

山留め掘削の弾塑性（拡張法）解析における諸基準とその傾向

Some Trends of Various Standards on the Analysis of Elasto-Plastic
Method of Excavation and Braced-Wall

池 上 慎 司* (Shinji Ikegami)
石 川 和 彦** (Kazuhiko Ishikawa)
奥 田 真 也*** (Shinya Okuda)

近年、増加する近接施工に対して、実際の計画・設計・施工に携わる技術者が、どのような概念を持ち、実際にどのような手法で設計・施工を行っているかを把握すべくアンケート調査を実施し、その結果を整理し傾向を検討した。本報告では、アンケートの調査結果とその傾向より、変形予測の手法の中で「弾塑性法」を用いる回答が多かったことをふまえて、弾塑性法をによる変形予測を、実測データを用いていくつかの基準や設計指針について比較検討を行い、その結果を紹介するものである。検討の結果、各基準の計算手法によって計算結果に差異が生じたが、経験と思想が反映された結果であり、我々実務者としてはこれらの差異を充分に把握した上で入力値等に的確な判断を下し活用していくべきと思われた

キーワード：基準，地盤係数，土圧，変形，掘削，弾性，塑性 E-2

1. まえがき

近年、都市とその周辺部においては、人口集中が進む中で都市機能を維持・向上させるための社会施設（交通機関、電力、上下水道、ガス等）が、整備拡充される傾向である。これらの施設は、土地の立体的、効率的な有効利用のために、地上及び地下空間において既設構造物に近接した位置に計画、建設される場合が多い。このため、これらの施設建設に際しては、既設の重要構造物（ビル、鉄道、道路、地下埋設物等）に近接した、いわゆる「近接施工」と称される工事となる。近接施工となる場合、工事によって地盤に変位を与えることにより、既設構造物に変状をきたしたり、機能を損なう恐れがあることや、振動・騒音等による周辺環境への影響が懸念される。そのため、一般の工事に比べて調査、計画の段階から設計・施工に至るまで慎重に十分な検討を実施し、既設構造物や周辺環境に悪影響を与えず工事を行うことが重要である。我々土木建築技術者にとって、「近接施工」とうまくつきあうことは、大きな関心事のひとつである。

近接施工における掘削・山留めに対する基準や設計指針は各関連機関で定められており、研究発表も数多くある。今回の研究では、実際の計画・設計・施工に携わる技術者が、「近接施工」に対してどのような概念を持ち、実際にどのような手法で設計・施工を行っているかを把握すべくアンケート調査を実施し、その結果を整理することによりその傾向を検討した。

本報告では、アンケート調査結果とその傾向より、変形予測の手法のなかで「弾塑性法」を用いる回答が多かったことを踏まえて、弾塑性（拡張）法による変形予測を、実測データを用いていくつかの基準や設計指針についての比較検討を行なった。その結果を紹介する。

*広島大学工学部建設工学講座 助手、**五洋建設株式会社中国支店土木設計部、

***不動建設株式会社ジオ・エンジニアリング事業本部広島事業所研究室、

2. 弾塑性（拡張）法の概説

弾塑性法・弾塑性拡張法は、弾性支承ばりの考えを山留め壁架構の設計に拡張した弾性法に、根切り底面付近の地盤に塑性域を想定することにより実状に近いモデル化を図ったものである。この方法については、多くの実務者が種々の提案を行なっているが、基本的には以下の仮定条件下で行われる計算手法である。

1. 壁体は根入れ長さを有し、地盤条件により先端を固定、ヒンジ、自由の3種類とする。
2. 背面側圧及び掘削面側の側圧は掘削による土質条件の変化（地下水位の低下など）に対処できるように、掘削段階毎にインプットする。
3. 掘削底面以下の壁体に作用する横抵抗は一次的に比例するものとし、且つ、受動土圧を越えない。
4. 切梁設置後の切梁支点は弾性支承とする。

又、弾性域、塑性域の各領域における基本式は次のように表わされる。

掘削底面以上と掘削底面下の塑性域においては、弾性支承ばりの基礎微分方程式は、

$$EI \frac{d^4 y_x}{dx^4} - (p + qx) = 0$$

掘削底面下の弾性領域においては、

$$EI \frac{d^4 y_x}{dx^4} + KB y_x - (p + qx) = 0$$

ここに、
 E : 山留め材料のヤング係数
 I : 山留め壁断面2次モーメント
 y_x : x における変位
 p : $x=0$ における荷重強さ
 q : 荷重の増加率
 K : 水平地盤反力係数
 B : 山留め壁の幅

と表わされる。

弾塑性（拡張）法についての記述は、「（土木学会）トンネル標準示方書・開削編」（昭和61年制定）・「（日本建築学会）山留め設計施工指針」（1988年）をはじめ種々の基準類にみられるが、大規模な掘削に対する計算方法として推奨されている。

3. 弾塑性（拡張）法の基準別による比較

弾塑性（拡張）法についての記述は種々の基準にみられるが、ここでは

- ① トンネル標準示方書・開削編（土木学会）昭和61年制定版
- ② 共同溝設計指針（日本道路協会）昭和61年版
- ③ 山留め設計施工指針（日本建築学会）1988年版

の3つの指針・示方書について比較検討を行った。

検討に用いた実測例は取水路の敷設の為の山留め工事で、その施工に関する概要は図-1に示す通りである。施工に際して、矢板の背後1mの所のボーリング孔内にステンレス製の測定管を埋め込み、ローラー式傾斜計と差動トランス式計器用インジケータを用いて、矢板壁の水平変位を計測している。

実測結果を図-2に示す。又、設計時における慣用法による山留め壁の計算結果を表-1に示す。

表-1 慣用法による計算結果
 準拠基準「共同溝設計指針」
 土留め壁：鋼矢板Ⅳ型
 有効断面率： $\alpha = 0.60$

釣り合い深さ	H	4.047m (G.L. -12.347)
根入れ長	D	4.856m (G.L. -13.156)
最大曲げモーメント	M_{max}	14.62tf・m/m (2次掘削時)
最大せん断力	S_{max}	9.65tf/m (2次掘削時)
曲げ応力度	σ_c	1073kgf/cm ²
土留め壁変位	最大	9.37 cm
	一次掘削時	2.22 cm (Changの式による)

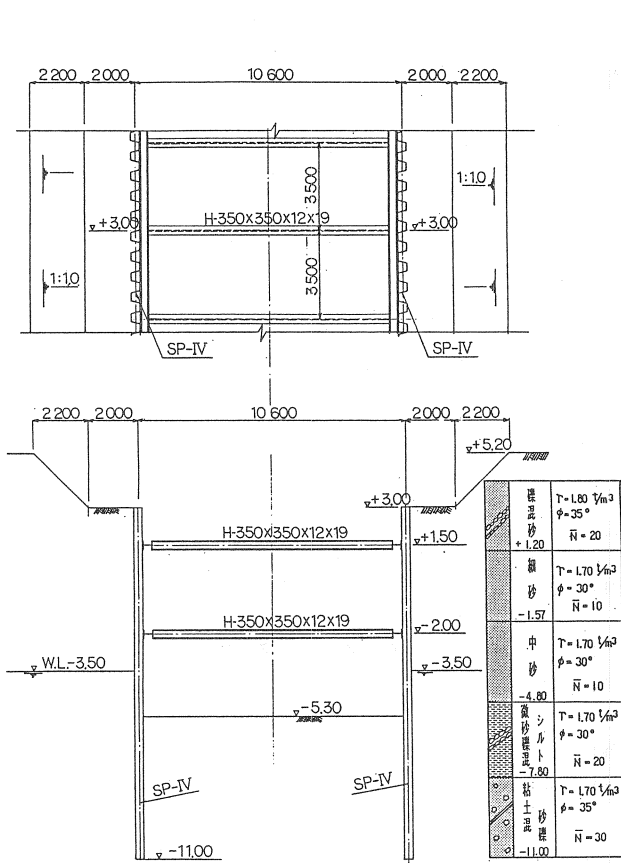


図-1 工事概要

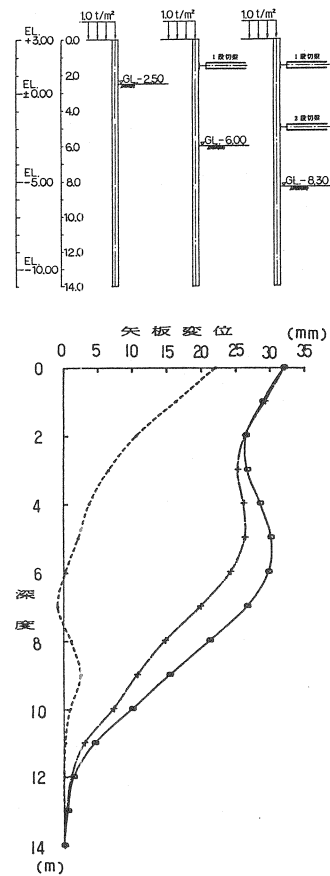


図-2 実測結果

実測例の基準①～③に沿って計算した結果を表－２及び図－３～図－８に示す。

表－２ 基準毎の計算結果

a. 水平地盤反力係数

深 度 (m)	N 値	土木学会 トンネル標準 示方書開削編	日本道路協会 共同溝設計指針	日本建築学会 山留め設計 施工指針
算 出 式		0.067 N	0.045 N	0.032 N
EL.+3.0～+1.2 (深度0.0～1.8)	20	K= 1.34kgf/cm ³	K= 0.90kgf/cm ³	K= 0.64kgf/cm ³
EL.+1.2～-4.8 (深度1.8～7.8)	10	0.67	0.45	0.32
EL.-4.8～-7.8 (深度7.8～10.8)	20	1.34	0.90	0.64
EL.-7.8～ (深度10.8～)	30	2.01	1.35	0.96

b. 各施工STEPの最大値

施 工 S T E P		土木学会 トンネル標準 示方書開削編	日本道路協会 共同溝設計指針	日本建築学会 山留め設計施工指針	
				ランキン・レザール式	
				側圧係数	
1	変位 (mm)	14.413 (0.00)	21.469 (0.00)	26.714(0.00)	25.696(0.00)
	+ モーメント(tm)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)
	- モーメント(tm)	4.77 (4.00)	5.68 (5.00)	5.35 (5.00)	5.36 (5.00)
	せん断力 (t)	-2.43 (2.50)	-2.74 (3.00)	-2.67 (3.00)	-2.61 (3.00)
2	変位 (mm)	12.592 (4.00)	21.669 (4.00)	23.481(4.00)	21.657(3.00)
	+ モーメント(tm)	8.37 (4.00)	13.23 (5.00)	10.88 (5.00)	9.41 (5.00)
	- モーメント(tm)	4.93 (9.00)	6.46 (10.00)	5.54 (9.00)	5.15 (9.00)
	せん断力 (t)	5.53 (1.50)	7.21 (1.50)	6.53 (1.50)	5.87 (1.50)
3	変位 (mm)	15.890 (7.00)	32.919 (8.30)	25.339(6.50)	26.24(7.672)
	+ モーメント(tm)	12.75 (8.00)	22.13 (8.30)	13.55 (7.80)	16.88 (8.00)
	- モーメント(tm)	5.52 (5.00)	11.24 (5.00)	3.55 (5.00)	9.17 (5.00)
	せん断力 (t)	11.33 (5.00)	16.66 (5.00)	11.46 (5.00)	14.79 (5.00)

※ 注：() 内は最大値の生ずる深度を表す。

側圧係数 $\begin{cases} \text{W.L.以上} & K = 0.3 \\ \text{W.L.以下} & K = 0.5 \end{cases}$

各基準及び設計指針ともN値より水平地盤反力係数を算定するが、算出式による差は2倍近くになる。また、土圧の考え方もクーロンの土圧を用いるケースとランキン・レザールの土圧を用いるケースがあり、若干の差異が生じる。

各基準毎に変形量及びモーメントに若干の差異がみられるが、慣用法に比べてその推定値は実測値に近く、掘削の進捗に伴う矢板の変形形状は実測値と良い対応を示している。変形形状を図－９のように深度軸と変形曲線でなす面積で評価すると表－３の如くなる。

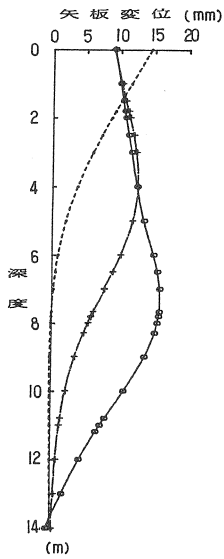
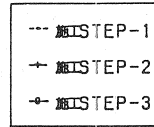


図-3 トンネル標準示方書
開削編 変位図

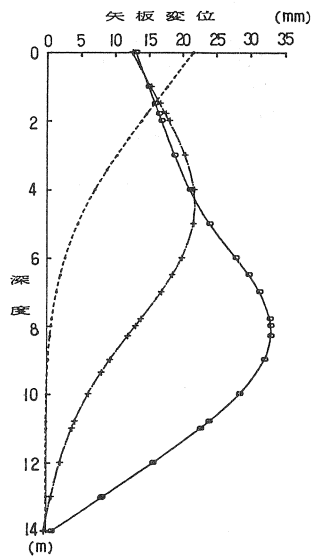


図-4 共同溝設計指針
変位図

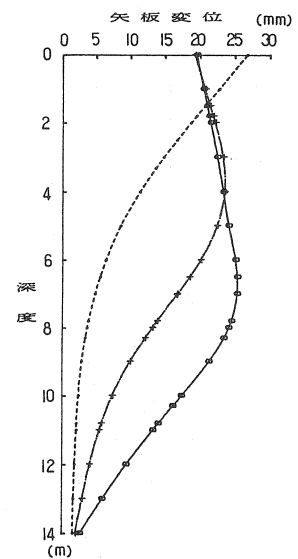


図-5 山留め設計施工指針
ランキン・レザール式 変位図

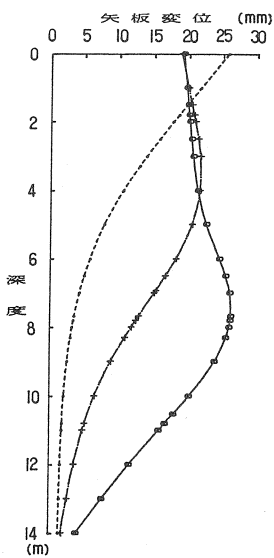


図-6 山留め設計施工指針
側圧係数 変位図

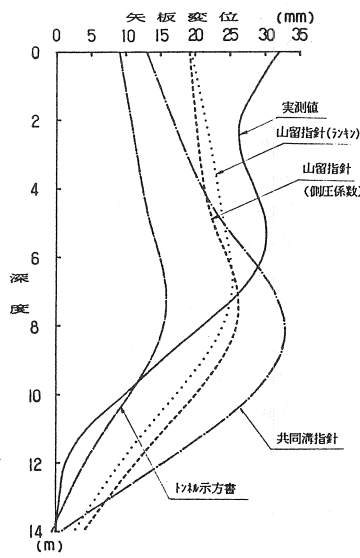


図-7 施工STEP-3 変位図

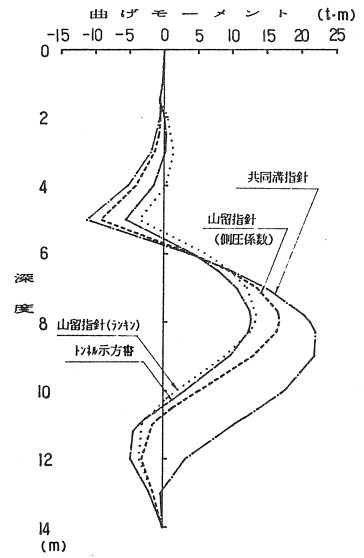
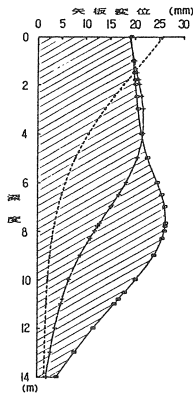


図-8 施工STEP-3 モーメント図

表－３ 面積比に依る評価

施工STEP	土木学会	日本道路協会	日本建築学会	
	トンネル 標準示方書 — 開削編	共同溝設計指針	山留め設計施工指針	
			ランキン・レザール式	側圧係数
STEP-1	$n = 0.730$	$n = 1.263$	$n = 2.146$	$n = 2.008$
STEP-2	0.409	0.755	0.890	0.811
STEP-3	0.553	1.135	0.996	1.023



図－９

ここに

各基準による計算値の面積

$$\text{面積比}(n) = \frac{\text{各基準による計算値の面積}}{\text{実測値の面積}}$$

面積：図－９の影の部分の面積を示す

表－３よりトンネル標準示方書以外は各基準共、施工STEP-1の自立状態では頭部変位が大きく計算されているため２倍程度の値になるが、掘削が進捗するに従って実測値に近づいているのがわかる。

４．弾塑性（拡張）法に及ぼす入力値の影響

弾塑性（拡張）法に基づいて行われる計算は３章で示したように、基準毎に若干の差異はみられるものの、それ自体理論的には正当なものである。しかし、実状に即した設計をするためには計算に使用する入力値の選定などの運用面が計算結果に大きく影響を及ぼすと考えられる。

金谷ら⁴⁾は、日本建築学会「建築基礎構造設計基準・同解説」（１９７４年改訂版）に基づく弾塑性拡張法の計算を例にとって、入力値が計算結果に及ぼす影響を調査し表－４に示すような結果を得ている。

アンケート調査結果によると、“発注者の指定”により基準や指針類を決定してしまう傾向にあるため、実務者レベルでの選択肢は土留め壁先端条件（ヒンジ・固定・自由）とボーリング等の土質データの整理に伴う地盤の変形係数（水平地盤反力係数）程度に限定されてしまう。本実測例を用いて先端条件の計算結果に及ぼす影響の検討を行ったのが図－１０である。

表－４ 入力値の影響度

変化させた項目			山留め計算結果への影響度		
			モーメント	変 形	切梁軸力
側圧係数 : $K=0.5 \sim 0.8$	支	固定	○	△	◎
	点	バネ (k)	◎	◎	○
土の変形係数 : $E_s/2, E_s, 2E_s$	条	固定	△	△	△
	件	バネ (k)	△	○	△
支点条件 : $k/2, k, 2k$, 固定			◎	◎	○

◎：大きく影響する、○：影響する、△：あまり影響しない

尚、検討は「共同溝設計指針」を用いて実施した。

先端条件では、自由端とピンの相違はほとんどなく、固定端と仮定すると下端のモーメント値に大きく影響している事がわかる。

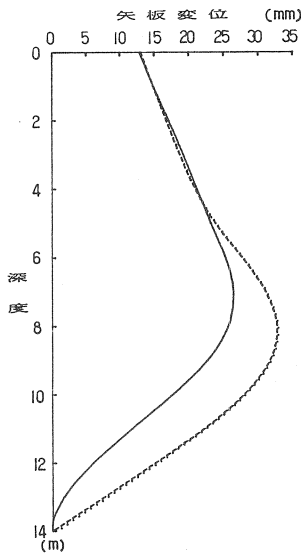
次に、地盤の変形係数の及ぼす影響を「トンネル標準示方書・開削編」を用いて検討した結果が表-5及び図-11である。

同示方書によると、N値より水平地盤反力係数を決定する場合、載荷幅Bが500～1,000cmであるため、水平地盤反力係数がある幅をもって算出される事になる。ここでは、この上限値と下限値を用いて反力係数を変化させて検討した。

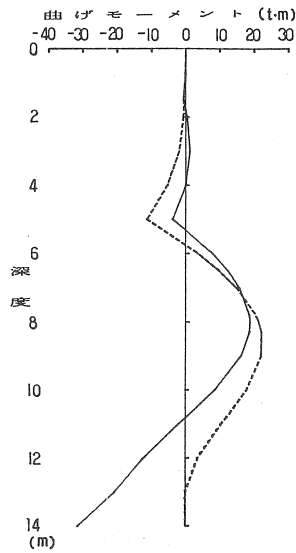
これによると、モーメントに関しては水平地盤反力係数の違いほどの差異はみられないが、土留め壁の変位量に関しては5mm程度の差異が見られる。

表-5 載荷幅の上限値と下限値の水平地盤反力係数

深 度 (m)	N 値	土木学会 トンネル標準示方書開削編	
		B=1,000 cm	B= 500 cm
算 出 式		0.067 N	0.113 N
EL.+3.0～+1.2 (深度0.0～1.8)	20	$K=1.34\text{kgf/cm}^3$	$K=2.26\text{kgf/cm}^3$
EL.+1.2～-4.8 (深度1.8～7.8)	10	0.67	1.13
EL.-4.8～-7.8 (深度7.8～10.8)	20	1.34	2.26
EL.-7.8～ (深度10.8～)	30	2.01	3.39



変位図



モーメント図

図-10 先端条件の計算結果に及ぼす影響

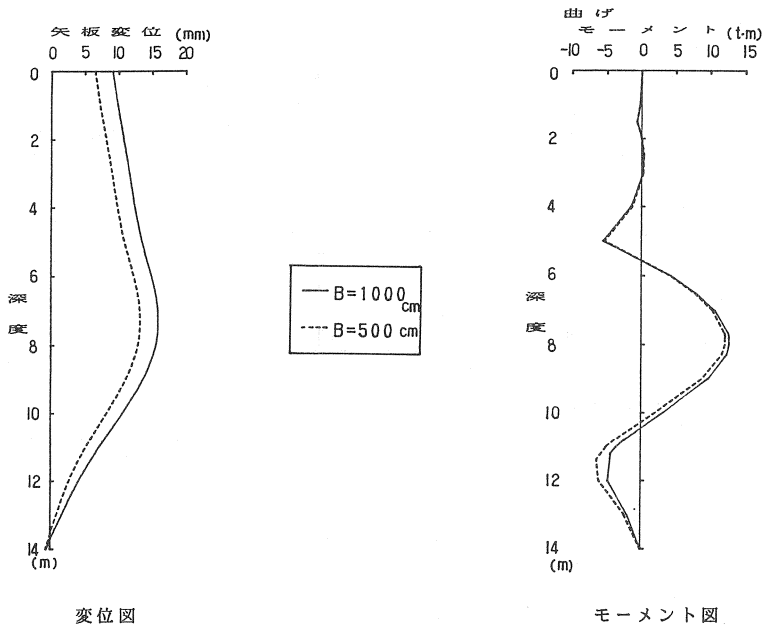


図-1.1 水平地盤反力係数の計算結果に及ぼす影響

5. まとめ

各基準類の計算結果の比較と、入力値の計算結果に及ぼす影響について述べてきたが、結果として本実測例については、「共同溝設計指針」がよく対応していたように思われる。しかし、なにぶん1現場の実測例についての比較である為、決して同指針の優位性を示すものではない。我々実務者としては、同条件下で生じる計算結果の差異を十分に把握した上で、入力値等に的確な判断を下し活用していくべきであると思われる。又、近接施工においては既設構造物への影響を常に把握しながら対策等を検討し、工事を無事完了する事が要求される。弾塑性（拡張）法は、現場計測により掘削による土質条件の変化を次段階へフィードバックする事ができる計算手法であり、かつまた、最近の工事現場への電算機の導入・計算ソフトの整備の状況等から非常に有益な計算手法であると思われる。

謝辞

本報告は、広島地区土質工学セミナーによる成果の一部をまとめたものであり、有益な御意見をいただいた同セミナーのメンバーの方々に深謝の意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書開削編・同解説
- 2) 日本道路協会：共同溝設計指針
- 3) 日本建築学会：山留め設計施工指針
- 4) 金谷・宮崎・土屋：RC山留め壁に作用する側圧：第17回土質工学研究発表会論文集