

(29) 仮設鋼矢板締切の設計最適化に関する研究

STUDY ON STRUCTURAL OPTIMIZATION OF A RETAINING WALL
USING SHEET PILES

笹木 敏信*

満尾 淳*

亀廻井 寿明**

杉本 博之***

Toshinobu SASAKI, Jun MITSUO, Toshiaki KAMENOI, Hiroyuki SUGIMOTO

In the construction field, the design of temporary structures, with which the designer is left with a high degree of freedom, is an area where cost reduction can be expected through structural optimization.

An attempt was made at minimizing the costs through optimization of the combination and layout of sheet piles, struts and wales, using the member weights and construction costs as objective functions, in the construction of an earth retaining wall consisting of struts and sheet piles.

The following conclusions were drawn. 1) Ordinary programmes for designing earth retaining structures can be converted with relative ease into optimization programmes for structural design. 2) Indices can be provided for optimization of the design where one used to rely simply on experience.

Key Words : structural optimization, retaining wall, cost reduction,
optimization program

1. まえがき

土留・締切工は開削トンネル・立坑・建築根切りなど、土木・建築両分野で頻繁に使用される仮設構造物である。

土留・締切工の設計には土木の場合、道路協会・JR・道路公団などの企業体が定める設計基準に沿って設計が行われる。各々の設計基準によって各部材の許容応力度が定められており、設計者は設計フローにしたがって、各部材の応力照査を行い、使用部材の組み合わせ・配置などを決定する。

実際の設計では、部材寸法・配置などは現場条件を勘案した上で、設計者の経験や勘によって初期設定され、トライアルアンドエラーによって最終的に決定される。したがって、各部材は応力的に安全な配置・組み合わせにはなっているが、その最適性について照査されることは皆無といってよい。

しかし、設計および施工の合理化を考えるならば、現設計が経済的・力学的な最適解に対してどのような位置にあるのかを知ることが重要である。

* 東急建設株式会社施工本部土木部土木設計部

** 室蘭工業大学工学部建設システム工学科、博士前期過程

*** 室蘭工業大学工学部建設システム工学科、助教授

そこで、土留・締切工の最適性の評価基準として施工コストを取り上げ、鋼材損料とその鋼材を設置するときの施工経費からなる目的関数を設定し、コスト最小化計算を行い、土留・締切工に最適設計を導入することの有効性を検証した。

最適化計算には、通常の土留工設計計算プログラムを汎用最適化プログラム¹⁾にリンクさせることにより行った。

2. 鋼矢板締切工の設計

鋼矢板締切工は図-1に示されるような、土留壁（鋼矢板）と支保工（主に切梁・腹起しに分類される）からなる構造物であり、河川の締切工事や地下水位が高い場所における土留工事に用いられる。

一般的な鋼矢板締切工の設計フローを図-2に示す。

設計は、土留壁の設計と、支保工の設計に分けられる。土留壁の設計は、作用土圧・水圧に対して鋼矢板が転倒しない根入れ長（掘削底面以下の鋼矢板の長さ）と外力によって破壊されない断面を決定するものであり、支保工の設計は、土留壁・支保工断面が応力的に有利になる位置を探し、その位置で作用する土圧・水圧・温度応力などの外力に対して支保工部材の断面を決定するものである。

通常の設計では、まず土留壁・支保工材の断面・位置などを仮定し、構造計算を行う。その結果、部材の許容応力度を超えた場合には、部材の断面・位置などを変更し再度計算を行う。すべての部材が許容応力度を下回った場合でも、ある部材の応力度が許容応力度を大きく下回っていた時には、再び計算を行い、最も合理的と考えられる部材断面の組み合わせ・配置を選定する。

土留壁の設計では、背面側からの主働土圧は掘削底面より上方では主として支保工により、下方では掘削側の受働土圧により受け持たれる。この掘削側の受働土圧が、主働土圧と一致したときの根入れ深さをつり合い深さという。実際の設計では、最下段あるいはそれより1段上の切梁位置に関してそれより下方の主働土圧によるモーメントと受働土圧によるモーメントがつり合うときの掘削底面以下の深さをつり合い深さとし、その1.2倍の長さを根入れ長とする。

土留壁断面の計算は、支保工で拘束された区間を単純梁として断面力を求め、応力計算を行う。

支保工の設計では、下方分担法により支保工に働く主働土圧・水圧による荷重を配分し、断面力を計算する。

今回、最適化計算に用いたプログラムは首都高速道路公団の「仮設構造物設計基準」²⁾に準拠したものである。

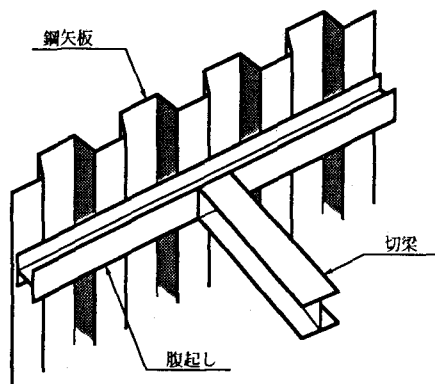


図-1 鋼矢板締切工模式図

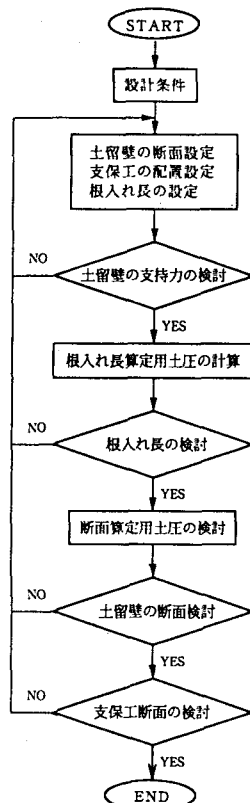


図-2 土留・締切工設計フロー図

3. 鋼矢板締切工の最適設計

一般に構造最適化問題は次の様な形で定式化されることが多い⁹⁾。

$$\begin{aligned} \text{目的関数} &: F(x) \rightarrow \min \\ \text{制約条件} &: g_j(x) \leq 0 \quad (j=1 \sim m) \\ \text{上下限值} &: x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad (i=1 \sim n) \\ \text{設計変数} &: x^T = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n] \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 x は設計変数、 F は目的関数、 $g_j(x)$ は制約条件であり、また x_i^l は設計変数の下限値、 x_i^u は上限値である。

2.で述べた鋼矢板締切工をこの構造最適化問題に適用するため、この問題に対しての定式化を試みた。

(1) 設計変数の決定

設計変数は、鋼矢板締切の設計において独立変数でなければならず、また設計者の経験あるいは勘に頼って決められていたパラメータとすることが望ましい。

図-2に示した設計フローチャートによると独立変数となるのは、支保工配置（切梁設置深さ、切梁水平間隔）であり、矢板長、切梁・腹起し・鋼矢板断面定数はこれらの従属変数となる。したがってここでは、設計変数として切梁設置深さおよび切梁水平間隔を選定する。

(2) 目的関数の決定

目的関数 F としては、鋼材重量、総工費などが考えられるが、ここでは最も経済性評価に反映しやすい総工費を目的関数として選定する。

一般に、総工費は

$$\text{総工費} = (\text{支保工損料} + \text{土留壁損料}) + (\text{支保工施工費} + \text{土留壁施工費})$$

という形で表現されるが、積算等で用いられる計算式は非常に複雑であり、定式化には不向きであるので、ここでは次式のような簡略式を用いる。

$$F = CR + CEX \quad (2)$$

ここで、 F ：総工費（目的関数）

CR ：損料

CEX ：施工費

なお、損料 CR および施工費 CEX はそれぞれ次の様に求められる。

$$CR = 160 \times (WK + WH + WY) \times IDAY + 3500 \times WY \quad (3)$$

WK ：切梁重量 (tf)

WH ：腹起し重量 (tf)

WY ：鋼矢板重量 (tf)

$IDAY$ ：損料算定日数 (日)

損料…鋼矢板・支保工材ともに1日1トン当り160円

鋼矢板整備費…1トン当り3500円（支保工材は無料）

$$CEX = 3620 \times YL + \sum_{i=1}^{ND} (65890 \times 1.1^{i-1} \times (WK + WH)) \quad (4)$$

YL ：鋼矢板延長 (m)

ND ：支保工施工段数

鋼矢板施工費…延長1m当り3620円

支保工施工費…1トン当り65890円（一段下がるごとに施工費は1.1倍となる）

損料は支保工重量あるいは鋼矢板重量の関数となり、施工費は支保工については重量と施工次数の関数、鋼

矢板工については総延長の関数となる。また式-(2)は土留施工延長1m当りに換算された値とする。

ただし、ここで問題となるのは、使用プログラムの性質上、目的関数は設計変数に対して連続性を有する必要があるが、切梁・腹起しあるいは鋼矢板は通常、H型钢・U型钢矢板等の既製形鋼を用いるため、式-(3)、(4)におけるWK、WH、WYが土留計算で求められた断面力に対して不連続となり、すなわち断面定数と断面力の関係も不連続となることである。

したがって、切梁断面積 A_k 、腹起し断面係数 Z_H 、鋼矢板断面係数 Z_r を次のように断面力の連続関数として求める必要がある。

$$\begin{aligned} A_k &= A_k(N, L) \\ Z_H &= Z_H(R, X) \\ Z_r &= Z_r(M) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで N : 切梁軸力(tf)
 R : 腹起し反力(tf/m)
 M : 鋼矢板最大曲げモーメント(tf・m)
 L : 切梁長(m)
 X : 腹起し検討スパン(m)

ここでは設計基準の部材応力照査式に基いて、各既製形鋼について任意の切梁長あるいは腹起しスパンに対する限界断面力を逆算し、この離散点で得られた限界断面力とそれに対応する断面定数の関係をスプライン関数で近似することにより連続関数として表現した。このようにして式-(5)の関数を特定することにより、式-(3)、(4)におけるWK、WH、WYが断面力の連続関数として一意に求まる。

図-3に鋼矢板土留最適設計フローを示す。

(3) 制約条件

既製形鋼として切梁・腹起しはH-400、鋼矢板はFSP-V_L型を最大サイズとしているため、これらの断面定数が制約条件となる。また、各切梁間の最低切梁間隔あるいは最下段切梁と掘削底面との最小離隔を設定し、これを制約条件とする。

4. パラメトリックスタディ

図-4に示す土留計算モデルを用いて上記フローによる最適計算を試みる。

土質条件は、砂質系の3層地盤とし、地下水位はG.L.-4.0mとする。また掘削深さは7.0m、切梁段数は2段切梁と仮定する。

計算を行った結果、図-5に示すように切梁深さおよび切梁水平間隔が最適化され、また表-1に示すように部材断面定数が決定された。図-6にはその収束過程を示す。

また、計算された値の最適性を検証するため、

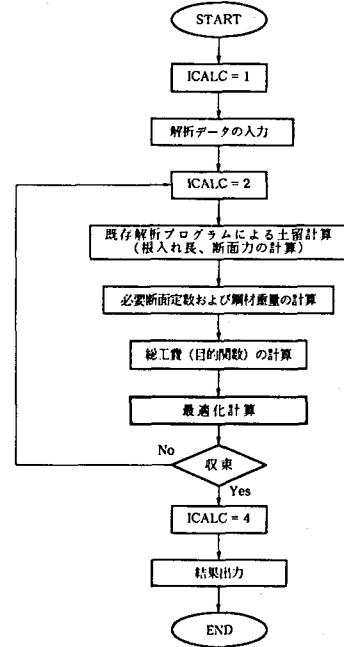


図-3 鋼矢板土留最適設計フロー

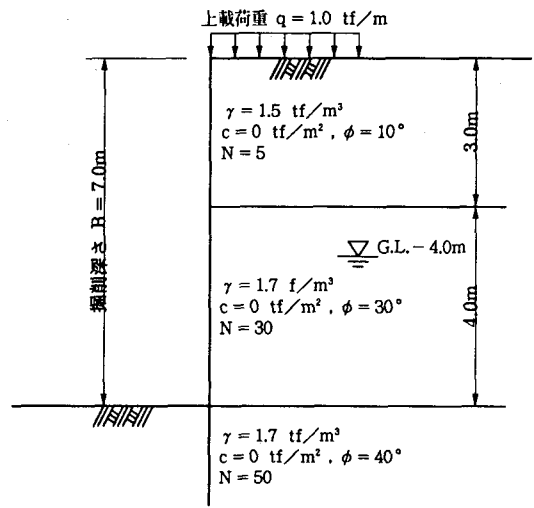
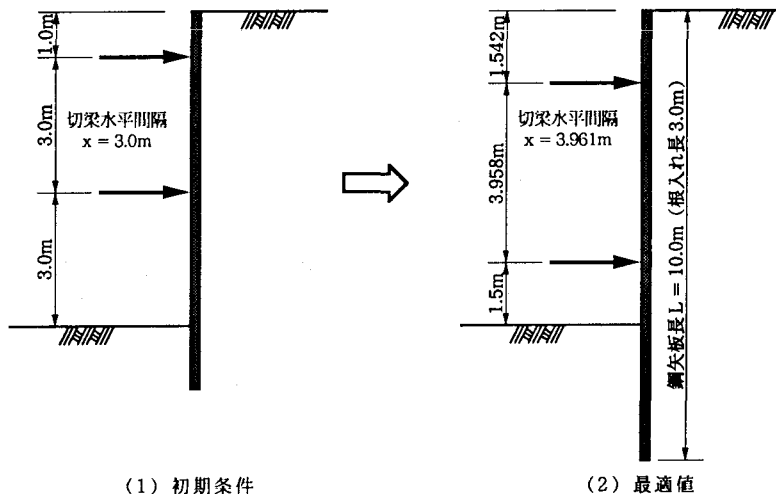


図-4 土留計算モデル



(1) 初期条件

(2) 最適値

図-5 最適計算結果

表-1 必要部材断面定数

部材種別		断面定数	相当既製形鋼
切梁断面積 (cm^2)	1 段目	113.2	H-300
	2 段目	93.3	H-300
腹起し断面 係数 (cm^2)	1 段目	1601.5	H-350
	2 段目	765.0	H-250
鋼矢板断面係数 (cm^2)		904.7	FSP-Ⅲ

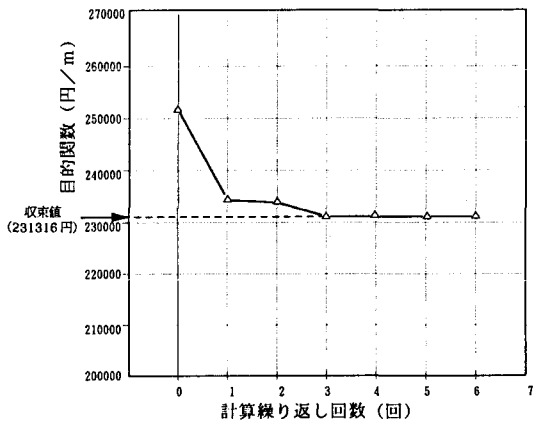


図-6 収束過程

2 段目切梁位置および切梁水平間隔をそれぞれパラメータとした工費算定計算を行った。これらの結果を図-7、図-8に示す。

これらに結果によると、2 段目切梁深さの最適解は掘削底面と最下段切梁の離隔に関する制約条件から決定され、切梁水平間隔については極小値が存在することがわかる。

図-7 によると 2 段目切梁深さが下方へ移動しても支保工損料・施工費はほとんど変化しないが、鋼矢板損料が減るため全体施工費が減少する。これは地盤が砂質系であるため地下水位 (G.L. - 4.0m) 以下では土圧がその上部に比較して卓越し、切梁位置が下がるほど鋼矢板に生じる曲げモーメントを低減することができるためである。また切梁設置間隔については、間隔を広げるほど切梁損料・施工費は低減できるが、逆に腹起し損料・施工費は増加する。すなわち両者のバランスから最適値が決定されていることになる。鋼矢板損料・施工費は切梁水平間隔の影響はまったく受けない。

以上により本計算結果の施工コストに關しての最適性は示されたが、ここで求められた必要部材断面定数より既製形鋼を選定した場合、これが必ずしも最適な部材とはならない。例えば表-1 によると 2 段目切梁は、必要断面積が 93.3cm^2 であることから H-300 と選定されたが、1 ランク下の H-250 の断面積は 92.18cm^2 であり、わずかに切梁位置を補正することにより 2 段目切梁は H-250 となり、しかも他の部材選定に変更

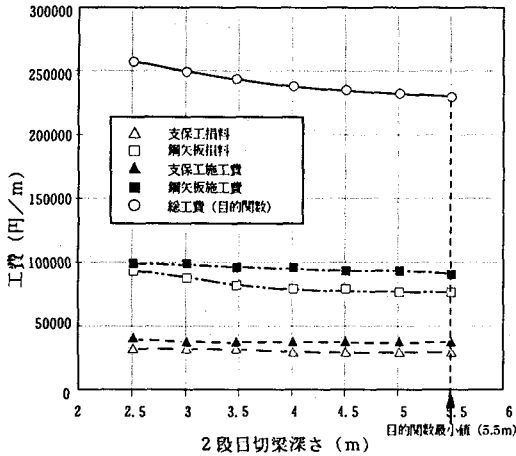


図-7 2段目切梁深さと工費の関係

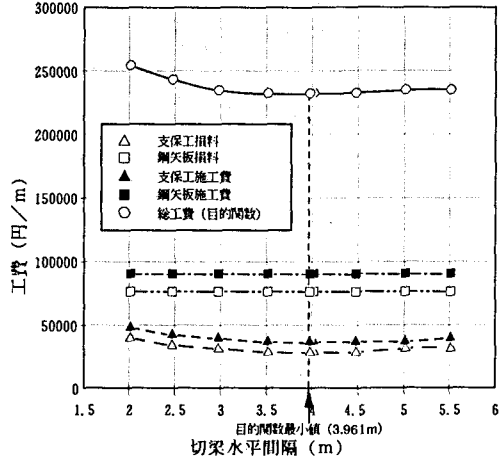


図-8 切梁水平間隔と工費の関係

を生じない可能性がある。すなわち本計算は連続関数としての最適値は与えるが、既製形鋼最適選定手法としての要件は満たしていないことになる。したがって計算結果に基づいた確かな既製形鋼の選定方法を決定することが今後の重要な課題となる。

5. おわりに

本研究では、土留め・締切工に最適化設計手法を適用し、施工コストを最小化することを試みた。

その結果、次の所見を得ることができた。

- (1) 既存解析プログラムに対してわずかな改良を加え、汎用最適化プログラムとリンクすることにより、設計最適化のためのプログラムを構築できる。
- (2) 2段切梁土留モデルを用いて、パラメトリックスタディを行った結果、施工コスト最小という条件のもとで、最適な支保工配置および断面定数を決定することができた。
- (3) 設計者の経験や勘に頼らず合理的な設計を行える可能性を見出した。
- (4) 必要部材断面定数が、断面力の連続関数として求まるため、この値から既成形鋼を選定する際、工夫が必要となる。

参考文献

- 1) Vanderplaats, G.N. and Sugimoto H.: A GENERAL - PURPOSE OPTIMIZATION PROGRAM FOR ENGINEERING DESIGN, Computers and Structures, Vol.24, No.1, 1986.
- 2) 首都高速道路厚生会：首都高速道路・仮設構造物設計基準, 1990.
- 3) 土木学会：構造システムの最適化～理論と応用～, 構造工学シリーズ1, 1989.