

招待論文
INVITED
PAPER

招待論文

軟弱地盤における深い掘削

DEEP EXCAVATIONS IN SOFT GROUND

藤田圭一

Keiichi FUJITA

正会員 工博 東京理科大学理工学部土木工学科教授
(〒278 野田市山崎 2641)

Key Words : deep excavations, braced walls, settlement

1. まえがき

与えられた題目の中の“深い掘削”という用語はなじみが薄いですが、第7回国際土質基礎工学会議 (ICSMFE) —Mexico—1969における Peck の State-of-the-art report “Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground” の deep excavation の日本語であるとすれば理解しやすいと思われる。それまでは、Terzaghi-Peck (1948 と 1967)¹⁾ の “Soil Mechanics in Engineering Practice” では、open cuts を分類して掘削深さ 20 ft (6.1 m) を境に shallow cuts と deep cuts と呼んでおり、中位より軟らかい粘土地盤では shallow cuts でも bracing が必要であるとしている。また、Tschebotarioff (1951) “Soil Mechanics, Foundations and Earth Structures” では、deep cuts のほかに braced cuts の用語があり、braced and anchored cuts という章が設けられている。

いずれにせよ、深い掘削には bracing が必要であるから braced excavations という用語が、最近外国で広く用いられている。しかし、bracing に anchoring は含まないとする人と含む人がいる。

さて、幸運にも Mexico で Peck の講演を聞くことができ、帰国後直ちに問題のあったいくつかの掘削データを見直したところ、Peck の指摘したとおりであった。しかし、Peck のデータは掘削深さが浅いように思われたので、当時の日本における掘削例と比較するために図-1を作成した。ただし、今回さらに新しいデータを追加して比較している。日本のデータとして、Peck (1969)²⁾ と同時期と思われるものを技術雑誌“施工技術”と“土木施工”の1968年と1969年の一部に紹介された掘削例17件を取り上げた。図-1には“基礎工”の1990年7月号³⁾のデータ27件が追加されている。

図-1によれば、Peck (1969) のデータは4.9～23.7

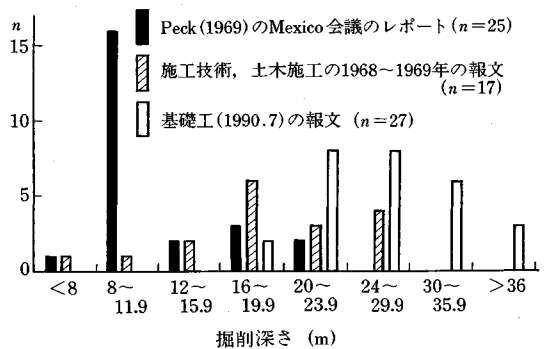


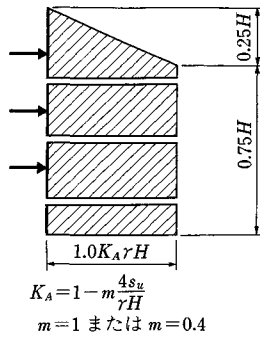
図-1 文献からみた掘削深さの比較 (藤田, 1994)

m, 当時の日本は6.4～26.5 m, 最近の日本は19.5～51.1 mであるが、平均的にみると、それぞれ10～11 m, 19 m前後, 26 m前後の掘削が deep excavations として取り扱われたことになり、掘削の深さは年々大きくなっている。一方、データで示すことはできないが、対象地盤は次第に良くない方に移っているのは確かなことである。

2. Peck の貢献

Peck (1990) によれば、その学生時代には、地下鉄建設のための掘削の最深部に非常に大きな切梁を入れていた。これに対して Meem (1908) はニューヨークの地下鉄工事の経験と実測をもとに、土留め壁に加わる土圧の合力の作用点は掘削深さの1/2より上方にあり、擁壁に加わる土圧の分布と異なることを指摘して、大きな議論をおこしたと回顧している。

Terzaghi-Peck (1948) は、切梁に加わる軸力の実測値を整理して、土留め壁に加わる見掛けの土圧 (apparent earth pressure) の分布を提案している。以来、分布形状が多少異なる提案もみられるが、この考え方は土留め



軟らかい～中位の粘土地盤における土圧に関する安定数 (N_s)

$$N_s = \frac{\gamma H}{S_u} \quad (\text{注}) \text{ Peck の提案では } N$$

- N_s : 掘削時の土圧などに関する安定数
- S_u : 粘性土の非排水せん断強さ
- γ : 土の単位体積重量
- H : 掘削深さ

安定数 N_s による掘削時の土圧の判定

$N_s < 4$	$K_A = 0$ になるが、土圧は台形分布で、 $(0.2 \sim 0.4) \gamma H$ である。
$N_s = 4 \sim 6$	周辺の土が弾性域から塑性域に移行する。土圧は $1.0 K_A \cdot \gamma H$ で算出する。 $m = 1$ 。
$N_s = 6 \sim 8$	周辺の土の塑性域が掘削底面に達し、地表面沈下が大きくなる。 $m = 0.4$ を適用するケースが表われる。

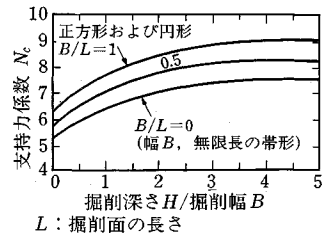
図-2 軟らかい～中位の粘土地盤における切梁に加わる荷重を計算するために用いる見かけの土圧分布と土圧に関する安定数 N_s (Terzaghi-Peck, 1967 より作成)

壁の設計の基本となって現在でも用いられている。

Terzaghi-Peck (1967) は、図-2 のように軟らかい～中位の粘土地盤の土圧に関する安定数 N_s の概念を導入して、掘削深さに対する土の非排水せん断強さがある比率より小さい場合には、土圧の大きさが約2倍になる式を与えている。これは、掘削に伴って周辺の粘土が乱され、せん断強さが急激に低下するためである。安定数 N_s [原文では N としているが標準貫入試験の N 値と間違いやすいので N_s とした (藤田, 1973)]⁶⁾ から掘削時の土圧の大きさを判定する基準は図-2 に示されている。

Terzaghi-Peck (1948, 1967) は、軟らかい粘土地盤における掘削底部破壊あるいはヒービングに対する安定数 N_b の概念を図-3 のように与えている。

N_b の限界値である N_{cb} は、1948 年には 5.70 であったが、図-3 には 1967 年の 5.14 を記入した。これらの数値は $\phi = 0^\circ$ の粘土地盤における帯状基礎の支持力係数 $N_c = 5.70$ (1948), 5.14 (1967) が根拠になっている。通常の掘削は四辺形であるのでその補正が必要である。Terzaghi-Peck (1967) は図-3 に示した Janbu ら (1956) の図を、Peck (1969) は、Bjerrum ら (1956) の 6.5～



ヒービングに対する安定を検討するための支持力係数 N_c (Janbu ら, 1956)

掘削底面の破壊に対する安定数 N_b

$$N_b = \frac{\gamma H}{S_{ub}}$$

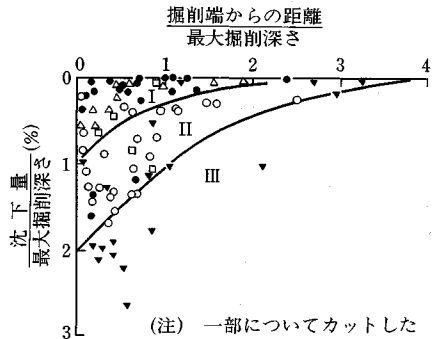
- N_b : 底面破壊またはヒービングに関する安定数
- γ : 土の単位体積重量
- H : 掘削深さ
- S_{ub} : 掘削底面から下方の粘性土の非排水せん断強さ

安定数 N_b と掘削底面に生じる現象

$N_b < 3.14$	掘削底面上の向きの変位はほとんど弾性的でその量は小さい。
$N_b = 3.14$	掘削底面に塑性域が広がり始める。
$N_b = 3.14 \sim 5.14$	掘削底面のふくれ上がりが見られる。土留めの応力・変形および地盤の変位などについて慎重な検討が必要である。
$N_b = 5.14$ (N_{cb})	極限に達して、掘削底面は破壊もしくはヒービングにより継続的に盛り上がる。

Peck (1969) は、深さの割合に四辺の長さが短い場合には、Bjerrum らの提案する $N_{cb} = 6.5 \sim 7.5$ としてよい。

図-3 掘削底面の破壊に対する安定数 N_b に関する総括 (Terzaghi-Peck, 1967; Peck, 1969 に基づいて作成)



ゾーンⅠ:

砂、軟らかい～硬い粘土、平均的な施工の仕上がり。

ゾーンⅡ:

- a) 非常に軟らかい～軟らかい粘土。
 - 1) 掘削底面から下方の粘土があまり深くない。
 - 2) 掘削底面以下の粘土が深いか、 $N_b < N_{cb}$ のとき。
- b) 施工が困難なために、沈下量に影響を及ぼした。

ゾーンⅢ:

非常に軟らかい～軟らかい粘土で、掘削底面以下の粘土が深く、かつ、 $N_b \geq N_{cb}$ のとき。

図-4 各種の地盤におけるオープンカット周辺の沈下量と掘削端からの距離の関係の総括 (Peck, 1969)

7.5を推奨している〔藤田(1973)は日本国内の実測例から5.9を与えている。場所打ち杭や立坑の経験を踏まえると掘削幅あるいは掘削幅と掘削深さとの比も関係しているように思われる〕。

Peck(1969)は、掘削に伴う地表面沈下量とその形状(範囲)について、掘削深さで正規化して図4を与えている。当時の土留め壁は親柱横矢板式か鋼矢板式であった。地表面沈下量の大きさは地盤の種類によって区分できるが、施工の巧拙に影響されることが指摘されている。なお、Peckは土留め壁に水圧が加わらないように、原則的に地下水位を低下することを推めている。

3. 国際学会と深い掘削

(1) 国際会議におけるセッションのテーマ

国際土質基礎工学会(ISSMFE)では、4年ごとに国際土質基礎工学会議(ICSMFE)で主催しているが、主要セッションのテーマで深い掘削が取り上げられたのは、Mexicoで開催された第7回ICSMFE(1969)におけるPeckのState-of-the-art-report“Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground”のみである。

しかし、Rio de Janeiroで開催された第12回ICSMFE(1989)では、Special Lecture“Underground Construction, Tunnel, Underground Transportation”の中で、藤田²⁾が深い掘削を取り上げた。すなわち、軟弱地盤のトンネルの施工法として、シールド工法と開削工法を取り上げ、開削工法における深い掘削は周辺に対する影響が大きいことを述べた。

また、New Delhiで開催された第13回ICSMFE(1994)では、主要セッション“Design and Performance of Retaining and Buried Structures”のState-of-the-art-reportとして、藤田³⁾が“Soft-Ground Tunneling and Buried Structures”という与えられたテーマの中で、開削工法による深い掘削に伴う地盤変位の問題を取り上げた。Peck(1969)とClough(1990)³⁾の論文を比較して、約20年という年月の経過は、深い掘削における地表面沈下量を約1/2~1/3に減少させたことに触れた。

(2) 国際学会の技術委員会

ISSMFEは、1989年のICSMFEの直後に掘削に関連した技術委員会を設置した。すなわち、ISSMFE・TC-28“Underground Construction in Soft Ground”-Chairman 藤田圭一、Secretary 日下部治一である。このTC-28には、国際シンポジウムの開催、各国の基準類あるいはケースヒストリーを集めて報告書を作成するなどの任務が与えられた。

このTC-28は日本の土質工学会がサポートすることになったので、国内委員会(委員長:藤田圭一)を設け、山留め小委員会(小委員長:宮崎祐助)シールド小委員

会(小委員長:河田博之→栗原和夫)がそれぞれ作業を分担した。国内委員会は国際シンポジウムに先立って、土質工学会シンポジウム“山留めとシールド工事における土圧・水圧と地盤の挙動に関するシンポジウム”⁴⁾を1992年4月に開催した。この論文集には、両小委員会の研究成果が委員会報告として129ページにまとめて掲載されたが、土留め掘削に関するものはその中88ページである。

ISSMFE・TC-28が主催した国際シンポジウム“International Symposium on Underground Construction in Soft Ground”は、1994年1月3日にインドのNew Delhiで開催されたが、2つのセッション-Braced ExcavationsとTunnellingによって構成され、ケースヒストリーを中心として多くの論文が発表された。なお、この国際シンポジウムのProceedingsはオランダのBalkema社から出版される。また、TC-28はイギリスが中心になって運営することになる予定である。

4. 土留めに関する各国および日本の基準類について

(1) 基準類のリスト

TC-28委員会の活動に伴って、各国の土質工学会あるいはこれに準ずる学会に問合せを行い、各国における土留め関係の基準・指針などの入手を図った。無回答の国も少なくなかったが、大部分がコンサルタントの判断によることが判明した。割合まとまっているのが南アフリカで、その他の多くは関連する基準類などの一部として条項に加えられている。TC-28委員の一人であるインドのSomが名称と内容の骨子をまとめたのが表1である。

TC-28国内委員会では、表2に示す9種類の主な基準類について表3に示す項目に対して比較検討した。なお、土屋(1990)⁵⁾はわが国の17の基準類のリストを作成している。表2によれば、基準類として適用できる限界として最大掘削深さを規定しているものもないものがある。それは、各基準類が対象とする永久構造物の種類にもよるが、計算方法として簡便な慣用設計法である単純梁法を採用する場合には、最大掘削深さを規定する必要がある。複雑な弾塑性法を採用しているのは、土木学会、日本建築学会、日本道路協会(共同溝)、首都高速道路公団のほか東京都交通局と日本トンネル技術協会(立坑用)であるが、いずれも深い掘削に対応するためと考えられる。

(2) 基準類の利用状況と所要仮設材重量との関係

土留めに関する日本の基準類は17件以上あるが、建築はその中の1件のみである。なぜ土木関係に多数の基準類があるのか理由はあまり明確でないが、多分、構造物の型式が多いこと、発注機関ごとに失敗例を見直して

表一 各国の土留め掘削に関する基準類 (Som-1994)

国名	基準類の名称	内容
カナダ	National Building Code : NBCC 1990. Canadian Foundation Engineering Manual	簡易化した土圧の分布, 地盤の変位など. 基礎と掘削方法の概論.
フランス	Eurocode-Part I, Clouter (1991), TA 86.	土留め構造物の設計に関する一般的な規則, ソイルネイリング, グラウンドアンカー.
イタリア	P.W. Ministry Decree 1988.	設計に関する一般的な原則と指針.
韓国	Seoul and Pusan Metropolitan Subway Bureau. National Railway Authority, Building Code	切梁のシステム, 土圧, 近接構造物の防護.
ノルウェー	Norwegian Building Code.	限界状態設計荷重係数, ひずみ硬化, ダイレタンシー.
南アフリカ	Code of Practice on Lateral Support in Surface Excavations SAICE (1989).	現場調査, 支保システム, 土圧, 地下水のコントロール, 計測の方法, 法的規制
香港	Guide to Retaining Wall Design (Geo 1991). Review of Design Methods (Geo 1990)	設計, 施工および挙動に関する研究に対する勧告.
イギリス	British Code CP 2, B.S. 8002, Eurocode 7 (ch 8)	安全率, 全応力と有効応力のパラメーター.
アメリカ	NAVFAC DM 72(USNAVY)FHWA/RD-82/047 (US Federal Highway Administrative Manual)	設計の原則.

表二 主な基準類の最大および単純梁法の適用掘削深さならびに土留め壁の断面算定側圧の比較

団体の名称	基準類の名称	制定年月 (改訂年月)	最大適用掘削深さ		単純梁法適用深さ		砂質地盤の側圧		粘土地盤の側圧	
			良質地盤	軟弱地盤	良質地盤	軟弱地盤	分布形	土圧水圧	分布形	土圧水圧
土木学会	トンネル標準示方書・同解説(開削篇)	1977. 1 (1986. 1)	30 m 程度	特に規定なし	15 m		台形	一体	台形	一体
日本建築学会	山留め設計施工指針	1974. 11 (1988. 1)	特に規定なし		10 m (切梁段数が1~2段の山留め)		ランキン*	分離	ランキン*	分離
							三角形	一体	三角形	一体
							長方形	一体	ベック**	一体
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. 1 (1987. 5)	10 m 程度	8 m 程度	10 m	8 m	長方形	分離	台形	分離
日本道路協会	共同溝設計指針	1980. 4 (1986. 3)	特に規定なし		10 m	8 m	長方形	分離	台形	分離
日本道路公団	設計要領・第2集・第6編・[II]仮設構造物	1977. 11 (1990. 7)	10 m 程度		10 m		長方形	分離	台形	分離
首都高速道路公団	仮設構造物設計基準	1972. 9 (1990. 10)	30 m 程度		10 m		長方形	分離	台形	分離
鉄道総合技術研究所	掘削土留工設計指針	1979. 12 (1987. 9)	15 m 程度	安定が確保できる深さ	15 m	安定が確保できる深さ	四辺形	分離	四辺形	一体
									台形	一体
地下鉄技術協会	仮設構造物設計指針(案)	1979. 12 (1987. 9)	特に規定なし		特に規定なし		テルツァーギベック	分離	チエボタリオフ	一体
日本下水道事業団	設計規準(案)・土木設計編	1974. 8 (1978. 3)	20 m	10 m	20 m	10 m	三角形	一体	三角形	一体

(注) 土質工学会・TC-28 国内委員会報告書に基づいて作製した。*ランキン-レザル, **テルツァーギ-ベック

安全を図っているためと考える。

堀場ら (1992)¹⁰⁾ は, 1990 年度におけるわが国の土留め工事用の重仮設資材の総需要量を約 800 万 t と推定している。堀場らの会社はその約 20% を取り扱っているが, その在庫量の内訳は, 土木工事が約 68%, 建築工事が約 32% である。全在庫量の約 72% に対して, 技術サービスとして土留め壁, 切梁などの支保材の設計を

行っているが, 土木関係は約 65%, 建築関係は約 99% の割合になっている (堀場, 1988)¹¹⁾。

これに対して, 設計に用いた基準類の内訳は, 土木関係が約 18%, 残りの約 82%¹²⁾ は日本建築学会の指針が用いられている。土木関係では, 日本道路協会の道路土工に関する指針が全体の約 12%, 他は 1% 台かそれ以下であった。これは工事件数の比率でなく, 発注者側の

表-3 主な基準類の比較検討の項目

土留め壁の計算方法			共通項目
単純梁法	弾塑性法	自立式	
<ul style="list-style-type: none"> 概念 適用範囲 設計用側圧 根入れ長の検討方法 山留め壁の断面検討 腹起しと切梁の断面算定荷重 	<ul style="list-style-type: none"> 概念 適用範囲 設計用側圧 水平方向地盤反力係数 切梁バネ定数 山留め壁の曲げ剛性 必要根入れ長 	<ul style="list-style-type: none"> 概念 適用範囲 設計用側圧 根入れ長の検討方法 断面計算方法 	<ul style="list-style-type: none"> 上載荷重 山留め支保部材の検討方法(腹起し, 切梁, 横矢板, 中間杭) 掘削底面の安定(ヒービング, ボイリング, 盤ぶくれ)

表-4 基準類と土留め掘削用仮設材重量の比較

(堀場, 1988による)

	A 基準	B 基準	C 基準
鋼 矢 板	279.00 t	357.87 t	488.25 t
中 間 杭	23.31 t	23.31 t	23.31 t
1 段目支保工	(12.0+34.0+6.9) 52.90 t	(18.0+34.0+7.8) 59.80 t	(18.0+34.0+7.8) 59.80 t
2 段目支保工	(18.0+34.0+7.8) 59.80 t	(24.0+51.0+11.25) 86.27 t	(36.0+51.0+13.05) 100.05 t
3 段目支保工	(24.0+51.0+11.25) 86.25 t	(36.0+51.0+13.05) 100.05 t	(48.0+68.0+17.4) 123.40 t
合 計	501.26 t	627.28 t	794.81 t
比 率	100 %	125 %	159 %

(注) 支保工の各欄の1行目は(腹起し+切梁+部材)の数字を示す。材料はリース材である。

地盤条件: 地下水位はGL±0 m

-13 m までシルト質粘土, (N=0~2)

-14 m 以深は砂質土, (N≥50)

掘削平面: 30 m×30 m, 掘削深度: -10 m

鋼矢板長さ: 15.5 m, 切梁: 水平間隔 6 m, 3段切梁

基準類に準拠するという原則が守られてなく、加えて下水道枝線の管路布設工事などに対して地方自治体の基準類がない事情があるためといわれている。

なお、堀場らのデータから推定すると、土木工事の1件平均出庫量が多いので、出庫件数は土木が約44%、建築が約56%、また、設計サービス件数からみると、土木が約34%、建築が約66%になる。したがって、土木関係でもその半数近くが建築学会の指針を用いたことになる。

土留め関係の重仮設資材量が適用する基準類によってどのように異なるかについて、堀場(1988)が試算した例が表-4である。表中の掘削規模と地盤条件に対して3つの基準類で試算した結果、所要資材量は最小を100とすると最大は159になった。一般に、日本建築学会の指針を適用した場合が最も経済的といわれているが、これが多用される原因と思われる。

(3) 土留め掘削に関連した重大事故について

橋本(1994)¹²⁾は、“建設業安全衛生年鑑”に基づいて、最近5年間の重大事故のうち、掘削・山留め工事関係の死亡事故を表-5のようにまとめた。工事の種類ごとの

表-5 掘削・土留め工事における死亡事故の統計

-S. 62~H. 4年度-(橋本, 1994による)

	上下水道	道 路	河 川	土地整理	砂 防	建 築	橋 梁	トンネル	その他	計
土砂崩破	96	22	7	18	13	2	3	2	9	172
建設機械等	15	10	7	8	2	3	2	1	3	51
墜 落	7	11	6	2	7	4	3	2	1	43
倒 壊	7	4	8	2	1	4	0	1	6	33
飛来落下	6	5	5	0	2	4	0	1	1	24
クレーン等	0	2	0	2	1	1	3	0	1	10
自動車	3	0	1	0	0	0	0	0	0	4
爆発・火災	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
その他	2	2	0	0	0	1	2	1	0	8
計	136	56	34	32	26	19	13	9	21	346

(注) *その他にはダム, 鉄道, 地下鉄などを含む。

工事量や掘削の難易度が不明であるので、詳細に検討することができないが、上下水道関係の事故が圧倒的に多いのが気になる。基準類の内容以前の問題として、掘削の安全にかかわる重要な事項に、作業の熟練度と工事管理の程度があることを指摘しておきたい。

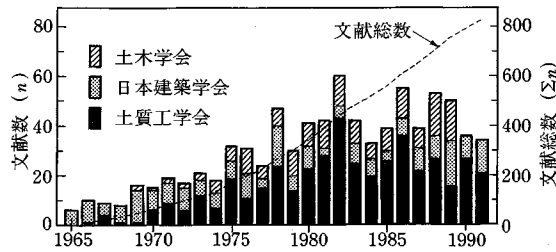


図-5 土木学会・日本建築学会・土質工学会に発表された土留め関係の文献の年次別動向（土質工学会・TC-28国内委員会報告書，1992）

表-6 文献の分類項目
（土質工学会，TC-28国内委員会報告書，1992）

大分類	小分類
側 圧	壁面，切梁，根入れ部
水 圧	壁面
応 力	壁面
変 形	壁面
反 力	切梁，アンカー
変状(変位)	周辺地盤，周辺構造物，掘削底面
計 測	計測装置，計測方法，計測管理と手法
設計・解析	モデル化，地盤性状，地盤定数
施 工	施工法，プレロード，地下水

5. 日本における深い掘削に関する諸研究の動向

日本の学会における論文集，論文報告集などにおいては，ケースヒストリーなどに対して一般に厳しく取り扱われたことから，この種の報告が諸外国に比べて非常に少ないのが現状である。しかし，年次学術講演会などでは，多くの発表（以下文献という）がみられる。

TC-28国内委員会・山留め小委員会¹³⁾の文献グループでは，土木学会，日本建築学会，土質工学会において講演発表された約25年分について分類・調査した。総数827件の内訳は次の通りである。

- ① 土木学会：土木学会年次学術講演会講演概要集（1965～1989）……………168件
- ② 日本建築学会：日本建築学会大会学術講演梗概集（1965～1991）……………215件
- ③ 土質工学会：土質工学研究発表会（1966～1991）……………444件

残念ながら，調査年度が一致しない部分があるが，文献数を年次別・学会別にまとめたのが図-5である。1960年代には文献数が少なかったが，1978年ごろから急増加して年間およそ40件になっている。

文献が取り扱っている内容は表-6に示す分類項目別に文献数をとりまとめた。図-6は主テーマを項目別に分類したものである。この図によれば，土留め壁に加わる側圧（土圧+水圧）と，土留め壁に生じた圧力と変形

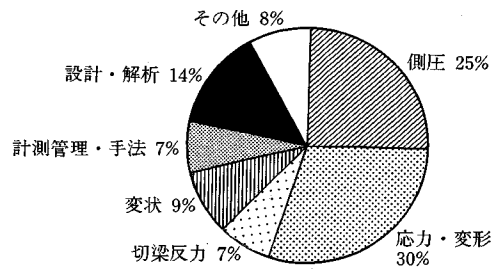


図-6 文献の主テーマの項目別分類（土質工学会・TC-28国内委員会報告書，1992）

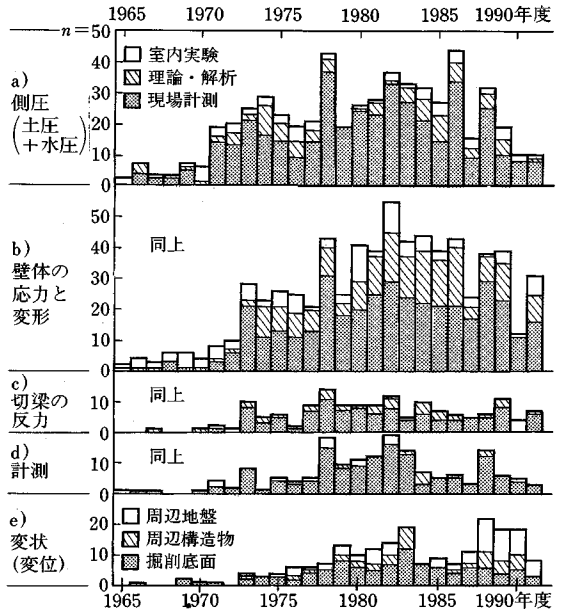


図-7 文献で取り上げている主な項目の年次別動向（土質工学会・TC-28国内委員会報告書，1992に基づいて作成した。項目数>文献数である）

に関して，最も興味もたれている。周辺地盤や周辺構造物の沈下を主テーマとした文献が意外に少ない。

図-7は，図-6に示した項目をさらに細分化したうえで，各文献の主テーマ以外に取り扱っている項目を取り出して整理したものである。したがってこれらの数の合計は文献数より多くなっている。全文献数827件のうち，側圧，壁体の応力・変形，切梁反力，計測，地盤変状を取り扱っているのが，それぞれ，67%，82%，18%，20%，25%になっている。また，現場計測，理論，実験に分けると，およそ60～90%が現場計測である。

委員会報告では，文献調査結果をさらに分析し，①土留め壁に作用する側圧，②根入れ部に作用する側圧，③設計・解析方法，④計測方法と計測値の利用，⑤周辺地盤の変状などについてその歴史的発展の経過，現状，さらに最近の研究動向について取りまとめている。

建設省の総合技術開発プロジェクト“地下空間の利用技術の開発”の一環として，1988年にわが国における

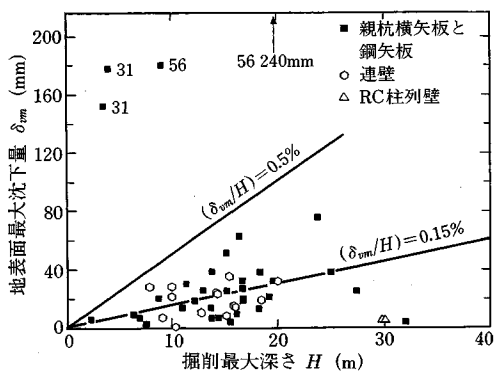


図-8 土留め壁を用いた掘削における掘削最大深さと地表面最大沈下量との関係 (Clough ほか, 1990)

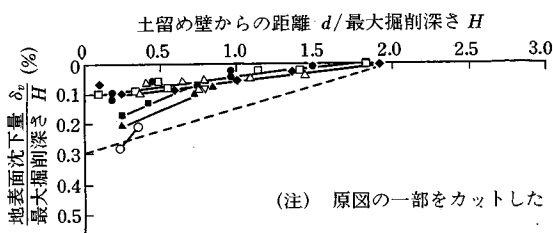


図-9 砂地盤における周辺の地表面沈下量と最大掘削深さの関係 (Clough ほか, 1990)

大深度・大規模土留めの設計と施工に関する実態調査を実施しているが、岡原ら (1990)¹⁴⁾ が報告した概要の中に次のことが含まれている。1977～1987年に施工した199件の調査結果によれば、掘削深さは年々深くなる傾向がみられる。土留め壁の計算方法では、深さ20～30m級の約60%、深さ30m以上のほとんどに、弾塑性法が用いられている。

6. 地表面沈下量に関する統計的なデータ

(1) 地盤の種類と地表面沈下量

Peck (1969) は図-4のように地表面沈下量の実測値を整理しているが、地盤を3種類すなわち、砂・軟らかい～硬い粘土、非常に軟らかい～軟らかい粘土 (N_6 が限界値以下) および非常に軟らかい～軟らかい粘土 (N_6 が限界値以上) に分類している。ここに N_6 は底部破壊に対する安定数である。

Clough (1990) は、掘削深さと地表面最大沈下量の関係を図-8、地表面沈下量を掘削深さで正規化した関係について、砂地盤 (図-9)、硬い～非常に硬い粘土地盤 (図-10)、軟らかい～中位の粘土地盤 (図-11) の場合をそれぞれ与えている。

図-8によれば、地表面最大沈下量は掘削深さの0.5%以下、平均して0.15%程度であるが、親杭横矢板工法では異常に大きな沈下量になることがある。なお、表-1に利用した基礎工の1990年7月号の事例には、沈下

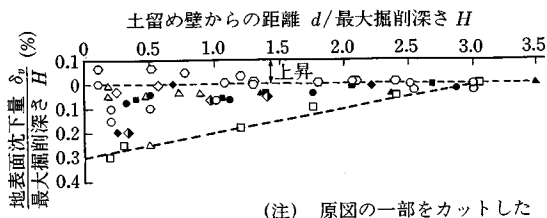


図-10 硬い～非常に硬い粘土地盤における周辺の地表面沈下量と最大掘削深さの関係 (Clough ほか, 1990)

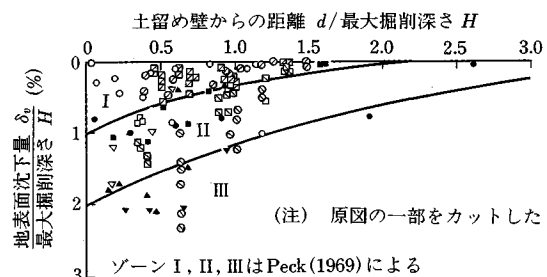


図-11 軟らかい～中位の粘土地盤における周辺の地表面沈下量と最大掘削深さの関係 (Clough ほか, 1990)

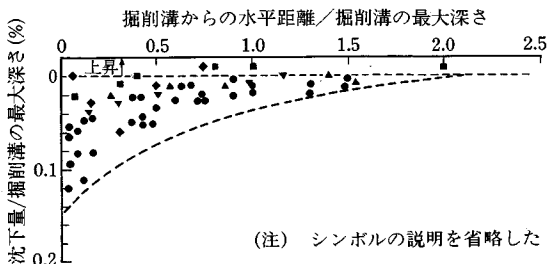


図-12 連壁の施工で生じた地表面沈下量の実測値 (Clough ほか, 1990)

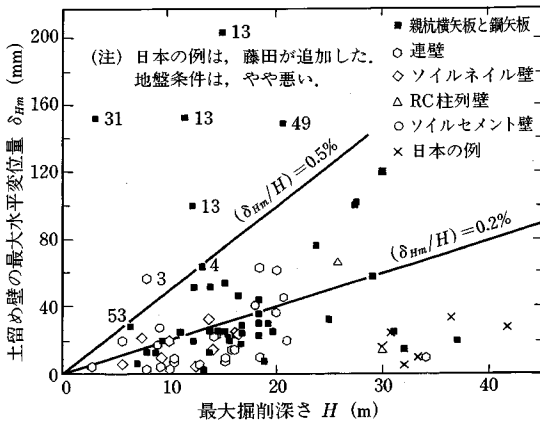
量を示すデータがなかった。

図-11の軟らかい～中位の粘土地盤には、Peck (1969) の古いデータも多く含まれているが、図-4に示す傾向とほとんど変わっていない。しかし、図-9と図-10は、Peck がゾーン I と分類し、沈下量が掘削深さの1%以下であるとした地盤と同じタイプであるが、沈下量は掘削深さの0.3%以下になっている。すなわち、沈下量が約1/3になったのは技術の進歩として評価したい。一方、軟らかい粘土地盤において沈下量の減少の傾向がみられないのは、掘削技術以前の地盤の性質に原因があると考えたい。

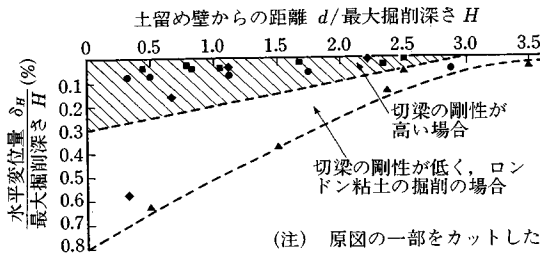
杉本 (1990)¹⁵⁾ は、東京都における沈下量のデータ (時期不明) を、台地、台地河谷底、低地の三地区に分類して整理しているが、台地は図-9または図-10、低地は図-11に似た傾向を示している。

(2) 連壁の施工に伴う地表面沈下について

Clough (1990) は連壁の施工による地表面沈下量を掘削溝の深さとの比で図-12に与えている。最大沈下



図一13 硬い粘土、残積土および砂地盤における土留め壁の最大水平変位量と最大掘削深さの関係 (Clough ほか, 1990 に一部追加)



図一14 硬い～非常に硬い粘土地盤における水平変位量と最大掘削深さの関係 (Clough ほか, 1990)

量は5～15 mmであったが、深さ37 mの連壁施工時に50 mm余の沈下量を生じた場合があった。地表面最大沈下量は連壁の深さに対して0.1%以下であるが、根入れ長を考慮すると、掘削深さに対して0.06～0.09%相当になる。この値は、図一9と図一10に示す地表面沈下量の約20～30%程度である。

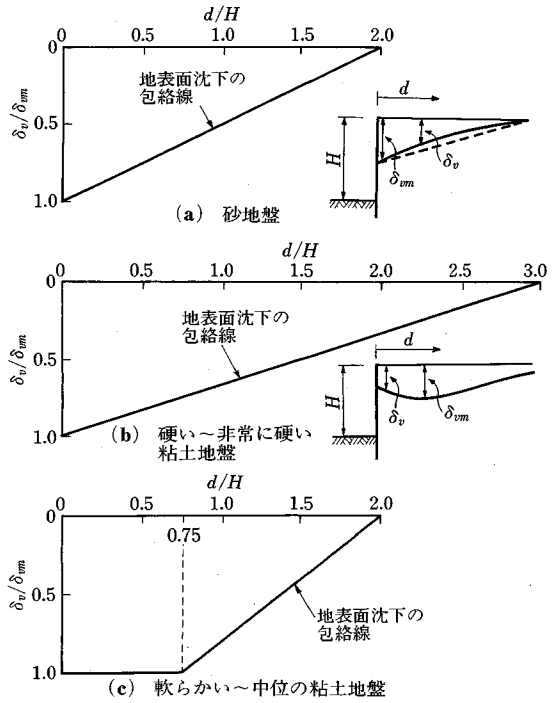
(3) 土留め壁の水平変位量について

土留め壁の水平変位量は地表面沈下量の大きな要因であるが、Clough (1990) は、硬い粘土、残積土および砂地盤の場合について図一13を、硬い～非常に硬い粘土地盤の場合を図一14に与えている。なお、図一1に用いた基礎工の1990年7月号中の水平変位量のデータを図一13に追加した。

(4) 地表面沈下量と土留め壁の水平変位量の実測データの関係

(1) と (3) のデータをまとめると、以下のようになる。

- ① 地表面沈下量に比べて土留め壁の水平変位量のバラツキが大きい。
- ② 地表面沈下量は掘削深さの平均約0.15%、土留め壁の水平変位量は同様に平均約0.2%である。したがって、地表面沈下量は土留め壁の水平変位量の約75%



図一15 各種の地盤における掘削において周辺地盤の沈下量の分布形状を予測するために用いる無次元化した沈下形状の断面 (Clough ほか, 1990)

あるいは3/4と考えてよい。

(5) 地表面沈下の形状

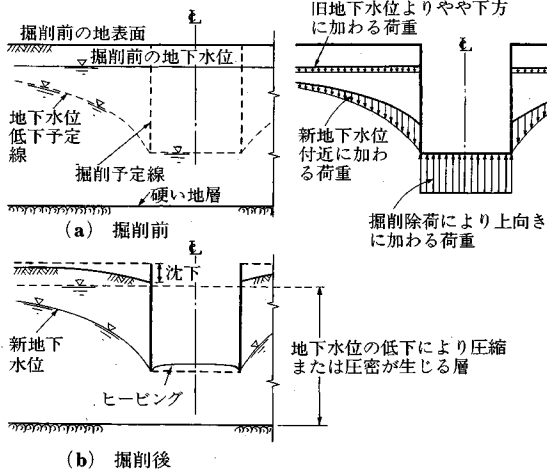
深い掘削に伴う地表面沈下の形状を知ることは、周辺構造物たとえば建物や埋設管などに与える影響を検討する上で必要なことである。Clough (1990) は、多数の実測データを整理して、図一15に示すように、(a) 砂地盤、(b) 硬い～非常に硬い粘土地盤、(c) 軟らかい～中位の粘土地盤の3種類について、土留め壁からの距離を掘削深さで正規化して、地表面沈下の形状を与えている。

7. 深い掘削における地表面沈下の要因

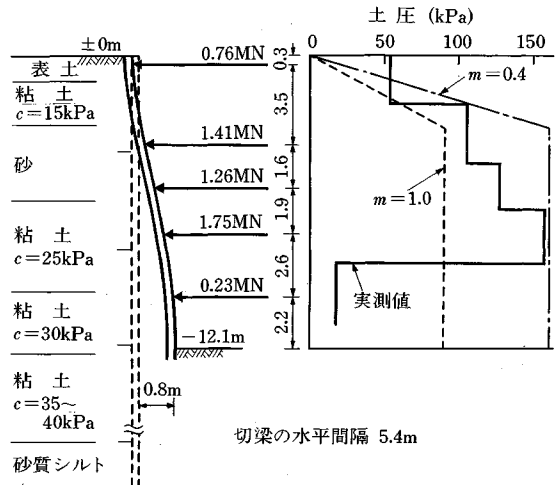
深い掘削に伴う地盤とくに地表面沈下、さらに最大沈下量の大きさや沈下の範囲と形状を予測することは、掘削方法の選定や周辺の障害防止対策を講じる上で欠かせない問題である。

深い掘削に伴う地表面沈下の主な要因は、

- ① 地下水位の低下に伴う土被り圧の増加による地盤の圧縮と圧密による沈下
 - ② 土留め壁の水平変位に伴う土の落ち込み
- であると考えられるが、その他を含めてまとめると表一7のようになる。しかし、この中にいくつかの項目は、沈下の予測に際して取り上げられていない。以下、若干の項目について問題点を指摘しようと思う。



図一16 掘削に伴う地下水位の低下により地表面沈下が生じる層と荷重の概念 (藤田, 1994)



図一17 大阪における土留め掘削中の土圧分布 (藤田ほか, 1973)

表一七 地表面沈下の要因 (藤田, 1994)

①	地層の構成・初期応力・地下水位 (地下水圧)
②	土の物理的・力学的特性
③	掘削の深さ
④	掘削の幅と長さ
⑤	土留め壁の種類、設置と撤去の方法
⑥	土留め壁の曲げ剛性
⑦	土留め壁の縦剛性 (沈下に対する抵抗力)
⑧	切梁 (アンカーを含む) の剛性と縦方向の間隔
⑨	土留め壁の根入れ部の水平抵抗
⑩	切梁を設置するための余掘り深さ
⑪	掘削から切梁設置までの日数
⑫	切梁に与えるプレストレス
⑬	施工に伴う地下水位の変動と地下水の動き
⑭	圧密沈下
⑮	施工の巧拙
⑯	その他

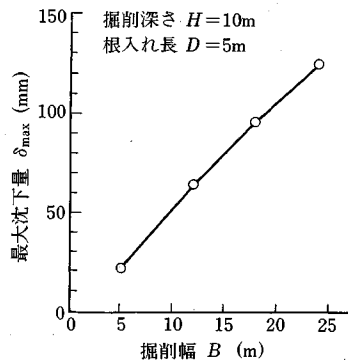
(1) 地層の構成

砂層と粘土層の区分だけでなく、掘削に伴う地下水位の変動によって、① 沈下が促進される程度、② 掘削終了後に地下水位の回復が遅れて圧密沈下が長期間にわたる程度、などの視点で地層の構成を検討することが忘れてられているようである。

(2) 土の性質

前項の立場から、土の透水性、圧縮特性、圧密特性などの検討が必要であるが、Terzaghi-Peck (1948, 1967)、Peck (1969) は、土の非排水せん断強さと掘削の深さの関係重視して、側圧と底部破壊に対する安定数 N_s と N_b の概念を導入している。

図一17は藤田ら (1973) が与えたが、Peck (1969) の講演以前に経験した非常に困難な掘削例を検討してえられたもので、 $N_s=7.5$ 、 $N_b=5.7$ であった。土圧分布



図一18 最大沈下量に及ぼす掘削幅の影響 (杉本, 1986)

は Peck の提案の $m=0.4$ とよく似ており、 N_b が大きいので、土留め鋼矢板が約 80 cm はらみ出して非常に危険な状態であった。

Clough (1989)¹⁶⁾ は、 N_b が N_{cb} に対して安全率 2 であると、軟らかい～中位の粘土地盤の沈下量は、通常、掘削深さの 0.5% 以下になるとし、また、イギリスの実務では、沈下量を小さくするために、同様に安全率を 1.5 以上にとっている。

(3) 掘削の深さ (H)、幅 (B)、および長さ (L)

掘削の深さに比例して地表面沈下量が大きくなることは定説になっている。掘削の幅と長さの比に関しては、図一3のように B/L が小さいよりも正方形や円形に近いほど安定数が大きくなるので、同じ掘削深さに対して地表面沈下量が小さくなるはずである。

掘削の幅に対して掘削の深さが大きい場合は、場所打ち杭や立坑と同様に掘削底面の安定がそれほど悪くならないと考えられる。すなわち、掘削幅が大きい場合は、同じ掘削深さに対して幅が小さい場合よりも沈下量が大きいはずである。

掘削の幅に関して、FEM を用いた杉本 (1986)^{17), 18)}

表—8 鋼矢板を用いた掘削における地表面沈下の内訳
(藤田ほか—1971)

	累加沈下量 (mm)	各階段ごとの沈下量	
		(mm)	(%)
鋼矢板打込み終了時	20	20	15
掘削終了時	43	23	17
切梁撤去終了時	65	22	16
鋼矢板引抜き終了時	116	51	37
6 カ月後	136	20	15

(注) 矢板から 2.5 m の地点で測定した。

表—9 土留め壁の縦剛性と水平変位量の関係
(Day—1994 のデータにより作成)

土留め壁の下端 アンカーの傾角	非岩着 15°	非岩着 10°	岩着 10°
土留め壁の沈下量	22 mm	6 mm	4 mm
土留め壁の水平変位量	26 mm	22 mm	11 mm

の研究があり、図—18 のように、地表面沈下量は掘削の幅にほぼ比例して大きくなるとしている。なお、杉本はこの研究において、84 件の地表面最大沈下量の実測値を数量化理論 I 類を用いて要因分析を行っている。要因として取り上げたのは、地盤の種類別、掘削部の地盤の硬さ、根入れ部の地盤の硬さ、掘削深さ、掘削幅、排水状況、土留め壁の種類、根入れ長の 8 項目である。解析の結果、地盤の種類によって異なるが、土留め壁の種類、掘削幅、掘削深さなどが大きく地表面沈下量の大きさに寄与することが明らかになった。

(4) 土留め壁の設置と撤去

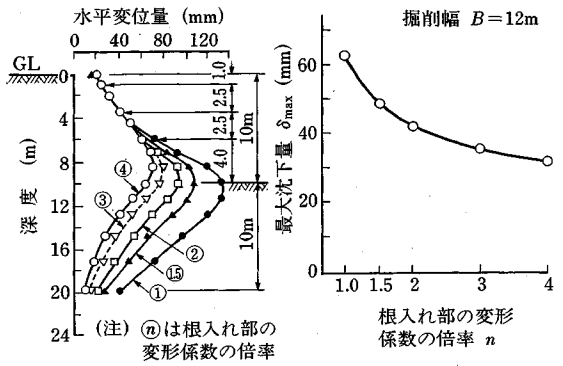
藤田 (1971)¹⁹⁾ が与えた表—8 は土留め壁として長さ 17～18 m の鋼矢板を打込み、14.65 m の掘削を行った例で、2.5 m 離れた地点で地表面沈下量を観測している。全沈下量の 52% が鋼矢板の折込みと引抜きで、また、15% が矢板引抜き後の圧密沈下量である。矢板引抜き時の埋戻しの方法も沈下量に大きく影響するが、一般にこれらの状況に関する情報は沈下量の評価ではほとんど不問にされている。

(5) 土留め壁の種類と曲げ剛性

図—13 によれば、親杭横矢板の場合には異常に大きい沈下量を生じることがあるが、通常、深い掘削に用いられる種類の土留め壁ではほとんど差異はない。しかし、曲げ剛性が大きいほど沈下量は小さくなることは定説になっている。たとえば、Terzaghi-Peck (1948) は、粘土地盤の場合、土留め壁の最大水平変位量が掘削深さの 0.25% を超えないときには、周辺地盤の沈下量はほとんどないと述べている。

(6) 土留め壁の沈下特性

Clough (1990) は、土留め壁の沈下は地表面沈下量を増加させ、アンカーを用いた場合に顕著であるとして



(a) 根入れ部の変形係数が土留め壁の水平変位量に及ぼす影響
(b) 根入れ部の変形係数が地表面最大沈下量に及ぼす影響

図—19 土留め壁の水平変位量と地表面最大沈下量に及ぼす根入れ部の地盤変形係数の影響 (杉本, 1986)

いる。地表面沈下量が土留め壁の高さの 0.5% を超えたものに、このような例が多いと指摘している。

Day (1994)²⁰⁾ の言う vertical stiffness (縦剛性) は、土留め壁自体の沈下特性を指している。同一箇所の深さ 10 m の掘削にアンカーを用いた例をまとめると、表—9 のようになる。土留め壁の沈下量が小さいほど水平変位量が小さいので、地表面沈下量も小さくなっていると推定される。

(7) 切梁またはアンカーの剛性と縦間隔

切梁またはアンカーの剛性が大きいほど、また縦方向の間隔が小さいほど土留め壁の水平変位量は小さくなる。Shultz (1981) は、これを system stiffness (システム剛性) と呼び、以下のように定義している。

$$\text{システム剛性} = EI/L^3$$

ここに、E: 土留め壁材料の弾性係数

I: 土留め壁の慣性モーメント

L: 切梁の縦間隔

Ulrich (1989)²¹⁾ は、システム剛性が 0.3 MN/m および 3 MN/m のとき、最大水平変位量は土留め壁の高さに対して、それぞれ約 0.6% と約 0.1% であった例などを紹介している。また、Day (1990) のデータによれば、切梁の場合の水平変位量は、土留め壁の高さの 0.2% から平均 0.6% であるのに対して、アンカーの場合には、およそ 0.1～0.2%、まれに 0.5% があつたとして、一般にアンカーのほうが水平変位量は小さいとしている。

一般に、剛性の大きい土留め壁を採用する場合には、切梁の縦間隔を大きくして、掘削工期の短縮と工費の節減を期待している。このために、地表面沈下量の減少に寄与しないことが多いのが実情である。

(8) 土留め壁の根入れ部の水平抵抗

最下段の切梁から下方の土留め壁が、掘削側に水平変位をおこすのを妨げるのは、土留め壁の根入れ部の水平

抵抗である。水平抵抗に寄与するのは、地盤の変形係数 E_s あるいは水平方向地盤反力係数 k_s 、土留め壁の剛性 EI と根入れ長 l である。これらの値が大きいかほど水平変位量は小さくなる。

杉本 (1986) は、FEM 解析結果を図-19 に示しているが、地盤反力係数が大きくなるほど、土留め壁の水平変位量も、地表面最大沈下量も小さくなることを示している。

(9) 掘削から切梁設置までの日数

掘削から切梁設置までの間に土留め壁の水平変位量は増大する。Burland (1977) によれば、18 m の掘削における 24 cm の水平変位量のうち、70~85% は切梁が設置されるまでに生じたとしているが、Day (1994) は約 80% であったと報告している。可能な限り早期に切梁を設置することが大切である。

9. その他

若干補足したいことは、掘削底部破壊の防止あるいは安全率向上のための地盤改良と情報化施工のことである。

(1) 地盤改良

掘削底部破壊に対する安全率を高めるために、生石灰パイル工法などによって地盤改良を行うことがある。土質工学ハンドブック (1982)²⁴⁾ によれば、首都高速道路横羽線ではこの地盤改良によって、土留め壁に用いた径 1200 mm の鋼管杭の頭部には 20~264 mm、約 9~23 m 離れた橋梁の橋脚には 6~23 mm の水平変位量が発生した。その後の約 19 m の掘削では、土留め壁の水平変位量は掘削側に約 40 mm であった。底部破壊に対する安定数 N_b が小さくなるように改善することも大切であるが、地盤改良によって大きな地盤変位を生じることがあることを忘れてはいけない。

(2) 情報化施工

前述の横羽線の工事では多くの計器を取り付けて、土留め壁に生じる応力度などの自動計測を行い、常に設計時に予想した値を比較するとともに、次段階の数字を予測することで作業を進めてよいかどうかの判断を下した。このような方法を情報化施工と呼んでいるが、まさに、Terzaghi-Peck の言う observational procedures である。最近では商業化されて、深い掘削に広く採用されているが、コストが高いために計測箇所が限られる。したがって他の箇所がどのような状態にあるのかを判断することが重要な課題である。

10. まとめ

紙数が限られているが、Terzaghi-Peck の業績に関して詳しく述べて、これを出発点として深い掘削の問題について述べたつもりである。これをまとめると以下の

ようになる。

① 半世紀近くの間、掘削は次第に深くなり、土留め壁の型式も変りつつあるが、土留め壁に加わる土圧などに関する基本的な考え方は、Terzaghi-Peck 以来ほとんど変わっていない。

② 土留め壁の断面を決定する方法は、掘削深さが 15~20 m を超える場合には、切梁の位置を支点とする単純梁の計算から、切梁位置を弾性支承として掘削段階ごとに土留め壁の変形や応力を計算する、いわゆる弾塑性法による計算が主流になっている。したがって、深い掘削とは弾塑性法で計算する必要があるものとして定義しても良い。

③ 地下空間開発の時代が近いにもかかわらず、深い掘削に関する研究は、国際的にも国内的にもあまり重要な地位が与えられてない。しかし、国際学会には技術委員会が設けられた。

④ 国内では各機関ごとに基準類が制定されているが、同一条件における仮設材重量を比較すると、基準類によってかなりの差が認められる。一方、土留め掘削に関連する重大死亡事故はかなり多い。とくに土木の分野での努力が望まれる。

⑤ 掘削周辺の地表面沈下量と土留め壁の水平変位量の大きさは、土留め掘削が適正に実施されたかどうかを判断するのに役立つ。Peck と Clough の統計的なデータを比較すると、約 1/4 世紀の間にこれらの量はおよそ 1/2~1/3 程度になっており、技術の進歩が認められる。

⑥ 地表面沈下量と土留め壁の水平変位量の大きさを予測することは、周辺構造物への対策を講じるうえで必要であるが、あまり進歩が認められない。これは沈下の要因の取り上げ方に問題があるように思われる。とくに“圧密・圧縮が生じる層の厚さ”、“掘削の幅”、“掘削幅と掘削高さとの比”、“底部破壊に対する安全率”、“施工の巧拙”などに関する検討が不足している。

⑦ 深い掘削の多くの現場において、計測管理すなわち情報化施工が実施されていることは評価するが、ケースヒストリーが十分に発表され、系統的に整理されているとは言い難い。

最後に、土質工学会の TC-28 国内委員会の委員の方々、文献を引用させていただいた方を始め、関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

全般的なもの

- 1) Terzaghi, K. and Peck, R.B. : Soil Mechanics in Engineering Practice, Wiley, New York, 1st ed. 1948 & 2nd ed. 1967.
- 2) Peck, R.B. : Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground. Proc. 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico,

- State-of-the-art Volume, pp.225～290,1969.
- 3) Clough, G.W. and O'Rourke, T.D. : Construction Induced Movements of Insitu Walls. Design and Performance of Earth Retaining Structures, ed. Lambe, P.C. and Hansen, L.A., ASCE, New York, pp.439～470, 1990.
 - 4) 土質工学会:山留めとシールド工事における土圧・水圧と地盤の挙動に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, 307 p, 1992.
- 個別のもの
- 5) 総合土木研究所:特集・大深度掘削—最近の動向と事例集, 基礎工, 18巻7号, pp.1～129, 1990.
 - 6) 藤田圭一:施工上からみた軟弱地盤の問題点, 軟弱地盤の設計と施工の問題点, 土木学会関東支部, pp.65～84, 1973.
 - 7) Fujita, K. : Special Lecture B, Underground Construction, Tunnel, Underground Transportation. Proc. of 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Vol.5, pp.2159～2176, 1989.
 - 8) Fujita, K. : State-of-the-art Report, Soft Ground Tunneling and Buried Structures. Proc. of International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Delhi, Vol.5, pp.89～108, 1994.
 - 9) 土屋幸三郎・小山浩史:大深度掘削に関する諸基準, 基礎工, 18巻7号, pp.10～16, 1990.
 - 10) 堀場靖久・石塚邦夫:わが国における山留め工事の種類と規模に関する実態調査, 山留めとシールド工事における土圧・水圧と地盤の挙動に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp. 107～110, 1992.
 - 11) 堀場靖久:重仮設業協会員の山留め設計の実態と小規模山留め施工の留意点, 基礎工, 16巻8号, pp.93～101, 1988.
 - 12) 橋本正治:山留め工事の事故と予防, 基礎工, 22巻2号, pp.2～9, 1994.
 - 13) Underground Construction in Soft Ground (TC-28) 国内委員会:山留め小委員会報告, 山留めとシールド工事における土圧・水圧と地盤の挙動に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.1～65, pp.285～307, 1992.
 - 14) 岡原美知夫・土屋幸三郎:大深度掘削工事の現状と今後の動向, 基礎工, 18巻7号, pp.2～9, 1990.
 - 15) 杉本隆男:開削工法による周辺地盤沈下の予測と実際, 基礎工, 18巻8号, pp.18～25, 1990.
 - 16) Clough, G.W., Smith, E.M. and Sweeney, B.P. : Movement Control of Excavation Support Systems by Interactive Design, Proc of ASCE, Foundation Engineering : Current Principles and Practices, Vol.2, pp.869～884, 1989.
 - 17) 杉本隆男:開削工事に伴う地表面最大沈下量の予測に関する研究, 土木学会論文集, No.373/VI-5, pp.113～120, 1986.
 - 18) 杉本隆男:山留め工事における地盤変状の要因と対策, 基礎工, 22巻2号, pp.61～66, 1994.
 - 19) 藤田圭一・加藤太重:矢板の打込みと公害, 矢板打ち技術ノート, 施工技術, 4巻10号, pp.117～120, 1971.
 - 20) Day, P.W. : Factors Influencing the Movements of Retaining Structures. Proc. of International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Delhi, Vol.5, pp.109～114, 1994.
 - 21) Ulrich, E.J. : Tie-back Supported Cuts in Overconsolidated Clay. Proc. of ASCE, GE Vol.115, No.4, pp.521～545, 1989.
 - 22) 土質工学会:鋼管矢板による施工例, 土質工学ハンドブック, pp.720～723, 1982.

(1994.7.21 受付)