

自立式鋼矢板土留め壁の線形応答関数法によるたわみ解析と設計

Deflection analysis and design by means of response function method for freestanding steel sheet pile retaining wall

三浦均也¹，松田達也¹，澤木達也¹，穴井啓太¹，渡辺強²，栗田和博³，

1 豊橋技術科学大学・建築・都市システム学系・k-miura@ace.tut.ac.jp

2 株式会社コクヨー・

3 株式会社サインファースト・

概 要

本研究は土留め壁の設計手法に関する者で、切梁やアンカーなどの支保工を用いない自立式の鋼矢板土留工を本研究の対象としている。「弾性法」によるたわみ解析と根入れ長決定法が道路土工-仮設構造物工指針に取り入れられている。このたわみ解析では「矢板の長さを半無限、地盤を均質」と仮定しなければならないため「掘削深さとは無関係に地盤の硬さと矢板の剛性のみによって根入れ長が決まる」、「根入れ部における地盤の層構造が考慮されない」という問題点がある。本研究では、そのような問題点を克服するために「応答関数法」によるたわみ解析と設計法を試みた。また、「弾性法」加えて「極限平衡法」による設計結果も示し、比較検討することによって設計法の特徴を明らかにする。

キーワード：自立式鋼矢板土留め壁，たわみ解析，応答関数法，弾性法，極限平衡法

1. はじめに

管路や構造物基礎を建設する際に、地下水の遮水および周辺地盤の崩壊を防止するために仮設的に設けるのが土留め壁工である。掘削深が比較的浅い場合や遮水が必要な場合には鋼矢板壁を用いる傾向にある。その中でも切梁やアンカーなどの支保工を用いない自立式の鋼矢板土留工を本研究の対象としている。現行の道路土工-仮設構造物工指針¹⁾においては、いわゆる「弾性法」が採用されており、鋼矢板と地盤反力からたわみ挙動を解析し、許容応力と根入れ部分や矢板の天端における許容変位を満たす設計法となっている²⁾。しかし、このたわみ解析では「矢板の長さを半無限、地盤を均質」と仮定するため「掘削深さとは無関係に地盤の硬さと矢板の剛性のみによって根入れ長が決まる」、「根入れ部における地盤の層構造が考慮されない」という問題点が挙げられている³⁾。このため、根入れ部が層状地盤であった場合は複数の地盤性情を平均化したり、最も軟らかい地盤を単層と仮定した計算が設計者の判断で行われている。このような判断も根本的な解決にはならず、必要以上の根入れ長が得られるなど、土留め壁の施工性や経済性を低下させる一因となっている。

本研究では、自立式鋼矢板壁における設計において、根入れ長の有限性を考慮でき、根入れ部が層構造地盤である場合にも適切に地盤状態を考慮できる、合理的かつ経済的な設計を可能にするたわみ解析法「応答関数法」^{3,4)}を提案し、その特性を定量的に検討する。「応答関数法」の誘導にあたって、

筆者ら^{5,6)}は地盤反力の非線形性も考慮しているが、本稿では線形の範囲内で比較検討する。

1999年の道路土工-仮設構造物工指針改訂以前には極限土圧を用いた「極限平衡法」に基づいた設計が採用されていた。本稿では「極限平衡法」も取り上げて設計法を比較検討する⁷⁾。

土留め壁の設計にあたっては、土圧による矢板の平衡以外にも、ボーリングやパイピング、盤ぶくれなどの要因も考慮しなければならないが、これらは本稿の対象外として割愛し、また、地下水も存在しない条件で検討している。

2. 設計法の概要

ここでは、3つの土留め壁設計法「極限平衡法」「弾性法」「応答関数法」の概要を説明し、それらにおける仮定と算定法、長所、短所を比較検討する。

2.1 極限平衡法

矢板が前方に十分変位し地盤が完全に塑性化したと仮定し矢板の背面側に主働土圧、掘削側に受働土圧を作用させて解析する方法である。主働土圧による転倒モーメントと受働土圧による抵抗モーメントが等しくなる深さを求め、そのつりあい深さの1.2倍を根入れ長とする⁷⁾。

極限平衡法は合理的かつ計算が簡単な解析方法である

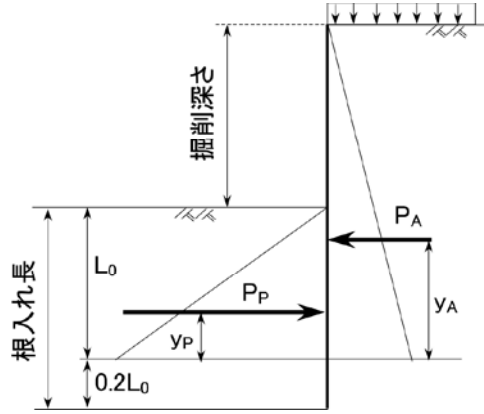


図1 「極限平衡法」における外力

が、極限状態を検討するために矢板の変位を考慮できないという欠点がある。

極限土圧の評価は以下のランキンの土圧論（式）によって算定した。

$$\begin{aligned} p_a &= K_a \gamma z + q - 2c\sqrt{K_a} ; \quad K_a = \tan^2(45^\circ - \phi/2) \\ p_p &= K_p \gamma z + q + 2c\sqrt{K_p} ; \quad K_p = \tan^2(45^\circ + \phi/2) = \frac{1}{K_a} \end{aligned} \quad (1)$$

掘削部の矢板に作用する土圧は、3つの設計法に共通して主働土圧として算定した。

2.2 「弾性法」

矢板の根入れ部が離散型のバネで支持された「弾性床上の梁」として解析する方法である。「弾性床上の梁」の解析は複雑であるが、根入れ長が π/β （たわみ曲線の半波長）以上であれば「半無限長の梁」と見なすことができ計算が簡便になる。 β はたわみの特性値である。道路土工—擁壁工指針¹⁾では根入れ長は $2.5/\beta$ 以上とすることで「半無限長の梁」と見なしている。

弾性法における矢板のたわみ挙動の支配方程式は以下のようである。

$$EI \frac{d^4 \delta}{dx^4} = -k\beta \delta \quad (2)$$

E : 矢板のヤング率

I : 矢板の断面2次モーメント

x : 掘削面からの深さ

δ : 深さ x における矢板のたわみ

k : バネ定数

微分方程式の一般解は特性値以下のようである。

$$\begin{aligned} \delta &= e^{-\beta x} (a \cos \beta x + b \sin \beta x) + e^{\beta x} (c \cos \beta x + d \sin \beta x) \\ \beta &= \sqrt[4]{\frac{k_H B}{4EI}} ; \quad k_H = \frac{1}{0.3} \alpha 2800 N \left(\frac{B_H}{0.3} \right)^{\frac{3}{4}} \quad (N/m^3) \end{aligned} \quad (3)$$

地盤反力は N 値より算定した。無限長を仮定すると式(3)の未定定数 c, d をゼロと置けるので、たわみ、たわみ角、曲げモーメント、せん断力は以下のように計算できる。

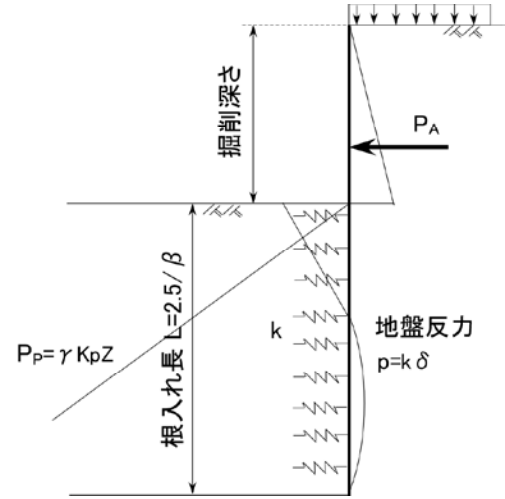


図2 「弾性法」における外力と地盤反力

$$\begin{aligned} \delta &= e^{-\beta x} (a \cos \beta x + b \sin \beta x) \\ \theta &= -\frac{d\delta}{dz} = -\beta \left[ae^{-\beta z} (-\cos \beta z - \sin \beta z) + be^{-\beta z} (+\cos \beta z - \sin \beta z) \right] \\ M &= -EI \frac{d\theta}{dz} = +2\beta^2 EI [ae^{-\beta z} \sin \beta z - be^{-\beta z} \cos \beta z] \\ Q &= \frac{dM}{dz} = +2\beta^3 EI \left[ae^{-\beta z} (+\cos \beta z - \sin \beta z) + be^{-\beta z} (+\cos \beta z + \sin \beta z) \right] \\ P &= -\frac{dQ}{dz} = kD [ae^{-\beta z} \cos \beta z + be^{-\beta z} \sin \beta z] = kD\delta \end{aligned} \quad (4)$$

矢板内に発生する最大曲げ圧縮応力は、断面係数 Z を介して曲げモーメントから算定する。

$$\sigma_{\max} = M / Z \quad (5)$$

2.3 「応答関数法」

「応答関数法」では鋼矢板の有限性や地盤の層構造に合わせて鋼矢板を複数の区分に分割し、地盤条件に合わせて応答関数を計算することになる。たわみの支配方程式は式(2)と共通であり、式(3)の一般解から展開して以下のマトリックス方程式が得られる。

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \delta(z) \\ \theta(z) \\ M(z) \\ Q(z) \end{Bmatrix} &= [S(z)] \begin{Bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{Bmatrix} ; \quad [S(z)] \\ &= \begin{bmatrix} e_- C & e_- S & e_+ \cos \beta z & e_+ S \\ -e_{2-} (-C-S) & -e_{2-} (+C-S) & -e_{2+} (+C-S) & -e_{2+} (+C+S) \\ e_{3-} S & -2e_{3-} C & -EIe_{3+} S & e_{3+} C \\ e_{4-} (C-S) & e_{4-} (C+S) & e_{4+} (C+S) & e_{4+} (C-S) \end{bmatrix} \\ C &= \cos \beta z, \quad S = \sin \beta z, \\ e_{1+} &= e^{\beta z}, \quad e_{1-} = e^{-\beta z}, \quad e_{2+} = \beta e^{\beta z}, \quad e_{2-} = \beta e^{-\beta z}, \\ e_{3+} &= 2\beta^2 EI e^{\beta z}, \quad e_{3-} = 2\beta^2 EI e^{-\beta z}, \quad e_{4+} = 2\beta^3 EI e^{\beta z}, \quad e_{4-} = 2\beta^3 EI e^{-\beta z} \\ \begin{Bmatrix} \delta(z) \\ \theta(z) \\ M(z) \\ Q(z) \end{Bmatrix} &= [R(z)] \begin{Bmatrix} \delta(0) \\ \theta(0) \\ M(0) \\ Q(0) \end{Bmatrix} ; \quad [R(z)] = [S(z)][S(0)]^{-1} \end{aligned}$$

(4)

ここで、 $[R(z)]$ は応答関数（マトリックス）である。応答関

表 1 設計法の比較

	極限平衡法	弾性法	応答関数法
仮定と算定法	矢板を剛体と仮定し、主働側と受働側のモーメントとの釣り合いを求める。	弾性床上の半無限長の梁と仮定する。線形弾性解析法。	微分方程式の連結領域を考慮した解析法。非線形解析にも適用可能。
長所	計算が簡単である。 根入れ部の層構造地盤も考慮できる。	根入れ長を半無限と仮定することで計算が簡略化される。	矢板の有限長を考慮できる。根入れ部の層構造地盤を考慮できる。
短所	矢板の変位量を計算できない。 根入れ長は矢板の剛性に無関係に決まる。	掘削深さとは無関係に根入れ長が決定される。	計算が複雑になるため、プログラムの作成が必須。

数は地盤の剛性によって異なるので、地層ごとに求めた応答関数を乗じることによって杭全体のたわみ解析を実行できることになる。杭先端の境界条件は $M=0$, $Q=0$ である。

「弾性法」で用いる解はいわゆる Chang の公式として知られているものと同等で、数式で解を表すことができるが、「応答関数法」で用いる解はこれを発展させて、マトリックスに展開したものである。

3つの設計法の特徴を表 1 に示して比較した。これらの特徴が解析結果と設計値にどのように影響するのかを、以下で比較検討する。

3. 試設計の条件

表 2 試設計条件

均質な単層地盤 砂質土, 粘性土 (地下水位なし)	
掘削深さ H (m)	2.0, 3.0 (2 ケース)
上載荷重 q (kN/m ²)	10
単位体積重量 γ (kN/m ³)	18 (砂質土) 16 (粘性土)
N 値	3, 5, 10 (3 ケース)
せん断抵抗角 ϕ (度)	$\sqrt{(20N)+15}$ (砂質土) 0 (粘性土)
粘着力 c (kN/m ²)	0 (砂質土) 6.25N (粘性土)
矢板の種類	U 形鋼矢板 II, III, IV 型 (3 ケース)

本研究で採用した試設計を表 2 に示している。掘削深さは 2 通り (2m と 3m) とした。地盤表面に分布する一様荷重として $q=10\text{kN/m}^2$ を想定した¹⁾。砂質土と粘性土の両方を対象とし、基本的な地盤条件は 3 種類の N 値で与えた。土圧を決定する内部摩擦角と粘着力はそれぞれ表中の換算式を用いて計算した。鋼矢板は標準的な U 型として 3 種類設定した。これらの断面性情と設計で採用する断面二次モーメントと断面係

数の有効率は文献⁸⁾に譲るが、II, III, IV 型の順に曲げ剛性が増大している。許容応力度も文献⁸⁾に従った。また、設計において鋼矢板を選択し、根入れ長を決定するための鋼矢板天端での変位は掘削深さの 3% としている¹⁾。

4. 設計による根入れ長の比較検討と考察

4.1 均質地盤における比較検討

均質地盤に対して、先に示した設計条件の内掘削深が $H=3\text{m}$ に対して得られた必要根入れ長を表 3 に列挙している。

「極限平衡法」で得られる根入れ長は鋼矢板の断面剛性には依らず一定になる。これは鋼矢板を剛体と仮定し、鋼矢板のたわみと変位を算定しないためである。N=3 の粘性土の場合は矢板に発生する応力度が過剰であったため、設計不可である。

「弾性法」と「応答関数法」では鋼矢板 II 型の場合は過剰な応力度のため、設計が不可である。「弾性法」と「応答関数法」の比較では、「応答関数法」で根入れ長がより短くなるという一貫した傾向が認められ、条件によっては 2 倍以上の差があることが分かった。

「弾性法」では他の条件が等しい場合、鋼矢板の剛性が大きいほど、必要根入れ長が大きくなるという不合理な結果が得られている。これは、鋼矢板の剛性が上がると特性値 β の値が小さくなり、たわみ曲線の波長が長くなることに原因している。詳細を示してはいないが、掘削深 (主働土圧) によらずに根入れが決定してしまうことも大きな問題である。一方の「応答関数法」ではこれらの問題を解決できる。

3つの設計法を比較すると、同じ条件では、「応答関数法」、「極限平衡法」、「弾性法」の順に必要な根入れ長が長くなる傾向を読み取ることができる。この面から「応答関数法」は経済的な設計となっていると言える。

4.2 層状地盤における比較検討

図 3 に示した層状地盤のモデルに対して「弾性法」と「応答関数法」矢板のたわみ解析を実施し、たわみ曲線を図 4 に示す。「応答関数法」では根入れ長を数段階で変化させ、それぞれの条件で計算した変位、曲げモーメント、せん断力の分

布を図 4 に比較して示している。鋼矢板先端の境界条件 $M=0$, $Q=0$ は満たされていて、十分な精度でマトリックス方程式が解かれていることを確認した。

「応答関数法」では根入れ長の増大に伴い、杭頭の変位は小さくなるので、掘削深さの関数として変化する主働土圧に対応して根入れ長を長くすれば、鋼矢板天端の変位を許容値以内に抑えることが可能であることが分かる。また、 N 値が異なる地層境界の前後で、変位や曲げモーメント、せん断力の変化特性が変化していることが確認できた。一方、「弾性法」地盤を均質と仮定しなければならないため、地盤の層構造を適切に考慮することはできない。

「応答関数法」で求めた許容変位量以内の必要根入れ長は 4.8m となった。それに対して根入れ部が $N=3$ の砂質土単層と仮定した「弾性法」では根入れ長は 7.2m, $N=10$ の仮定では 5.3m となった。ただし、 N 値 10 の単層構造を仮定するのは危険側の設計である。また、「極限平衡法」で層構造地盤を考慮し計算した結果、5.4m となった。

5. おわりに

本研究では自立式鋼矢板壁の設計法について、現行の「弾性法」と従来の「極限平衡法」を比較対象として採用しつつ、

提案する「応答関数法」を用いた鋼矢板土留め壁を種々の条件で設計した。その設計値（特に必要根入れ長）を比較検討した結果、単層地盤と層構造地盤の両方で応答関数法の有用性を確認することができた。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：道路土工－仮設構造物工指針, 1994
- 2) 右城猛：鋼矢板を用いた自立式土留め工の設計，四国地方整備局研修資料, 2006
- 3) 三浦均也，松田達也，羽柴慶太，KEODUANGCHITH Somchith：風荷重を受ける看板・交通標識を支持する杭基礎の重複反射法を用いた設計法，第23回調査・設計・施工技術報告会，地盤工学会中部支部, 2014
- 4) 岩越恭平，三浦均也，栗田和博，松田達也：擁壁のための杭基礎の許容変位を考慮したたわみ挙動解析，第27回地盤工学シンポジウム，地盤工学会中部支部, 2015
- 5) 高木翔太，三浦均也，松田達也：横荷重を受ける杭の応答関数を用いた非線形解析手法，平成27年度土木工学会中部支部研究発表会，土木学会中部支部, 2015
- 6) 高木翔太，三浦均也，松田達也：横荷重を受ける杭の非線形たわみ挙動の計算例，平成27年度土木工学会中部支部研究発表会，土木学会中部支部, 2015
- 7) 日本道路協会：道路土工擁壁・カルバート・仮設構造物工指針, 1977
- 8) JFE スチール株式会社：鋼構造設計便覧，7-8. 鋼矢板の断面性能表，<http://www.jfe-steel.co.jp/products/building/binran/>

表 3 各設計法で計算した根入れ長（単位：m）

掘削深さ $H=3$		$N=3$		$N=5$		$N=10$	
		砂質土	粘性土	砂質土	粘性土	砂質土	粘性土
極限平衡法		5.85	-	5.12	3.92	4.08	2.29
弾性法	Ⅱ型	-	-	5.37	6.49	4.52	5.46
	Ⅲ型	7.19	8.68	6.32	7.64	5.32	6.43
	Ⅳ型	8.85	10.69	7.79	9.41	6.55	7.91
応答関数法	Ⅱ型	-	-	3.92	4.56	2.21	2.85
	Ⅲ型	6.55	5.64	3.23	3.78	2.00	2.56
	Ⅳ型	4.10	4.69	2.91	3.47	1.91	2.44

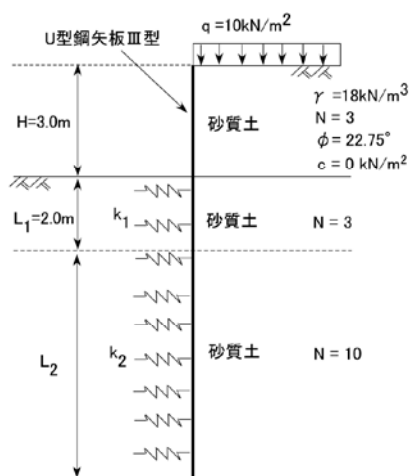


図 3 応答関数法を検証する層状地盤モデル

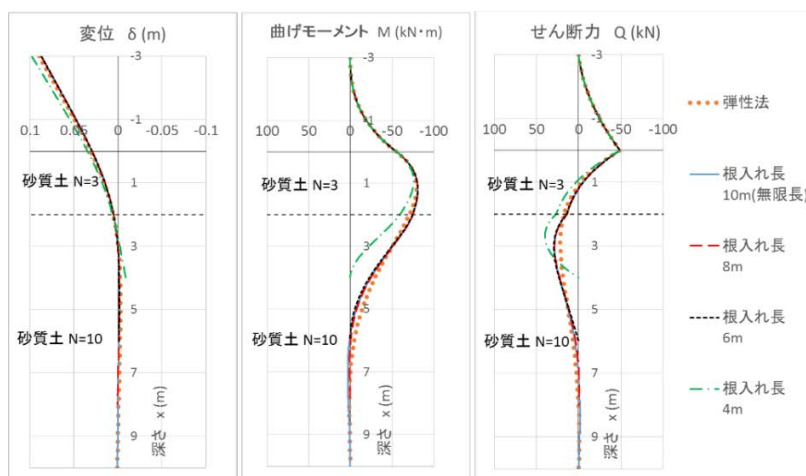


図 4 「応答関数法」によるたわみ解析結果