリアなどが生成するスライムによって閉塞が起こると、排水効果の低下に伴って地下水位が上昇し、地盤の不安定に繋がる。

5.1.2 鉄バクテリア対策

鉄バクテリアによるスライムの発生は、水質調査を行って地下水の鉄濃度や溶存酸素量等を把握し、目詰まりの発生しやすい箇所の特定と予防を継続する必要がある。

5.1.3 定期的な洗浄

定期的に高圧洗浄などを行い、排水管内の閉塞物を取り除くことで排水機能を維持する必要がある。

5.2 排水状況の監視

5.2.1 排水量の観測

水抜き工からの排水量の急激な減少は目詰まりの可能性があるので、排水量を定期的に測定し、異常な変化がないか確認を行う必要がある。

5.2.2 地下水位の観測

地すべり地等では、水抜き工の効果を把握するために観測井を設置して地下水位を継続的に測定することも有効である。

5.3 排水施設の健全性確認

5.3.1 破損や変形の確認

経年劣化や地すべりの移動等により、水抜きパイプや排水路等が破損・変形していないか、定期的に確認する必要がある。

5.3.2 腐食の確認

酸性や塩化物イオンを多く含む地下水は、排水管等の金属部材を腐食させる。特に、異種金属が使用されている場合には腐食が進みやすいため、注意が必要である。

5.4 点検計画の策定と運用

5.4.1 施設の評価

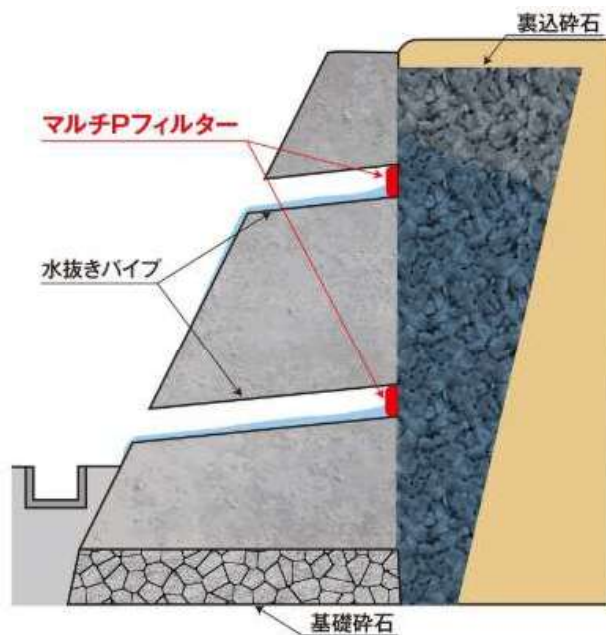
水抜き工が設置された施設の状況に応じて、劣化要因を考慮した維持管理計画の策定、実行・評価を確実に行う必要がある。

5.4.2 優先順位の設定

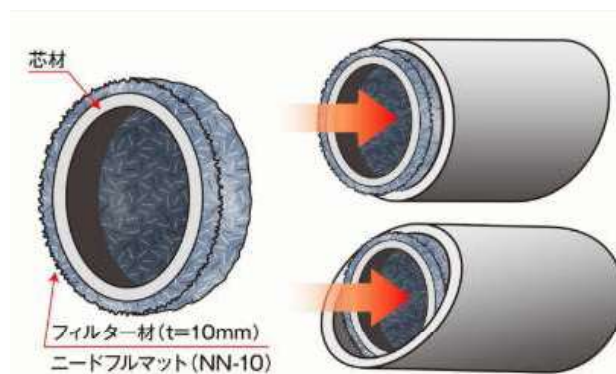
劣化や機能低下の進行が懸念される施設については、点検頻度を上げるといった優先順位づけを行う必要がある。

5.4.3 長期的・確実な運用

施設の長寿命化を確保するためには、立案した維持管理計画を長期的・確実に運用していく必要がある。



設置位置のイメージ



フィルター設置のイメージ

図-11 マルチ P フィルターのイメージ 12)

6. 目詰まり防止対策技術

6.1 孔内洗浄

本技術は、圧水を用いた洗浄によって孔内の堆積物を除去するもので、定期的なメンテナンスとして有効である。

6.2 酸素遮断

鉄細菌の繁殖に必要となる酸素の供給を遮断すべく、孔口にアタッチメントを設置する技術があり、実証試験において目詰まり物質がアタッチメントに付着し、孔内への付着が減少したとの報告事例¹¹⁾がある。

6.3 フィルター材

水抜きパイプに合成繊維製等のフィルター材を装着することで、土砂や小動物などの侵入を防いで排水効果を維持する製品として、施工が容易で高耐久性のマルチ P フィルターが開発されている¹²⁾。

7. おわりに

本稿では、まず水抜き工による斜面、河川堤防、宅地造成地を安定化させる工法を挙げ、次にそれらの排水機能を保持する方法について述べ、最後に代表的な水抜き工法である排水管の最も重要な維持管理項目である目詰まりの防止対策技術について言及した。

水抜き工法による地盤の安定化は、地域住民が安心して暮らすうえで極めて重要である。一方で、人工的な地下水の排水は、周辺の生態系、環境や帯水層への地下水補充減少に伴う水質等への影響も懸念されるため、排水工法の設定には周辺影響への考慮が不可欠である。

また、水抜き工法選定に係る地域住民への説明性向上の観点からは、水抜き工を考慮した2次元、必要に応じて3次元の地下水流動解析等により、降雨時の排水効果を視覚的に示すことも必要と考える。

(執筆責任者 笹井友司)

参考文献

- 1) 株式会社ジオテック HP : <https://www.geotech-co.jp/business/works/jisuberi/jisu03.html> (入手日 : 2025.9.29)
- 2) 国土交通省東北地方整備局山形河川国道事務所 HP : <https://www.thr.mlit.go.jp/yamagata/syucho/sagaeiji/contents/news/201901-1/index.pdf> (入手日 : 2025.9.29)
- 3) 国土交通省中部地方整備局富士砂防事務所 : FUJI SABO 通信, 第 79 号, 2012.
- 4) 株式会社オーイケ HP : <https://www.ooike.net/lineup/result/残存型枠工法で施工した重力式擁壁/> (入手日 : 2025.9.29)
- 5) 公益社団法人土木学会 HP : 技術評価 第 21 号—NS スロープキーパー, <https://committees.jsce.or.jp/opcet/hyoka/21> (入手日 : 2025.9.29)
- 6) アイケンコンクリート HP : <https://www.ik-con.com/product/kanchiblock/index.html> (入手日 : 2025.9.30)
- 7) 東京理科大学創域理工学部社会基盤工学科水理研究室 HP : <https://www.rs.noda.tus.ac.jp/hydrolab/research.html#levee> (入手日 : 2025.9.30)
- 8) ニホン・ドレン株式会社 HP : <https://www.n-drain.co.jp/column/content/2035> (入手日 : 2025.9.30)
- 9) アデムウォール協会 HP : <https://www.ademwall.jp/topics/2009/0401> (入手日 : 2025.9.30)
- 10) 農林水産省農村振興局企画部資源課 HP : https://www.maff.go.jp/j/nousin/noukan/tyotei/t_zisuberi/attach/pdf/index-78.pdf (閲覧日 : 2025.9.30)
- 11) 藤山商会 HP : <https://fujiyama5656.com> (閲覧日 : 2025.9.30)

7.2 グラウンドアンカー工法で安定化させる

1. グラウンドアンカー工

グラウンドアンカーとは、作用する引張り力を地盤に伝達するためのシステムで、グラウトの注入によって地盤に定着させるアンカー体と、自由長となる引張り部と、定着具からなるアンカー頭部によって構成される。このアンカーの引張り力を地盤に有効に伝達するために、構造物(受圧体)と一体で機能する。

すべり面の角度が急な箇所に適した工法である。

図-1 にアンカーのモデル図を示す。

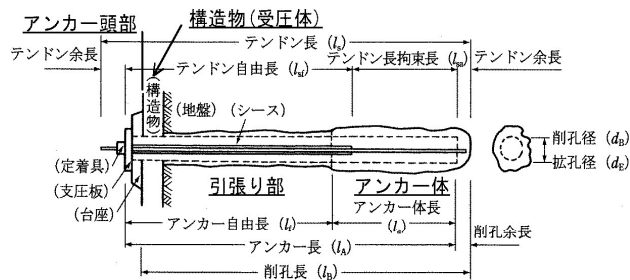


図-1 アンカーのモデル図^{1)*}

(1) アンカーの機能

アンカーの機能は、「引き止め効果」と「締め付け効果」を期待して設置する。

1 本当りの設計荷重は、地盤条件や受圧体の条件を考慮して決定するが、危険負担を軽減することより150~800KN/本程度とすること多い。

法面や斜面におけるアンカー工の抑止機能の違いによる配置例を図-2 に示す。

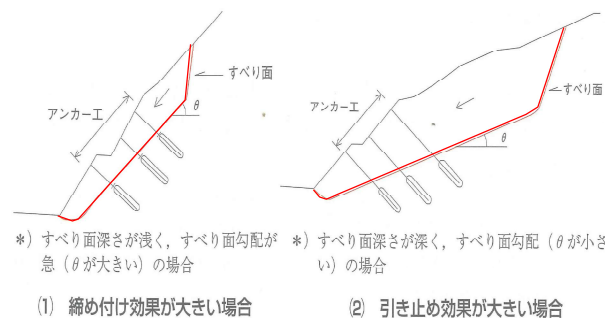


図-2 アンカー工の抑止機能の一例^{3)*}

(2) アンカーの配置

アンカーは、複数本により面的に配置することにより抑止効果が得られると考えられている。一方、設置位置、段数、間隔、打設角度により斜面の安定効果に大きな影響を与えるので慎重に検討する必要がある。

アンカー水平方向の配置は、すべり土塊の移動方向と受圧体が直角になるのが望ましく、設置間隔 1.5m 以上~4m 以下とするのが一般的である。

アンカーの段数は2段以上が望ましく、打設方向は

すべり土塊の移動方向と平行とする。

打設角度は水平面から下向き 5 度~45 度の範囲とする。また、脆弱な地盤や法肩に配置する場合は、地盤の変形が発生する場合があるので受圧体構造や配置位置を検討する必要がある。

補強アンカー (追加アンカー) において、アンカー間隔が 1.5m 未満の配置となる場合は、群効果を避けるために図-3 に示すように既設のアンカー体より 1.0m 以上深部に、追加のアンカー体を配置すること。

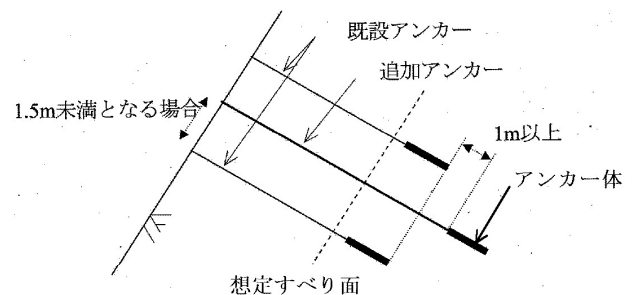


図-3 既設アンカーと追加アンカーの離隔^{4)*}

(3) アンカー工法の分類

アンカーの仕様は、供用期間と構造物の置かれる条件により分類されている。以前は、ランク A を(永久)、ランク B を(仮設)と称していた。表-1 にアンカー共用期間と構造物条件による分類を示す。

アンカーの仕様は、ランク A として計画する。

表-1 アンカー供用期間と構造物の置かれる条件による分類¹⁾

構造物の種類	供用期間	
	2年未満	2年以上
一般の構造物	ランク B	ランク A
特殊な条件下にある構造物	ランク A	

(4) アンカー工法の種類

アンカー工法は、各メーカーにより材料や定着方式等の違いにより多くの製品が販売されている。日本アンカー協会の資料(2005 発行)でも(永久)(仮設)を含めて 37 種類が紹介されている。基本は、引張材が被覆された P C 鋼より線で、定着部がグラウトにより地盤に定着される構造である。

鋼材を地中に設置するため腐食し易い構造である。近年では多重防食処理されたものや、樹脂製の引張材を使用した工法も開発されている。

設置条件や重要度、維持管理、経済性も含め適切な工法を選定する。

図-4 に永久アンカー工法の構造例を示す。

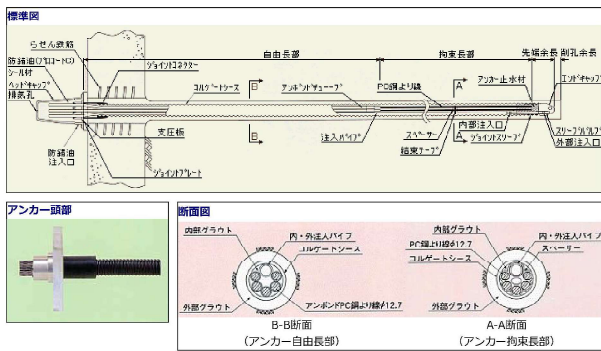


図-4 VSL 永久アンカー工法(A ランク) ⁶⁾

(5)受圧体の選定

受圧体はアンカー力を地山に伝達させるもので、十分な強度を必要とする。アンカー工の規模、地盤の状況、環境条件、施工性、経済性等について検討して選定する。

表-2 に斜面に設置する受圧板の種類を示す。

表-2 受圧板の種類

構造分類	受圧板の種類	
[連続構造]	のり枠(格子)	現場打コンクリート枠工
		吹付枠工
	連続板	コンクリート張工
		現場打擁壁工
[独立板構造]	独立受圧板	RC現場打ち平板
		RC・PCプレキャスト受圧板(形状多種)
		金属製受圧板(形状多種)
		※樹脂系受圧板(平板)

※FRP,プラスチックなど上記以外の素材

(6) アンカーの設計

アンカーの設計は、**図-5** に示す手順で行う。

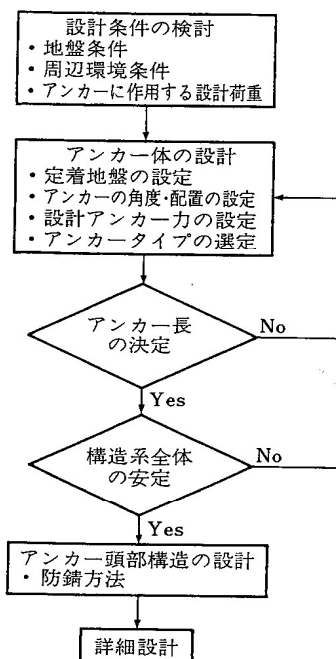


図-5 アンカーの設計計画フロー²⁾

(7) アンカーの施工

アンカーに必要な機能は、アンカー頭部、自由長部、定着長部がそれぞれの役割を果たし、地山を含めた構造物を安定させることである。施工はこれらの機能を十分に発揮できるように行わなければならない。

アンカー点検時に見られる機能低下の原因としては、状況の変化や設計の不備もあるが、施工不良によるものが大半を占める。仕様に従い入念に施工することが肝要である。また、施工の確実性を確認する為の試験として、引抜き試験、引張試験、確認試験により管理される。

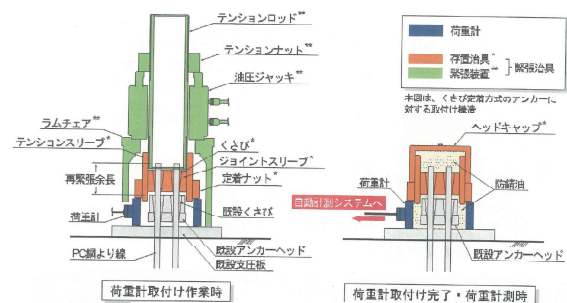
アンカーを施工する場合の主要作業を示す.

- ① 施工計画の立案
- ② 準備及び削孔（一般的径 90～135mm）
- ③ アンカーケーブルの加工・組立
- ④ 注入（一次、二次及び加圧注入）
- ⑤ 緊張・定着

(8)維持管理

グラウンドアンカーは、1976 年国内で基準が作成され広く普及しているが、施工直後から引張り力が減衰するのが一般的である。これは地盤の変形やテンドンの伸び等によるもので適正な管理が必要である。

維持管理は定期的な点検と異常時の点検，計測，管理を行うべきである．特に旧タイプアンカー（1988 年 11 月制定土質工学会基準に準拠していない構造のアンカー）は，防食機能に劣っていたため腐食による頭部の脱落，飛び出し等の事故が発生しており注意を要する．近年では，緊張力を計測できる維持管理用の荷重計を施工時に設置することが多い．既設アンカーに後付け可能な荷重計で，アンカー張力を連続してモニタリングできる機器も開発されている．図-6 に紹介する．



a. Aki-Mos(アキモス)構造図



b.設置例写真

図-6 荷重計 Aki-Mos(アキモス)⁵⁾

点検時の評価は、アンカー単独の評価のみならず、アンカーされた構造物及び周辺の変状も併せて総合

的に評価することが必要である。第三者への被害が想定される場合は、緊急処置が必要である。

(9) 新技術と今後の課題

新設のアンカー工法については、頭部や引張り材の防食処理に優れた製品や、引っ張り材自体が炭素繊維による物など防食性に優れた新製品の開発が進んでいる。しかし、すでに施工済である多くのアンカーについては、現状での健全性について把握できていないものが多く、進行する老朽化への対策が課題である。

変状の原因は、水に起因するものが多い。

写真-1～2 にアンカー点検時の変状状況について示す。

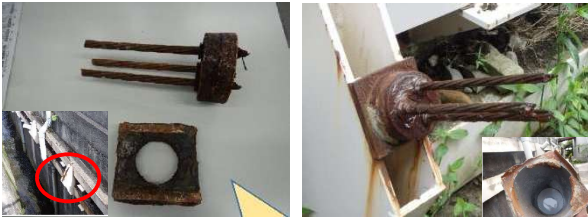


写真-1 頭部の落下や腐食

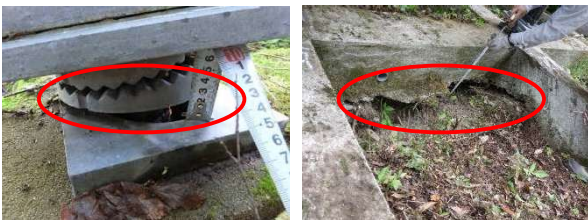


写真-2 頭部の浮きや受圧体の浮き

管理手法における技術としては、写真-3 に示すリフトオフ試験が容易にできる小型・軽量ジャッキや、図-7～8 に示すアンカー頭部の鋼線余長が短くても、除荷や再緊張ができる工法などが開発されている。



a. リフトオフ試験状況 b. ジャッキ部分
写真-3 SAAM(サーム) ジャッキシステム⁸⁾

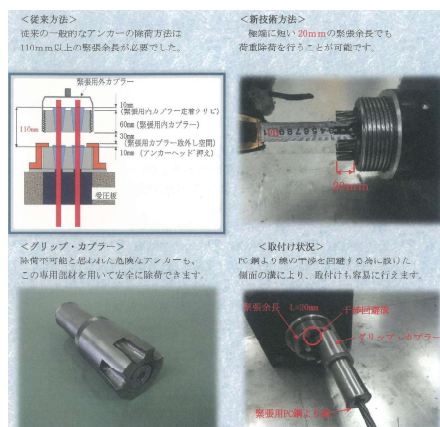


図-7 グリッパカプラー(特殊除荷工法)、鋼線の緊張余長 20mm でも安全に除荷できる工法⁸⁾

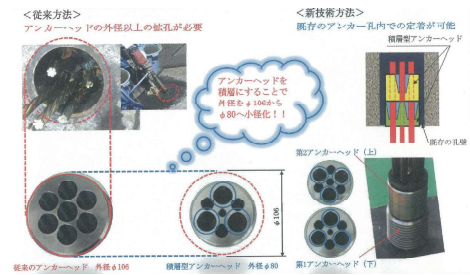


図-8 ロードレスター(特殊再定着工法)、除荷したアンカーを、既設孔を拡大させることなく再定着させる工法⁸⁾

新設では、アンカー体に光ファイバーを組み込み変異の計測ができる技術など開発されているが、コスト面が課題である。予算が限られる中で計画的な維持管理と対策が求められる。

(10) アンカー工での留意事項

- ・アンカーの構造は、荷重の増減の対応や維持管理のための計測機器が設置できる構造が望ましい。
- ・アンカー体の定着部は、すべり面より深部で堅固な地盤とし、引き抜き抵抗力が大きい岩盤が最も適している。引き抜き抵抗力が弱い地盤や、すべり面が確定していない場合は、自由長を長くして堅固な地盤に定着する。
- ・定着地盤の引き抜き抵抗力は、施工前に引抜き試験により確認しておく必要がある。引き抜き抵抗力が不足する場合は、設計の見直しが必要である。
- ・アンカーの耐久性を阻害する環境(温泉、鉱山、変質帯等)では、地盤や地下水などの影響を十分考量して適切な対応が必要である。
- ・地表面の地耐力が小さい場合や降雨時の流水等がある場合は、受圧板の沈下、移動や浮き、地山の崩壊、変形などが生じないように対策を取る必要がある。
- ・アンカー材は鋼材のため腐食に弱い。腐食の主原因は水である。施工において各アンカー工法の仕様に従い入念な施工とする。

2. アンカー工の設計事例

(1) 法面崩壊復旧計画

道路に接する民地法面の復旧において、工区分割を行い最適となる対策工を計画した。1 工区は過去の崩壊跡地であり、すべり崩壊を未然に抑止するためにアンカー工を採用した。

1) 計画図面

図-9 に計画平面図を、図-10 に計画断面図を示す。

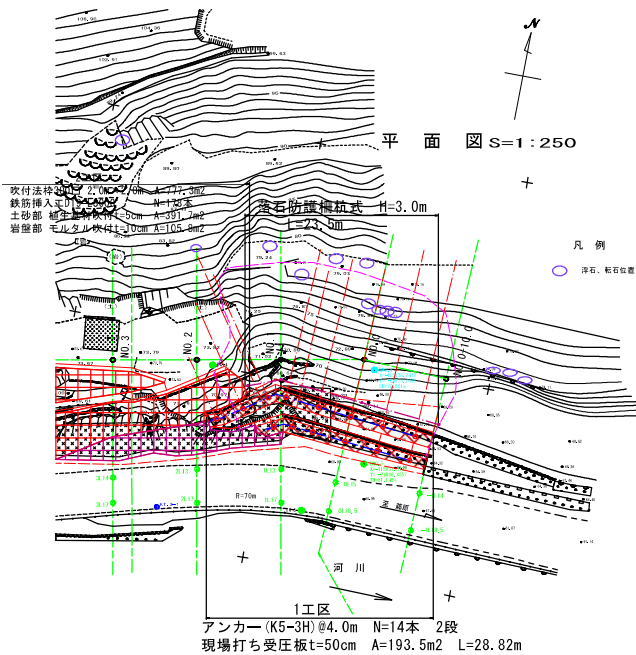


図-9 計画平面図

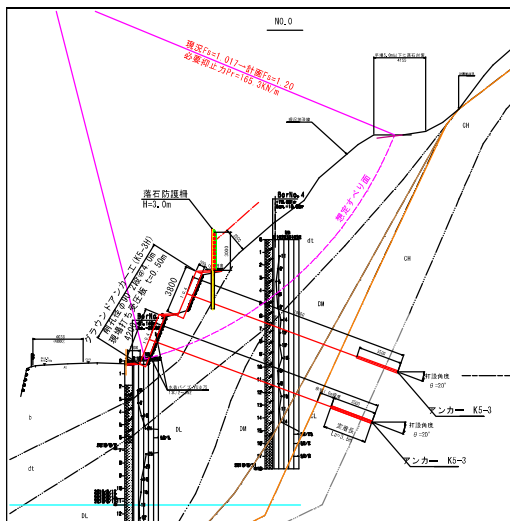


図-10 計画断面図 N0.0

2) 必要抑止力の計算

すべり面が確定していないため、土質調査結果より求めた土質定数を用いて、探索円弧を用いたすべり安定計算により安全率と必要抑止力を求めた。

現況安全率：Fs=1.017, 計画安全率：Fsp=1.20

必要抑止力：Pr=165.3KN/m である。

採用したすべり安定計算式を式(1)示す。

$$F_s = \frac{\sum(c + l + (W - u \cdot b) \cos \alpha \cdot \tan \phi)}{\sum W \cdot \sin \alpha} \quad (1)$$

スライス分割法による、

ここで、Fs:安全率、

土質条件:崩積土(dt), N=8~13,

$\gamma=18\text{KN/m}^3, C=0\text{KN/m}^2, \phi=35^\circ$ 。

3) アンカー工の計算

必要抑止力 Pr=165.3KN/m に対して最適となるアンカー配置を検討した。

設計アンカー力は Td=275.6KN/本となった。

表-3 に計算書の抜粋を示す。

表-3 設計アンカー力の計算書⁷⁾

項目	記号	単位	数値
外力	必要抑止力	Pr	165.3
	すべり面	平均角度	$\theta = 25.50^\circ$
		$\tan \phi$	0.70021 ($\phi=35.000^\circ$)
計算結果	水平間隔	a	4.00
	施工段数	n	2
	アンカー傾角	α	20.0
材料	アンカー効果	締め付け+引き止め効果	
	アンカー種別	PC鋼線より線(KTB・引張型SCアンカー) K5	
	アンカーラック	ラックA(常時)	
定数	コンクリートの許容付着応力度	τ_{ca}	0.80
	アンカー一体の側面摩擦抵抗	τ	1.00
	設計安全率	Fs	2.5

計算結果	設計アンカー力	アンダー規格	見かけ周長	鋼線径	アンカー体長(m)		
アンカー傾角 $\alpha(^\circ)$	Td(kN/本)		L(mm)	d _A (mm)	f _{ss}	f _s	L _a
20.0	275.6	K5-3H	104.6	90	3.30	2.44	3.5

4) 受圧板の計算

受圧板は既設石積みに変状が見られたため、密着性が良く、石積みの抜け落ちを防ぐ目的で、連続構造の現場打ち受圧板(RC構造)とした。

設計アンカー力 Td=275.6KN/本に対応する受圧板は、縦横2方向の仮想梁幅(モデル図-11)を想定した連続梁として計算した。鉄筋の配置は、仮想梁幅が必要となる鉄筋量を板の裏表全面に配置した。表-4 に計算書の抜粋を示す。

表-4 受圧板の計算書⁷⁾

計 算 条 件		日		記 号 単 位		数 値	
外力 設計アンカー力				Td	kN/本	275.6	
反力 体 外 横 形	縦	スパン数		ℓ_{sa}	スパン	1	
	梁	スパン長		ℓ_s	m	4.00	
		掘出し長		上 下	n	2.10	2.10
	横	スパン数		ℓ_{sa}	スパン	2	
		スパン長		ℓ_s	m	4.00	
形	梁	掘出し長		左 右	n	2.00	2.00
梁 断面	仮想梁断面（梁高×梁幅）			h × b	mm	500 × 720	
	有効高			d	mm	400	
許 容 応 力 度	コンクリート	設計基準強度		σ_{ak}	N/mm ²	24.0	
		圧縮応力度		σ_{ca}	N/mm ²	8.0	
		せん断応力度		τ_{ca}	N/mm ²	0.390	
		付着応力度		τ_{ca}	N/mm ²	1.60	
	鉄筋	引張応力度		σ_{sa}	N/mm ²	180.0	

項目	記号	単位	数値
応	最大曲げモーメント	M _{max}	82.33
力	最大せん断力	S _{max}	93.35

主 鉄 筋		応 力 度 (N/mm ²)				スターラップ		判定	
呼び径	本数 (片側)	鉄筋量 (mm ²)	引張 σ_s	圧縮 σ_c	せん断 τ_s	付着 τ_c	呼び径		間隔 (mm)
D22	4	1548.4	149.4	4.89	0.365	0.937	—		—

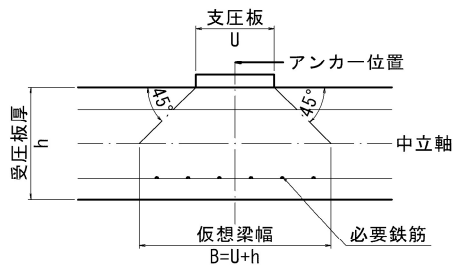


図-11 仮想梁幅モデル図

5) 構造詳細図の例

図-12 に受圧板の展開図, 図-13 に配筋図を示す.

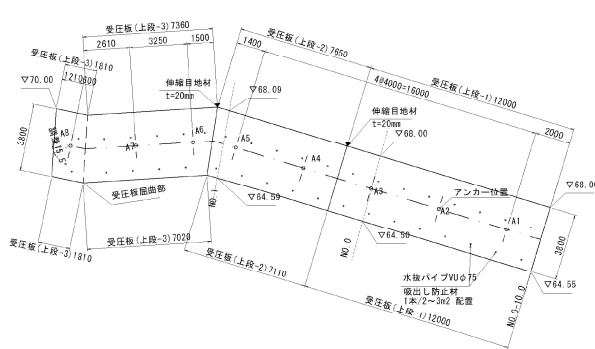


図-12 現場打ち受圧板展開図

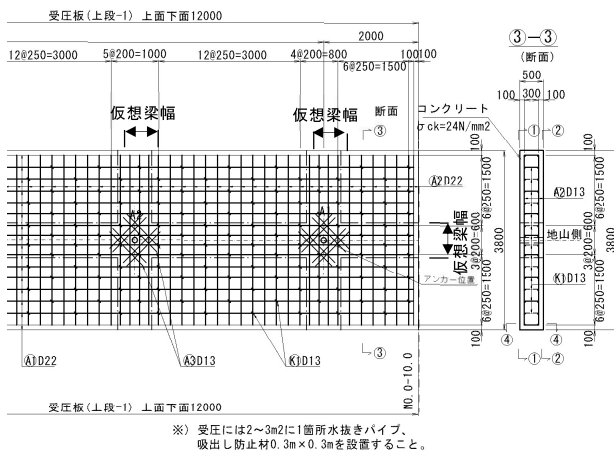


図-13 現場打ち受圧板配筋図

(2) 道路法面の地すべり災害復旧の計画

豪雨災害による道路法面の地すべり対策工を設計した。ボーリング調査及び孔内傾斜計、地表面の伸縮計、地下水位調査等によりすべり面を確定し、最適となる対策工を選定した。抑止工としてアンカー工と、抑制工として排水ボーリング工、法面保護工として吹付法枠工を計画した。

1) 対策工計画図面

図-14に計画平面図を、図-15に計画断面図を示す。

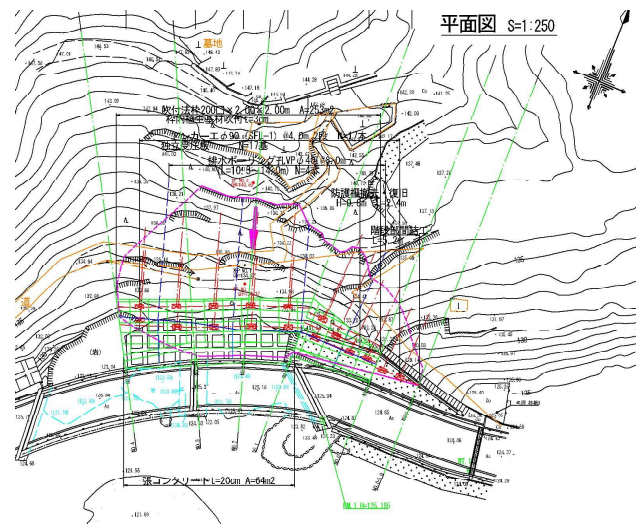


図-14 計画平面図

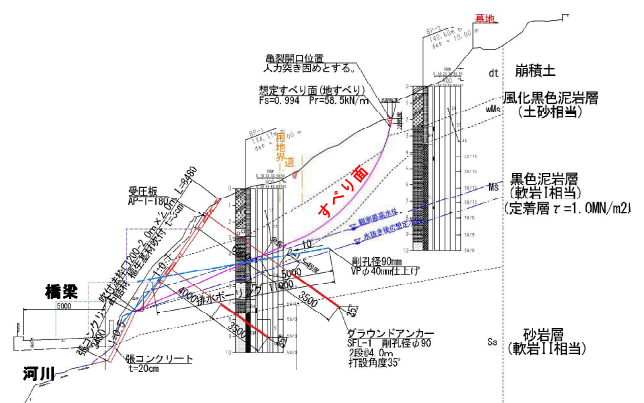


図-15 計画断面図 NO.2

2) 被災状況

道路法面を含む地すべりであり、のり高さ 10m、被災延長 31.4m、崩壊土塊の末端部は橋梁に接触していた。また、ブロック積擁壁にも水平方向にひび割れや押し出しが見られた。

写真-4～5 に被災状況写真を示す.

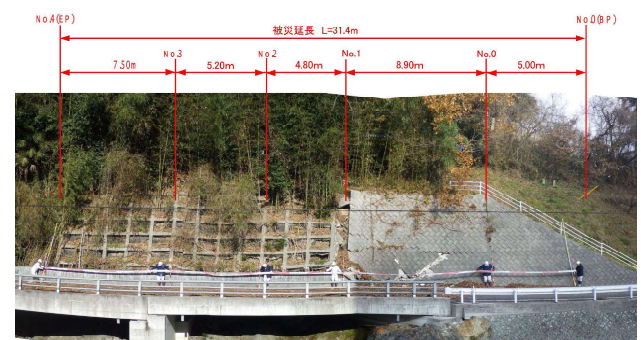


写真-4 被災法面全景



写真-5 被災法面断面状況

3) 機構解析および必要抑止力の算定

すべり土塊は降雨に伴う断続変動があり、特に豪雨時は滑動変位量が顕著に観測されるため、現況安全率 $F_s=0.98$ と設定した。土質調査結果より求めた土質定数を用いて逆算法によるすべり安定計算により必要抑止力を求めた。

- ・ 現況安全率： $F_s=0.98$,

土質定数： $C=4.5\text{ kN/m}^2$ (すべり層厚),

$\phi=25.9$ 度, $\gamma=18.0\text{ kN/m}^3$ 。

- ・ 計画安全率： $F_s=1.12$ (市道) とした場合必要抑止力は $Pr=69.7\text{ kN/m}$ であるが、排水ボーリングによる地下水位の低下を見込みアンカー工による抑止力は $Pr=55.2\text{ kN/m}$ である。以下、図-16 に解析モデル図と結果を示す。

逆計算で求められたすべり面強度定数	
せん断抵抗角 ϕ	25.9 °
粘着力 c	4.5 kN/m^2
現況安全率と必要抑止力	
現況安全率 F_s	0.98
必要抑止力 Pr ($p.F_s=1.12$)	69.7 kN/m
観測HWLから0.96m水位低下 させて求める安全率	
安全率 F_s	1.01
必要抑止力 Pr ($p.F_s=1.12$)	55.2 kN/m

②解析結果

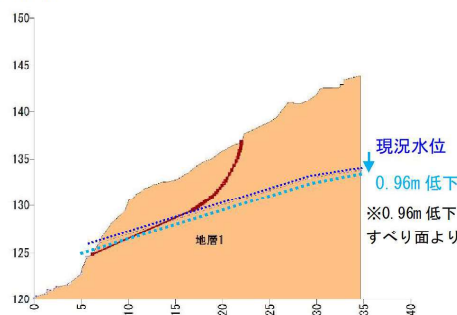


図-16 解析断面モデルと求められる必要抑止力

4) 対策工法の選定

A から D の 4 案比較により、経済性・施工性・景観等に優れる、D 案アンカー工+排水ボーリング工を採用した。

比較案の検討断面図を図-17～20 に示す。

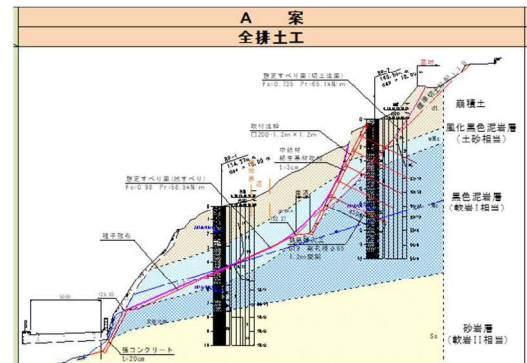


図-17 A 案断面図

評価: 経済性×, 施工性△, 景観性△, 用地取得×

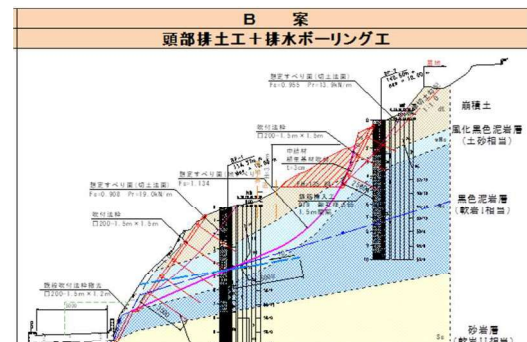


図-18 B 案断面図

評価: 経済性×, 施工性△, 景観性△, 用地取得×

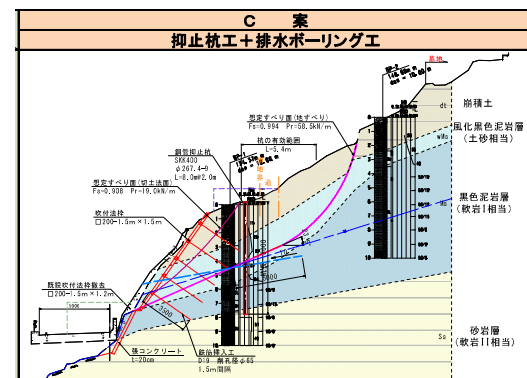


図-19 C 案断面図

評価: 経済性△, 施工性△, 景観性○, 用地取得△

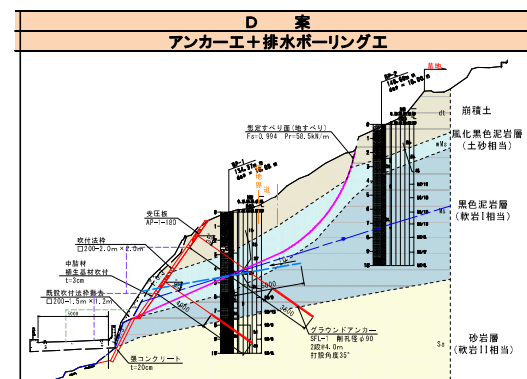


図-20 D 案断面図

評価: 経済性○, 施工性○, 景観性○, 用地取得○

5) アンカーの配置による比較検討

a. 比較条件

- ・アンカー本数が多くなると経済性に劣る.
- ・アンカー本数を少なくすると受圧構造体が大きくなる.
- ・アンカーの設置段数は2段以上が望ましい.
- ・平均N値15のDt層が受圧板の支持地盤となるため、許容地耐力は150KN/m²とする.
- ・アンカー打設角度は $\alpha 5 \text{度} \leq 45 \text{度}$ 以下とする必要がある.
- ・アンカー体と受圧板の角度は90度が望ましい.
- ・東日本高速道路(株)の設計要領では、アンカー体と受圧板の角度は90度より10度以内の角差とされている.
- ・角度調整台座により合成角度(鉛直と水平)20度まで可能な台座を計画する.
- ・受圧板設置の法面勾配1:0.7~0.5として角度調整を行う.
- ・アンカー体の定着位置はすべり面の凹凸等を考慮して、すべり面からの余長1.0m以上、かつ定着層(黒色泥岩層-軟岩I)より1.0m以上とする.
- ・上記条件によりアンカー工の配置検討を行う.

b. 検討結果

経済性に優れたアンカー工の配置は以下となる.

- ・施工段数：2段、・水平間隔：4.0m
- ・打設角度：35°

c. アンカー材の選定

グラウンドアンカーはその材料・形式によって多くの種類がある. 設計計算上、材料を選定し計算を進める必要がある. 当該地区に最適と考えられるアンカー材を施工実績などから形式別に3種類を選定して比較した.

圧縮型：SEE E工法

引張型：スーパーフロテック工法

引張型：KT B工法

d. 採用工法

経済性に優れた「スーパーフロテック工法」を採用する.

6) 受圧板の比較選定

アンカー工の受圧板は、一般的に図-21の種類に分類される. 当計画地では、斜面の凹凸や勾配変化に対応可能な吹付法枠、板タイプは施工性に優れた二次製品の独立板が適する.

よって、A案とB案による比較検討の結果、施工性・経済性に優れた「A案：独立板+吹付法枠」を採用する.

比較案の検討断面図を図-22~23に示す.

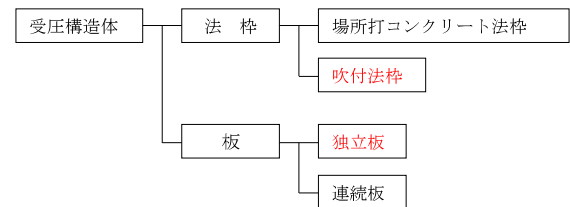
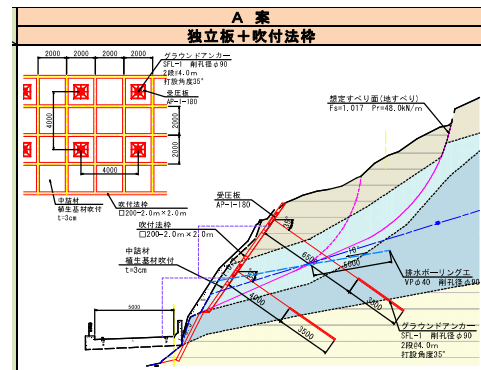
図-21 受圧板の分類⁸⁾*

図-22 A案断面図 評価:経済性○,施工性○

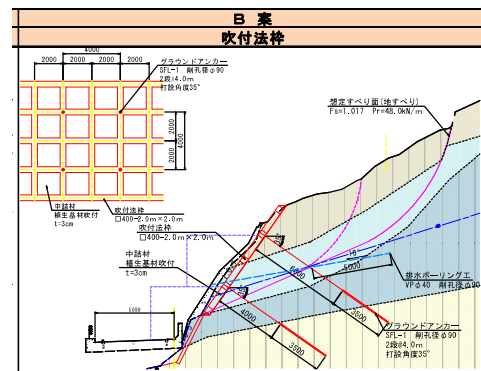


図-23 B案断面図 評価:経済性△,施工性△

7) 独立受圧板の比較

独立受圧板は、軽量で施工性に優れた二次製品を選定して表-5で比較した. 結果、経済的に最も優れたアンカーパネルを採用する.

表-5 独立受圧板の比較表

名 称	KIT受圧板	FFU受圧板	アンカーパネル
タイプ	(KIT165-230-L)	(1000S-3)	(AP-1-180)
材 質		強化プラスチック (FFU)	繊維強化プラスチック (FRP)・鋼板
寸 法(縦×横×高さ)	1.60×1.60×0.1225 m	1.00×1.00×0.24 m	0.98×0.98×0.172 m
許容アンカー力	230 KN/本	650 KN/本	180 KN/本
重 量	162 kg	95 kg	94 kg
許容面積	1.78 m ²	1.00 m ²	0.94 m ²
形状写真			
地盤反力	71 kN/m ²	126 kN/m ²	134 kN/m ²
許容地耐力150KN/m ²	○ K	○ K	○ K
工 費 (10基当り)			
製 品 代	1,600,000	1,237,000	940,000
取 付 費	63,050	63,150	86,330
合 計	1,663,050	1,300,150	1,026,330
総合判定	×	△	○ 採用

8) 構造詳細図の例

法枠・アンカー位置の展開図,独立受圧板詳細図(平面図),アンカー構造図,排水ボーリング孔口の詳細図を図-24~27に示す.

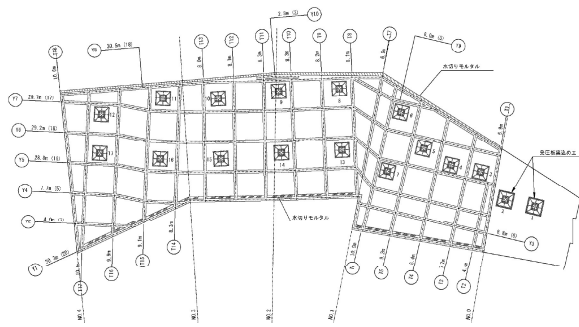


図-24 法枠・アンカー位置展開図

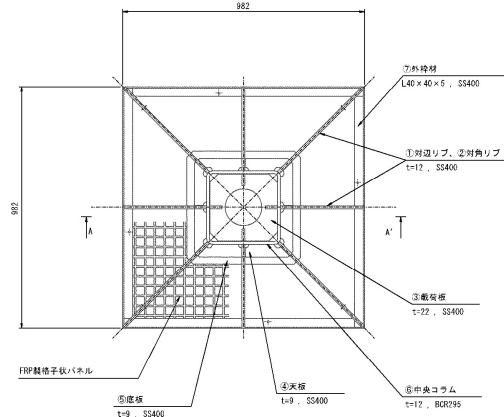


図-25 独立受圧板詳細図(平面図)

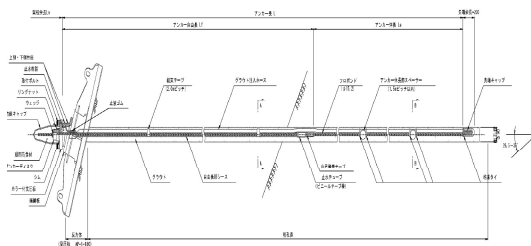


図-26 アンカー構造図

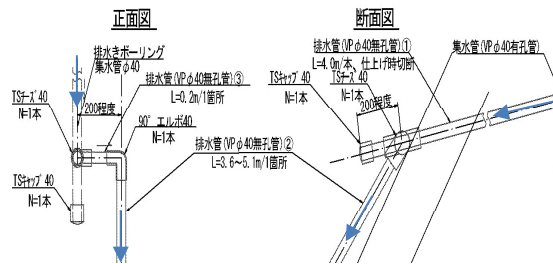


図-27 排水ボーリング孔口詳細図

9) 施工手順

施工は安全性に配慮して、以下の手順で行うこと。

図-28 施工手順図参照。

- ・ 現況地形 ($F_s=0.98$)
 - ①排水ボーリング施工 ($F_s=1.010$)
 - ②付法枠取壊し、掘削 ($F_s=1.008$)
 - ③上段アンカー施工 ($F_s=1.068$)
 - ④吹付法枠取壊し、掘削 ($F_s=1.057$)
 - ⑤アンカー施工 ($F_s=1.120$)
 - ⑥吹付法枠施工
 - ⑦既設法枠取壊し、掘削、張コンクリート施工
 - ⑧枠内植生基材吹付施工
- ・ 施工完了

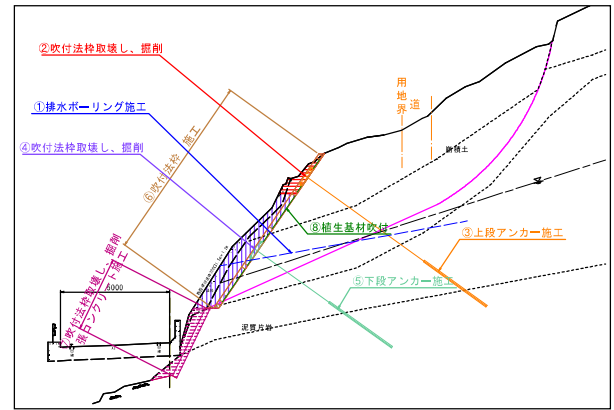


図-28 施工手順図

10) 施工時の留意点

- a. 環境への配慮
 - ・ 法面緑化の材料は自然環境に配慮できる在来種の草本類を主体とする。
- b. 安全管理
 - ・ 施工時期は極力降雨時期を避けることが望ましい。降雨時には、法面の崩壊に対してシート養生等による防災対策をとること。
 - ・ 観測施工により施工中の安全を確保することが望ましい。
 - ・ 新たに危険な亀裂等を発見した場合は、事前に発注者と協議を行うこと。
- c. 土工法面工事
 - ・ 地すべり崩壊であり法面の抑止、掘削に伴う施工時の安全を確保するため上段からの逆巻き施工を原則とする。
- d. 地下水排除工（排水ボーリング工）
 - ・ 施工中の安全を確保するため、先行して排水ボーリングを施工のこと。孔口の仕上げは法枠完成後とする。
- e. アンカー工について
 - ・ 本設前に引き抜き試験 1 本を実施し、設計に用いた極限周面摩擦抵抗値 (τ_p 値) の確認を行う必要がある。設計に用いた τ_p 値は、軟岩： $\tau_p=1.00\text{N/mm}^2$ である。
- f. アンカー受圧板について
 - ・ 逆巻き施工に配慮して独立受圧板を採用している。設置面は平坦に仕上げる。特に既設ブロック積に設置する箇所は、不陸整正のためのザブトン枠を計画している。
- g. 斜面の亀裂箇所
 - ・ 斜面には地すべり発生時に生じた亀裂が見られる。雨水が流入しないように入念に突き固めること。

3. アンカー工の施工事例写真

(1) 道路法面のアンカー工施工事例



写真-6 RC 独立受圧板とアンカー
(下段は吹付法枠と鉄筋挿入工)



写真-7 吹付法枠とアンカー



写真-8 プレキャスト受圧板とアンカー



写真-9 土留め擁壁の補強アンカー

(2) 急傾斜地崩壊防止対策のアンカー工施工事例



写真-10 RC 独立受圧板とアンカー



写真-11 吹付法枠とアンカー

(執筆責任者 西村正一)

参考文献

- 1) 公社)地盤工学会, グラウンドアンカー設計・施工基準、同解説, p. 25, 64;2012.
 - 2) グラウンドアンカー技術協会, グラウンドアンカー工法設計施工指針, p. 40;2010.
 - 3) 公社)全国防災協会, 災害復旧事業における地すべり対策の手引き, pp. 76-79;2018.
 - 4) 東日本高速道路(株), 設計要領 第一集土工 一保全編, pp2-24~2-35;2016.
 - 5) 社)アンカー健全度協会, 現場技術者のためのアンカー維持・補修の手引き, pp. 223-227, 364, 365;2023.
 - 6) 土木情報サービス いさぼうネット:土木カタログ VSL 永久アンカー工法(Aランク), 2024. 11. 25, <https://isabou.net/sponsor/vsl/vsl-sp2.asp>.
 - 7) 株)五大開発, ソフトウェア-ANCHOR Version15-, アンカー工設計計算書.
 - 8) LLC アンカーアセットマネジメント研究会, SAAM ジャッキの設置方法, 2024. 12. 04, <https://www.saam.jp/summary.htm>.
-)*付は参考文献に追記している.

7. 3 セメント注入工法で安定化させる

1. はじめに

我が国は地震国であり、歴史的に見ても、関東大震災（1923 年）、新潟地震（1964 年）、阪神・淡路耐震災（1995 年）、東日本大震災（2011 年）などで甚大な被害を経験してきた。数ある地震被害のうち液状化による被害は、ただちに人命に関わることは稀ではあるが、噴水・噴砂の発生、戸建て住宅の沈下や傾斜、道路面の変形、ライフライン施設の損傷等により地震後の地域住民の生活に及ぼす影響は多大にして多種多様であり、これらが複合的に発生することで影響期間は長期に及ぶ。近年でも、能登半島沖地震（2024 年）による大規模宅地被害等も記憶に新しい。このような既設戸建て住宅の液状化被害は、東日本大震災（2011 年）以降にクローズアップされたが、建築基準法で義務付けられていないこと、費用対効果の問題、そして既存の対策工法が戸建て住宅に必ずしも適用できないこと等の理由により対策が進んでいないのが実情である。ここでは、既設戸建て住宅の液状化対策を目的とした数少ない工法の候補の一つとして極超微粒子セメントを用いた浸透注入工法について紹介する。

2. 戸建て住宅の液状化対策技術

2.1 戸建て住宅の液状化対策の現状・課題

地盤の液状化対策に関する技術開発は新潟地震を機に行われ、現在までに密度増大工法、固結工法、間隙水圧消散工法等が開発されてきた。しかしながら、これら従来工法の対象のほとんどが橋梁や高層建築物、河川堤防、港湾施設等に代表される公共性の高い大型構造物を対象とした工法のため、図-1 に示すように施工範囲が広く大型機械を使用する工法（広範囲を大型機械で効率良く施工する）がベースであり、個人の資産である戸建て住宅

のように小規模構造物を対象とする液状化対策技術が確立されていないのが実情である。

このような情勢を鑑み、東日本大震災以降、液状化により被災した地区を有する自治体、地盤工学会や建築学会などの関連学会の委員会、国土交通省等によって戸建て住宅の液状化対策に関する検討・技術開発が進められ、現在では専門技術者だけではなく市民向けに工法の提案が行われている^{例え、1,2)}。このような取組みにおいて考慮されるべき戸建て住宅特有の制約条件³⁾は以下のとおりである。

- ①個々の宅地範囲が狭いので、狭隘な場所で施工が可能な小型機械が必要である。
- ②住宅密集地のように家屋が隣接している場合は、隣家に悪影響を与えないようにする注意が必要である。
- ③個々の財産であるため、公共構造物に比べて多大な費用をかけることは難しい。
- ④新設家屋の場合と既設家屋の場合では、対策に必要な費用が大幅に異なる。

すなわち、既設家屋までを網羅する場合には、狭窄部において既設構造物の直下を安価に施工可能な工法の開発が不可欠である。

図-1 によると、既存の液状化対策工法では、施工面積が広がるほど大型の機械による大量施工が可能であり施工単価は比較的安くなるが、大型機械が適用不可能で施工面積が狭くなるにつれ、小型機械による施工能率の低下や特殊な仮設費などにより、費用が割高となり施工単価は高くなるという傾向にある。個人の資産である戸建て住宅の液状化対策の適用を検討する上で、これらの施工性と費用の関係にも留意する必要がある。

2.2 既設構造物に適用可能な液状化対策工法

既設構造物に対しては、構造物基礎直下の対策になることに加え、周辺にも既設構造物が存在し近接施工となるため、十分な施工ヤードの確保が困難になるケースも想定される。そのため、新設構造物を対象とするケースと比較して施工条件はかなり厳しくなり、適用が可能な工法はかなり限定される^{4),5)}。特に、住宅が密集する市街地となる場合には、隣地との間隔も狭く工事を行うための作業スペースを確保することが困難になる。また、工事に伴う振動、騒音や変状の影響に対しても注意を払う必要がある。東日本大震災以前も、このような場合に適用可能な特殊技術として「静的圧入締固め工法（CPG 工法：コンパクショングラウチング工法）」、「大口径深層混合処理工法」および「注入固化工法（浸透固化工法）」等開発されており、タンク、滑走路・誘導路、岸壁などの構造物に適用されてきた（表-1 参照）。

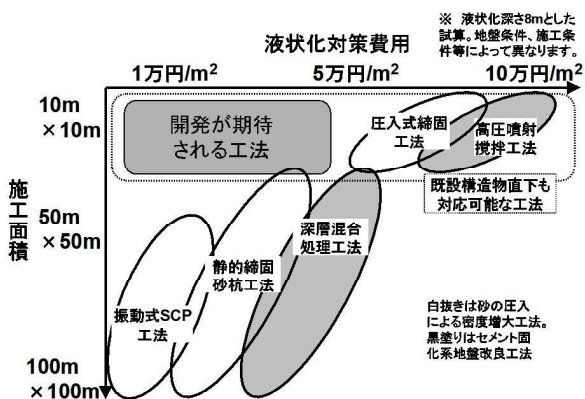
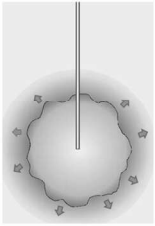
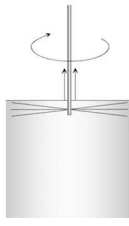
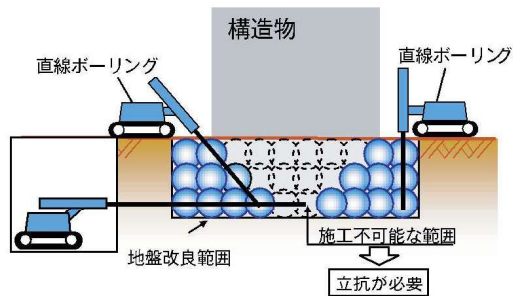


図-1 地盤改良施工面積と液状化対策費用との関係¹⁾

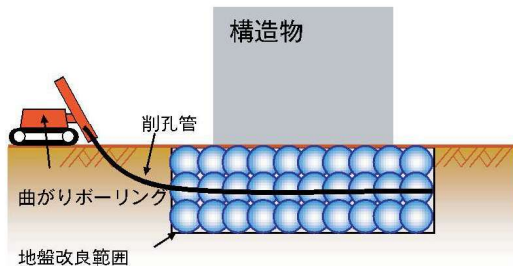
表-1 既設構造物の液状化に適用可能な工法例

原理	密度増大	固結	
工法	圧入締固め工法	深層混合処理工法 (高圧噴射工法)	注入固化工法 (浸透固化工法)
概要	 モルタルや流動性を良くした砂を高い圧力で押し込み、その圧力で周囲の地盤を締め固める。	 セメント系改良材を高い圧力で地盤内に噴射して土と混合して部分的に固結させる。	 低い圧力で薬液を水平方向にゆっくり浸透させ固結させる。

【従来工法による注入固化工法】



【曲がりボーリングを用いた注入固化工法】

図-2 既設構造物の浸透固化工法の概要⁶⁾

いずれも小型の機械で小口径の孔を掘削して地盤を改良する方法であり、狭隘な場所において施工が可能である。また、構造物の床から孔を掘削し、構造物の直下に施工することも可能である。更に、圧入締固め工法と注入固化工法では、構造物の外側から斜めに施工、あるいは構造物の下に向けて湾曲した孔を掘削して施工することが可能な技術も適用できる。特に、周辺への影響を踏まえると、浸透固化工法は、無振動・無騒音な施工が可能であり、住宅密集地にも適用可能な工法のひとつとして有効な工法であり、図-2 に示すように既設構造物直下の改良の実績も多い。

従来の浸透固化工法は、改良範囲に特殊水ガラス系の溶液型薬液注入材を浸透注入することによって地盤中の間隙水をゲル状に固化させて改良するものである。このため、溶液型注入材は浸透性に優れるが、改良体の一軸圧縮強さは $q_u=50\sim100\text{kN/m}^2$ 程度⁷⁾で改良され、強度発現性や耐久性の面で劣る。このため、将来危惧される首都直下型地震、南海トラフ地震など想定しうる最大規模

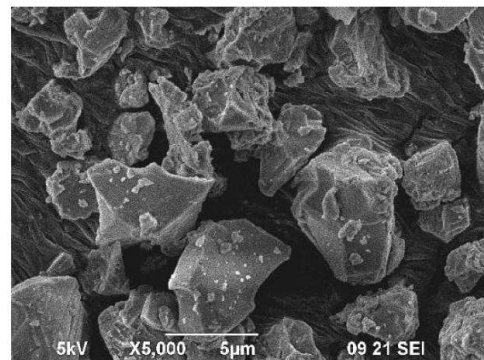
の巨大地震に耐えうるためには、より強度・耐久性が高く安全性を確保できる方法が期待される。

3. 極超微粒子セメントによる注入固化工法

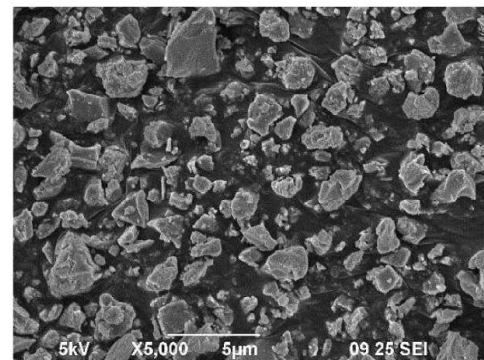
3.1 極超微粒子セメントについて

注入固化工法で用いられる溶液型以外の注入材としては、止水目的や強度・耐久性が必要な場合等に用いる懸濁液型の注入材として超微粒子セメントに代表されるセメント系注入材がある。従来のセメント系注入材は強度の発現性は期待できるが、浸透性については溶液型注入材と比較してかなり劣るため、細粒分を多く含む砂地盤への適用は困難と言われてきた。そこで、より浸透性を高めるために、ポルトランドセメントよりもセメント粒子を細かく粉砕することで、より浸透性を高めるために、ポルトランドセメントよりもセメント粒子を細かく粉砕した「超微粒子セメント」(平均粒径 $4\mu\text{m}$) へと改良されてきた。ただし、細粉砕を行い過ぎても細粉粒子が水和反応を生じてしまい、浸透性が低下する要因にもなる^{29),30)}。このようなセメント系注入材の短所を表-2 のように適用性を改善し、写真-1 及び図-3 に示すようにセメント粒子を粒径 $1\sim2\mu\text{m}$ 程度まで微粉砕するとともに、分散性を高めたセメントが「極超微粒子セメント」^{8),9)}である。

図-4 に普通セメント、超微粒子セメント、極超微粒子セメントについて、各注入材の粒径加積曲線を示すが、



(1) 超微粒子セメント



(2) 極超微粒子セメント

写真-1 極超微粒子セメントの顕微鏡写真⁸⁾

平均粒径 D_{50} は、従来の超微粒子注入材 ($4\mu\text{m}$) と比較して、さらに約 $1/3$ の $1.5\mu\text{m}$ 程度である。また、普通ポルトランドセメントの $20\mu\text{m}$ と比較して、約 $1/13$ である。更にこの材料は、水和反応の遅い高炉スラグを使用しており、ポリマー構造を有する特殊分散剤を使用することで、高度な分散性を保持して、高い浸透性を発揮できる強度で安全性の確保できる施工方法が期待できると考えられる。

表-2 セメント系注入材の適用地盤⁸⁾

透水係数 (m/s)	10^0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	0.005	強度
粒径 (mm)	2.0	0.042	0.075				
土質	礫	粗砂	細砂	シルト	粘土		
注入材料							
溶液型薬液注入材料							小
懸濁型薬液注入材料							大
普通セメントグラウト							大
超微粒子セメントグラウト							大
極超微粒子セメントグラウト							大

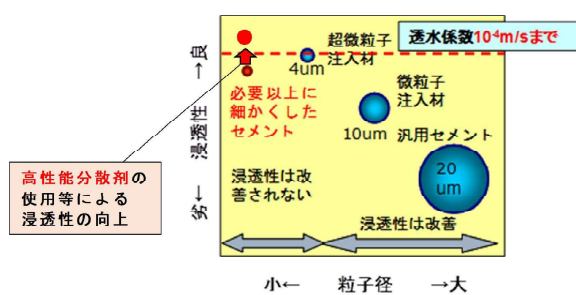
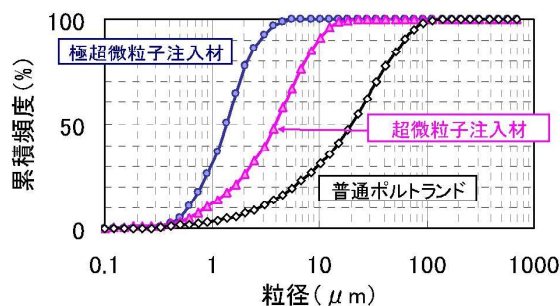
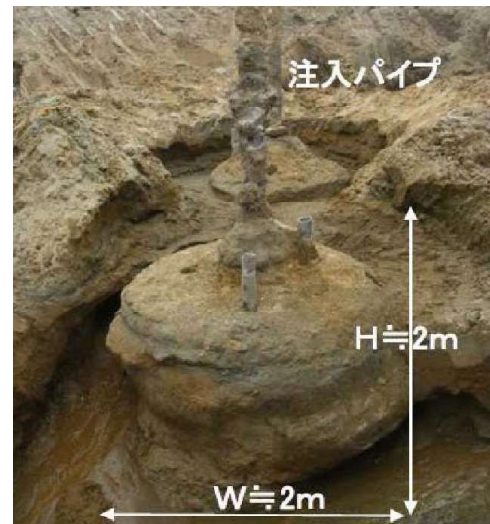
図-3 粒子径と浸透性の関係⁸⁾図-4 セメント系注入材の粒径加積曲線⁸⁾

写真-2 は、既往研究において成田層を対象とした試験施工により造成された改良体であるが、極超微粒子セメント浸透注入工法で、砂質土を固結する液状化対策が可能になることが確認されている¹⁰⁾。

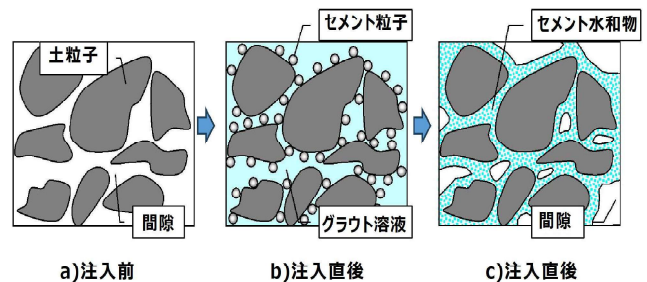
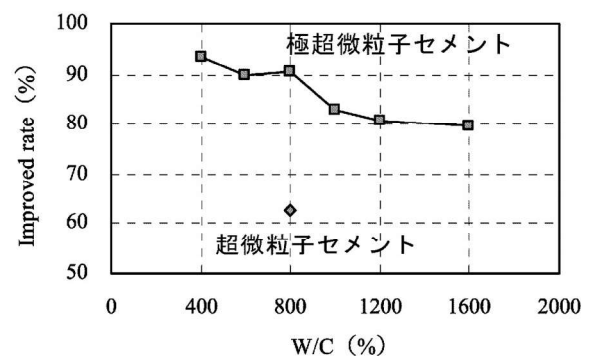
3.2 極超微粒子セメント注入材による改良原理・特徴

本工法のようにセメント系注入材を用いる浸透固化工法は、溶液型薬液を用いる浸透固化工法が地盤中の間隙を薬液で置き換えるのに対し、図-5 に示したように間隙に注入したセメントが水和物を生成し土粒子を結合することで固化体を形成するものである。

特に注入段階においては、水がセメント粒子の運搬役として地盤内を浸透させる役割を果たすが、注入材はセメント粒子の目詰まり等により濾過され、水だけが先行

写真-2 既往研究における注入後の改良体¹⁰⁾

して遠くへ浸透する。すなわち、特に細粒分が多い地盤では、セメント粒子が「ろ過現象」により遠くへ運搬されにくくなり目詰まりが生じやすくなると考えられる。また、図-6 は、小泉ら¹⁰⁾による砂質土地盤を対象とした極超微粒子セメント注入に関する三次元浸透固化実験による水セメント比と改良率（グラウトの注入量から推定される計画改良径に対する改良体の実測改良径との比）との関係である。この関係より、水セメント比 (w/c) が大きいほど出来形が低下する傾向が認められ、セメント濃度が低くても必ずしも浸透距離が長く、より広い範囲を改良できるわけではないことを示す実験結果となっている。この傾向は、注入材（セメントミルク）の凝縮・濃縮の影響が要因と考えられ、溶液型薬液注入工では扱われないセメント系注入材を用いた浸透固化工法の特徴と言える。

図-5 セメント系注入材の浸透固化に伴う硬化概念⁸⁾図-6 水セメント比と改良出来高の関係¹⁰⁾

3.3 水セメント比に着目した改良効果の検証方法

著者らは、浸透固化過程における注入材（セメントミルク）の凝縮・濃縮の影響に着目し、次式で表現される改良体の平均的な水セメント比、注入したセメントミルクの水セメント比および充填率との関係より、固化特性を評価する方法を提案している¹¹⁾。

$$(w/c)_{is} = \frac{Vn}{Q} \left\{ (w/c)_{cs} + \frac{\rho_w}{\rho_c} \right\} - \frac{\rho_w}{\rho_c} \quad \cdots(1)$$

ここに、 V ：改良体体積、 n ：間隙率、 Q ：注入量、 ρ_c ：セメントの密度、 ρ_w ：水の密度、 $(w/c)_{is}$ ：改良体の平均的な水セメント比、 $(w/c)_{cs}$ ：セメントミルクの水セメント比、である。なお、いわゆる薬液注入工法の設計で用いられる充填率（ $\alpha = Q/(n \cdot V)$ ）と各水セメント比との関係は、次式で関係付けられる⁴⁾

$$\alpha = \frac{\rho_w / \rho_c + (w/c)_{cs}}{\rho_w / \rho_c + (w/c)_{is}} \quad \cdots(2)$$

さらに、式(1)より注入効率として式(3)が導かれる。

$$\frac{V}{Q} = \frac{1}{n \times \alpha} = \frac{1}{n} \times \frac{1 + (\rho_c / \rho_w)(w/c)_{is}}{1 + (\rho_c / \rho_w)(w/c)_{cs}} \quad \cdots(3)$$

式(3)から、注入効率の値は、改良体の平均的な水セメント比が大きいくほど大きくなり、改良体の出来形（ V ）が大きくとれる（注入効率が良い）ことを意味している。

4. 現地実験に基づく検討事例

超微粒子セメントを用いた浸透注入工法に関する検討成果として、土質性状の異なる2つのサイトで現場試験を行い改良効果について検討した事例^{11),12)}を示す。

現場試験は、表-3に示すように佐賀県唐津市の沖積低地（細粒分含有率 $F_c=5\%$ 程度）と千葉県袖ヶ浦市の臨海埋立地（細粒分含有率 $F_c=20\%$ 程度）における砂質土層を対象として実施したものである。

表-3 現地注入実験結果

サイト	唐津市 ²⁾		袖ヶ浦市 ¹⁾	
	K-1	K-2	S-1	S-2
深度 (m)	2.5 ~ 5.0		1.5 ~ 2.5	
N 値	4		6	
細粒分含有率 F_c (%)	6		20	
間隙率 n (推定値)	0.49		0.51	
水セメント比 $(w/c)_{cs}$	12	8	16	8
注入量 Q (m ³)	2.19	2.77	1.68	1.68
改良体出来型				
直径 D (m)	1.5	1.7	1.0	1.0
高さ H (m)	2.5	2.5	1.0	1.0
体積 V (m ³)	4.4	5.7	0.8	0.8
充填率 α	1.02	1.02	4.19	4.19
水セメント比 $(w/c)_{is}$	11.7	8.0	3.56	1.65

写真-3に各サイトにおける実験結果を示す。唐津市のサイトでは直径 1.5～1.7m の概ね均一な改良体を確認できており、本工法の有効性を確認できる結果を得た。一方で、袖ヶ浦市のサイトでは均一な浸透注入ができないという結果を得ており、埋立地のような細粒分の多い不均質な地盤に対しては、何らかの浸透促進を図る必要がある。



(1) 唐津市（沖積低地）



(2) 袖ヶ浦（埋立地）

写真-3 現地注入実験結果¹¹⁾

各サイトでの実験結果および地盤調査結果に基づき、式(1)で算出した改良体の平均的な水セメント比と注入材の水セメント比との関係を図-7に示す。これより、唐津市での改良体の平均的な水セメント比は注入材の水セメント比とほぼ同じ値となり、充填率 $\alpha=1$ 程度となった。また、袖ヶ浦での改良体の平均的な水セメント比は注入材の水セメント比よりも小さい値となり、充填率も充填率 $\alpha>1$ と濃縮傾向を示した。袖ヶ浦市のサイトのように不均質な埋立地ではセメント粒子の目詰まり等に起因して濃縮が生じやすい条件であり、浸透促進が必要であると考えられる。なお、図-8には、既往文献³⁾より推定したデータも示しているが、改良体の平均的な水セメント比は、頭打ちとなる傾向が見られ、固化しうる最大の水セメント比 $(w/c)_0$ が存在する可能性があることがわかる。

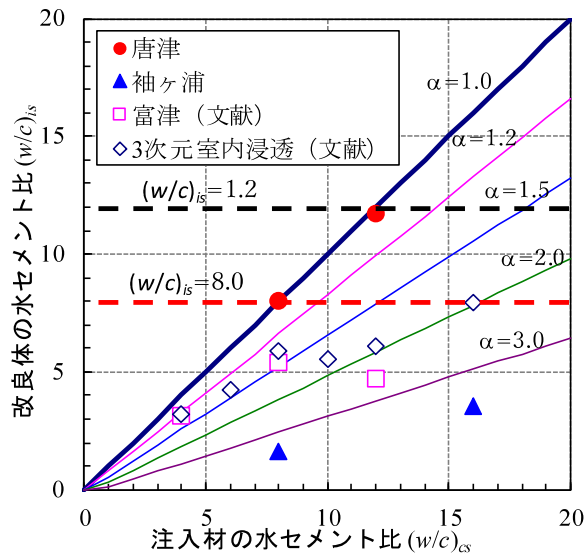


図-7 注入材水セメント比と改良体水セメント比

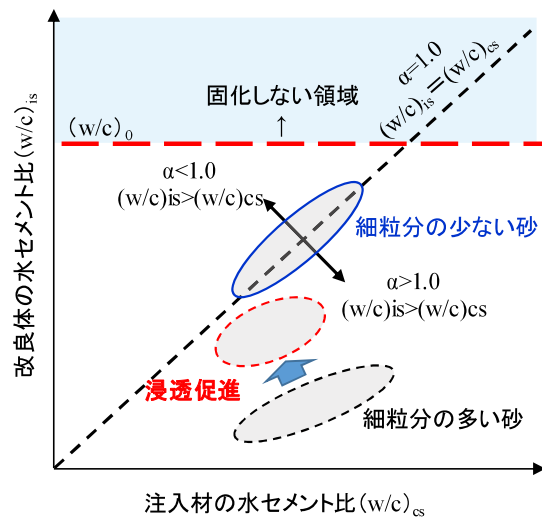


図-8 水セメント比を指標とする固化形態の模式図

5. 今後の課題（おわりに）

ここでは、極超微粒子セメントを用いた浸透注入工法について、その改良原理・特徴、水セメント比に着目した改良評価方法および現地実験事例について示した。現地実験の結果より、均質な地盤では目標改良仕様の改良体を造成でき液状化対策として有効であると考えられる。一方で、不均質な地盤については、不規則に介在する粘性土層等の影響で浸透しやすい部分だけに注入材が注入されてしまうため、いわゆる均質な改良体の造成が困難である。実際の埋立地はこのようなケースであることが多いと考えられ、不均質地盤への適用については解決していかなければならない課題である。これまでの取り組みでは浸透固化を想定しているが、不均質地盤についてはより高い注入圧力での割裂注入あるいは脈状注入でも、より広い範囲に注入する可能性がある。特に、極超微粒子セメントを用いる場合は、脈状に固結した部分で高い強度が期待できるため効果的であると考えられる。ただし、

高強度な脈状改良部が液状化対策としての効果・対策原理については更に詳細な検討が必要である。

また、極超微粒子セメント注入材を使用することで、従来の注入材よりも高強度かつ耐久性に優れた改良体を造成できるという長所もあるが、他の注入材と比較して高価であるという短所もある。近年では、火山灰¹³⁾やもみ殻灰¹⁴⁾等を活性フィラーとするジオポリマーを地盤改良に適用する研究も進められており、このようなジオポリマーを注入材として利用できればコスト・環境面でも改善されることが考えられる。

謝辞

本研究は、平成 26 年度国土交通省建設技術研究開発助成制度（政策課題解決型技術開発）によって実施された研究の一部である。研究を行うにあたり、東京電機大学の安田進名誉教授、岡山大学の西垣誠名誉教授には有用な助言を頂いた。また、唐津における現場試験では、(株)ワイ・ビー・エムより試験サイトの提供を頂いた。ここに、謝意を表します。

（執筆責任者 橋本和佳）

参考文献

- 1) 地盤工学会関東支部造成宅地の耐震対策に関する研究委員会：造成宅地の耐震対策に関する研究委員会報告書—液状化から戸建て住宅を守るための手引書—, 2013. 5.
- 2) 東京都都市整備局：液状化による建物被害に備えるための手引, 2013.3.
- 3) 安田進, 原田健二：東京湾岸における液状化被害, 地盤工学会誌, VOL.59, NO.7, PP.38-41, 2011.7.
- 4) 安田進：既設構造物の液状化対策, 月刊 積算資料公表価格版 2015 年 11 月号, 2015.12.
- 5) 田中俊行, 藤崎勝利：既設構造物の耐震補強, 液状化対策を目的とした地盤改良技術, 平成 23 年度中国地方建設技術開発交流会, 2011.10.
- 6) 山崎浩之, 善功企, 河村健輔：溶夜型薬液注入工法の液状化対策への適用, 港湾空港技術研究所報告第 41 巻第 2 号, 2002.2.
- 7) (財)沿岸開発技術研究センター：浸透固化処理工法技術マニュアル, 2010.
- 8) 金沢智彦：極超微粒子セメントの地盤工学への応用, 岡山大学博士論文, 2012.3.
- 9) 西垣誠, 金沢智彦：セメント系注入材の注入によるしらす斜面崩壊防止対策に関する検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.6, No.2, pp.213-224, 2011.
- 10) 小泉悠, 田中俊行, 竹内仁哉, 金沢智彦, 西垣誠：極超微粒子セメント注入材による砂質土地盤への注入工法の開発, 材料, Vol.61, No.1, pp.52-57, 2012.
- 11) K.Hashimoto, S.Nishihara, S.Oji, T.Kanazawa, S.Nishie, I.Seko, T.Hyodo, Y.Tsukamoto : Field testing

- of permeation grouting using microfine cement, Proc. ICE: Ground Improvement, Vol.169, No.2, pp.134-142, 2016.
- 12) Kazuyoshi Hashimoto, Weihong Wang, Taichi Hyodo & Yoshimichi Tsukamoto, Satoshi Nishihara, Shusuke Oji, Shunsaku Nishie & Ichiro Seko: Building up design basis for permeation grouting using ultra microfine cement to locally countermeasure against soil liquefaction, Proceedings of 3rd International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, Vancouver, Canada, July 16 – 19, 2017.
- 13) 西村輝, 西垣誠, 鈴木茂之: 火山礫を用いたジオポリマーによる落石防止材の研究, 第 57 回地盤工学会研究発表会, 2022.
- 14) 飯塚悠貴, 兵動太一, 立田真文, 竜田 尚紀: アルカリ水溶液がもみ殻灰を用いたジオポリマー改良土の強度に及ぼす影響, 令和 6 年度土木学会中部支部研究発表会, 2025.

7.4 ジオポリマー注入工法で安定化させる

1. はじめに

異常気象による豪雨や地震に対してどのように人命や市民の財産を守るために土木技術者は何をすれば良いかと考えると、結論は災害が起こる前に対策をして、その対策が劣化していくことをモニタリングして、再対策するシステムを構築することであるとなる。

色々な対策をして施設が劣化することが少しでも遅いことは、費用効果が良い対策であると評価される。しかし、長期的にモニタリングして管理していくことによって、対策する「技術の継承」もきわめて重要である。

しかし、現状では、過去に建設した施設の劣化が予想より早く、モニタリングをしていないために、この劣化が原因で施設の崩壊等が生じている。

世の中が忙しすぎるのかもしれないが、過去の構造物の劣化に関してのモニタリングすらしていないために、地盤が急に陥没したために地上では、交通が停止するなどの大災害が実際に生じている。

このような災害を防ぐために、地中構造物は劣化が遅いジオポリマーコンクリートの研究が、土木学会コンクリート委員会や農業土木学会等で議論されている。

2. 火山礫を用いたジオポリマーによる落石防止材の研究

2.1 背景

ジオポリマーの研究での原点は、火山灰と海水と生石灰であるが、生石灰を使うことはカーボンニュートラルの観点から現状では難しいので、生石灰を使わないで、伊豆大島に広く分布する玄武岩のスコリア状火山礫（以下、火山礫という）の組成はアルミナ・シリカを含みジオポリマー反応による硬化が期待された。表-1 に化学的組成割合を石灰灰、高炉スラグと合わせて示した。また、火山礫は環境基準の溶出試験をすべてクリアし、安全性や環境負荷の面から火山礫を用いたジオポリマーの研究に着手したり。

ここで本研究では、ジオポリマーの使用用途として、花崗岩地域で問題となる山でオニオン化した岩石の中で、落石発生源対策工法（予防工）の一つである岩盤接着工の接着材として利用できないかと考えた。今回使用したアルカリ溶液は珪酸ソーダ1号（以下、水ガラスという）を使用した。

2.2 火山礫の粒度特性

用いる火山礫は粒度調整された物で、その粒度特性と

表-1 化学的組成割合 (%)

組成	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
火山礫	47	16	11	9
石灰灰	40~75	15~35	2~20	1~10
高炉スラグ	31~35	13~20	-	36~45

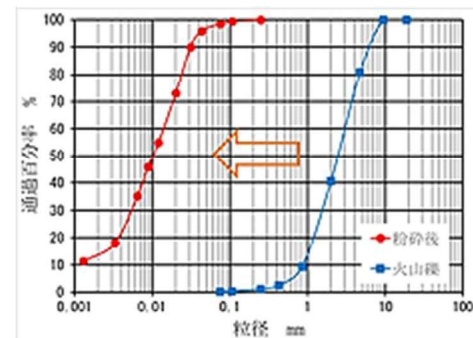


図-1 火山礫粉砕粒度特性

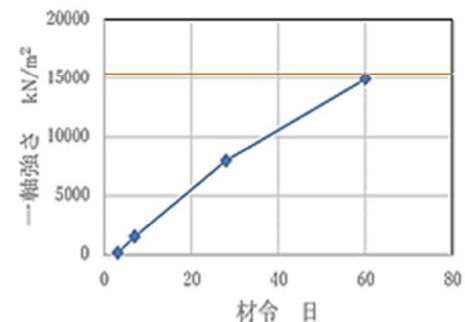


図-2 加温養生・室温養生 強度

して 50%粒径が 2.5mm と大きくこのままではポリマー反応が期待できないため、ボールミルを用いて粉砕し、単位重量当たりの表面積を大きくした。粉砕前後の火山礫の粒度特性を図-1 に示した。粉砕後の火山礫（以下、B フィラーという）の 50%粒径は 0.01mm となっている。また、一般的な石灰灰の 50%粒径は 0.01~0.04mm 程度とされている。

2.3 養生条件

ジオポリマーの特性として、加温養生することにより強度の早期発現が期待される。加温養生（60℃ 24 時間）と室温養生（14℃）の材令日数変化による一軸圧縮強さの比較を図-2 に示した。用いた試料の配合は重量比で、以下の通りである。

水ガラス：1 B フィラー：4 水：0.2

加温養生時の一軸圧縮強さ 15385 kN/m² に対し、材令 60 日の一軸圧縮強さ 14948 kN/m² と同程度の強度発現を確認できた。以降の室内試験では加温養生した試料を用いて試験を行った。

2.4 接着強さ試験

ジオポリマーと岩片がどの程度接着するかを測るため接着強さ試験を実施した。今回使用した岩片は、岡山県で広く分布し、不安定な状態の岩塊が多い花崗岩を用いる事とした。岩片は、表面の凹凸による接着強さの影響を少なくするため、ダイヤモンドホイールによる切断面で接着強さを試験することとした。試験に用いたジオポリマーの配合割合を表-2 に示した。

試験は JIS A 1171 「接着強さ試験」に準じて行う。岩片に 40mm×40mm の大きさでジオポリマーを形成し、その上に引張用の治具を接着するが、治具とジオポリマーの接着が強固にできないため、あらかじめジオポリマーを形成する際に、ボルトを埋込み治具と一体化させることとした。写真-1 に形成後の状況を示した。写真-2 には試験機の装着状況を示した。

接着強さ試験結果を表-3 に示した。表中には同配合で作成した一軸圧縮試験強さも合わせて記載した。

また、写真-3 には試験後のはく離状況を示した。はく離状況を見ると、ジオポリマー内部の引張破壊が約 60% 程度見受けられた。合わせて、岩片表面でも配合 A の試料を用いて試験した結果、配合 A と同様の 562 kN/m² の接着強さを確認できた。写真-4 に岩片表面はく離状況を示した。

2.5 促進スレーキング試験(JGS 2124-2020)

岩石の促進スレーキング試験は、乾燥／水浸を繰り返すことにより、スレーキング特性、耐久性を把握する目的で実施した。写真-5 に配合 A の試験前後の写真を示した。結果、スレーキング区分 0 (変化なし) であった。

2.6 まとめと今後の課題

岩盤接着工の設計法に関する文献は少なく、勘田(2002)²⁾の文献の設計例では、許容接着強さ(地震時)を 0.375 N/mm² (375 kN/m²) として計算している。今回の研究では環境負荷の少ない火山礫を用いたジオポリマーが、落石対策工の岩盤接着材として使用できるかの可能性を探るために行った。試験結果より、配合 A, B の試料においてはこの値を満たしていることから、岩盤接着材として利用できる可能性が高まった。

今後は実用化に向けて、経済性や、火山礫の粉碎システム、ジオポリマーの短所である使用時間の改善策として期待する添加剤の導入や、攪拌・圧送システムの検討を進めるとともに、力学特性の評価のための曲げ試験、施工性評価のスランプ試験、耐環境試験としての凍結・融解試験等も加え評価していきたい。

転石、浮石の不安定度を評価する手法として、落石危険度振動調査法(旧日本道路公団)や、深田ら(2013)³⁾は振動計測を用いた危険度評価の判定法を提案している。

表-2 接着強さ試験 配合割合(重量比)

配合	A	B	C
水ガラス	1	1	1
B フィラー	1	1.6	5
水	0.2	1	1.5

表-3 接着強さ試験結果

配合	A	B	C
接着強さ kN/m ²	539	381	184
一軸圧縮強さ kN/m ²	2301	1590	620



写真-1 試料作製状況



写真-2 試験状況



写真-3 はく離状況



写真-4 岩片表面試験後



a) 試験前

b) 試験後

写真-5 試験促進スレーキング

一方、微動アレーを用いた研究もされていると聞いている。これらの探査技術により転石、浮石の不安定度を定量的に評価し、接着工施工後の対策効果も合わせて評価していきたい。

3. おわりに

ジオポリマーの利用の壁は、珪酸ソーダ（水ガラス）の価格が高いためであることはわかっている。しかし、100 年で劣化する施設と 2000 年経って劣化する施設の差は、大きなものである。これを理解しないとジオポリマー材は土木の社会では使われない材料になってしまう。

しかし、安全を得るには、常にモニタリングする必要がある。1000 年の都の京都の木造建築物は常に匠により診断され、匠によって補修が続けられているから維持されていると考え、維持管理も高価な仕事である。どちらを選ぶかは、その国の哲学である。

謝辞

実際に実験を実施していただいた岡山土質試験センター長の西村輝様と、大島の火山礫である試験試料

及び、化学分析結果を提供くださった伊豆大島 村松興業株式会社 村松与志広様と共同研究をさせていただいたことをここに記して謝意とする。

（執筆責任者 西垣誠）

参考文献

- 1) 西村輝, 西垣誠, 鈴木茂之: 火山礫を用いたジオポリマーによる落石防止材の研究, 第 57 回地盤工学年次講演会, 2022.
- 2) 勘田益男: 落石対策工設計マニュアル, 2002.
- 3) 深田隆弘, 谷口達彦, 澁谷啓: 振動計測に基づく斜面上転石の落石危険度評価方法の提案, 2013.

