

施工中にたわみ性土留めの土圧再配分を制御した 掘削の事前設計に関する最適化

金沢工業大学 正会員 川村 國大

1. まえがき

近年、大規模掘削の土留めに剛性の高いRC地中壁や鋼管矢板などが用いられる一方、中小規模の掘削、あるいは、15m深以内の掘削ではほとんどたわみ性土留め（主に鋼矢板）が用いられる。現在の社会的、経済的状況下では、このような需要の多い、ほぼレーンワーク化された中小規模の掘削工事こそ、安全性、経済性の面から問い直さなければならないと着目し、本報告では、たわみ性土留めを用いた掘削工事に新しい設計法を提案し、その成果に差をつけて現行設計法の妥当性を検討しようとするものである。

2. 提案する設計法

本報告で提案する設計法とは以下のとおりである。亦た、掘削土工において、土留めに働く掘削土圧は土留めの剛性、掘削深とその段階数、さらには切ばり本数とその設置箇所などの要因によ、大きく変じ、再配分される。そして、この掘削土圧に、次段階以降の掘削計画と安全性、経済性の点から最適となる土圧分布が存在するならば、そのような土圧分布を施工中に作り出すように、次段階掘削以降の掘削深や切ばり本数などを決定してあげれば良いことになる。付け加えれば、この提案する設計法は現行設計法に比べて以下の点で大きく異なる。現行設計法では、その大部分がたわみ性土留めに働く土圧分布を施工中終始変化しないという仮定のもとで最適土留め形式や切ばり本数を決定するとか、あるいは、仮に土圧の再配分を考慮した決定法であっても、過去の経験や実績に照らし、あらかじめ土留め形式、規模、掘削段階数や切ばり本数を決めてやり、その結果として再配分されるであろう土圧分布を使って、先に決定した土留めや切ばりの安全性を再度チェックする設計法である。言わば、“掘削土圧の再配分に大きく関心を持たない設計法”ということがございよう。これに対して、提案する設計法では、掘削計画全体を通じて最適となるであろう各掘削段階の土圧分布がそれぞれ発揮できるように土留めのたわみを制御してやる考え方、換言すれば、最適土圧の再配分が得られるように各段階の掘削深や切ばり設置箇所を系統的に決定してやる方法であり、言わば、“掘削土圧の再配分を施工中を通じて利用する立場に立った設計法”と言えよう。

3. 最適設計法のアルゴリズム

提案する設計法は掘削システム全体が最適となるように各掘削段階の土圧分布をつくり出す、言わば、現行設計法の逆の考え方にある。そのため、最適設計法の構築には以下の3つの作業が不可欠となる。亦た、その1つは、たわみ性土留めの土圧再配分の特性を把握することである。他の1つは、本設計法が次段階掘削の合理性を追求するものではなく、掘削システム全体の合理性を志し、それによって各掘削段階の掘削深や切ばり位置を決定する方法であることから、システム全体の最適性を保障するために必要なアルゴリズムを上述の土圧再配分特性を基礎として作成することである。以下には、提案する設計法の最適化に必要なアルゴリズムを述べる。

掘削システムは多段階の掘削土工で構成され、システム全体の最適性は各掘削段階の土圧分布に依存する安全性に影響を受けることになる。したがって、最適性の決定には、dynamic programmingの手法が必要である。ここでは、ベルマンの最適性の原理を応用し以下のような方法により最適掘削の事前システム、具体的には各掘削段階における最適掘削深と切ばり本数（設置面材の決定も含む）を決定しようとするものである。

図1において、掘削システム全体の信頼度 R は次式で表される。すなわち、 i 掘削段階の信頼度 R_i とすると、

$$\begin{aligned} R &= \prod_{i=1}^N R_i \\ &= \prod_{i=1}^N (1 - P_{Fi}) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 P_{Fi} は i 掘削段階の破壊確率。掘削システムにおいて、加法性仮定すれば、

$$\begin{aligned} R &\doteq 1 - P_F(a^1, a^2, a^3, \dots, a^N) \\ &\doteq 1 - \{P_F(a^1) + P_F(a^2) + P_F(a^3) + \dots + P_F(a^N)\} \end{aligned} \quad (2)$$

となり、ここで、 a^i は i 掘削段階の掘削深 $z(a_1 + a_2 + \dots + a_i)$ と示される。なお、 i 掘削段階の破壊確率 $P_F(a^i)$ は図1のような制御された土圧分布のもとで算定される支保工（土留め、切ばりなど）に与えられる破壊確率である。したがって、システム全体の最適性を保障するため、最終掘削段階 N の安全性 $f_N(a^N)$ は全体の破壊確率 $P_F(a^1, a^2, \dots, a^N)$ を最小にする必要がある。すなわち、

$$\begin{aligned} f_N(a^N) &= \min_{\sum_{i=1}^N a_i = a^N} P_F(a^1, a^2, \dots, a^i, \dots, a^N) \\ &= \min_{\sum_{i=1}^N a_i = a^N} \{P_F(a^N) + P_F(a^{N-1}) + \dots + P_F(a^i) + \dots + P_F(a^1)\} \\ &= \min_{a^N} \left[P_F(a^N) + \min_{\sum_{i=1}^{N-1} a_i = a^N - a_N} \{P_F(a^{N-1}) + P_F(a^{N-2}) + \dots + P_F(a^i) + \dots + P_F(a^1)\} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、右辺の中かっちは、

$$\begin{aligned} f_{N-1}(a^{N-1}) &= f_{N-1}(a^{N-1}) \\ &= \min_{a^{N-1}} \{P_F(a^{N-1}) + P_F(a^{N-2}) + \dots + P_F(a^i) + \dots + P_F(a^1)\} \\ &= \min_{0 < a^{N-1} < a^N} \left[P_F(a^{N-1}) + \min_{\sum_{i=1}^{N-2} a_i = a^{N-1} - a_{N-1}} \{P_F(a^{N-2}) + \dots + P_F(a^i) + \dots + P_F(a^1)\} \right] \\ &= \min_{0 < a^{N-1} < a^N} \{P_F(a^{N-1}) + f_{N-2}(a^{N-1} - a_{N-1})\} \end{aligned} \quad (4)$$

結局、 i 掘削段階までの最適システムは $(i-1)$ 段階までの破壊確率を最小とし、しかも i 段階の破壊確率を最小にするような掘削深 a_i^* とそれに対応する切ばり S_i^* を決定してやるべき。しかも、この決定解 (a_i^*, S_i^*) を $(i+1)$ 段階以降の決定にも適用してやり、最終的に最適システムを順次求めようとする。勿論、破壊確率の算定はそれぞれで最適施工履歴 (a_i^*, S_i^*) に依存する土圧再分配を考慮して行われる。図1 掘削システム

