

最近の連続地中壁

Recent Developments in Diaphragm Walls

内 藤 禎 二 (ないとう ていじ)

大成建設株式会社技術本部生産技術開発部基礎工開発室 室長

1. いま 連続地中壁

いま、東京湾横断道路（口絵写真一3）や本四連絡橋などの大プロジェクト工事の一部には必ずといってよいほど連続地中壁（以下、連壁とも呼ぶ）が使われている。この状況は将来とも変わることなく、大プロジェクトを計画するに際しては、この工法が比較の対象となるであろう。

このことは、連壁の品質がそのレベルまで信頼されるようになったことを裏付けていると言えよう。加えて、連壁は自由度のある設計が可能であり、止水性の良い剛性の高い壁体を得られ、大深度・大壁厚の施工が可能であることから大耐力を取れる工法であることなどによる。さらに、軟弱層から中硬岩までの広範な土質に対応でき、周辺地盤への影響が少なく近接施工が可能で、低騒音・低振動工法である特徴にもよる。

2. 連続地中壁とは

連壁というと、安定液を用いて地中に溝を掘って、鉄筋などの応力材を挿入して、掘削溝の下端からコンクリートを打ち込んで連続壁を構築することをイメージするが、定義の上からはもう少し範囲が広い。まず、型式によって壁式と柱列式に大別できる。また、掘削溝の固化体からみれば、コンクリート系、泥水固化系、ソイルセメント系に分類でき、これらの種類はそれぞれ壁式にも柱列式にもある。さらに、この固化体の中の応力材によっても、鉄筋・鉄骨・鋼杭などの鋼材系、PC パネル・コンクリート杭などのプレキャスト系、シート系、その他の応力材を用いるものなどがあり、用途によっては応力材を用いないものもあるなど、細分類できる。

なお、「連続地中壁」を英語で表現する場合、有

筋のものを Diaphragm Walls と、無筋のものを Slurry Walls という。以下、ここでは壁式の鉄筋コンクリート系の連壁を意識して記述するので、上記の表題とした。

3. 連壁の歴史と技術の変遷

連壁はヨーロッパで発案され、記録に残る最初の工事は1950年イタリアの Santa Maria Dam の止水壁をバケット式で施工したものである。我が国には、1959年イタリアのイコス社からバケット式が技術導入されて、大井川水系の中部電力畑薙^{はたなぎ}ダムの締切り止水壁に用いられたのが最初である。以来、この技術は我が国の複雑な土質、地盤条件を克服するために長足の進歩をとげ、その用途も仮設土留め壁や止水壁としての利用から、本体構造物としての利用へと広がってきた。

我が国の掘削機の歴史は、バケット式が導入されて以来、この機種が主流となり、イコスやケリーなどの輸入機種が広く使用されるなか、1971年に国産のM型シリーズが出現し、1977年にはより大型化をめざした油圧式バケット(MHL, CON)が、1978年にはよりパワーアップした電動油圧式(MEH)が現れる。

回転式は、1966年に垂直多回転回転カッター(BW, 以下、垂直多軸と称する)が国産され、この機種の高能率が注目され、土質によっては回転式が有利であることと相まって、急速にシェアを広げた。なお、この機種は世界で我が国のメーカーのみが製作したもので、現在でも多く用いられているが、これから述べる水平多軸回転カッター（以下、水平多軸と称する）が岩以外のほとんどすべての地盤に適用が可能になるなど、施工技術が確立してきた今日、メーカーの意向とも相まって、いずれは、水平多軸

総 説

にとって代わられるものと予想される。

垂直多軸は一軸圧縮強度が $100\sim 200\text{ kgf/cm}^2$ 程度まで掘削可能といわれているが、連壁工法が広汎に使用される状況になり、大深度、大壁厚でより硬質な地盤に対応できる機種が求められるようになってきた。

このような状況のなかで、 500 kgf/cm^2 前後まで、部分的には 1000 kgf/cm^2 を越えても掘削可能な水平多軸が注目され、1978年にHF（ソレタンシュ社製）がフランスから輸入され、1985年にはEM（利根社製）が国産され、続いて1988年にBC（パウワー社製）がドイツから、1991年にHM（キャサグランデ社製）がイタリアからそれぞれ輸入され、今日に至っている。

参考までに、柱列式についてはソイルコンクリート杭（MIP）が1955年に始まり、数年を経てバック工法（PIPW）が登場する一方、原位置土混合工法（SMW）の単軸のものが1971年に、多軸のものが1976年に技術開発される。このSMWは多軸のものが低廉で、工期が短く、低騒音・低振動ということで急速にシェアを広げ、今日では比較的根切りの浅い建築工事の土留めにはほとんどがこの工法が採用されている状況にある。

一方、連壁を使用した構造物の歴史から見ると、上記1959年の止水壁にはじまり、以来土留め壁や止水壁として、主として仮設構造物として使用されていたが、1973年に連壁本体利用による我が国最初の地下タンクがM型バケットで施工されている。また、1979年には連壁剛体基礎（連壁の横筋をエレメント間でジョイントし一体化した、ケーソン状の箱型の基礎など）が施工される。1980年代に入り、LNG地下式貯槽などの地下タンクに土留め、止水壁として連壁が適用され、壁厚が 1.20 m 、深度が 100 m 前後と一挙に大型化され、施工精度や安定液の管理などの施工管理が急速に進歩した。しかし、この時点での地下タンク用連壁の掘削機は各社まちまちで、大型バケット、垂直多軸や水平多軸が用いられていた。今日この種の連壁にはほとんど水平多軸が用いられていることから思えば、昔日の感がある。いずれにしろ、この頃に連壁技術が目覚ましく進歩し、これが技術革新の第1期といえるが、我が国に連壁技術が導入された揺籃期から数えて、およそ20年に

なる。

続いて、1986年以降これらの連壁のスケールをはるかに越えた、壁厚 3.20 m 、深度 170 m まで施工可能な掘削機械を用いた大型連壁の実証実験が大手ゼネコン数社で行われている。これは、東京湾横断道路川崎人工島の土留め、止水壁（壁厚 2.80 m 、深度 119 m ）工事などの国家的プロジェクトに対応するもので、現在ではその数件の大型連壁工事が早くも完成している。ここにきて掘削精度管理や品質管理などの連壁技術が再び急速に進歩するわけで、この時期をもって技術革新の第2期といえるが、先の第1期から数えて、およそ10年が経過したことになる。

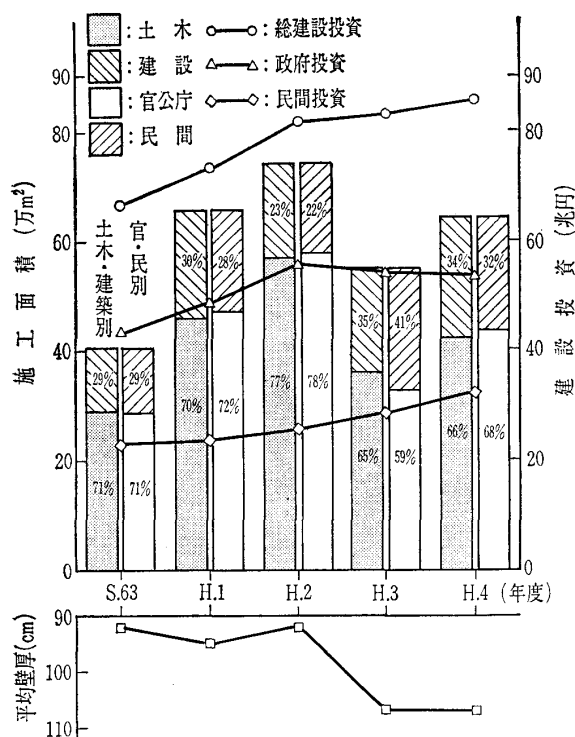
連壁工法はこのように飛躍的に発達してきたわけだが、ややもすれば連壁用の掘削機の開発が注視されるなか、この機械をハンドリングしての掘削精度の管理、溝壁安定の研究、安定液の研究、エレメント間のジョイント、コンクリートの技術など、多くの施工ノウハウをシステムティック化した技術の方がはるかにウエイトが高く、工法発展に大きく寄与している。これらの研究、開発の成果として、今日では日本の技術が世界の断然トップを行く状況にある。

4. 最近の連続地中壁の動向

このような背景から連壁の施工実績も年々増加し、この35年間の総施工量は約 1000 万 m^2 を越えたとみられ、1社で 200 万 m^2 を越えた会社も出てきた。ただこの実績も大手ゼネコン数社でその8割以上を占めるなど、技術が片寄っていることにも注目しておかなければならないと思う。

ここ5年間の連壁施工実績は図—1のとおりである。年平均施工面積は約 60 万 m^2 で、土木・建築別では土木が平均70%と、官民別では官公庁が同じく平均70%の割合で多いことがわかる。この比率がほぼ同じということは土木工事のほとんどが官公庁発注ということを示していると思われる。なお、参考までに建設投資額との関係を調べたが、顕著な相関関係を見い出せなかった。

一方、この間の平均壁厚の推移は約 90 cm から約 110 cm と増大してきたが、これはこの間に東京湾横断道路（壁厚 2.80 m ）、江東ポンプ所（ 2.60 m ）や明石海峡大橋（ 2.20 m ）などの大壁厚のプロジェクトが施工されたからとも思われ、今後も一律にこの



図—1 最近5年間の連続地中壁の施工実績

ように壁厚が増大する傾向を示すかどうかは、今後の結果を待たなければ結論を出せない。

5. 連壁技術の現状

5.1 連壁掘削機

現在、国内で使用されている主な連壁掘削機には、バケット式、回転式など各種のものがあ、その現場の条件に合わせて使い分けられている状況にある。ちなみに、筆者の調査によれば、1993年3月末現在登録されている主要機械台数はバケット式では、MHLが90台、MEHが13台、ケリーが50台などである。回転式ではBWが35台である。また、水平多軸が52台で、その内訳は表—1のとおりである。

このようななかで、バケット式は軟弱な粘性土系の土質や掘削深度が比較的浅い場合などに幅広く用いられている。また、回転式を用いる時でも、垂直多

表—1 国内の水平多軸回転カッター掘削機

名称	台数	メーカー名(国名)	メーカーの性格
EM系	29*	利根社(日本)	施工部門併有メーカー
HF系	10	ソレタンシュ社(フランス)	施工部門併有メーカー
BC系	10	パウワー社(ドイツ)	施工部門併有メーカー
HM系	3	キャサグランデ社(イタリア)	メーカー専業

注1. 本表は1993年9月末現在で作成した。

2. *印は一部製作中のものも含む。

軸で対応可能な場合は、主として経済的であるとの理由により、この機械が多用される傾向にある。この機種は普通の粘性土系の地盤に対しても、その機械的構造形状から、水平多軸に比べてやや有利であるといわれ、この面からも現在でも広く用いられているともいえる。

5.2 大型連壁と水平多軸掘削機

その一方で、近年大型連壁として話題になっている工事のすべてが、水平多軸を使用している。掘削深度100mか壁厚2.00mのいずれか以上という条件で、我が国における大型連壁工事の施工例を示すと、表—2のとおりである。この表からも分かります、この分野では同機種が特化されていると言える。

これは水平多軸が大深度、大壁厚に対応できるこ

表—2 国内の主な大型連続地中壁の施工実績

工 事 件 名	深 さ (m)	壁 厚 (m)	使 用 掘削機	施 工 業 者	施工開始年・月
関東地建 外郭放水路建設工事第3立坑	140	2.10	EM	西松・三井JV	1994年1月(予定)
関東地建 外郭放水路建設工事第2立坑	129	2.10	EM	大成・清水JV	1993年11月
東京湾横断道路 川崎人工島建設工事	119	2.80	EM	大成建設ほかJVおよび鹿島ほかJV	1991年11月
北海道開発局 白鳥大橋3P橋脚下部工建設工事	106	1.50	EM HF	大林組、大成建設ほかJV	1989年1月
東京都下水道局 江東ポンプ所建設工事	104	2.60	EM	大成・飛島・大都JV	1990年10月
首都高 川崎航路沈埋トンネル浮島立て坑建設工事	76.5	2.00	EM	大成・前田・ハザマ・飛島・五洋・佐藤JV	1990年2月
本四 明石海峡大橋アンカレッジ建設工事	75.7	2.20	EM HF	清水建設、大林組ほかJV	1990年1月
東京電力 新豊洲変電所	70.0	変断面 2.40 (上部44m) 1.20 (下部26m)	EM	清水・ハザマ・前田・戸田・三井JV	1993年2月

注1. 本表は深さ100m以上、または壁厚2.00m以上の条件により、1993年9月末現在の実績で作成した。

2. 掘削機の名称は次のとおり。

EM: エレクトロミル(利根社製), HF: ハイドロフレーズ(ソレタンシュ社製)

総 説

とに加えて、掘削精度の管理が可能であり、高い掘削能率で、硬い地盤に対しても適応でき、さらには先行エレメントのカッティングが可能であり、弱点といわれる粘性土地盤に対しても各種の工夫がなされて、多くのノウハウを蓄積しつつあることなどによるものである。

この水平多軸は現在世界で4社が製造しており、先に表—1で述べたとおり、我が国にはこれらすべての機種がそろっている。

5.3 安定液の技術

従来のベントナイトを主体としたものから、劣化しにくい優れた性状の高性能のポリマー系のものが得られるようになり、連壁の品質が格段に向上し、さらに分散剤や変質防止剤の研究、安定液再生の研究も行われ、その一部は実工事に適用されはじめている。

5.4 掘削溝壁の安定

掘削溝壁の安定は、土質、地下水位、安定液の性状などと非常に密接な関係にあるなかで、その研究開発が進み、広範な土質に対する溝壁の崩壊防止が可能となってきた。また、安定解析は最近のコンピューターや計測手法の発達と共に、かなり研究が進み、数種の経験式が提案され、ほぼ実用に支障のないところまで進んできた。さらに、遠心力载荷試験機を利用した研究も進んできた。

5.5 補助工法

上記の検討の結果、溝壁の崩壊が予想される場合には、適切な補助工法が必要となる。すなわち、揚水工法や施工地盤のかさ上げにより地下水位と安定液との水位差を確保すること、地盤改良などによる周辺地盤の強度増加を計ることあるいは上載荷重の分散や低減をはかることなどの方法が行われている。

5.6 鉛直精度の管理

高度化利用に必要なエレメント間の横筋の接合やカッティングなどの施工技術面からと、施工誤差を設計上に考慮し有効壁厚を低減することによる経済性の面などから、連壁が大型になるほど高い鉛直精度が要求される。水平多軸を対象にレーザー変位計、差動トランスや傾斜計などを利用した精度管理装置が4社で発表され²⁾、その一部は実工事に適用されている。一応、精度の目安は深度100mで、誤差10cm以内というところであろうが、このうちレーザ

ー変位計を利用したものは深さに関係なく4～5cm以内にコントロールした多くの実績が報告されている³⁾。

5.7 コンクリートの品質と強度

コンクリートは安定液中で打ち込むため、その品質は安定液と密接な関係にある。最近、安定液の改良、スライム処理技術の開発および向上、コンクリートの配合技術の進歩や混和剤の開発、打込み管理手法の確立などにより、信頼性の高い高品質なコンクリート壁体を得られるようになってきた。先に述べた安定液技術の向上と相まってこの面からも連壁の本体利用が検討されるようになってきたものと思われる。

特に、地下クランクのような円形構造物で圧縮応力が卓越する構造物では、高強度にすれば壁厚を薄くできることから、すでに設計基準強度700 kgf/cm²が発表される⁴⁾など、各社で盛んに研究開発、実証実験が行われている。

5.8 エレメント間の継手

連壁は平面延長2～9mのエレメントごとに施工するので、どうしてもエレメント間の継手処理が必要となる。現在の施工技術から、一般の壁の構造継手と同じく、フリー、ピン、剛結の3接合¹⁾を任意に選択することができる。

5.9 情報化施工

設計手法と計測技術の発達により、大規模工事には必ず情報化施工が適用され、現場の状況をリアルタイムに把握し、安全を確認しながら施工する。

すなわち、工事の進捗に伴い、連壁に働く作用荷重、モーメント、せん断力、軸力や変位などをリアルタイムに測定し、連壁に発生している応力状態などを確認し、これらの値が設計値とどのような関係にあるかを、また将来どう推移するかを予測しながら施工する。この手法により将来厳しい状況が予測される場合には、施工法を変更するとか、補助工法を採用するなどして事前の対策がとられることもある。これは構造物の品質管理と安全施工に極めて有力な手段であると共に、将来はこの値が本体利用への一助となることも期待される。

6. 連壁の本体利用

昨今、一部に連壁の本体利用が検討されるように

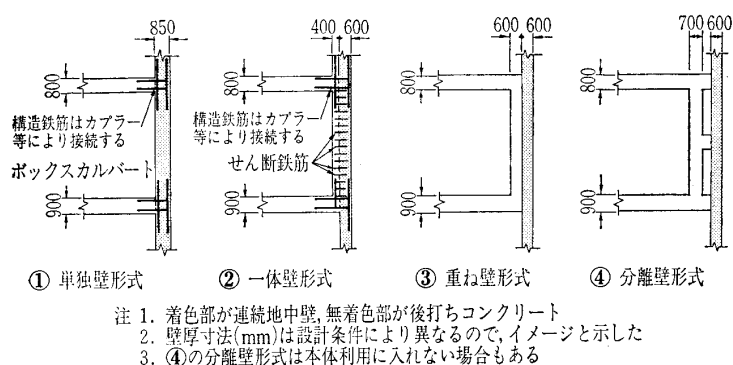


図-2 連続地中壁の本体利用の形式(断面図)

なってきたが、それ程普及してこない。その理由は、主として経済性の問題であるが、このほかに後打ちコンクリートとの合成構造とした場合の合成方法に手間と経費がかかり、加えて連壁に作用した先行応力の評価が難しいことなどである。

特に、連壁が今のところ掘削溝の下端から天端まで等断面で施工するため、計算上必要のない範囲にも余分なコンクリートを打ち込まなければならない。そのうえ、連壁を本体利用するとすれば、少なくとも施工時の応力のある程度抑えなければならず、その分壁厚を厚くする必要がある。これに対して、連壁を仮設のみに使用する考えで許容応力度ぎりぎりまで薄くし、本体構造物を別途気中で施工した方が経済的である場合もある。これは連壁の施工費が気中コンクリートの4～5倍もする(短絡的に言えば、気中で施工すれば同じ施工費で連壁の4～5倍も厚い構造物を施工できることになる)うえ、連壁を中途半端な応力で抑え、ということはそれ相応の壁厚が必要となり、そのうえ、後打ちコンクリートとの合成のための処理など、経費のかさむ要素があるためである。

いずれにしろ、連壁の支保工方式や根入れの長さあるいは用地費などの条件によっても経済性の評価が違ってくるので、この辺を十分に考慮して検討する必要がある。

連壁を本体利用しようとする場合、一般に次に述べる4形式があるが、これをボックスカルバートの構築を例に図-2によって説明する。ただし、図中の壁厚は筆者の経験によるイメージであって、具体的に計算したものではないことをお断りしておく。

- ① 単独壁：連壁をそのまま本体構造物とする。
 劣化代の考慮が必要。

- ② 一体壁：連壁と後打ちコンクリートとをせん断筋を介して完全一体化させる。
 ③ 重ね壁：連壁に後打ちコンクリートを重ねて構築し、せん断力の伝達を期待しない。剛比によって荷重を分担する。
 ④ 分離壁：連壁と後打ちコンクリートを一部を除いて分離。

連壁を本体利用する場合図-2からも分かっており、①単独壁形式が最も全幅が小さくなるが、連壁に温度応力により水平状に入るクラックからの漏水対策と、内空側の連壁に泥膜のついた凸凹面が露出するので、化粧壁を後打ちして景観対策を行うかどうかを、事前に検討しておく必要がある。これらの欠点をカバーしたのが②一体壁形式であり、この一体化の手間を省いたのが③重ね壁形式である。なお、④分離壁形式は厳密な意味では本体利用に入れない場合もある。

連壁の本体利用がこのような状況にあるなか、注目されるのは先に述べた連壁そのものを基礎として用いる、連壁剛体基礎である。現在までの実績は250基を越えたが、この面での本体利用が特化しているともいえよう。

7. 連壁技術の将来展望

連壁工事は工程の中に必ず“安定液”が介在することより、洋の東西を問わず「汚れ作業」であることには変わりなく、今のところ解消の見通しも立てにくい。掘削に関しては、先に述べた鉛直精度管理システムの情報をリアルタイムに掘削機に送ることによっていつでも全自動掘削技術の開発は可能であるが、膨大な費用がかかる割合にはそれ程省人化が期待できず、開発のメリットが見当たらない状況にある。たとえ、掘削工事を全自動化しても、鉄筋籠の建込み、コンクリートの打込みなどの工程にも安定液が介在することより、やはり汚れ作業の解消にはならない。このような背景の中で筆者らはそれぞれの工程をほぼ全自動化した、連続地中壁工法の将来のクローズドシステム予想図を発表¹⁾しているが、この技術を実現するのは21世紀に入ってからのように思う。

ここで連壁の将来技術に関して、比較的現実に近い問題となれば、やはり連壁のスケールであろう。

総 説

まず、深さについてはバケット式（懸垂式）がその構造からみて 100m 程度までが経済的であるのに対し、回転式の水平多軸ではマーケットさえあれば 200～250m に対応できる機械をいつでも製作可能な状況にある。

次に、厚壁では、バケット式の MEH が 2.00m、回転式の水平多軸が 4.00m 前後のものが出現しそうである。一方、薄壁ではバケット式の MEH が 0.50m、MHL が 0.45m 前後が目標となろう。水平多軸では 0.40m のものが設計を終了、マーケットさえあればいつでも製作可能な状況にあるとそく聞している。

このような状況の中で、薄膜遮水壁 TRUST-21 掘削機（口絵写真-4）が 1993 年 1 月に実証実験を終え⁵⁾、実用の域に達した。この掘削機は最小壁厚 0.20m、深度 200m まで、一般土砂から中硬岩まで対応できるもので、泥水固化などにより透水係数 $10^{-6} \sim 10^{-8} \text{ cm/s}$ の壁体を得られることから、遮水壁が主な用途と思われる。

このほかの将来技術としては、コンクリートの高強度化指向については先に述べたが、変断面連壁についても課題があるとはいえ実工事の話が出はじめ、さらに施工の高速化、自動施工、管理の AI 化や自動化、水上連壁なども考えられる。これらの技術もやはり費用対効果を考えれば、技術はあってもその実現はそうたやすいものばかりではなく、少し先の技術になるものもある。

8. あとがき

連壁が我が国に技術導入されて以来、主要ゼネコン各社がそれぞれ独自に技術開発を進め、多くのノウハウを蓄積してきたが、これらを集合して連壁剛体基礎に対応すべく、1986年に地中連続壁基礎協会が設立された。これはより信頼性の高い基礎工法をめざして、品質、施工性、能率の向上などを研究していくことを目的としたもので、この基礎工法に対応できる連壁の技術を保有するゼネコン 35 社で構成、運営されている。

協会設立が時あたかも連壁の技術革新の第 2 期にあたり、協会活動が極めて活性化すると共に、これを機に連壁基礎に限らず、連壁全般の難しい問題の多くが協会に問い合わせられる状況になった。各社ま

表-3 連続地中壁関連協会組織

協 会 名	設立年月	会員数	会員の内訳	連絡先(電話)
地中連続壁基礎協会	1986年 7 月	35社	ゼネコン	03(5561)2178
地中壁施工協会	1987年 4 月	25社	専門業者	03(3562)3631
鋼製地中連続壁協会	1992年11月	32社	ゼネコン 31社 メーカー 1社	03(3275)7748

ちまちだった技術もある程度まとめられ、施工指針(案)、積算基準(案)や地中連続壁基礎工法ハンドブック施工編が同協会から刊行され、同ハンドブック設計編の刊行も間近の状況にあり、我が国における連壁技術の窓口的役割を果たしていることは大いに評価されるべきであろう。

連続地中壁関連の協会組織は表-3 のとおりで、地中壁施工協会は連続地中壁を施工する専門者の集まりで、やはり施工技術の向上と合理化を計るため技術情報の交換や研修会など活発に活動しており、国内の連壁施工実績などもほぼまとめられている。また、鋼製地中連続壁協会は、設立後まだ日が浅いが、今のところ RC 連壁に比べてコストの面で多少劣るが、壁厚を薄くできることから、用地制限を受ける所や大深度で大耐力を必要とする所などに適用され、早くも数件の実工事を数え、将来の建設工事の条件を考えれば、この工法のニーズも高まるものと予想される。なお、同協会では各種マニュアル類を整備すべく研究会や委員会を組織して鋭意活動中であり、1994年3月末までには大方まとまると期待されている。

最近の連続地中壁ということで、その動向、技術の現状、本体利用などに多少重点をおき、あとがきでは連続地中壁関連協会の活動について、それぞれ述べ、稿をまとめた。

末筆になりますが、本稿をまとめるに際し、多くの方々から貴重な資料提供をいただきました。記して厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 内藤禎二：連続地中壁工法の展望，土と基礎，Vol. 41, No. 9, pp. 25～30, 1993.
- 2) 日経コンストラクション：精度 1/1 000 を目指して独自の検出機構，日経 BP 社，pp. 30～33, 1992. 6. 26.
- 3) 日経コンストラクション：深さ 104m を誤差 3 cm で掘る，日経 BP 社，pp. 60～63, 1991. 4. 12.
- 4) 日経産業新聞，日刊建設工業新聞など：1993. 5. 13.
- 5) 日経産業新聞，日刊建設工業新聞など：1993. 1. 12.

(原稿受理 1993. 10. 19)