

施工条件を考慮した掘削土留め工の試設計

松丸 貴樹* 島田 貴文** 浅野 翔也**

Trial Design of a Temporary Earth-retaining Wall Considering Construction Conditions

Takaki MATSUMARU Takafumi SHIMADA Shoya ASANO

In the design method of a temporary earth-retaining wall, the allowable stress method will be applied following the current design method. However, the design standards about the structures related to temporary earth-retaining walls have been already revised, so the items revised in these design standards should be also applied in the design of the retaining wall. In this paper, trial design of two temporary earth-retaining walls with different types of earth-retaining support was carried out. The revised points are explained precisely by means of the trial design. Furthermore, the calculation method of the penetration depth of the retaining wall without any support will be revised. The influence of this revision is explained by means of the trial calculation of the penetration depth.

キーワード：掘削土留め工，試設計，支持力，安定，根入れ長

1. はじめに

現在改訂が進められている「鉄道構造物等設計標準・同解説（開削トンネル）」に併せ、掘削土留め工の設計手法は「鉄道構造物の建設等に用いる掘削土留め工設計指針」（以下、「改定指針案」と記す）として取り纏められる予定である。開削トンネル本体の設計は限界状態設計法から性能照査型設計に移行する予定であるが、掘削土留め工の設計については現行の許容応力度法に基づく設計が踏襲されることとなっている。これは、掘削土留め工が仮設構造物であることを踏まえてのことである。また、例えば文献1)のように土木学会が定める掘削土留め工の設計においても許容応力度法が採られている。

一方で、現行の掘削土留め工の設計法²⁾（以下では、「現行指針」と記す）が整備されて以降、関連する設計標準の改訂が進められている。例えば、「鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物）」（以下、「基礎標準」と記す）³⁾では、地盤反力係数の算定法以外に、例えば支持力算定式なども改められており、これらの改訂点を掘削土留め工の設計においても活用することとなる。

本解説では、具体的な掘削土留め工の設計の概要を施工条件の異なる土留め形式を2例採り上げて示すと共に、この中で関連する設計標準の改訂等を踏まえて現行の設計との変更点について述べる。また、併せて自立式土留め壁の根入れ長の算定方法の修正が行われており、その概要と試算を通じた根入れ長の算定結果に及ぼす影響度についても紹介する。

2. 掘削土留め工の設計フロー

掘削土留め工の基本的な設計の手順を図1に示す。地盤調査や室内土質試験の結果を踏まえて土留め工の断面形状を設定した後に、掘削底面の安定の検討、土留め壁の根入れ長の検討、土留め壁の応力・変形に関する検討、土留め支保工（腹起し、切ばり、火打ち等）の検討を行う。また、路面覆工を有する場合には、覆工版や中間杭に関する検討を行う。

土留め工の設計自体はここまでの手順となるが、都市部などでの既設構造物に近接した施工となる場合には、周辺地盤・構造物の変形や地下水流動の変動などの影響を予測し、影響が小さいことを確認することや必要時には対策工の検討を行うこととなる。また、施工時には計測管理を行って、必要に応じて文献4)に示すような情報化施工による計測結果の設計への反映を行う。

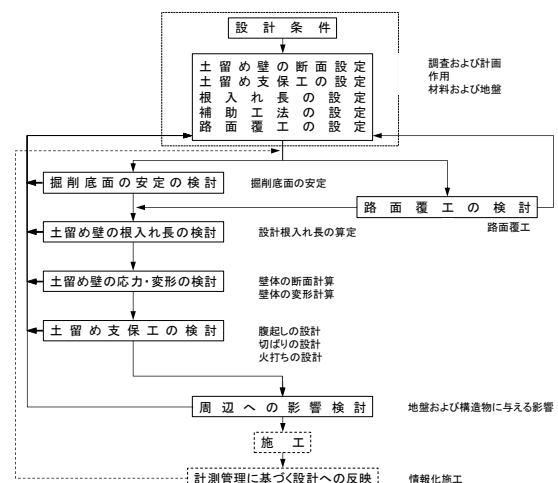


図1 掘削土留め工の設計の基本的な手順

* 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室
 ** 元 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室

特集：開削トンネルの設計技術

3. 自立式土留め壁の設計根入れ長の算定方法

3.1 改訂の概要

土留め壁の設計根入れ長の算定は、「現行指針」以前の技術基準（「掘削土留工設計指針」，以降では「S62指針」と記す）⁵⁾において、受働側の側圧による抵抗モーメントと主働側の側圧による作用モーメントが釣り合う釣り合い根入れ長を単に1.2倍したものが設計根入れ長とされており、他企業体の掘削土留め工の設計指針では現在もこの手法が多く用いられている。しかしながら、この手法は釣り合い位置の地盤状況等に応じた設計根入れ長の算定方法ではなく、例えば土留め壁先端付近が強固な地盤に根入れされるような場合などでは過大な根入れ長が必要となる場合があった。そこで、日本鉄道建設公団（現・鉄道建設・運輸施設整備支援機構）の「深い掘削土留め工指針」⁶⁾において設計根入れ長の算定方法を、作用側となる掘削背面側の側圧を1.2倍に割り増して求めたモーメントが釣り合う根入れ長を設計根入れ長とする方法が提案され、「現行指針」においてもこの手法が採用されている。「改定指針案」でもこの手法の基本的な考え方が踏襲されているが、部分安全係数法の作用係数の考え方との整合性を高めるため、自立式土留め壁の設計根入れ長の算定方法において具体的な作用の割増しの方法が若干修正される。以下にその概要を示す。

自立式土留め壁の設計根入れ長の算定方法の概要を図2に示す。「S62指針」は図2(a)に示すように根入れ長を直接割り増していたのに対して、「現行指針」では掘削背面側の側圧を割り増すこととしていた。これは、切ばり式等支保工を有する土留め壁では概ね作用側の割増しとなり、いわゆる部分安全係数法における作用係数の考え方が取り入れられていると解釈できる。しかしながら、自立式土留め壁の場合には、掘削側地盤および背面側地盤の主働・受働状態が図中のn-nで深度方向に変化するため、n-nより下方では掘削背面側が受働状態として抵抗側となる。すなわち、掘削背面側を一律に割り増すという図2(b)の「現行指針」の取り扱いとは、自立式土留め壁においては作用を割り増すという作用係数の考え方と整合せず、計算結果の力学的な意味が不明確になるという課題があった。

そこで、「改定指針案」においては図2(c)に示すように、自立式土留め壁の設計根入れ長の算定法として、n-n点より上方・下方での状態の違いを考慮し、作用側となる主働状態の側圧を割り増した上でモーメントの釣り合いを解く方法に改め、作用係数の考え方を明確に取り入れることとしている。

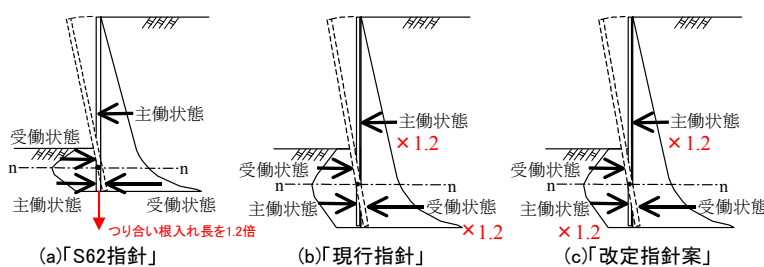


図2 自立式土留め壁の設計根入れ長算定手法の概要

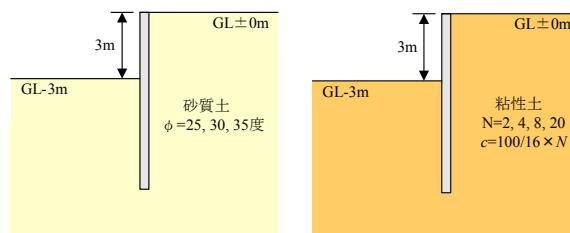


図3 検討地盤モデル

表1 設計根入れ長算定結果（単位：m）

(a) 砂質土地盤

φ (度)	「現行指針」	「改定指針案」
25	3.62	3.55
30	2.72	2.83
35	1.94	2.04

(b) 粘性土地盤

N 値	c (kN/m ²)	「現行指針」	「改定指針案」
2	12.5	21.14	20.45
4	25.0	5.36	5.85
8	50.0	2.11	2.22
20	100.0	0.90	1.35

3.2 試設計による設計根入れ長算定結果の比較

以下では、「現行指針」と「改訂指針案」に基づく自立式土留め壁の設計根入れ長の算定を行い、両算定法によって得られる設計根入れ長の違いを検討した。

3.2.1 計算条件

試設計を実施した断面を図3に示す。掘削深さは3m、地盤は砂質土および粘性土の単一の地盤モデルとした。砂質土地盤では、内部摩擦角φを25、30および35度と5度ずつ変化させた3ケースを設定した。一方、粘性土地盤では土圧の算定にN値および粘着力cが必要となるが、本試計算ではN値を2、4、8および20と変化させ、粘着力cは簡単のため $c=100/16 \cdot N$ (kN/m²)の関係式に基づいて算定することとした。

3.2.2 計算結果および考察

砂質土地盤、粘性土地盤において算定された設計根入れ長の一覧を表1に示す。これらの結果から、「改定指針案」で算定される設計根入れ長は、「現行指針」と大きくは変わらず、軟弱地盤では若干根入れ長が小さく

なり、一方で硬質地盤では若干大きくなる傾向となっている。

3.2.3 粘着力の設定に関する試算

上記の $N=2$ の粘性土地盤では掘削深度に比べて算定される根入れ長が 20m 以上と非常に大きく、実務的には非現実的な根入れ長が算定されている。そこで、掘削底面以深の地盤条件を変えて、図 4 に示す 2 つの地盤モデルを対象とした設計根入れ長の算定を「改定指針案」に基づき行った。

まず (a) では粘着力の大きさに関する検討として、 $N=2$ の粘性土地盤ではあるものの、一軸圧縮試験等から直接粘着力を求めることで、大きな粘着力が得られた場合を想定した計算を行った。ここでは粘着力 $c=25.0\text{kN/m}^2$ および 50.0kN/m^2 が得られたものとする。この条件において、算定された設計根入れ長を表 2 に示す。粘着力が増加することで、設計根入れ長は短くなっていることがわかる。

また、(b) では掘削底面以深に砂質土地盤が存在する場合に、設計根入れ長がどのように変わるか計算した。対象とする地盤モデルでは、掘削底面以深に、 $\phi=25$ 度および 30 度の砂質土が堆積する条件を設定した。算定される設計根入れ長を表 3 に示す。掘削底面以深に砂質土層が存在することによって、根入れ長は短く算定されることがわかる。

4. 施工条件を考慮した掘削土留め工の設計

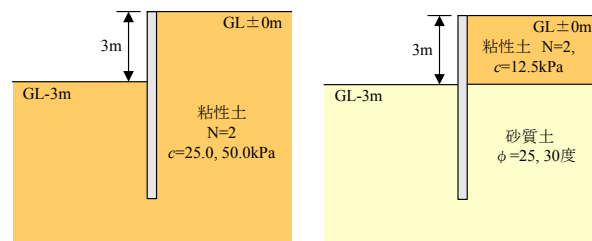
本章では図 1 に示した基本的な掘削土留め工の設計の部分を対象に、切ばり式土留め工、および補強土式土留め工の設計事例を通じて具体的な設計の流れを示す。こ

の中で、主に関連する技術基準の改定に併せた現行の設計との変更点を示していく。

4.1 切ばり式土留め工の設計

4.1.1 切ばり式土留め工の設計条件

土留め工の断面図および地層構成を図 5 に示す。土留め壁の種類はソイルセメント壁 (H-390 × 300)、芯材間隔 0.45m であり、掘削深さが 21m、掘削幅 17m、掘削延長 50m である。路面覆工を有し、自動車荷重が作用する構造となっている。



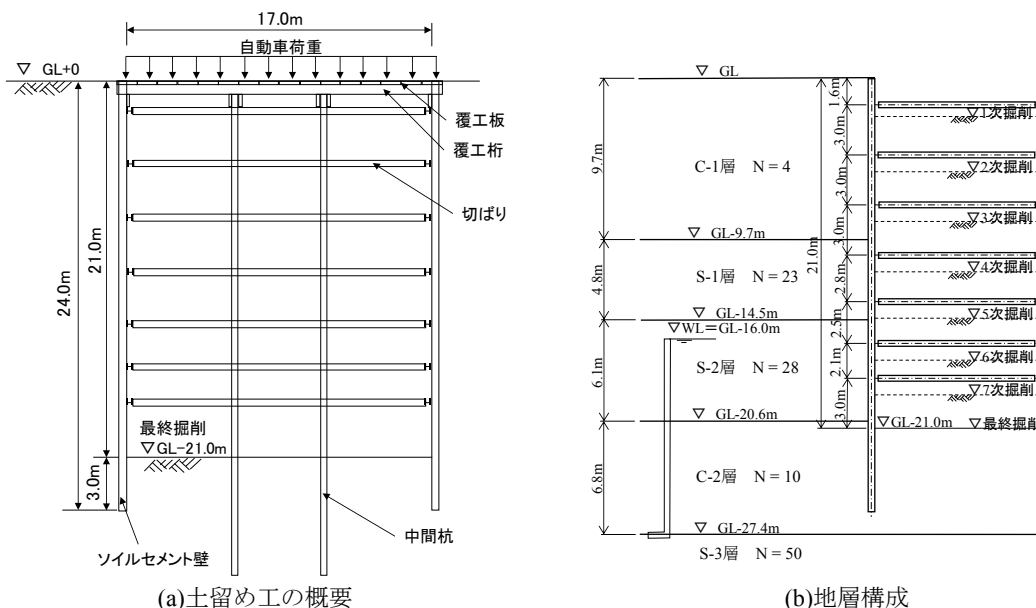
(a) 粘着力を変えたケース (b) 粘土・砂互層としたケース
図 4 検討地盤モデル

表 2 粘着力が大きい場合の根入れ長算定結果
(単位：m)

N 値	c (kN/m ²)	「改定指針案」
2	25.0	7.63
	50.0	3.19

表 3 互層地盤の場合の設計根入れ長算定結果
(単位：m)

ϕ (度)	「改定指針案」
25	4.54
30	3.72



(a) 土留め工の概要 (b) 地層構成
図 5 切ばり式土留め工の断面図

特集：開削トンネルの設計技術

4.1.2 掘削底面の安定の検討

土留め壁の設計に際しては、ヒービング、ボイリング、盤ぶくれといった掘削底面の安定に関する検討が必要となる。図5に示した対象地盤においては、掘削底面の土質が被圧地下水による揚圧力を受けるため、盤ぶくれに対する検討を行う必要がある。

盤ぶくれに対する安定の検討は、図6に示すように揚圧力とこれに抵抗する各成分の重量バランスを考え、次式により行うこととしている。

$$\frac{W}{F_1} + \frac{C_1}{F_2} + \frac{C_2}{F_3} \geq U \quad (1)$$

ここに、 W は被圧面以浅の土塊重量 ($\Sigma B \cdot t \cdot \gamma$) (kN/m)、 C_1 は根入れ部分の土留め壁と地盤の摩擦抵抗 ($2 \cdot \Sigma f \cdot t_1$) (kN/m)、 C_2 は難透水層のせん断抵抗 ($2 \cdot \Sigma \tau \cdot t_2$) (kN/m)、 U は水圧 (揚圧力) ($H \times B$) (kN/m)、 B は掘削幅 (m)、 t は重量抵抗層の厚さ (m)、 f は壁面との摩擦強さ (kN/m²)、 τ は地盤のせん断強さ (kN/m²)、 t_1 は摩擦抵抗厚さ (m)、 t_2 はせん断抵抗厚さ (m)、 γ は重量抵抗層の湿潤単位体積重量 (kN/m³)、 H : 難透水層下面に作用する被圧水頭 (kN/m²)、 $F_1 \sim F_3$ は各抵抗成分に対する安全率 ($F_1=1.1, F_2=6, F_3=3$) である。

式(1)左辺の C_1 が含まれる項は、根入れ部分の土留め壁と地盤の摩擦抵抗の算定の部分である。「基礎標準」では、杭種に応じた支持力算定式が整備されており、この算定式を土留め壁の摩擦抵抗の算定に活用できるよう、「改定指針案」においては表4に示す土留め壁の種類に応じて「基礎標準」に示される杭工法の周面摩擦強さの算定を行うことができるようにしている。壁面との摩擦強さ f は、杭の基準周面支持力度 r_{tk} に杭周面の降伏支持力に関する地盤修正係数 ρ_{df} を乗じた値としている。

なお、後述する鉛直荷重が作用する土留め壁の許容鉛直支持力を算定する際にも、同表に従って土留め壁の種類に応じた先端支持力度、周面支持力度の算定を行うこととしている。

また、土留め壁の施工上の工夫を行うことで、式(1)に示す各成分以外の抵抗力を見込むことができる場合には、安全率を適切に定めた上で、抵抗力を適切に評価し設計に活用できることとしている⁷⁾。

本土留め工の場合には、被圧面に作用する水圧 ($U=1938\text{kN/m}$) がせん断抵抗の総和 (2055kN/m) 以下となることを確認した。

4.1.3 設計根入れ長の検討

設計根入れ長の算定は、上記の掘削底面の安定の検討に加えて、①モーメントのつり合いから求める根入れ長、②支持力の検討から求める根入れ長、③定常性から定まる根入れ長について検討を行うこととしている。

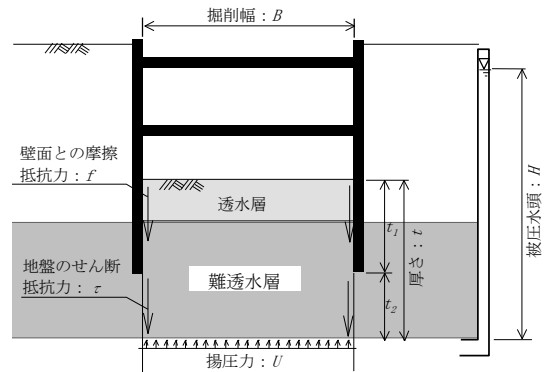


図6 盤ぶくれの検討方法

表4 土留め壁の種類と摩擦抵抗の算定に用いる杭工法の関係

土留め壁の種類	「基礎標準」の杭工法
鋼矢板壁	打込み杭工法 (先端開放鋼管杭)
鋼管矢板壁	打込み杭工法 (先端開放鋼管杭) 中掘り根固め杭工法
RC地下連続壁	場所打ち杭工法 (安定液による掘削の場合)
鋼製地下連続壁 (コンクリートを用いる場合)	
柱列式地下連続壁	
泥水固化壁	鋼管ソイルセメント杭
鋼製地下連続壁 (ソイルセメントを用いる場合)	
ソイルセメント壁	

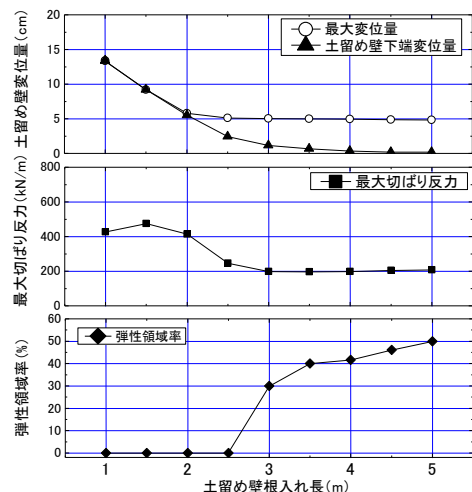


図7 土留め壁の根入れ長に対する安定度解析結果

図5の土留め工において、①の検討では根入れ長 $\ell=2.75\text{m}$ 、②の検討では根入れ長 $\ell=3.0\text{m}$ で条件を満足することを確認した。また、③の検討については、弾塑性法を用いた計算により、土留め壁に発生する応力や変形量、支保工反力が一定値に収束する定常状態であ

ること、許容変位量以内であることを確認するため、図7に示すように、根入れ長 $l=5.0\text{m}$ まで 0.5m ピッチで根入れ長を増分して安定度解析を実施した。安定度解析の結果、根入れ長 $l=3.0\text{m}$ で土留め壁変位と切ばり反力が一定値に収束していることから定常状態であると判断できる。

4.1.4 壁体の断面計算・変形計算

決定した根入れ長を踏まえ、弾塑性法により壁体の断面計算・変形計算を行った。水平地盤反力係数の算定は文献4)に示す方法により行っている。図8に最終ステップの土留め壁変位と曲げモーメントの深度分布を示す。

4.1.5 路面覆工および中間杭の設計

計算を実施した路面覆工の断面図を図9に示す。中間杭はH鋼杭である。計算例では、路面覆工の応力度およびたわみの検討、ならびに中間杭の応力度および支持力の検討を行った。

中間杭の許容鉛直支持力の算定は、「改定指針案」では一般に「基礎標準」により算定することとしている。この際に、中間杭は仮設工事での使用であり、ある程度の沈下に対して覆工板のジャッキアップ等で対処できるため、杭基礎の安定（安全性、地震時以外）の設計鉛直支持力 R_{vd} を許容鉛直支持力 Q_a としてよいこととしている。

ただし、路面覆工は自動車荷重を受けるため、協議等

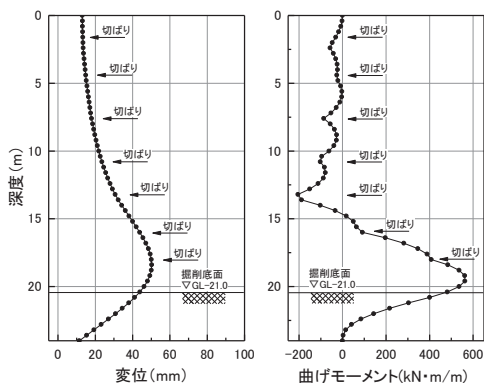


図8 土留め壁の変位・曲げモーメントの深度分布

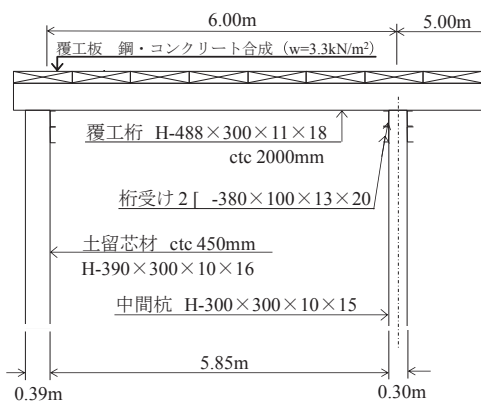


図9 路面覆工の断面図

によって道路の設計が求められることもある。そこで、場合によっては「道路土工指針 仮設構造物編」⁸⁾ による許容鉛直支持力の算定を行ってもよいこととしている。

4.2 補強土式土留め工の試設計

4.2.1 補強土式土留め工の設計条件

土留め工の断面図を図10に示す。土留め壁は鋼矢板(Ⅲ型)、掘削深さが8m、掘削延長50mの補強土式土留め工である。土留め工の背面には列車荷重が作用する。

4.2.2 補強材配置の検討

補強材の配置、打設長さは、「鉄道構造物等設計標準・同解説（土留め構造物）」⁹⁾ に示される2ウェッジ法に

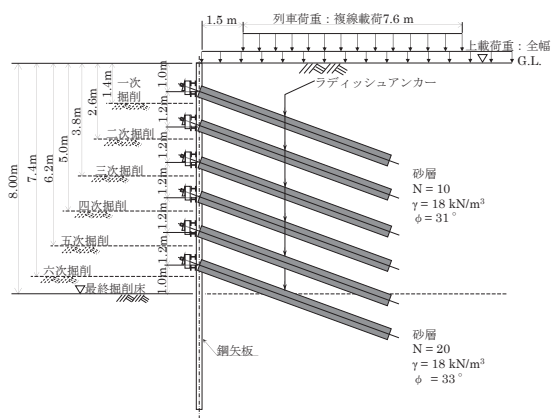


図10 補強土式土留め工の断面図

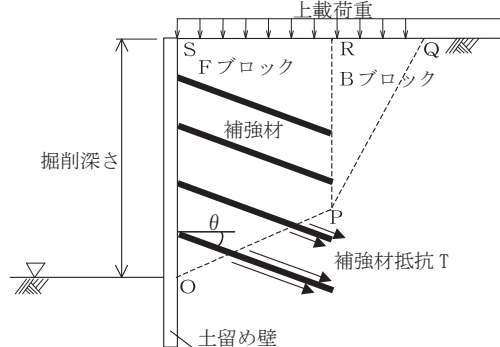


図11 内的安定（2ウェッジ法）の検討の概要

表5 内的安定計算結果

構造物の状態	安定計算ケース	計算安全率		所要安全率	判定	
		滑動	転倒			
施工時/2段目補強体打設時 (掘削深さ: h=2.60m)	常時	—	3.289	4.110	1.50	OK
	一時 列車荷重時	3.606	4.601	1.50	OK	
施工時/3段目補強体打設時 (掘削深さ: h=3.80m)	常時	—	3.386	3.632	1.50	OK
	一時 列車荷重時	3.356	3.667	1.50	OK	
施工時/4段目補強体打設時 (掘削深さ: h=5.00m)	常時	—	3.378	3.456	1.50	OK
	一時 列車荷重時	3.049	3.112	1.50	OK	
施工時/5段目補強体打設時 (掘削深さ: h=6.20m)	常時	—	3.099	3.171	1.50	OK
	一時 列車荷重時	2.752	2.742	1.50	OK	
施工時/6段目補強体打設時 (掘削深さ: h=7.40m)	常時	—	2.768	2.768	1.50	OK
	一時 列車荷重時	2.439	2.373	1.50	OK	
仮設時構造物完成時 最大掘削時 (掘削深さ: h=8.00m)	常時	—	2.528	2.165	2.00	OK
	一時 列車荷重時	2.560	2.269	1.50	OK	

特集：開削トンネルの設計技術

よって施工時（各次掘削段階）および仮設構造物の完成時における滑動・転倒に対する安定を確保できるように設定する。2ウェッジ法による安定計算の概要を図11に、内的安定計算結果を表5に示す。いずれの状態においても、滑動・転倒両モードに対して所要安全率を満足している。

4.2.3 設計根入れ長の検討

補強土式土留め工では、前述のように2ウェッジ法による計算によって内的安定が確保されるが、補強領域外を通るすべりに対しては円弧すべり法による外的安定の検討を行い、必要な根入れ長を確保する。

外的安定の計算イメージを図12に、検討結果を表6に示す。なお、外的安定の検討は最終掘削時に対してのみ実施している。各検討結果に基づき、根入れ長を $l=4.5\text{m}$ とした。

4.2.4 壁体の断面計算・変形計算

設定した補強材配置や根入れ長に基づいて、弾塑性法による各次掘削段階の土留め壁の変形や断面力の算定を行った。最終ステップの土留め壁の変位と曲げモーメントの深度分布図を図13に示す。

5. おわりに

本解説では、異なる2種類の掘削土留め工の試設計を例に設計の流れを示すと共に、現在改訂が進められている「鉄道構造物の建設等に用いる掘削土留め工設計指針」における「現行指針」との主な変更点を示した。また、自立式土留め壁の設計根入れ長の算定方法の修正と、これに伴った算定される根入れ長への影響を試計算を通じて示した。

文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書 [共通編]・同解説／「開削工法編」・同解説，2016
- 2) 国土交通省鉄道局監修 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 開削トンネル，2001
- 3) 国土交通省鉄道局監修 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物，2012
- 4) 松丸貴樹，小島謙一，島田貴文：掘削土留め工の設計に用

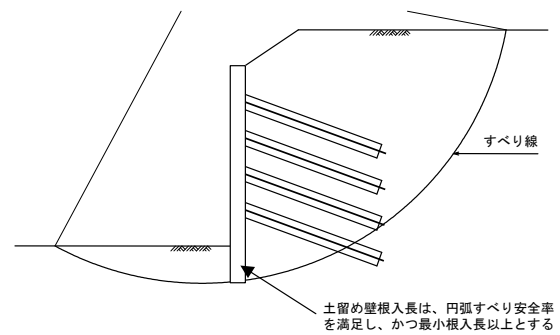


図12 外的安定（円弧すべり法）の検討の概要

表6 外的安定計算結果

構造物の状態	掘削深さ	掘削面からの必要根入れ長	荷重状態	計算安全率	所要安全率	判定
最大掘削時 (仮設構造物完成時)	8.00m	4.50m	常時	1.533	1.40	OK
			一時	1.455	1.40	OK

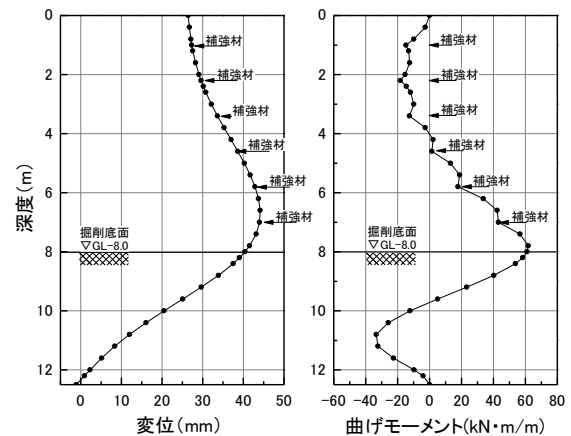


図13 壁体の断面・変形計算結果

いる弾塑性法，鉄道総研報告，Vol.33，No.4，pp.29-34，2019

- 5) 鉄道総合技術研究所：掘削土留工設計指針，1987
- 6) 日本鉄道建設公団：深い掘削土留工指針，1993
- 7) 光森章，渡邊康司，喜多直之，西岡英俊，神田政幸：節付き地中連続壁を用いた立坑の盤ぶくれ抵抗に関する研究，第50回地盤工学研究発表会発表論文集，pp.1605-1606，2015
- 8) 日本道路協会：道路土工—仮設構造物工指針，1999
- 9) 国土交通省鉄道局監修 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 土留め構造物，2012