

招待論文 大深度地下連続壁工法の現状と今後の展望

CONSTRUCTION TECHNOLOGY OF SUPER DEEP CONTINUOUS UNDERGROUND WALLS — A STATE-OF-THE-ART

岡原美知夫* 菊池禎二**

By Michio Okahara and Teiji Kikuchi

Under the comprehensive construction technology research project by the Ministry of Construction, "Development of underground construction technology", the study on "Development of design and construction technologies for large scale earth retaining walls and shafts" has been conducted by the joint research group of Foundation Eng.Div., PWRI., Advanced Construction Technology Center and 11 private companies. The construction technology of super deep continuous underground wall has been taken up to apply to earth retaining wall for large scale excavation as one of the most important subjects in the joint research program.

In this paper, today's state and problems of considerably deep excavation are presented based on results and progress of the above joint research project. Further, the developing process and view of the construction technology of continuous underground walls to extend away construction limits of excavation depth and wall thickness, is stated focused on the latest considerably deep underground construction works.

1. まえがき

人類は古来、自己や食料などを自然の脅威から守るために地下を利用してきた。これは、断熱性、遮断性など、地下空間の遮蔽性を活用したものであるが、反面、快適性、利便性に劣り、また、閉鎖空間からくる心理的圧迫感も強いので、その利用は限られたものであったといえる。

その後、電気、通信、ガス、空調、水処理、運搬、施工技術などの発達に伴い、住居や倉庫としてばかりでなく、地下鉄、地下街、地下駐車場、ビルの地下階、地下変電所、上・下水道、浄水場、下水処理場などにも利用が拡大されてきた。しかし、我国の都市は低地で軟弱地盤・高地下水位の地域に立地しているため、深くなる程、建設費が急激に高くなり、かつ維持管理上のコストも大きくなるため、経済的な要因のみを考慮したとしても、都市における地下空間の利用深度には限界があった。

1980年代後半における地価の異常な高騰と好景気に伴う投資意欲の高揚が地下空間の利用限界をさらに拡大し、大深度地下空間利用へと進んできた。

大深度地下空間を施工技術的に区分すると地表面から地下へ向かって鉛直方向に掘削していく技術と土中を水平方向に掘削していく技術に分けられ、前者の代表的要素技術に土留めがあり、後者の代表的要素技術にシールドがある。都市部において大深度に地下空間を築造する場合に、地表面から、いきなりシールドで

* 室長 建設省土木研究所基礎研究室 (〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)

** 副部長 ㈱大林組土木技術本部設計第2部 (〒101 東京都千代田区内神田2-12-5)

施工することは現状ではできないので、土留めは必ず必要となる。

このような状況のもと、建設省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「大規模土留め、立坑の設計・施工技術に関する研究」について、建設省土木研究所基礎研究室、(財)先端建設技術センターおよび民間11社で共同研究（昭和62年～平成3年度）しており、そこでは大深度掘削における土留め壁として、大深度地下連続壁工法を重要なテーマとして取り上げている。

そこで、本論文では最初に上記共同研究グループの成果に基づき大深度土留め掘削の現状と課題について述べ、次に掘削深度、最大壁厚とも急速に施工限界が拡大しつつある最新の大深度地下連続壁工法の開発経緯と現状、今後の展望について述べることとする。

2. 大深度土留め掘削の現状と課題

2. 1 掘削深さおよび規模

1988年に前記共同研究グループで行なったアンケート調査結果¹⁾より、我国における大深度掘削の現状について紹介する。調査対象は、過去10年間（1977年以降）に施工された土留め工事のうち、掘削深さが20m以上のもの、あるいは掘削深さが10m以上で、かつ近接施工を行なったものとした。有効回答数は、191件（以下、全体データと記す）であり、その中で掘削深さが20m以上のもの（以下、大深度データと記す）が99件、掘削深さが10m以上で、かつ近接施工を行なったもの（以下、近接データと記す）が112件であった。

全体データにおける構造物用途の比率は、立坑、建築物地下、下水処理場、地下鉄の順に多く、いわゆる、公共構造物で全体の68%を占めている。このことは、多くの社会資本の整備が大規模掘削あるいは近接施工を伴って建設されることを物語っており、早急にこれらに関する基準の整備を図ることの必要性があることがうかがえる。全体データにおける掘削深さ別の構造物用途件数を図-1に示す。掘削深さが30m以上については、構造物用途として立坑、地下タンクなどの公共構造物が多く、建築物地下は全て30m未満であった。最大掘削深さは、立坑と地

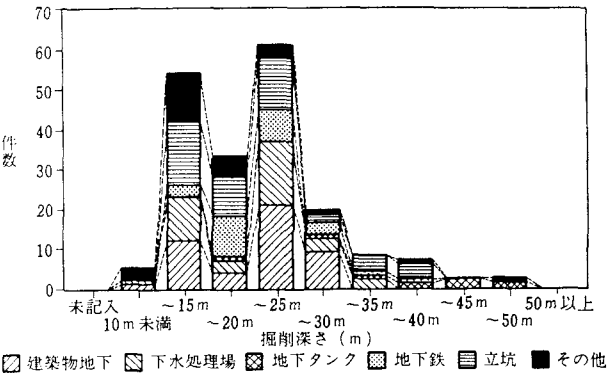


図-1 掘削深さと構造物用途（全体データ）

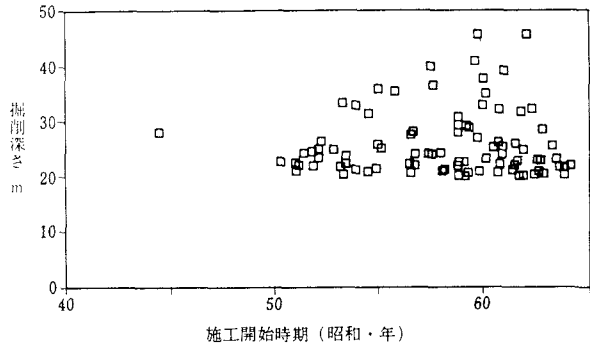


図-2 施工開始時間と掘削深さ（大深度データ）

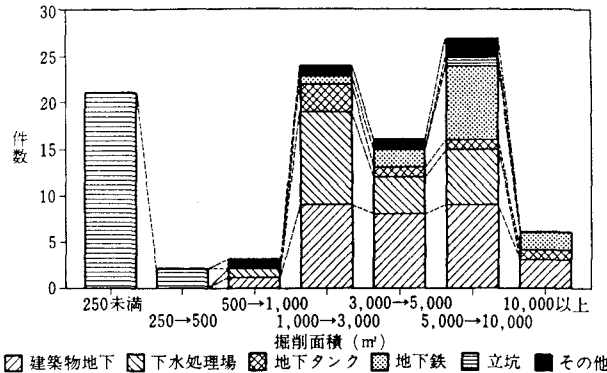


図-3 掘削平面積と構造物用途（大深度データ）

下タンクの46mであり、土留め壁の種類としては共に地下連続壁を採用している。大深度データ（掘削深さ20m以上：データ数99件）での掘削深さの年次変化を図-2に示す。同図より、最大掘削深さは年々増大している傾向が認められる。

図-3に大深度データにおける掘削平面積別の構造物用途件数を示す。平面積が250m²未満と1,000～10,000m²の範囲での施工実績が多く、250～1,000m²での施工例が少ない結果となっている。平面積が小さいものはシールド工事用の立坑などであり、平面積の大きいものの多くは建築物地下、下水処理場、地下鉄などであった。これより、大深度掘削の場合の平面積は2つの領域に分けることが可能で、それぞれの特徴を把握してこれらの合理的な設計法・施工法を検討することが望ましいと考えられる。

掘削深さと近接構造物までの距離との関係を図-4に示す。過密化した都市部においては既設構造物に近接した掘削も多く、近接構造物との距離が10m以内での施工例が多くあり、距離2mで掘削深さが40mに達している例もあることがわかっている。

2. 2 土留め壁および支保工の種類

掘削深度が20mをこえる大深度土留めにおける土留め壁の種類を図-5に示す。地下連続壁の使用が圧倒的に多く、ついで柱列式土留め、鋼管矢板式土留めの順となっており、壁体剛性の大きい土留め壁が採用されていることがわかる。また、掘削深度と土留め壁の種類との関係を示したのが図-6であるが、掘削深度が増すにつれて地下連続壁の占める割合は大きくなる傾向にあり、30m以深の掘削に対しては80%以上採用されている。これは地下連続壁が低振動・低騒音で施工できる上、土留め壁としての剛性が大きいことや、止水性が高いなどの特徴を有していることに起因すると考えられる。

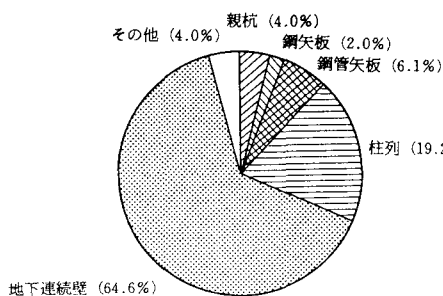


図-5 土留め壁の種類（大深度データ）

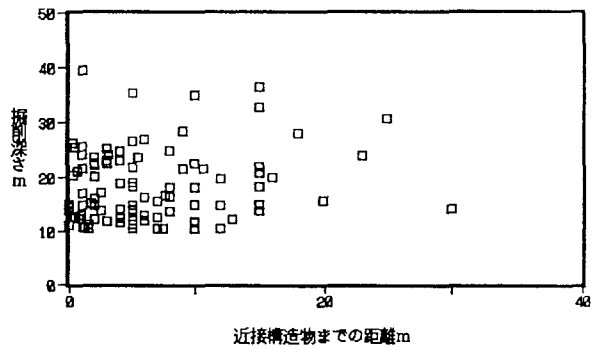


図-4 掘削深さと近接構造物までの距離（近接データ）

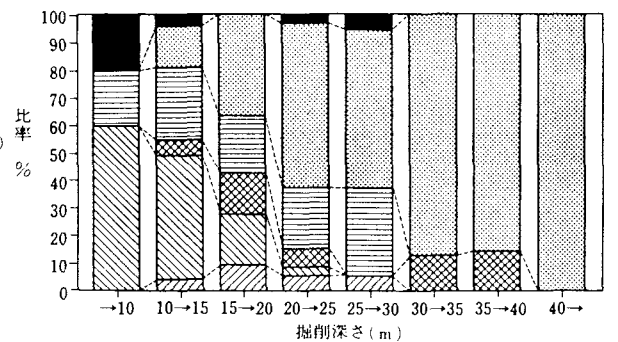


図-6 土留め壁の種類と掘削深さ（全体データ）

鋼管矢板式土留めは壁体剛性が大きいものの、土質条件等の施工条件の制約を受けやすいため、使用される割合は非常に少なくなっている。なお、近接工事に関しても、地下連続壁および柱列式土留めの使用が多い。

大深度掘削における土留め支保工形式の割合を図-7に示す。切梁方式が大部分を占めており、アンカーを用いたものも1割ほどある。また、逆巻工法の採用も多い。大深度に及ぶ掘削においては、支保工の剛性および土留め架構全体の剛性が必要となり、この点で逆巻工法が有利となるためであろう。

アンカー工法については、地下権の問題、アンカー除去方法の問題、被圧水下における施工上の問題等が解決されれば、今後徐々に採用が増えていくものと考えられる。

なお、大深度掘削の特徴の一つに、土留め壁を本体として利用する場合が多いことがあげられる。本体利用は地下連続壁で特に多く、土留め壁の剛性が高いことや、施工の信頼性の向上により品質が確保できるなどの理由から土留め壁を仮設のみに利用するのではなく、本体構造物の一部として有効に利用している。ただし、単独壁として用いられるケースは少なく、重ね壁方式や一体壁方式が多い。

2. 3 地盤の安定・変形

大深度掘削において掘削底部地盤の安定性を検討する際、特に問題となるのは盤ぶくれであり、これは地下水にかかわる掘削底面の破壊現象である。すなわち、盤ぶくれとは不透水層である粘性土地盤がその下面に作用する被圧地下水圧により、せん断あるいは曲げ破壊を生じる現象(図-8)であると考えられている²⁾。大深度掘削では工期の長期化が予想されるので、盤ぶくれの検討には地下水位および地下水量の長期的な変動も考慮する必要がある。盤ぶくれに対する検討方法は、基本的には不透水層下面に作用する揚圧力と、不透水層下面から上方の土の重量との釣り合いで行なっており、安全率は $F_s = 1.1 \sim 1.2$ 程度が考慮されている。日本トンネル技術協会の指針³⁾では、抵抗力として土留め壁と土との摩擦抵抗($\tau = 1 \sim 2 \text{ tf/m}^2$)および不透水層自体の粘着力を考慮している。大深度掘削になると揚圧力が大きくなり、盤ぶくれが大きな問題となるので、摩擦抵抗力の評価や掘削平面規模・掘削深さとの関係など、合理的な検討方法が必要である。図-9は、掘削深さ20m以上、かつ掘削平面積 250m²以下に限った場合の盤ぶくれの計算手法の実績を示したものであるが、掘削平面積が比較的小さく、かつ閉塞形状の土留めの場合、壁面摩擦を考慮するケースが多くなる傾向にあることがわかる。

一方、都市部において構造物に近接する大深度掘削を行なう場合、事前に周辺地盤の変形およびそれに伴う近接構造物への影響を定性的、定量的に捕らえることが重要な課題となる。

周辺地盤の変形は、掘削底面地盤が安定していれば主に土留め壁の変形および排水による圧密沈下によって生じると考えられる。しかし、

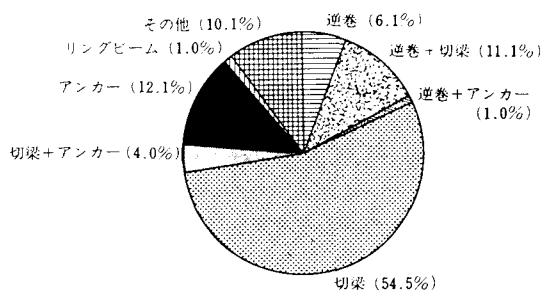


図-7 支保形式（大深度データ）

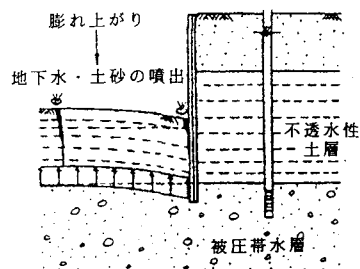


図-8 盤ぶくれ現象

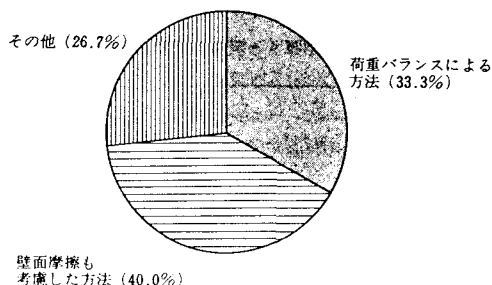


図-9 盤ぶくれの計算手法（掘削深さ20m以上、掘削平面積 250m²未満）

これらは土質や地下水といった自然条件に加え、掘削規模、土留め壁や支保工の種類といった施工条件によっても異なる。そのため、周辺地盤の変形の予測手法として確立されたものはなく、実務上は過去の施工実績や既往の研究成果を基に、影響度の大きい要因に着目して予測を行なっているのが現状である。

以上のように、地盤の安定・変形に対する検討法として確立されたものがないため、大深度掘削は地盤の変形や地下水位などを計測管理（必要に応じて対策工を実施）しながら進めることが重要である。

2. 4 鋼製地下連続壁の研究・開発

今後、土留めの大深度化および近接施工の増大が予想されることから、壁体の高耐力・高剛性化のニーズに対する種々の壁体の形状および構築法に関する研究・開発が精力的に進められている。ここでは、前記共同研究グループが取り組んでいる鋼製地下連続壁について述べる。

鋼製地下連続壁とは図-10に示すようにあらかじめ工場製作された継手を有する鋼製エレメントを地中に連結挿入した後、コンクリートを充填して、これを一体化・合成化することにより、連続壁体を構築するものである。なお、鋼製エレメントは、用途・施工法等に応じて図-11に示すような非透過型構造（場所打ちコンクリートが鋼製エレメントを透過しない構造（a））・透過型構造（場所打ちコンクリートが鋼製エレメントを透過する構造（b））の二つのタイプがあり、現在両者の耐力特性について要素試験実施している状況である。

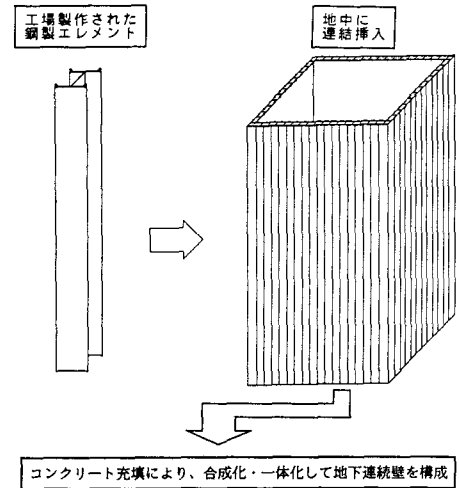


図-10 鋼製地下連続壁

鋼製地下連続壁の特色を以下に示す。

- ① 壁体の高耐力・高剛性化を図ることが容易であり、壁体のスレンダー化が可能である。したがって、地下空間の有効スペースの拡大はもと

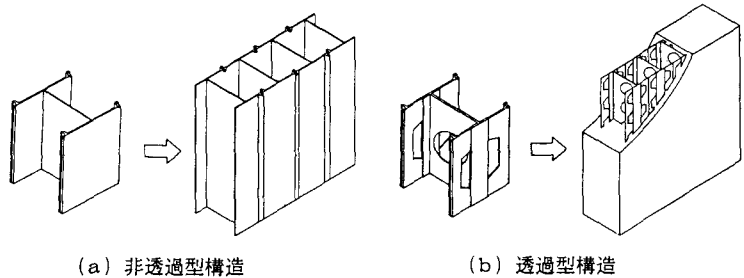


図-11 鋼製エレメントの構造形式

より、施工機械の小型化、溝掘削残土の低減等の効果がある。

- ② 工場製品である鋼製エレメントを順次建て込むプレハブ化施工法であり、施工の省力化・急速化が追求できる。また、建て込む時の重機の簡易化・現地加工ヤードの省スペース化が可能である。
- ③ 鋼製エレメントの品質信頼性が高く、高い壁体水密性の確保や精度の高い計測施工等が期待できる。

鋼製地下連続壁工法は、現在までに数例の施工事例が報告されており比較的浅い掘削に限られているが、構造・施工に関する研究・開発の進展により、今後の大深度への適用が期待できる。

2. 5 設計・施工に関する課題

表-1⁴⁾は、土木関連の仮設土留めに関する現行指針類の適用範囲と計算方法についてまとめたものである。この表によれば、土木関連の現行指針類のほとんどが、その適用範囲を10～30mまでの掘削としてお

り、唯一、⑤日本トンネル技術協会の指針³⁾が50～60mまでの掘削を対象としているものの、この指針においても適用の対象は、原則として地中送電線用の掘削平面積の小さい深部立坑に限られている。したがって、30m以深の大深度掘削を対象とした指針類は、整備されていないのが現状である。

このような状況は、大深度土留め・立坑の実際の挙動や、掘削に伴う周辺地盤・近接構造物に及ぼす影響について、不明確な点が多いためであり、今後、実績資料の蓄積、設計・施工方法の確立および関連技術の確立が急務である。

設計に関する主な課題を挙げれば以下のようになる。

① 土留め架構の設計上のモデル化
(プレロード時の

モデル化、土留めの3次元架構による支保工パネの割り増し等)

② 土留め壁に作用する大深度での土圧・水圧の評価

③ 掘削底部地盤の安定性の評価

④ 地盤反力係数の設定手法 (特に洪積地盤、あるいは3次元変形状態の地盤での地盤パネ)

⑤ 周辺地盤の変状予測手法 (近接構造物への影響)

⑥ 掘削工事が長期にわたるため耐震性の検討の要否

⑦ 仮設構造物の本体利用時の設計手法の確立

なお、図-12は、以上の大深度掘削における土留め・立坑の設計技術の確立に必要なとされる主な課題をまとめたものである。

一方、大深度土留め掘削の施工法は、従来工法と全く異なるというものではないが、実績はまだ少ないこと、大深度かつ高地下水圧であること、および工事期間が長期化することなど工事中の不確定要素が多いこ

表-1 現行指針類における適用範囲と計算方法の比較

No.	基準・指針	制定時期	適用範囲			計算方法 (H=掘削深さ)
			最大掘削深さ		土留め壁の種類	
			良質地盤	軟弱地盤		
1	鉄道総合技術研究所 掘削土留工設計指針	S62.9	15m 掘削幅3m以上	地盤の安定が確保できる深さ	制限なし	H=3m以下 簡易設計図表 H=3m以上 慣用計算法
2	土木学会 トンネル標準設計方書 開削編	S61.6	30m	N値が全体的に2を下回らない	制限なし	H=15m程度まで 慣用計算法 H=30m程度まで 弾塑性法
3	日本道路協会 道路土工・擁壁・カルバート 仮設構造物指針	S62.5	10m	8m	地中連続壁を除く	H=3m以下 簡易設計図表 H=3m以上 慣用計算法
4	日本道路協会 共同溝設計指針	S61.3	—	—	制限なし	中規模 H=3～10m 慣用計算法 大規模良質地盤 H=10m程度以上 弾塑性法 軟弱地盤 H=8m程度以上
5	旧日本トンネル技術協会 地中送電用深部立坑・掘道の調査、設計、施工、計測指針	S57.3	50～60m	—	制限なし	矩形立坑 弾塑性法 円形立坑 3次元立体構造解析 水平方向リング構造解析
6	東京電力㈱地中線総建設所 仮設構造物設計基準	S54.3	—	—	制限なし	慣用計算法
7	東京都交通局高速度電車建設本部 仮設構造物設計基準解説編	S55.10	砂質土30m程度 粘性土20m	地盤の安定が確保できる深さ	制限なし	砂質土 慣用計算法 粘性土 慣用計算法・弾塑性法
8	地下鉄技術協議会 仮設構造物設計指針案	S53.3	—	—	—	慣用計算法
9	日本下水道事業団、下水道事業団 業務普及協会 設計基準案土木設計編	S60.3	20m	10m	制限なし	慣用計算法
10	東京都下水道局 下水道施設設計標準案	S59.4	20m程度	10m程度	制限なし	慣用計算法
11	帝都高速度交通営団 仮設構造物設計指針	S53.8	—	—	制限なし	慣用計算法
12	横浜市交通局高速度鉄道建設本部 仮設構造物設計方書案	S43.1	—	—	制限なし	慣用計算法
13	大阪市交通局高速度鉄道建設本部建設部 仮設構造物設計指針案	S43.12	—	—	制限なし	慣用計算法
14	神戸市交通局高速度鉄道部 仮設構造物設計指針案	S54.10	—	—	制限なし	慣用計算法
15	首都高道路公団 仮設構造物設計指針案	S47.9	15m	10m	親杭 鋼矢板	慣用計算法
16	日本道路公団 仮設構造物設計基準	S52.11	10m	—	親杭 鋼矢板 コンクリート壁	慣用計算法
17	日本建築学会 山留め設計施工指針	S63.1	—	—	制限なし	小規模 H=10m以下 慣用計算法・弾塑性法 中規模 H=15m程度 慣用計算法・弾塑性法 大規模 弾塑性法

とから、施工の安全性には従来以上に十分な配慮が必要となる。また、工事による周辺環境への影響が広範囲に及ぶことが予想されるため、環境保全についても十分に配慮する必要がある。

具体的には次に挙げるような施工に関する課題がある。

- ① 土留め壁の止水性の確保および施工精度、特に鉛直精度の向上
- ② 信頼性の高い地下水対策の確立（大深度下では高水圧のため、万一湧水が生じた場合には被害が大きいかつその止水作業も困難である。）
- ③ 地下水位や周辺地盤の変位も含めた計測管理手法の標準化・システム化
- ④ 大深度地下における補助工法の効果の予測と確認方法の確立
- ⑤ 大量に排出される建設残土や産業廃棄物の土捨場の確保

3. 大深度地下連続壁工法の現状

3. 1 開発経緯と特徴

ヨーロッパで開発された地下連続壁工法は、昭和30年代半ばごろに日本に導入された。その後の技術上の主要な事項と工事について、特に施工深度に着目してまとめたものが表-2であるが、地下連続壁の施工深度は掘削機の能力によるところが大きく、既存の機種能力アップ、あるいは新型機種の開発によって大深度化がはかられてきた。

(1) 技術導入から実用化の段階（1960年～1967年）

本格的に地下連続壁工法が施工される

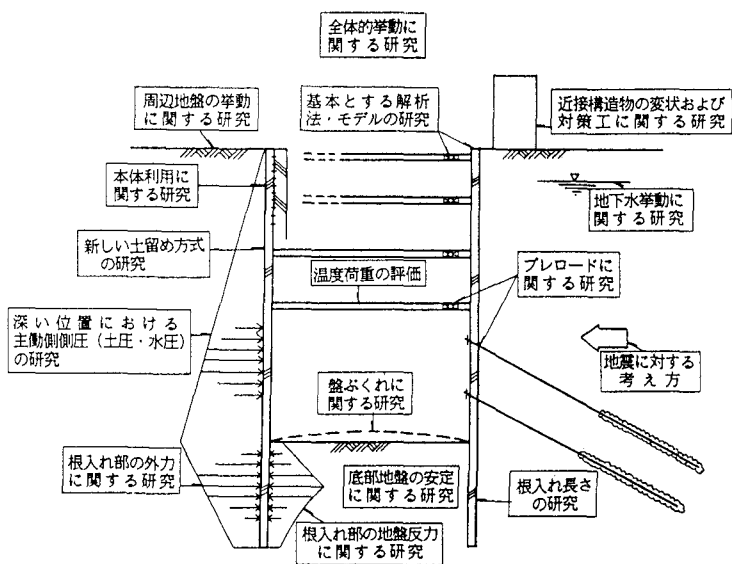


図-12 大深度掘削における技術上の課題

表-2 大深度地下連続壁工法の開発経緯

年（西暦）	地下連続壁工法主要技術	主 要 工 事
1960	イコス工法 OWS-SOLETANCHE工法 FEW工法、エルゼ工法	中部電力畑薙ダム止水壁
1965	超音波溝壁測定機	アジア石油半地下式タンク 東京地下駅 大阪ガスLNG地下タンク
1970	ポリマー安定液	大深度掘削機実験工事
1975	大深度掘削自動管理システム ハイドロフリーズ 大深度BWロングウォールドリル MEH	
1980		東京電力・東京ガス LNG地下タンク
1985	スーパーハイドロフリーズ エレクトロミル HBTレンチカッター	超大深度掘削実験工事 東京湾横断道路実験工事 白鳥大橋主塔基礎工事 東京都下水道局蔵前ポンプ場 神田川環7地下調整池立坑
1990		明石海峡大橋1A

ようになって数年間は、ワイヤー懸垂、巻上げのグラブ式とバーカッション式掘削機が使用され、鉛直精度や能率の確保などの問題から当初は掘削深度は15～20mが限度であったが、油圧クラムシェル式などの開発により徐々に30～40mと進展した。

(2) 技術改良と普及の段階（1968年～1976年）

昭和43年12月の騒音規制法施行以来、市街地での開削工事に伴う土留め壁として地下連続壁土留めが鋼矢板土留めに代わって急速に普及した。この間の施工深度は、掘削機の能力では60m程度まで可能であったが、実際の施工は30～40m程度までが大部分であった。

(3) 大深度掘削の段階（1977年～1985年）

1978年にハイドロフリーズ4000型が導入され、試験施工が行なわれ、引き続いて100m仕様のBWロングウォールドリルとグラブ式掘削機であるMEHの施工実験が行なわれた。その後、東京電力と東京ガスにおいて、LNG地下タンクの円筒形土留め壁として、100m程度の地下連続壁が相次いで施工された。LNG地下タンク以外では、地下連続壁深度が50～60m程度のシールド用立坑、市街地での大深度地下変電所あるいはポンプ場、橋梁基礎などに採用されている。この段階の掘削機は、水平および垂直の回転式が主流で壁厚は1.2～1.5mが限度であった。

(4) 超大深度、大壁厚の段階（1986年～）

東京湾横断道路川崎人工島に壁厚約3m、掘削深度約150m程度の地下連続壁が計画され、エレクトロミル（EM）、スーパーハイドロフリーズ（HE 10000）が開発され、壁厚2.4～3.0m、深度150m程度の施工実験が行なわれた。1990年には明石海峡大橋1A下部工に壁厚2.2m、掘削深度76mの地下連続壁がHF 10000型2台、EM 320型1台を使って施工された。この他には、臨海部の大規模ポンプ場の土留め壁などに計画されており、その一部は施工され現在に至っている。

一方、大深度地下連続壁の掘削機の能力アップや掘削管理技術の向上など掘削に直接関連する技術ばかりでなく、掘削溝壁の安定に関する技術やコンクリートの品質、掘削残土や廃液の処理技術、パネル間の継手の構造および施工技術、大型鉄筋籠の製作、建込みなど関連施工技術の開発・改良が行なわれた。また、地下連続壁の利用面では、深度20～30m程度の簡易な土留めについては、経済性からソイルミキシングウォールや泥水固化壁などが主流となってきており、深度40～50m以上の土留めあるいは、地下壁や基礎構造など構造本体として利用する場合に地下連続壁が採用されることが多くなっている。この理由として、

- ① 掘削技術やコンクリートの品質あるいは打設技術などの向上により、地下連続壁の品質に対する信頼性が増した。
- ② 小規模土留めでは、RC地下連続壁は経済性で劣る。
- ③ 深度が50mを超えると、他の土留め工法では施工が困難か不可能である。
- ④ 大深度の場合、地質が超軟弱から硬質地盤まで複雑に変化することが多いが、対応できる掘削機が開発された。

などがあげられる。

3. 2 大深度地下連続壁の掘削

(1) 掘削機

現時点（1990年末）で100m以上掘削可能な地下連続壁掘削機の機種と台数、特徴を表-3に示した。地下連続壁掘削機には、グラブ式と回転式があり、回転式には回転軸の方向で垂直多軸と水平多軸に分けられる。グラブ式掘削機は、電動油圧駆動の大重量の懸垂式掘削機であり、大深度や硬質地盤では回転式に比べて低能率となるため、回転式が主流となっている。回転式掘削機の2種類の中では100m程度の段階までは垂直多軸式である大深度仕様のBWロングウォールと水平多軸式の両者が使用されていたが、100mを超える掘削ではほぼ後者のみに限定されている。この理由は、以下のことが考えられる。

- ① 大深度掘削では水平多軸型は、パネル間の継手が接合鋼板方式に限られるが、水平多軸型ではカッテ

表－３ 大深度地下連続壁掘削機

	MEH	BW ロングウォール (大深度用)	ハイドロフレーズ ４０００	ハイドロフレーズ １００００	EM240	EM320	HBトレンチ カッター
掘削機のタイプ	懸垂式 グラブバケット (電動)	垂直多軸式 回転ビット	水平２軸 回転カッター	水平２軸 回転カッター	水平２軸 回転カッター	水平２軸 回転カッター	水平２軸 回転カッター
掘削可能深度 (m)	120	100	120	170	150	150	100
掘削可能壁厚 (m)	0.8 ～ 1.2 1.2 ～ 1.8	0.9 ～ 1.2	0.63～ 1.5	1.5 ～ 3.2	1.2 ～ 2.4	2.0 ～ 3.2	0.64～ 1.5
１ガット長 (m)	2.8 ～ 4.4	3.7 ～ 4.0	2.4	2.2 , 3.2	2.4	3.2	2.6 ～ 3.0
実用化時期 (年)	1979	1979	1979	1987	1987	1987	1989
パネル間 継手施工法	鋼板	鋼板	鋼板又は カッティング	鋼板又は カッティング	鋼板又は カッティング	鋼板又は カッティング	鋼板又は カッティング
現 存 台 数	5	10	7	2	7	4	2

ィング方式、接合鋼板方式のいずれでも可能で有利である。

- ② 軟岩などの硬質土や玉石まじりに対しても掘削可能である。
- ③ 水平多軸型では掘削機に回転方向と逆方向に反力が加わるが、水平多軸型では掘削溝がねじれる方向への力がほとんどなく、掘削精度管理が容易である。
- ④ 1.2 mを超える大壁厚に対しても比較的容易に対応できる。

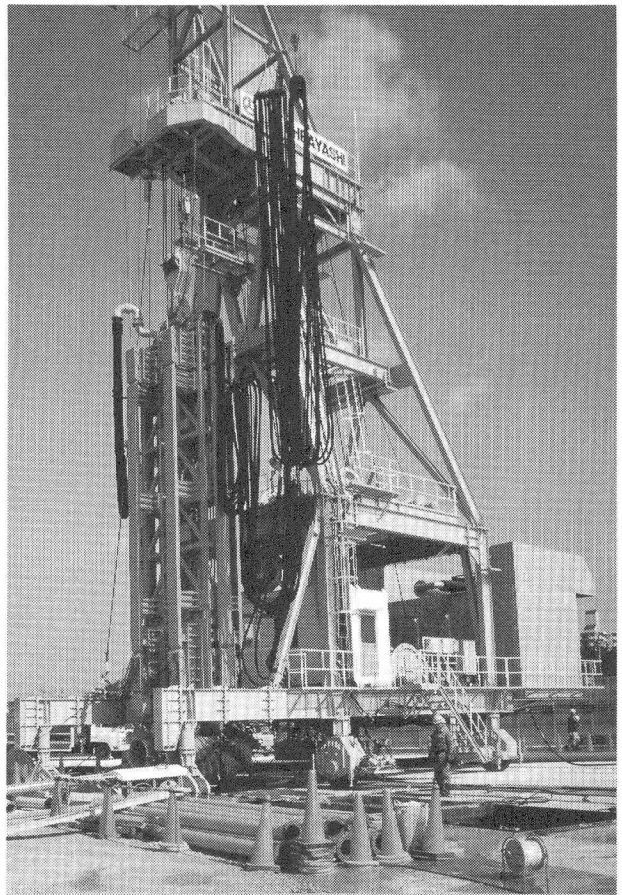
写真－１は、明石海峡大橋１Ａにおけるハイドロフレーズ 10000型による施工状況である。

(2) 掘削精度

掘削途中および掘削完了後の掘削溝の精度は、従来、超音波溝壁測定機で確認しているが、掘削途中の測定は一旦掘削機を地上に引き上げる必要があり、特に回転式では極めて低能率になる。このため、大深度地下連続壁の場合は、基本的には掘削機に搭載した傾斜計により、位置・傾斜等を検知し、地上の操作室に表示して、精度修正装置（油圧ジャッキ）を作動させて精度管理を行なっている。なお、精度の表示方法も従来の掘削深度に対する壁中心線の傾斜という考え方より、誤差の絶対値で表す方向になってきている。

(3) 安定液

掘削に使用する安定液には、ポリマー系安定液とベントナイト系安定液があるが、大深度地下連続壁の場



写真－１ ハイドロフレーズ 10000型掘削機

合には以下の理由でポリマー系が使われることが多い。

- ① セメント系地盤改良による補助工法が併用されたり、パネル間継手にコンクリートカッティング方式が使われ、セメント分の混入が多くなる場合、ポリマー系は劣化が少ない。
- ② 海岸付近での施工の場合、ベントナイト系は海水の影響があるが、ポリマー系は比較的影響が少ない。
- ③ コンクリートの品質確保はポリマー系の方が容易である。
- ④ スライム処理はポリマー系の方が容易である。

また、大深度大壁厚の場合には使用する安定液も必然的に大量となり、施工の効率と品質確保の面から、連続混練システムや品質の自動計測管理システムなどが開発され、効率化が進められている。

(4) 掘削土処理

回転式掘削機では、カッターで切削された掘削土砂は安定液と共に排泥管で地上に排出され、土砂分離システムで処理されるが、大深度大壁厚掘削機では、揚泥ポンプ等が高性能であり、適切な能力の処理設備を使用しないと掘削システム全体の能率に影響する。このため、土砂分離装置など処理システムも高性能なものが多数開発されている。

3. 3 掘削溝壁の安定解析

地下連続壁の掘削溝壁の安定は、計画および施工時の最も重要な管理項目の一つであるが、大深度ではより一層重要である。通常、地下連続壁の掘削溝壁の安定度に関連する項目には、①土質 ②地下水位 ③安定液の品質 ④掘削パネルの平面形状と長さ ⑤地表面の上載荷重 ⑥近接する道路、鉄道などの交通荷重 ⑦掘削深度 ⑧掘削溝の放置期間 ⑨近接構造物および ⑩施工時の衝撃があると考えられているが、各項目の影響の強さについては明確になっていない。このため、実験結果あるいは経験的に理論や計算式などがいくつか提案されている。このうち代表的なもの3例を図-13に示したが、いずれも、掘削溝壁面に接したある土塊を想定し、落下しようとする力と抵抗力の比率によって安全性の判定を行っている。また、各計算式とも前記要因の一部を考慮

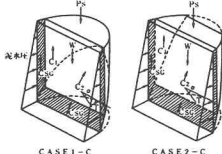
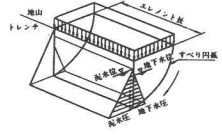
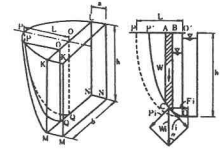
崩壊形状	計算方法
 CASE 1-C CASE 2-C	半円筒形に底面は平面のすべり面を想定し、掘削深度、すべり面の角度を変えて最小安全率を求める。
	エレメント全長にわたり、同一形状の円弧すべり面を想定し、円弧の中心を変化させることで最小安全率を求める。
	深度方向、平面形状の両者が放物線状に変化する土塊を想定し、深度と厚みを変化させて最小安全率を求める。

図-13 壁面安定解析の考え方

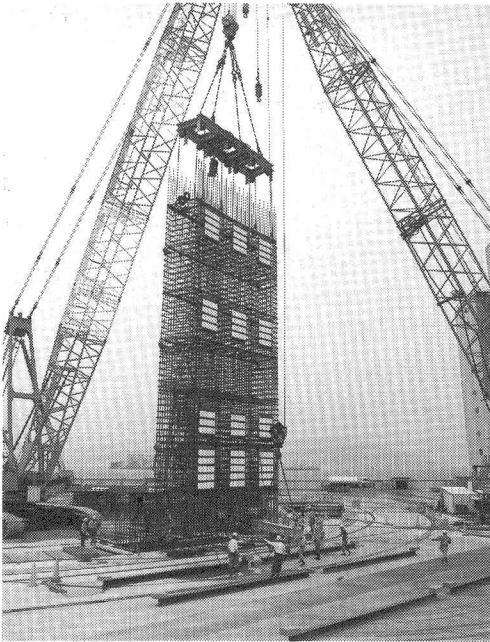


写真-2 鉄筋籠の建込み状況
(明石海峡大橋 1 A)

しているだけであり、また当然、肌落ちなど部分的、局所的な崩壊などは判定できるものではないが、施工地点の状況や構築物の特徴や重要度などから総合的に判定する一つの手段として用いている。

3. 4 鉄筋工事およびコンクリート工事

大深度地下連続壁では1パネルの鉄筋籠が大型になり、1回で打設するコンクリートも大量になる。このため、鉄筋籠の製作、建込み作業やコンクリート打設作業などの自動化、効率化などの開発も行われている。

(1) 鉄筋工事

地下連続壁の鉄筋籠は、深度方向に分割して製作し、順次掘削溝の中に挿入しつつ接続していく。大深度になると、この接続の回数が多くなり、長時間を要することになるため、できるだけ1籠の長さを伸ばして接続時間を低減することが望まれるが、クレーンによる建て起こし作業での変形防止などのため限度があり、最終的に吊り下げる1パネル全体の重量を考慮し、使用クレーンの計画との関連で設定している。また、大深度になり、鉄筋籠の製作時間が長くなることや鉄筋径が大きくなることへの対応や接続時の仮受け方法、後打ちコンクリートとの接合方法などにも技術開発が進められている。写真-2は、明石海峡大橋1Aにおける鉄筋籠の建込み状況である。



写真-3 コンクリート打設天端自動測定装置

(2) コンクリート工事

地下連続壁のコンクリート工事に関しては、高強度コンクリートや地下連続壁に適した流動化剤などコンクリートの配合、材料の研究開発および大量のコンクリートを短時間に打設するための施工法、管理手法の開発などが行なわれている。地下連続壁コンクリートの打設に従い、止水性の完全なトレミーを、適切な速度で短時間に引き上げ切り離すことが重要である。そのためにはコンクリート天端高さの正確な測定が重要で、通常は管理員が検尺テープを使って1パネル数ヶ所程度測定し、管理シートなどに記入した上でトレミーの引き上げを行なっているが、大深度大断面では手数がかることになる。正確で効果的な管理をめざして、写真-3に示すようなコンクリート打設天端自動測定装置も開発されている。

	継手構造	特徴
① 鉄筋重ね継手方式		・連壁の各パネルが、横鉄筋の重ね継手により構造的に剛結合となる。 ・パネル間の接合面には鋼板を使用 ・施工に高精度を要し、重量の問題などから実用的な可能深度は、80m程度である。
② 接合鋼板方式		・パネル間の継手に鋼板あるいは型鋼を使用する。 ・シートなどコンクリート流出防止装置が必要である。 ・施工精度と重量の問題などから、実用的な可能深度は100m程度である。
③ カッティング方式		・パネル間には鋼材を使用せず、掘削機のクーラーで切削する。 ・掘削機に出力、精度管理など所定の性能機能が必要である。 ・施工精度、鉄筋かごの重量などから決まる可能深度の制約はない。

図-14 大深度地下連続壁のパネル間継手

3. 5 パネル間のジョイント

地下連続壁のパネル間ジョイント工法で最もよく使われるのはインターロッキングパイプ方式であるが、この方式は深度50m程度、壁厚120cmが限度といわれている。大深度大壁厚地下連続壁の場合には、基本的には図-14の3方式が用いられ、いずれも構造性能あるいは施工的に一長一短があり、地下連続壁の用途や規模などにより選定されている。深度の面で言えば、③のカutting方式は特に制約はないが、①および②には、鉄筋籠の重量や建込み精度（能率等を考慮して）などから、実用的な使用範囲には限界がある。

3. 6 円筒形土留めの設計

大規模な地下掘削の場合、荷重としての土水圧が大きくなり、鉛直方向の地下連続壁の耐力・剛性のみで、この荷重に抵抗するには、壁厚が極端に大きくなり、不経済となる。このため、地下連続壁を円筒形に閉合することで、円周方向のリングコンプレッションを生じ、構造上有利となる円筒形土留めが大深度掘削の土留め壁として採用される例が多い。そこで、大深度地下連続壁工法での土留めで特徴的と考えられる円筒形土留めの設計の考え方について述べる。

基本的な設計フローを図-15に示す。検討項目については、通常の鉛直方向の土留め構造と大差はないと考えているが、荷重の考え方、土留め壁体の応力解析に円筒形構造としての特性を考慮しているところに特徴がある。

円筒形土留めの断面検討に用いる荷重は、地下連続壁自重、土圧、水圧、偏土圧、地震の影響および温度の影響、多角形の影響などがあり、構造物の規模、施工条件などによって設計上不利となるようにこれらの荷重を組み合わせることとしている。このうち、偏土圧は、地盤の不均一

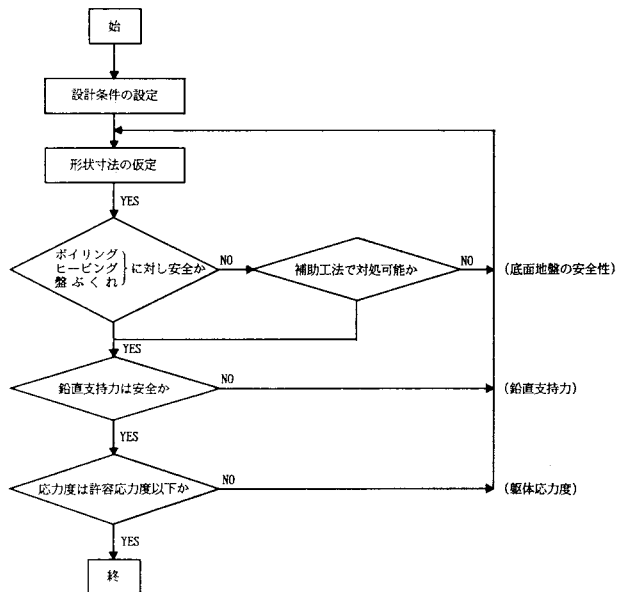


図-15 大深度地下連続壁土留めの設計フロー

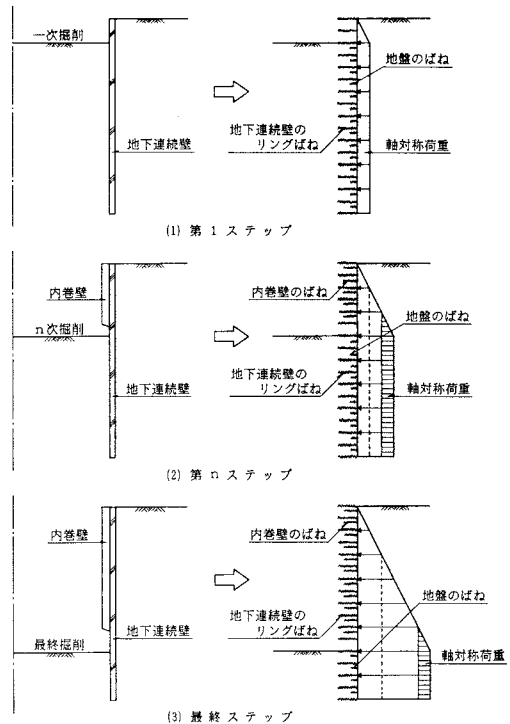


図-16 軸対称荷重に対する解析モデル

性、施工時の偏圧などを考え、静止土圧の10～20%を考慮している例もある。

一方、土留め壁体は、土圧・水圧などの荷重に対し、大部分を円周方向の剛性で抵抗しており、応力解析は一般に円筒形構造として土圧・水圧などの軸対称荷重に対する解析および地震時荷重や偏土圧などの非軸対称荷重による応力の解析に分け、それぞれ数ケースの解析を行い、解析結果を適切に重ね合わせて検討を行なっている。

円筒の軸を中心とする軸対称荷重に対して土留め壁は、図-16に示すように地下連続壁土留め壁と逆巻壁のリングばねおよび地盤のばねによって支えられている2次元の梁モデルとして解析している。荷重は、各施工ステップに応じて増加分を考慮し、施工ステップ毎に弾塑性解析（地盤について弾塑性モデルを使用）を行なっている。

軸対称でない荷重には、図-17に示すように土留め壁をシェル要素またはソリッド要素としてモデル化し、3次元FEM弾性解析を行なっていることが多い。

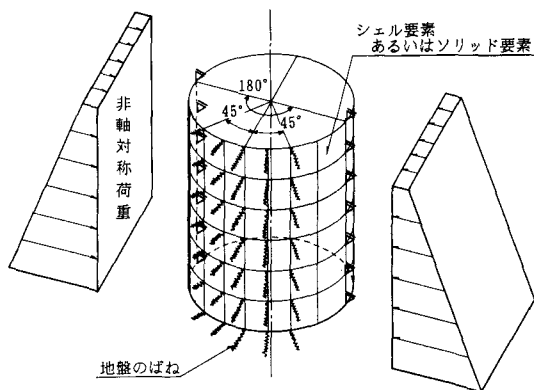


図-17 非軸対称荷重に対する解析モデル

4. あとがき

大深度地下連続壁工法は、都市部において大深度土留めを行なう場合の最適な土留め壁工法として採用されており、大深度土留め壁に要求される様々な課題に対応してきた。これは、たゆまざる技術開発の結果であると同時に、今後の需要に十分こたえることができる施工技術の可能性があると思われる。掘削深さや壁厚など施工機械は飛躍的に向上したので、現在、進んでいるコンクリートの高強度化に伴い、今後は、バットレスやプレストレスの導入など、構造面の発展が期待される。また最近、基礎本体としての地下連続壁工法の需要も増えており、今後一層の技術開発の進展が望まれる。

最後になったが、本論文の作成にあたっては、著者ら以外に前記共同研究グループ（建設省土木研究所基礎研究室、（財）先端建設技術センター、大林組、大本組、鴻池組、新日本製鐵、大成建設、竹中工務店、東急建設、日本鋼管、日本国土開発、不動建設、三井三池製作所）の方々の御協力をいただきました。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 建設省：建設省土木研究所共同研究報告書 1990年 3月
大規模土留め、立坑の設計・施工技術に関する共同研究報告書（その1）
- 2) 高坂、三宅：吉田：地下水にかかわる掘削底面の破壊現象とその対策、基礎工、Vol.18, No.8, pp.33~41
1990年 8月
- 3) 日本トンネル技術協会：地中送電線用深部立坑・洞道の調査、設計、施工、計測指針、1982年 3月
- 4) 土屋、小山：大深度土留め掘削の設計に関する諸基準、基礎工、Vol.18, No.7, pp.10~16、1990年 7月

(1990年10月12日受付)