

# 連続地中壁工法の展望

## A View of Diaphragm Wall Method

内藤 禎 二 (ないとう ていじ)

大成建設(株)技術本部生産技術開発部基礎工開発室長

### 1. はじめに

いま、21世紀に向けて豊かな社会環境を作るため、インフラ整備を中心に、各種の事業が盛んに進められている。この中でも、地下空間を有効に利用しようとする「ジオフロント開発」や水際の土地利用をすすめる「ウォーターフロント開発」が脚光をあび、大きな話題となっている。

これらの開発の多くは、大規模な構造物を作るために、大深度の大型の土留め壁や基礎がどうしても必要になってくる。これらの技術に欠くことのできないものとして連続地中壁（以下、連壁ということもある）工法があり、大いに話題になっている。

ところで、一口に連続地中壁と言っても多くの種類があるわけで、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る。さらに、この固化体中の応力材によって細分類することもできる。

このように多岐に分類できる連壁のなか、本稿ではその主旨から、以下連壁とは壁式のコンクリート系を指すこととして述べる。

なお、我が国ではこの連壁を英語で表現する場合、Diaphragm Walls とか Slurry Walls とか言って混用されているきらいがあるが、正確には前者は有筋（鋼材など）の連壁をいい、後者は無筋の連壁をいう。

### 2. 連続地中壁工法とは

連壁工法は地中に、平面が矩形や小判形の形状をした深い溝を鉛直に掘って、その中に籠状に組み立てた鉄筋などを挿入し（用途によっては無筋の場合もある）、下部より安定液と置換えながらコンクリ

ートを打込んで壁を造り、この壁を平面上で順次つなげて地中に連続した壁を造る工法（壁式コンクリート系）である。このような手順により地中に直線状の壁、箱形や筒状などの任意の形状の構造物を構築することができる。すなわち、地中構造物の土留め壁、橋梁や大型構造物の基礎、シールドや沈埋トンネルなどの大深度立て坑の土留め壁、ダムや地下ダムの止水壁など、用途に合わせた自由度のある構築が可能である。

連壁工法では、掘削機の1回の掘削長（壁厚直角方向の平面上の長さ）をガット長といい、機種によって異なるが、普通2.0～4.0m程度である。このガットを数ガット、一般には施工法の関係から1～5の奇数ガットで1回でコンクリートを打込む単位壁を掘削する。この単位壁をエレメントと呼び、その長さは2.0～9.0m程度である。

相隣り合うエレメント間の接続部を継手部といい、詳細は後述するが用語の説明を兼ねて、ピン接合と剛結接合をイメージした連壁の概念図を図-1に示す。

地中に大きな溝を掘ると、側圧（土圧と水圧）によって溝が崩壊するので、掘削開始からコンクリート打込み終了までの間は、溝内に安定液を満たして側圧とバランスをとり、溝壁の崩壊を防止する。こ

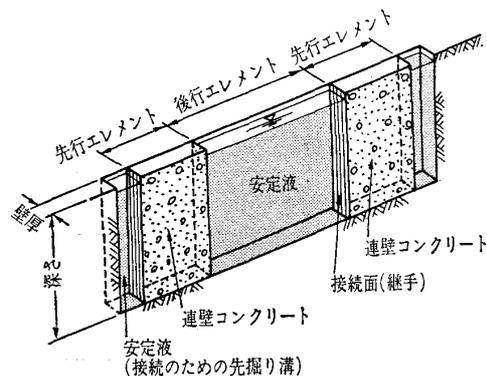


図-1 連続地中壁概念図

表-1 安定液の標準配合(水1m<sup>3</sup>当たり)<sup>3)</sup>

土質	ベントナイト系安定液			ポリマー系安定液		
	ベントナイト	増粘剤	分散剤	ポリマー	ベントナイト	分散剤
粘性土	40~60	0~1	0.5~1	1~4	10~20	0~1
砂質土	60~80	1~2	1~2	3~5	10~30	0.5~2
砂礫	80~120	1~3	2~3	4~6	20~40	1~3

の安定液は泥水ともいい、連壁工法の成否をかける重要な要素技術の一つで、多くのノウハウがある。その機能と性質は、削溝壁面の安定には高比重・高粘性が、コンクリートとの置換には低比重・低粘性が好ましく、望ましい性状が相反するものがある。全部の機能を同時には満足させられないので、掘削時とコンクリート打込み時では、それぞれ安定液を使い分ける場合があり、これを良液置換と言っている。

なお、回転式掘削機では掘削土の排出に安定液を媒介させているので、この面から考えれば当然低比重・低粘性の方が好ましいが、掘削途上における溝壁の安定にも前述のように配慮しなければならず、この辺を調整して施工している。この場合も必要に応じて良液置換が行われる。安定液の配合は、水溶性高分子(ポリマー)とベントナイトを主成分とし分散剤などの添加剤を加えたもので、一般には比重が1.01~1.20程度の液体である。標準配合の1例を表-1に示す。

### 3. 連壁の掘削機械の選定と土質

連壁の掘削機械は、土砂を1回ごとにつかみ出すバケット式と、土砂を回転するカッター刃で地山を

掘り崩して安定液と一緒に吸い上げる回転式とが主体である。

これらの掘削機械の種類と型式は、掘削壁厚や深度、対象土質、作業条件、工期などを考慮して、適切な機種を選定しなければならない。国内で現在比較的汎用されている掘削機械の種類とその適用壁厚と適用深度については表-2のとおりである。

### 4. 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の止水壁として施工されたものである。我が国には、1959年イタリアのイコス社から技術導入されて、大井川水系の中部電力畑薙ダム<sup>はたなぎ</sup>の河川の締切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厳しい土質、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バケット(MEH)が現れる。

回転式は、1966年に垂直多軸回転カッター(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

表-2 連続地中壁用掘削機械一覧表

機械名称	適用区分	適用壁厚 (cm)													適用深度 (m)									
		20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	20	40	60	80	100	120	140
バケット式	懸垂式 クラムシェル	イコス	[適用]													[適用]								
		MHL(マサゴ)	[適用]													[適用]								
		MEH(マサゴ)	[適用]													[適用]								
	ロッド式 クラムシェル	KELLY	[適用]													[適用]								
		BSPケリー	[適用]													[適用]								
回転式	垂直多軸回転 カッター	CON(大谷基功)	[適用]													[適用]								
		BW(利根)	[適用]													[適用]								
	水平多軸回転 カッター	EM(利根)	[適用]													[適用]								
		HF(ソレタンシュ)	[適用]													[適用]								
		BC(パワー)	[適用]													[適用]								
		HM(キャサグランデ)	[適用]													[適用]								
薄壁多軸回転 カッター	TRUST 21(利根)	[適用]													[適用]									
衝撃式	イコスビット	[適用]													[適用]									

(注) 本表は1993年3月現在、汎用性のある機械の標準仕様で示した。

あることと相まって、急速にシェアを広げてきた。この機種は一軸圧縮強度が $100\sim 200\text{kgf/cm}^2$ 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。

この様な状況のなかで、 $500\text{kgf/cm}^2$ 前後まで、部分的には $1000\text{kgf/cm}^2$ を越えても掘削可能な水平多軸回転カッター（以下、水平多軸と称する）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。

一方、連壁を使用した構造物の歴史から見てみると、上記1959年の止水壁にはじまり、以来土留めや止水壁として、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）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1.20m、深度が100m前後と一挙に大型化され、施工精度や安定液の管理など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。今日の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3.20m、深度170mまで施工可能な大型連壁の実証実大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2.88m、深度119m）工事などの国家的プロジェクトに対応するもので、現在ではその一部の連壁工事が早くも終了しているもの

が数件ある。ここにきて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、土砂分離の技術など、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。これも、我が国の厳しい国土の条件の中で、この工法の将来性にいち早く着目して懸命に技術開発してきた成果であり、この先達の努力を見逃してはならないと思う。

このため、今日ではその技術が世界の断然トップをいくこととなり、連壁工法の発祥の地であり先進国であったヨーロッパ諸国をはじめ、外国からもこの技術の視察が相次いでいる状況にある。施工実績も年々確実に増加の一途をたどり、国内での総計が $1000\text{万m}^2$ を越えたとみられ、1社でも $200\text{万m}^2$ 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。

## 5. 連壁技術の現状

現在、国内で使用されている主な連壁掘削機には、表一2に示したバケット式、回転式のいずれのものもあり、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、クレーが50台などである。また回転式では、垂直多軸のBWが35台、水平多軸が48台、その内訳はEM、EMXが27台（製作中の7台を含む）、HF10台、BC9台、HM2台などである。これらの台数は限られた条件の中での調査であり、あるいは遺漏があるかも知れない。

このようななかで、バケット式は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、垂直多軸で対応可能な場合は、主として経済的であるとの理由

表—3 国内の主な大深度、大壁厚連壁の施工実績

工 事 件 名	深 度 (m)	壁 厚 (m)	使用した 掘 削 機	施 工 業 者	施工開始 年・月
東京湾横断道路 川崎人工島建設工事	119	2.88	E M 機 EMX機	大成建設ほかJV および 鹿島ほかJV	1991. 11
白鳥大橋3P 橋脚下部工建設工事	106	1.54	E M 機 H F 機	大林組、大成建設ほか JV	1989. 1
江東ポンプ所建設工事	104	2.6	E M 機	大成・飛島・大都JV	1990. 10
川崎航路沈埋トンネル 浮島立て坑建設工事	76.5	2.0	E M 機	大成・前田・間・飛島・ 五洋・佐藤JV	1990. 2
明石海峡大橋 アンカレッジ建設工事	75.5	2.2	E M 機 H F 機	清水建設、大林組ほか JV	1990. 1

(注) 本表は深度100m以上、または壁厚2.0m以上の条件により、1993年3月末現在の実績で作成した。

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よう。

その一方で、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おり、掘削深度100mか壁厚2.0m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—3のとおりである。この表からも分かるとおり、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、そこそこに対応できる技術を確立しつつある、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、メーカー名と機種名については前ページで述べたとおりであるが、上記のとおり、日本にはこれらすべての機種がそろっている。なお、これら各社のうちキャサグランデ社のみが純然たるメーカーで、他の3社は何らかの形で施工部門を併有している。

昨今、一部に連壁の本体利用が聞かれるようになってきたが、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連壁に作用した先行応力の評価が難しいこともある。このような背景のなか、連壁の本体利用として注目されるの

は先に述べた連壁剛体基礎である。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て、地中連続壁基礎協会が1986年に設立され、この基礎工法に対応できる連壁の技術を保有する35社で運営され、今日に至っている。現在までの実績は250基前後と報告されているが、この面での本体利用が特化しているともいえよう。

## 6. 連続地中壁の高度化技術

### 6.1 その背景

最近、連壁技術の向上により、構造物としての信頼が高まり、本体構造物へも利用されはじめた。

建築構造物では、1973年以降、日本建築センターの評定を取得したものは18工法<sup>4)</sup>にのぼり、地下外壁、耐震壁、基礎杭などとして本体にも利用されている。一方、土木分野でも1975年代から基礎本体や地下外壁として使用されるようになった。

このように用途が広がってきた理由は、この工法には次のような特徴があるからである。

- ① 自由度のある、剛性の高い壁体が得られる。
- ② 止水性が良い。
- ③ 軟弱層から中硬岩まで、広範な土質に対応できる。
- ④ 周辺地盤への影響が少なく、近接施工が可能である。
- ⑤ 低騒音、低振動工法である。
- ⑥ すべて地上（路下式を含めて）からの施工で、安全である。

### 6.2 要素技術

連壁工法が高度化利用されるようになったのは、次のような技術の開発と確立があったからである。

#### 1) 安定液の開発

従来のベントナイトを主体としたものから、優れた性状を持ち、劣化しにくい高性能のポリマー系ものが得られるようになり、連壁の品質が格段に向上した。さらに分散剤や変質防止剤の研究や、安定液再生の研究も行われ、その一部は実プロに適用さ

れている。

## 2) 溝壁の安定

安定液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、遠心力載荷試験機を利用した研究も進んできた。

## 3) 鉛直精度の管理

連壁のエレメント間における、高度化利用に必要な横筋の接合やカッティングなどの施工面からと、施工誤差を設計上に考慮しなければならない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。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<sup>5)</sup>、その一部は実プロに適用されている。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<sup>6)</sup>。

## 4) コンクリートの品質

コンクリートは安定液中で、これと置換しながら打込むため、こ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、信頼性の高い良好なコンクリート壁体を得られるようになってきた。

## 5) エレメント間の継手

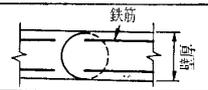
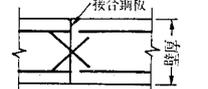
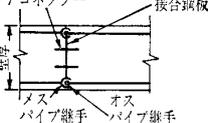
連壁は平面延長2~9mのエレメントに分割して施工するので、設計条件に応じて継手部の構造上の処理を行う必要がある。エレメント間の継手<sup>7)</sup>は表-4のように、一般の壁の構造継手と同じく、フリー、ピン、剛結の3接合を任意に選択することができる。とりわけ、ピン接合や剛結接合の開発は、連壁の用途を拡大した大きな要素である。

## 6.3 高度利用の用途

### 1) 地下外壁、耐震壁などの地下構造物

土木および建築で多くの実施例がある。その主な構造形式には、重ね壁方式、一体壁方式および単独壁方式がある。

表-4 エレメント間の継手方法

名称	継手の伝達力	継手の種別	備考
フリー接合	軸圧縮力	ロッキング パイプ継手 仕切プレート 継手	
		カッティング 継手	
ピン接合	軸圧縮力 せん断力	ジベル継手 せん断鉄筋継手	
剛結接合	軸力 (圧縮・引張り) せん断力 曲げモーメント	鉄筋重ね継手	
		ジャクソン 継手 (パイプ継手)	

注1. 参考文献<sup>8)</sup>をもとに構成。  
2. ジャクソン継手は筆者が加筆。

## 2) 基礎杭

地下外壁に連壁を用いて本体利用する場合など、その支持力機構を合わせるため、内部の杭に用いるもので、建築で用いられる場合が多い。

最近、土木でも高架橋の基礎などに、その軸線に直角に連壁を施工し、それらの頂部に頂版を設けたもので、いわゆる下駄式<sup>8)</sup>と呼ばれるものが使用されはじめた。

## 3) 地中連続壁基礎(連壁基礎)

連壁を剛結継手を用いて口の字型、日の字型、田の字型、あるいはそれらの組合せで閉合断面の一体構造とし、その頂部に頂版を設けて基礎とするもの。

## 7. 連壁技術の将来展望

連壁の将来技術に関し、比較的近いうち実現しそうな、壁厚の問題から述べる。

現有機械の適用壁厚は表-2にすでに述べたとおりであるが、さらに壁厚の厚い掘削機を開発しようとの動きがある。バケット式ではMEHが2.0mを越えるものであろうが、バケットの重量増に伴いベースマシンも大きくなることに留意しておく必要がある。回転式では水平多軸で、壁厚4.0m前後、深度200m程度と思われる。

一方薄壁では、バケット式ではMEHが0.50m、MHLが0.45m前後が目標となろう。回転式では水平多軸が現在の機構からみて、0.60mを大きく下回

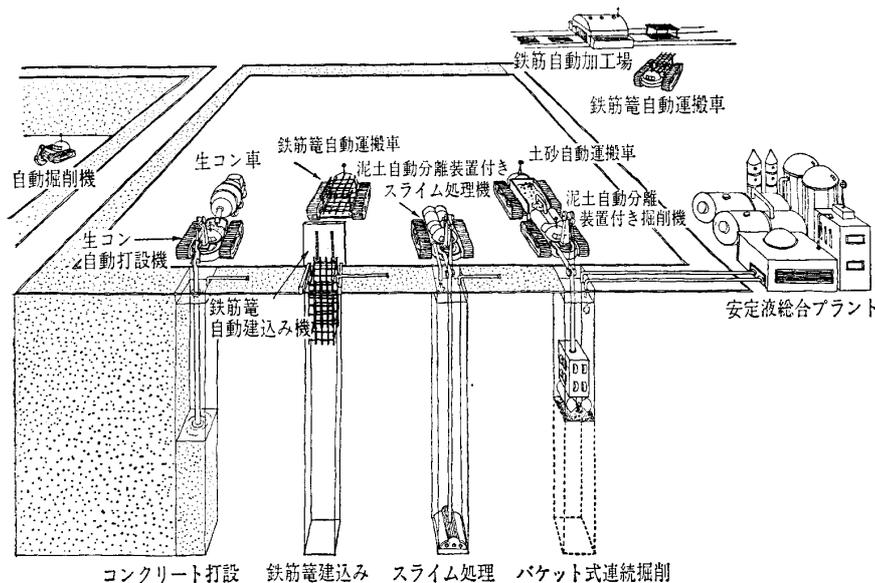


図-2 連続地中壁工法の将来のクローズドシステム予想図<sup>10)</sup>

ることは困難に思えるなか、表-2にも示したTRUST-21が1993年1月に実証実験を終え<sup>9)</sup>、実用の域に達した。この掘削機は最小壁厚0.20m、深度170mまで、一般土砂から中硬岩まで対応できるもので、主な用途は遮水壁と思われる。当面この形式で、この壁厚より薄いものは難しいと思われ、一つの目標が達成された感がある。

このほか、連壁の将来技術としては、低発熱高強度コンクリート、管理のAI化や自動化、変断面連壁、水上連壁、自動施工なども考えられるが、これらの技術のうち比較的近い時期に実現しそうなものや、21世紀になってからのものもありそうである。このような状況のなかで、連壁工事が洋の東西を問わず、「汚れ作業」であり、今のところ自動化されにくいことから、その将来展望として筆者らは図-2<sup>10)</sup>のような、自動化されたクローズドシステムを発表しているが、この域に達するのは少し先のことであろう。

## 8. あとがき

連壁が我が国に導入されて以来、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、既に述べたように、1986年地中連続壁基礎協会が設立された。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ある。各社ま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きく評価されるべきであろう。

このような状況のなかで、地中連続壁基礎協会(JADIF)では、1992年5月28日～6月12日の16日間、連壁発祥の地ヨーロッパのイギリス、ドイツ、イタリア、スイス、フランスの5か国へ技術視察団を派遣し、技術交換会、工場や現場の視察などを実施し、多くの成果をあげた。この時の知見によれば、ヨーロッパで

も、バケット式と水平多軸式が併用され、その時々で使い分けられていた。壁厚が80cm程度、深さ50m前後が主流であった。

この視察で得た多くの技術情報とともに、アメリカをはじめ、韓国や台湾など連壁を使用している国々の情報と現況についても、連壁の海外事情として述べたかったが、紙数の関係で割愛せざるを得なかった。いずれかの機会に紹介できることを期待して、擱筆する。

## 参考文献

- 1) 内藤禎二・井関英生：連壁地中壁工法，コンクリート工学，日本コンクリート工学協会，Vol.27，No.11，pp.50～55，1989.
- 2) 内藤禎二：連続地中壁工法，地質と調査，(社)全国地質調査業協会連業会，土木春秋社，第1号(通巻第43号)，pp.51～59，1990.
- 3) 地中連続壁基礎協会：技術資料I，地中連続壁基礎工法，施工指針(案)，p.36，1991.
- 4) 町田重美：地下連続壁の本体利用に関する現状と動向—建築構造物，基礎工，Vol.15，No.11，pp.2～11，1987.
- 5) 日経コンストラクション：精度1/1000を目指して独自の検出機構，日経BP社，pp.30～33，1992.6.26.
- 6) 日経コンストラクション：深さ104mを誤差3cmで掘る，日経BP社，pp.60～63，1991.4.12.
- 7) 上記3) pp.60～72.
- 8) 上記3) pp.60～61.
- 9) 日経産業新聞，日刊建設工業新聞など：1993.1.12.
- 10) 内藤禎二・有山元茂：連続地中壁工法の将来のクローズドシステム予想図，大成建設(株)，1990.3.

(原稿受理 1993.4.30)