

第44回

土構造物

はじめに

土構造物とは、土または岩石などを材料として構築された構造物およびこれに接する小構造物の総称です。土構造物で取り扱う地盤材料は、岩から粘性土まで時間とともに変化する強度変形特性を有しています。土は、個体である土粒子と水および空気から構成され、同じ土でもそれらの構成比率や荷重履歴が異なれば強度変形特性が異なってきます。一般に、土はよく締め固めれば固くなりますが、関東ロームのような火山灰質粘性土は転圧を行うとかえって地盤を乱し、強度を低下させてしまうこともあります。超軟弱地盤では盛土施工に伴い数m規模の圧密沈下が発生することもあります。

このような扱いにくい土ですが、経済性や施工の容易さから、在来線の線路ではほとんどが土構造物です。鉄道総研の集計結果によれば、在来線(24,284km)と新幹線(2,765km)の

土構造物の割合は、それぞれ82%と17%です(図1)。

ここでは、このような土を用いた構造物(土構造物)に関する技術の歩みや技術基準の進展、今後を展望します。

土構造物技術の歩み

土構造物の歩みを明治から現在に至るまで概要をまとめると表1のとおりです。鉄道が初めて開通したのは明治5年(1872年)です。その後、各地で鉄道建設が盛んに行われ、高崎線が明治17年(1884年)、東北本線が明治24年(1891年)それぞれ開通し、明治22年(1889年)には東海道本線が全線開通しました。その間、土構造物に対する技術の蓄積も着々と行われました。

昭和に入っても鉄道網の拡充、整備が行われました。昭和4年には土質力学の父と言われるテルツァーギ(図2)の研究内容が紹介されました。彼は、土構造物の設計の基礎となる土質力学

を確立しました。今では一般的に使われている「有効応力」の概念はテルツァーギが提唱したものです²⁾。

昭和初期には、鉄道の総延長は13,000kmに達していました。昭和5年には鉄道省内に土質調査委員会が設立されて、実

務を反映した土質力学の調査研究が始まりました。委員会解散後も「土質調査」といわれるグループに引き継がれ、鉄道における土質の諸問題の研究が行われました。このメンバーの大部分は大臣官房研究所に所属していましたが、その後昭和17年(1942年)3月に鉄道技術研究所と改称され土質研究室という名称も初めて登場しました。

昭和14年(1939年)から20年(1945年)までは戦時状態でしたが、地盤の安定処理や自然斜面の降雨に対する問題などについて研究活動は比較的活発に続けられました。戦後は荒廃した国土の復興から始まりましたが、鉄道、道路の復旧、整備が最重点でした。

戦後、外国からの技術導入も活発でした。大型土工機械の導入のほか、軟弱地盤対策工法であるサンドドレーン工法や地下水位低下工法でるウェルポイント工法による工事が各々昭和27年(1952年)、昭和28年(1953年)に初めて行われました。

昭和30年代は日本の経済成長期にあり、東海道新幹線や名神・東名高速道路の建設が行われました。昭和30年(1955年)前後に行われた盛土内列車荷重による圧力分布測定、全国規模の路盤噴泥調査などの成果が、東海道新幹線の盛土構築標準などの基となっています。

昭和40年代は経済成長の波に乗って、山陽新幹線や青函トンネルなどの

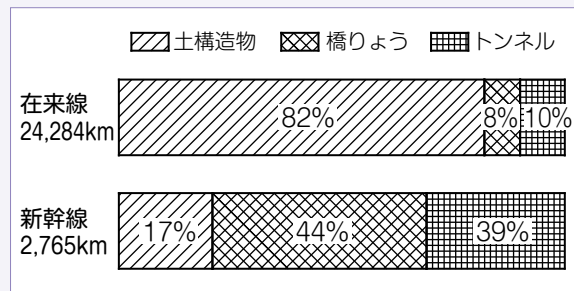


図1 土構造物などの採択比率 (2003年に実施した鉄道事業者103社のアンケート結果に、その後の開業延長を加算して集計したもの)

表1 土構造物技術の進展(文献1をもとに作成)

年	1870～1964年 明治3～昭和39年	1965～1974年 昭和40～49年	1975～1984年 昭和50～59年	1985～1994年 昭和60～平成6年	1995～2004年 平成7～16年	2005～2015 平成17～26年
主な建設事業	<ul style="list-style-type: none"> ・東海道新幹線の建設開業 ・名神高速道路の建設開通 ・土質、基礎調査コンサルタンツ業の発達 	<ul style="list-style-type: none"> ・山陽新幹線の建設開業 ・東名高速道路建設開通 ・公害対策 	<ul style="list-style-type: none"> ・東北、上越新幹線の建設開業 ・環境保全の規制 	<ul style="list-style-type: none"> ・山形新幹線の建設開業 	<ul style="list-style-type: none"> ・秋田、九州新幹線(鹿児島ルート)の建設開業 	<ul style="list-style-type: none"> ・北陸新幹線の建設開業 ・大阪駅大規模改良・再開発 ・新東名高速道路建設開通
技術基準	<ul style="list-style-type: none"> ・土工其ノ他工事示方書標準制定 	<ul style="list-style-type: none"> ・土構造物の設計施工指針(案)(昭和42年) 	<ul style="list-style-type: none"> ・建造物設計標準解説土構造物(昭和53年) 	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄道構造物等設計標準・同解説土構造物(平成4年) 	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計(平成11年) 	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄道構造物等設計標準・同解説土構造物(平成19年)
主な土構造物技術	<ul style="list-style-type: none"> ・テルツァーギの土質力学紹介 ・土質工学会発足 ・新技術の導入 	<ul style="list-style-type: none"> ・省力化軌道の発達 ・特殊土の研究開発 ・液状化の研究 	<ul style="list-style-type: none"> ・補強土工法の発達 ・深層混合処理工法の発達 ・無公害工法の発達 	<ul style="list-style-type: none"> ・剛壁面補強土壁工法(RRR工法)の開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・土構造物の性能評価法の発達 	<ul style="list-style-type: none"> ・補強盛土一体橋りょう(GRS一体橋りょう)の開発 ・既設盛土一体橋りょう(NRS一体橋りょう)の開発

工事が大々的に行われました。この頃は環境問題や工事公害が取り扱われたこともあり、量よりも質を重んじた多目的事業への転換期となりました。

昭和39年(1964年)に開業した東海道新幹線はまもなく路盤噴泥や盛土沈下といった土構造物の問題が露出しました。これらに対する実工事の経験を基に昭和42年(1967年)に土構造物の設計・施工指針(案)が制定されました。

昭和50年代に入って、経済の安定成長とともに土木事業におけるビックプロジェクトは少なくなりましたが、東北、上越新幹線の開業があり、高速道路網の拡大は引き続き行われました。またこの年代は設計施工の合理化や省力化が強く叫ばれた年でもありました。また、同時に環境保全と維持管理に対する技術の重要性が着目された年でもありました。

昭和60年代から平成初期には山形新幹線が開業するとともに、ジオテキスタイルを用いた補強土工法(RRR工法)などの新技術の開発が行われました。RRR工法は、土中にジオテキスタイルを水平に配置することにより、土自身の安定化を促進する工法です。主に鉄道施設に採用されており、現在でも施工実績が伸びています。

最近では、補強盛土一体橋りょう(GRS一体橋りょう)や既設盛土一体



図2 カール・テルツァーギ、1926年

出典: Reprint from "Karl Terzaghi: The Engineer As Artist," by courtesy of the author, Professor Richard E. Goodman.

化橋りょう(NRS一体化橋りょう)が開発されました(図3)。GRS一体橋りょうは、連続桁・壁面工と壁面工背面に定着したジオテキスタイルで補強した盛土を一体化させた構造物です。また、NRS一体化橋りょうは、既設橋台前部から太径の補強材で盛土を補強した後、桁を橋台と一体化させた構造物です。鉄道総研では、上記二つの橋りょうの実物大模型を構築し、その高い耐荷性能を確認しました。

技術基準の進展

大正時代から現在までの土構造物に関連する技術基準の変遷は表1に示し

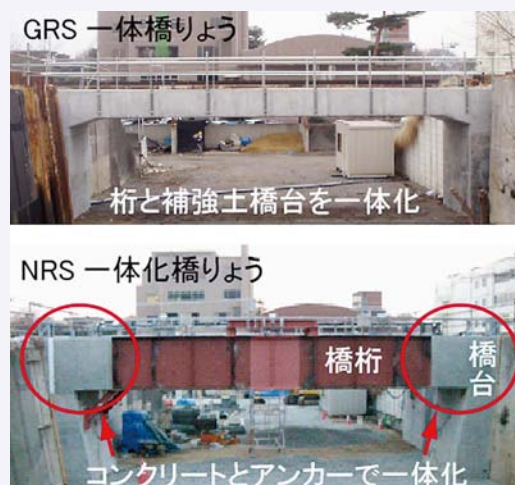


図3 (公財)鉄道総合技術研究所で建設されたGRS一体橋りょうとNRS一体橋りょうの実物大模型

たとおりです。盛土・切土の寸法は、明治41年3月に制定された「土工定規」に定められたのが最初です。その後追加修正を経て昭和4年制定の国有鉄道建設規定に引き継がれました。

土構造物に関する初めての技術基準は、現在の土工其ノ他工事示方書標準(大正6年)となります。この標準では、施工基準に関する内容が主であり、設計に関する記述は多くはありませんでした。

設計の基準としては、東海道新幹線の構築基準である新幹線規格(昭和36年)に開業後の実績を加味して、土構造物の設計施工指針(案)(昭和42年)が作成されました。この設計施工指針

(案)は、土工を構造物としてとらえて、計画・調査・設計・施工に至る一連のプロセスにおける技術上の留意点をまとめた本格的な基準であり、当時としては画期的なものでした。

その後、昭和53年に建造物設計標準解説 土構造物が制定されました。この標準は、土構造物の構築を高架橋並みのメンテナンスフリーを可能とすべく制定されました。盛土の層厚管理材の配置、構造系法面工の使用、強化路盤の採用、盛土支持地盤条件の提示などがなされ、従来よりも制約の厳しい内容となりました。また、補強土構造物の設計方法について初めて記述されました。この標準では補強土構造物として、1963年にフランスのアンリー・ビダール (H.Vidal) によって発明されたテールアルメ工法 (図4) が記述され

ました。テールアルメ工法は、帯状鋼板 (ストリップ) の補強材と壁面材 (スキン) により構成される補強土構造物です。我が国では1967年頃に紹介され、旧国鉄技術研究所においていち早く研究開発が行われ、旧建設省土木研究所、旧日本道路公団などにおいても広範な研究が行われ、現在でも道路では施工実績を伸ばしています。

平成4年に鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物が刊行されました。この標準では、テールアルメ擁壁および盛土補強土擁壁の設計手法について示されました。盛土補強土擁壁は、面状の補強材と曲げ剛性のある壁面で構成されるものと定義され、その設計手法について詳細に記載されました。この標準で取り扱われた盛土補強土擁壁は、後に説明する兵庫県南部地震にお

行されました。この標準では、強い地震動を考慮し、耐震性能を設定して構造物の安全性を照査する性能照査型設計法を採用しました。盛土のL2地震動に対する変形量は、簡易に地震時残留変位量を算定できるニューマーク法を適用することとなり、これは大きな技術革新であると言えます。

平成19年には、鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物が刊行されました。この標準では、最新の研究開発成果を取り入れるとともに、限界状態設計法を基本とした性能照査型設計法を初めて土構造物の設計に導入しました。この設計法は、土構造物を他の構造物と同一のルールに基づいて性能を照査できる点で優れています。

補強土工法の適用拡大

いてほとんど変状が発生せず、高い耐震性を示しました。

平成7年1月17日にマグニチュード7.3の兵庫県南部地震が発生し、土構造物にも大きな被害がありました。この地震による被害の重大性に鑑み、鉄道構造物等設計標準 (耐震設計) が刊

冒頭で述べたように、土は扱いにくい反面、ちょっとした工夫で、有効に活用することができます。古代ローマや中国においては、紀元前から盛土や地盤の中に葦や竹などの自然の補強材を挿入して土を補強する方法が採用されてきました。我が国でも土木工事に竹や木を利用した例は古くからあり、

軟弱地盤に対して木杭を打設したり、粗朶 (そだ: 切り取った木の枝) を敷きならす粗朶工法が古くから採用されています。

現在、理論体系に基づいた近代的な補強土壁工法として、テールアルメ工法、多数アンカー式補強土壁工法、ジオテキスタイルを用いた補強土壁工法が主に道路施設に適用されて

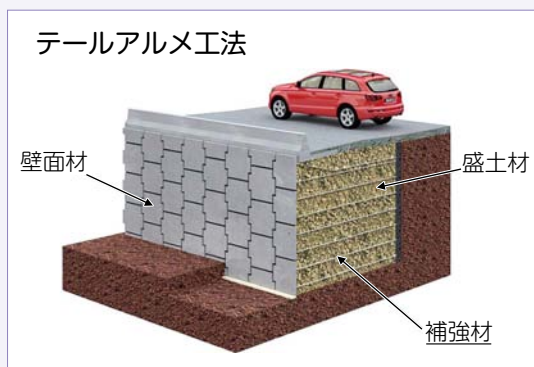


図4 テールアルメ工法 (ヒロセ (株) より提供)

表2 補強盛土と盛土補強土擁壁の概要

	イメージ図	特徴
補強盛土		ジオテキスタイルと植生土のうなどで構成される、勾配が1:1程度の急勾配盛土
盛土補強土擁壁		ジオテキスタイルと壁面工などで構成される、剛な壁面を有する補強土擁壁

表3 補強切土と切土補強土擁壁の概要

	イメージ図	特徴
補強切土		地山補強材との組み合わせの急勾配切土
切土補強土擁壁		地山補強材と壁面工との組み合わせた補強土擁壁



図5 三陸鉄道に採用されたGRS一体橋りょう

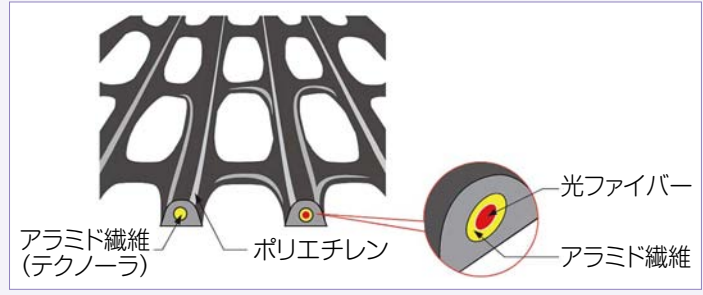


図6 光ファイバーを内蔵した補強材(前田工織(株)より提供)

います。これらのうち、鉄道施設では、ジオテキスタイルを用いた補強土壁工法が採用されています。これらの中で、補強材にジオテキスタイルを用いた補強土壁工法は、1970年代後半からイギリスで使用され始め、設計法が整備された後、急速に広まりました。我が国においては、1980年代から研究開発が進み、現在ではRRR工法として、道路・鉄道の分野で広く適用されています。

鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物(平成19年)では、表2と表3に示すように、ジオテキスタイルを配置した盛土を補強盛土、盛土における補強土壁を盛土補強土擁壁、地山補強材を配置した切土を補強切土、地山における補強土壁を切土補強土擁壁と分類しています。

補強土は、上記で説明した土留め構造物としての適用以外にも、橋台や橋りょう構造物としても適用されています。橋台では、セメント改良補強土橋台が九州新幹線大牟田地区において現場適用されました。橋りょうでは、GRS一体橋りょうが三陸鉄道において現場適用されました(図5)。このように、補強材を用いることで土を有効に活用することが可能となり、経済性や施工性を向上させることができます。

今後の展望

今後、我が国の建設市場は縮小傾向にあり、構造物の維持管理が益々重要となってきます。これまで、土構造物

の維持管理は、定量的な検査方法が確立されていないことから、目視主体で行われてきました。今後は、定量的な検査方法を開発し、現場で実証試験を行いながらデータを蓄積し、定量的な健全度診断法を開発する必要があります。例えば、

図6に示した光ファイバーを内蔵した補強材を補強土構造物に敷設することで、補強材のひずみを計測できます。建設初期と老朽化した補強土構造物内に敷設した補強材のひずみを比較することで、健全度診断が可能となります。また、図7に示したような監視センサーを設置して補強土壁のモニタリングも可能です。定期的なモニタリングを実施することで、目視で行ってきた定性的な検査から定量的な検査に移行が可能であり、計画的な維持管理が実施できます。

おわりに

我が国は、多種多様な地盤条件下において、土の利点を最大限に活かし、建設工事に利用してきました。昭和30年代の土工は、切取り量と盛土量が丁度釣り合った設計施工が経済的でよいものと考えられていたため、盛土は切取りやトンネルの掘削により発生する土や岩ずりの土捨て場でしかありませんでした。しかし、東海道新幹

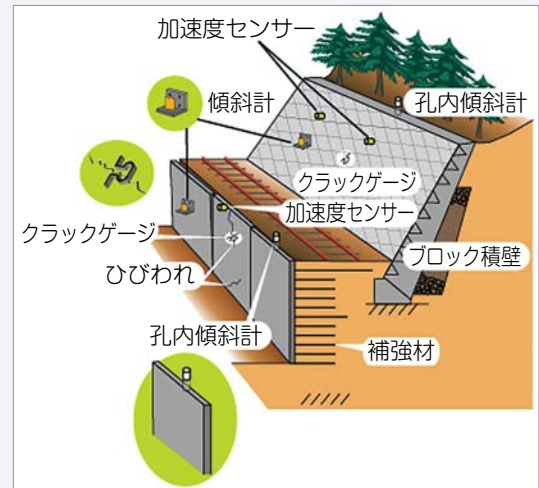


図7 補強土壁のモニタリング例

線の盛土の保守経験から、盛土の沈下、路盤噴泥、のり面崩壊などの欠陥が明らかになり、以後の新幹線においては構造細目や盛土材料の選定基準を細かく規定することとなりました。

土は良く締め固め、排水設備を設け、拘束圧を高めることで、飛躍的に強度変形特性が改善されます。また、土構造物は、他の構造物と比較して、建設工事期間が短く、条件によっては経済的となります。これからも土の利点を最大限に活かし、有効に活用していきたいと思えます。

(篠田昌弘/前 構造物技術研究部 基礎・土構造物研究室)

文献

- 1) 伊藤孝之, 草間一, 佐藤博紀, 村田修: 土構造, 八十島義之助・菅原操 監修, 新鉄道土木シリーズ2, 山海堂, 1985
- 2) リチャード・E・グッドマン著, 赤木俊允訳: 土質力学の父 カール・テルツァーギの生涯, 社団法人地盤工学会, 2006