

(14) 泥水固化工法によるP C地中連続壁工法

増 沢 虻 男^{*1} 平 井 利 一^{*2}
橋 本 絃^{*2} ○ 齋 藤 奎 子^{*2}

1. はじめに

地中連続壁工法は、わが国に導入以来20年余りの歴史を持っている。この工法は軟弱地盤に対し有効でかつ無騒音、無振動の建設公害に対する社会的要求に応える工法として発展を遂げ、現在では地下工法の主要技術としてわが国に定着している。

しかしながら、地中連続壁工法は、①泥水が満たされた溝中に鉄筋籠を挿入し、泥水と置換する方法で生コンを打設して壁体を構築する。②掘削された溝壁がそのまま型枠となる。という工法上の特徴があるため、泥水に接した面のコンクリート強度および鉄筋とコンクリートの付着力の低下が指摘されている。

このような条件にある地中連続壁工法に対し日本建築学会「建築基礎構造設計規準・同解説」では「綿密な施工計画のもとに慎重な施工を行なう」という前提で「場所打ち鉄筋コンクリート地中壁工法によって構築される地下外壁のコンクリートの長期許容圧縮応力度は、設計基準強度の1/4以下、かつ60 kg/cm²以下とする」と定めている。即ち、前述の地中連続壁工法がもつ問題点に対して、安全率を高くとる一方、十分な品質管理にもとづいて慎重な施工を行なうといった方法で対処しているのが実情である。

本文でとりあげるP C地中連続壁工法（以下「パネウォール工法」とよぶ）は、これらの問題を改良し高品質の地中連続壁を得ることを目的として開発されたものである。パネウォール工法は、プレキャストコンクリート板（P C板）を山止め壁として利用した後、本体構造と接合して土水圧および地震力を負担する地下耐震壁としても再利用するもので、その特徴は次の点があげられる。

- ① 工場で生産されたP C板を使用するため従来の地中連続壁工法のように、泥水と鉄筋が直接触れたり、泥水中で生コンを打設することがない。このため、鉄筋とコンクリートの付着力の低下、コンクリート強度の低減に対する配慮が不要で、品質の高い地中連続壁が得られる。
- ② P C板はFC 240～360 kg/cm²とコンクリート強度が高いため、壁厚を薄くすることができ、隣地に近接した施工が可能となり地下室の有効利用が図れる。
- ③ 従来の地中連続壁工法のように溝掘削面がコンクリートの仕上がり面とならないため、溝掘削機の選定を自由に行うことができ、かつ仕上がり面がP C板のため平滑な表面が得られる。
- ④ 掘削泥水はすべて固化するため、廃泥水処理が不要である。
- ⑤ P C板周囲に泥水固化物が充てんされるため、止水が完全である。
- ⑥ 山止め壁と地下外周壁が同一の板で兼用されるため、地下工事費のコストダウン、工期短縮が図れる。

パネウォール工法の開発における技術的背景には上部構造で既に一般化しているプレキャストコン

*1 御熊谷組 技術研究所 副所長・工博

*2 同 技術研究所

クリート構造の他に、当社が独自に開発した泥水固化工法（以下「ケイソイル工法」とよぶ）をあげることができる。

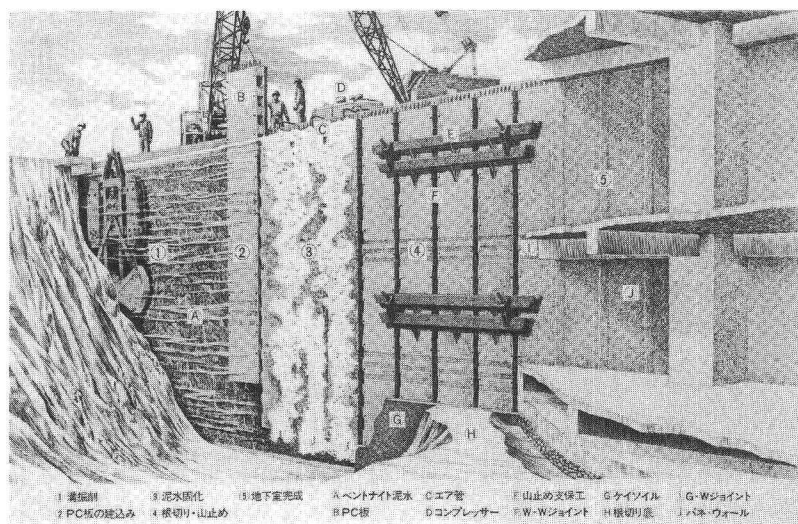
以下本文では、パネウォール工法の概要を紹介した後、ケイソイル工法について述べ、さらにパネウォール工法の設計上の留意点に触れ、最後に実施工例について述べる。

2. パネウォール工法の概要

写－１にパネウォール工法の施工手順の模写図を示す。本図は左側から右側に向かって施工順序に従って示してある。

2.1 溝掘削

従来の地中連続壁工法と同様にベントナイト泥水を用いて溝掘削を行う。溝の掘削幅はPC板背面に5cm以上の止水膜（ケイソイル）を確保することとして計画する。溝深さはPC板セット深さに通常50cmの余掘りを行なっているが、透水性が高いため地下水のまわりこみが懸念される地盤では、PC板下部より必要深さ



写－１ パネウォール工法施工手順

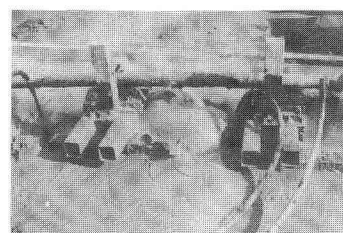
までさらに掘削しケイソイルのみの壁を構築することによって止水壁とすることもできる。掘削速度は1日1エレメントとし、1エレメントは6～8m程度としている。

2.2 PC板の建込み

PC板頂部の重心位置にあらかじめ埋設されている吊フックを利用し、PC板を溝中に建入れる。PC板は周辺の泥水が固化されるまで（約1日）ガイドウォール上に差し渡された治具で仮支持される。建込み時にオーバーフローした泥水は劣化されることなく回収貯蔵され、次の掘削に再使用される。

2.3 泥水固化

PC板を仮支持した状態で周辺の泥水を固化する。固化剤はA剤（水ガラス系）、B剤（セメント系）の2種類を使い、気泡攪拌法により混合攪拌する。気泡攪拌とは水中で気泡が浮力によって上昇するエネルギーを利用したものである。まづPC板に埋設配管されたパイプによって溝底近くの泥水中に圧搾空気を吹き込む。エアブローが始まると気泡の上昇に伴って泥水中に対流や乱流が起り、激しく攪拌される。この状態の泥水中に溝の上部から



写－２ 泥水固化状況

A 剤， B 剤を順次投入するとこれらは泥水中に分散し，混合され混合液の粘性が次第に高くなる。気泡攪拌は固化剤投入後約 10～20 分程度で停止し放置する。これによって泥水は 1 日圧縮強度 0.5 kg/cm^2 位の固化物になる。この強度は経時的に増大し，目的に応じて調整できる。写－2 に泥水固化状況を示す。

2.4 根切り・山止め

建物全周の P C 板建入れが終了すると内部の根切りを行ない，土と共に内側のケイソイルも掘削する。P C 板の背面には 5 cm 以上のケイソイルが充てんされているため P C 板間の止水は完璧である。

2.5 建物本体との接合

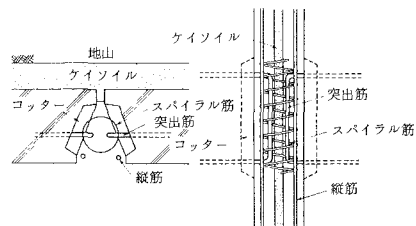
パネウォール工法は山止め壁として利用した P C 板を本体構造と接合して建物完成後も土水圧を受ける耐震壁として再利用する。耐震壁の機能を果たすために必要となる接合部は① W－W ジョイント（隣接する P C 板相互の接合）② G－W ジョイント（P C 壁と後打ち梁の接合）③ C－W ジョイント（P C 壁と後打ち柱の接合）の 3 種ある。

① W－W ジョイント

図－1 に W－W ジョイントを示す。本形状はプレキャストコンクリート構造として上部構造で用いる接合法と同種のものである。パネウォール工法では，接合部のコンクリート打設が目視状態で行なえるため確実な施工が期待できる。このため地震力を受けて W－W ジョイントに発生するせん断力は，コッター部のコンクリートによって伝達している。W－W ジョイントの施工は，上下の床スラブが施工され，腹起しを撤去した後，即ち，土水圧による変形が生じた状態でジョイントコンクリートの打設を行っており，ジョイント部に土水圧による応力が発生することを避けている。

② G－W ジョイント

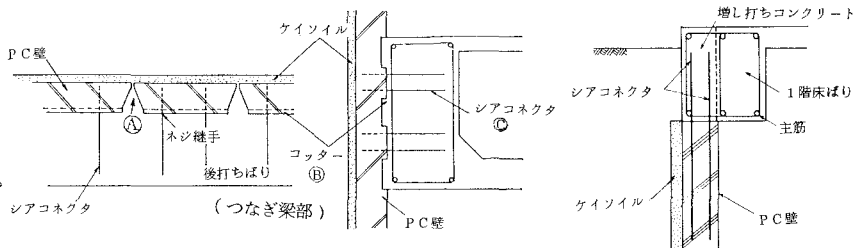
図－2 に G－W ジョイントを示す。1 階床梁用 G－W ジョイントは各々の P C 板頂部を拘束し，上階から伝達される地震力を P C 耐震壁に伝達するもので P C 板から突出するシアコネクタを 1 階床梁にアンカーさせている。つなぎ梁との接合部はつなぎ梁コンクリート打設の際，板端部（㊸部）にもコンクリートが打設されることを利用して，弾性範囲内の地震力はこれによって伝達する。㊸部はあらかじめ P C 板に形成されているコッターで P C 板自重，ネガティブフリクションのように P C 板に発生する軸力をつなぎ梁を介して柱に伝達している。㊹部のシアコネクタはネジ継手を利用したもので P C 板水平断面積に対し 0.5 2 % 以上入れることとしている。



図－1 W－W ジョイント

③ C－W ジョイント

C－W ジョイントは図－3 に示すようにネジ継手を利用している。パネウォール工法では建物の外周に位置する



図－2 G－W ジョイント (1 階床ばり部)

すべての柱とP C板を接合することはしない。図-4に示すように連続するP C壁の最外端に位置する柱のみP C壁と接合する。これは、W-Wジョイントで一体化されたP C耐震壁は上下の梁と最外端の柱で強剛な付帯ラーメンによって外周を拘束されているものと見なしているためである。実験によるとP C壁に水平力を増大させていくと耐震壁の壁板に図-5に示すような45°方向のせん断ひびわれが発生し、上下の梁によって拘束を受けているため、急激な耐力低下を起こすことなく45°方向の圧縮帯が形成され大きなひずみエネルギーを吸収することが判明した。この際耐震壁の最外端にあって柱拘束がない場合45°方向の圧縮帯を形成しえず、この部分から圧縮破壊を起し易い。これを防ぐため、上下の梁拘束をはずれる耐震壁の最外端については、P C壁と柱を接合する。

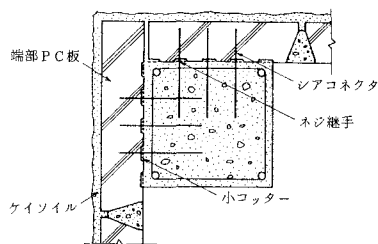


図-3 C-Wジョイント（入すみ柱）

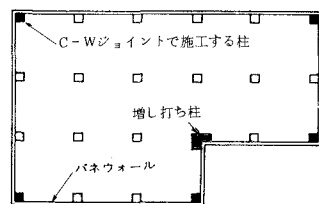


図-4 C-Wジョイント施工位置図

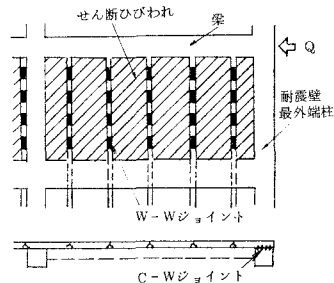


図-5 パネウォール破壊機構

P C壁と柱の接合が主として建物のコーナー部のみであるということは、施工的には大変メリットがある。即ちP C板の割りつけにあたって建物躯体の柱と無関係に標準的なP C板で割りつけることができ、P C板建入れも柱位置を意識することなく順を追って建入れることができ、P C板製造、管理の能率を上げることができる。

3. ケイソイル工法（泥水固化工法）

パネウォール工法の技術的背景となっているケイソイル工法は、泥水固化工法のひとつである。泥水固化工法にはベントナイト泥水に代わって自硬性泥水を使用するもの、あるいは泥水をグラウトと置換してしまう置換工法などがあるが、ケイソイル工法はP C板建込み後ベントナイト泥水に固化剤を投入して泥水固化するもので、泥水固化のタイミングを任意に選べる特長をもっている。またケイソイル工法はP C地中連続工法だけでなく、シートパイル、鋼管、P Cパイル等を用いた止水山止め工法や地盤改良工法にも応用されている。

3.1 ケイソイルの強度と物性

各種の工事で実施しているケイソイルの強度は、一般に図-6の範囲であり目的によって計画的に制御できる。図-7に泥水および固化剤の調査計画手順、表-1にケイソイルの強度と物性を示す。

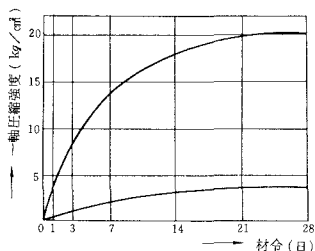


図-6 ケイソイルの材令と強度

3.2 攪拌方法と均質性

本工法における泥水と固化剤との混合攪拌は、溝底

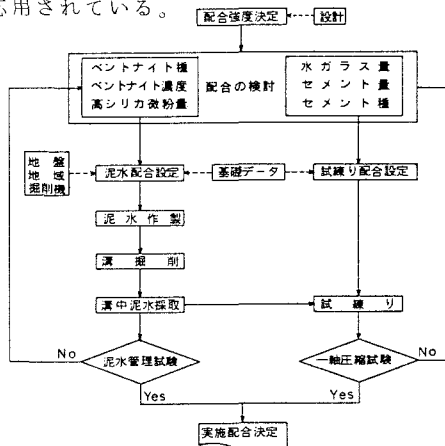


図-7 泥水および固化剤の調査計画手順

近くに配置されたエア管ノズルから吹き出される気泡群の上昇に伴って生ずる対流および乱流によって行なわれる。このため溝内のすみずみまで容易に攪拌、混合が可能で均質性は非常に良い。

図－８は深さ方向の気泡攪拌の混合効果の試験結果である。実験はＢ剤投入開始後、攪拌を続行しながら深度 25, 50, 75, 100 m からエアリフト管によって混合液を連続的に採取し各点の液比重の経時的な変化を調べた。その結果、Ｂ剤投入完了後約 10 分で混合液の比重がほぼ均一になり、均質状態になったとみなせる。

4. パネウォール工法の設計上の留意点

4.1 P C 板

パネウォール工法に使用する P C 板は、現場プラント又は工場生産による。したがって部材の大きさを定めるにあたって輸送制限、重機制限を受ける。さらに P C 板はその形状が長さ比較して厚さが薄いため、面外方向の曲げ剛性が小さく、製造、建方中に自重によって面外方向に曲げひびわれが発生しやすく慎重な取扱いが必要である。パネウォール工法に使用する P C 板は厚さ 25 ～ 40 cm、長さ 15.0 m 以下と限定している。したがってパネウォール工法の深さ方向の規模の

限界は地下 2 層程度としており土質条件に応じて根入れ長を算出し P C 板長を定めている。P C 板幅は 2.5 m で既述のように G－W ジョイントの耐力が図－２ ④ 部分の P C 板の木端のコンクリートせん断耐力に負っているため、1.0 ～ 1.5 m と限定している。

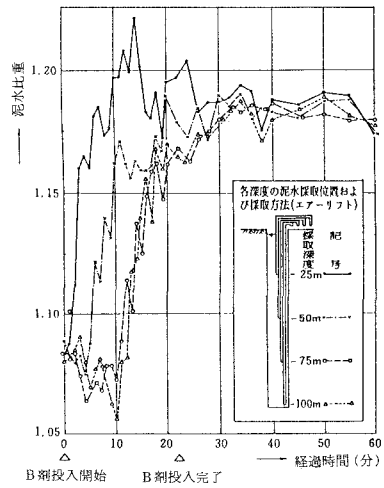
コンクリート設計基準強度は F C 240 ～ 360 kg/cm^2 を使用することとしており、仮設山止め時の面外方向のせん断耐力は日本建築学会「基礎構造設計基準」に準拠している。

4.2 耐震壁としての耐力と剛性

P C 板のコンクリート強度は上述のように F C 240 ～ F C 360 を採用しているが W－W ジョイント部の充てんコンクリートは現場施工のため F C 240 に限定している。従って耐震壁の地震力に対する設計は F C 240 を基準として考えている。図－９にパネウォール設計用許容せん断応力の一例を示す。本図の横軸は土水圧設計用許容せん断応力度 lfs 、たて軸は地震荷重設計用許容せん断応力度 fsl を示しており、設計用許容せん断応力度は両者の組み合わせで定める。ここに fsl は最大 5.7 kg/cm^2 となっているが、これは W－W ジョイント部の断面欠損および土水圧を受けながら面内せん断力を受ける二方向荷重を受け持つ壁として複合応力によって発生する応力度を低減した結果である。又、この値は右上方で斜め 45° 方向に低減する形となっているが、これは土水圧によるひびわれが発生した場合、地震力による斜めひびわれ発生を促進するのではないかという懸念から低減しているもので今後の研究で明確にしていきたい点で

表－１ ケイソイル強度と物性

試 験		試 料	
		泥水固化物(低強度)	
一軸圧縮試験	一軸圧縮強度 (kg/cm^2)	実 験 室	現 場
	変形係数 (kg/cm^2)	2.4～4.1 200～400	4.0～5.2 350～450
三軸圧縮試験 〔非排水〕 〔非圧密〕	粘着力 (kg/cm^2)	1.8～3.2	1.7～2.2
	せん断抵抗角 (度)	3～7	22～26
割裂試験	変形係数 (kg/cm^2)	600～800	400～700
	引張強度 (kg/cm^2)	0.6～1.0	—
透水試験	透水係数 (cm/sec)	(1～2) $\times 10^{-6}$	2 $\times 10^{-7}$
	材 令	一軸、割裂 28 日 三軸 50 日	一軸、割裂 28 日 三軸 50 日
備 考	地 盤	—	砂 質 地 盤 深 度 16m



図－８ 気泡攪拌の混合効果試験

ある。

パネウォールの面内せん断加力試験結果によるとパネウォールに斜めひびわれが発生するまでの初期剛性は一体壁と等しいことが確認されている。設計にあたっては地下階の構造部材である内部耐震壁、パネウォール、ラーメンについて各構面毎の剛性を算出し、剛性に応じて地震力を配分する方法をとっている。初ひびわれ発生後の剛性低下は、パネウォールは一体壁に比べて大きい但最终破壊までの変形量は十分大きく、地震時のひずみエネルギーを十分吸収し得る耐震壁といえる。パネウォールの終局耐力は $p_{fu}=18.0\text{ kg/cm}^2$ が認められており、保有耐力の算定にあたっては、この値を採用している。

5. パネウォール工法施工例

PC地中連続壁に耐震性をもたせる工法は、(財)日本建築センターの一般評定を完了しており、既に2件の施工実績をもっている。ここでは、現在施工中の一例について述べる。

表-2に工事概要、図-10にパネウォール施工平面図、図-11に地下壁の標準部完成断面図、さらに図-12に土質柱状図を示す。

本工事にパネウォール工法が採用された理由は

- ① 敷地は閑静な住宅地と商店街に囲まれており、地下工事は低騒音、低振動で行なわなければならない。
- ② 地下水位がGL-80cmと高く、GL-3～-4mは透水性の高い砂質土となっている。従って剛性が高く、止水性のある止め壁により周辺地盤の沈下を防がねばならない。
- ③ 駅前再開発によるショッピングセンターとして地下の売場面積の有効利用を図りたい。
- ④ 指定工期が短く地下工事の工期を大幅に短縮しなければならない。

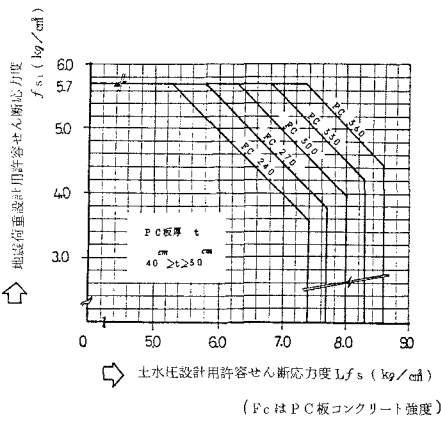


図-9 土水圧および地震荷重を負担するPC耐震壁の許容せん断応力度

表-2 工事概要

工事名称	片上駅前地区第一種市街地再開発事業施設建築工事
発注者	備前市片上駅前地区市街地再開発組合
設計・監理	協同組合 都市設計連合・株式会社 高田建築設計事務所
施工	片上再開発建設共同企業体(熊谷組・間組・藤田建設)
用途	大規模小売店舗および駐車場
構造	SRC造 地下2階 地上7階
建築面積	4030.8㎡ (延床面積 30353㎡)
パネウォール工事	溝巾: 45cm, 延長: 258m, 深度: 9.75m (一部11.25m), 面積: 2628.4㎡
PC板	厚さ: 25cm, 幅: 147cm (一部97cm), 長さ: 8.5m (一部10m), 総枚数: 167枚

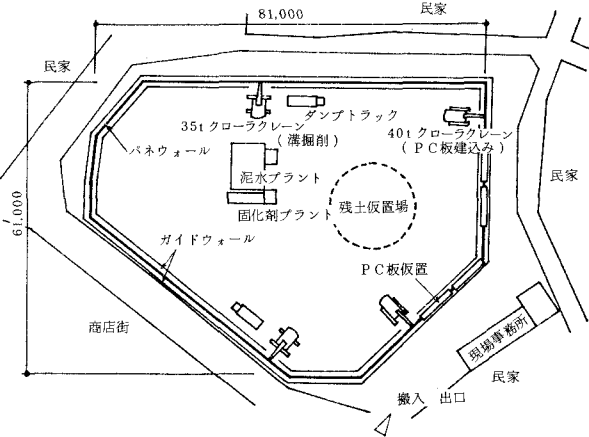


図-10 パネウォール施工平面図

- ⑤ 山止め壁と地下本体壁の兼用および工期短縮によるコストを低減したい。

などによるものである。

5.1 パネウォール工法の設計

本建物は地上7階地下1階（一部地下2階）のSRC造であり、上部4層に駐車場をもつショッピングセンターである。このため上部から入力される地震力が大きいのに比べ、地下階はショッピングセンターとして内部に耐震壁がほとんどとれない。さらに図-10に見られるように、建物のコーナー部がほぼ斜め45°にカットされており耐震壁としては性能の悪い平面形状をしている。このため、外周壁に発生する面内せん断応力度が大きくパネウォールのみでは全地震力を負担しきれなかつた。

そこで通常外周壁の内側に沿って配置する止水用のブロック壁を取り除き、代わって厚さ25cmの現場打コンクリート壁に設計変更した。この壁はパネウォールとの間に7cmのクリアランスを設けており打ち継ぎ部からの万一の漏水に備えることとした。この結果、パネウォールと外周壁は全地震力の65%を負担し、残りをラーメンと建物内部の耐震壁が負担する設計となっている。

建物保有耐力は必要保有耐力に対し1.2倍以上となっている。

5.2 PC板

使用したPC板は厚さ25cm、巾1.47m（一部97cm）、長さは一般部で8.5mとし、地下2階に近接する部分のみ10.0mとした。図-13に標準的なPC板の埋設金物と配筋図を示す。

PC板は、和歌山県橋本市の工場で製造され岡山県の現場まで施工エレメントの進展に伴い毎日トラック輸送することとし、1日4枚を1サ

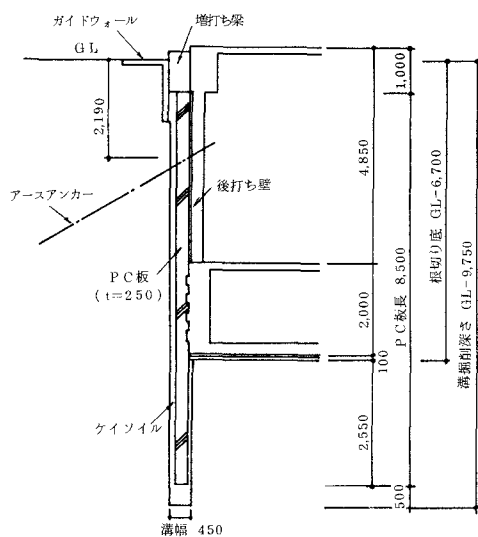


図-11 標準部完成断面図

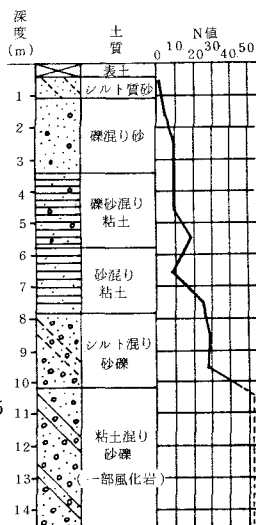


図-12 土質柱状図

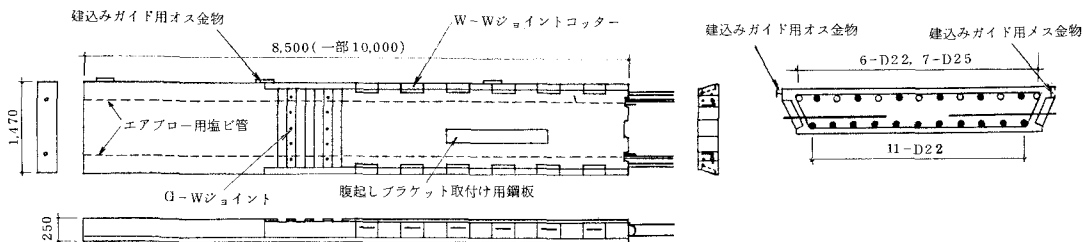


図-13 PC板埋設金物，配筋図

イクルとして蒸気養生によって製造した。P C 板にはエアブロー用塩ビ管、建入れ用ガイド金物、腹起しブラケット取付け用鋼板、W-Wジョイントコンクリート打設時の型枠セット用インサート、P C 板建入れ吊上げ用フック等の金物をあらかじめ埋設した。

5.3 溝掘削

工事に先立ち建物の外周にガイドウォールの施工を行なった。ガイドウォールは掘削溝の定規、P C 板セット位置の指定、P C 板仮支持時の反力点、溝上部の壁面崩壊防止等の機能を持つもので入念な施工が必要である。本工法では溝壁面がそのまま仕上面とならないため、ワイヤ式クラムシェルパケットを使用し、溝掘削完了後溝壁崩壊の有無および掘削精度を超音波測定機によって確認した。

5.4 P C 板の建込みおよびセット方法

P C 板の建込み精度は、P C 壁の精度に大きく影響するために慎重な施工管理を要する。P C 板木端には図-14 に示すようなガイド金物を埋設し、建込み時は隣接する P C 板相互をかみ合わせる形で建入れる。建入れは P C 板頂部の重心位置に埋めこまれた吊フックを用い重心吊りを行なうことで建入れ精度を確保しながら図-15 に示す方法で吊治具をガイドウォール上に仮支持したまま泥水固化を行なった。この際各エレメント毎に超音波側壁測定機により精度の確認を行なった。写-3 に P C 板建入れ風景を示す。根切り後の P C 壁面は図-16 に示すように面外方向の倒れ、1/500 程度を確保し平滑な壁面を得ることができた。

5.5 泥水固化

泥水固化は既述の如く行なった。ケイソイルの目標強度は材令 4 週で一軸圧縮強度 $\sigma = 7 \sim 10 \text{ kg/cm}^2$ とした。図-17 にケイソイル強度試験結果を示す。

溝掘削から P C 板建入れ、泥水固化までの一連の作業は掘削機 2 台による 1 日 2 エレメントを標準とし、1 エレメント内の P C 板枚数は 4 枚とした。全エレメントの P C 板建入れ終了後内部根切りを行なった。内側のケイソイルは根切りと同時に除去するが W-W ジョイント部まわりのケイソイルについては、鉄筋の付着力の低下を起さないよう手掘りによりていねいに除去した。写-4 に根切り完了後のパネウォール壁面を示す。

6. おわりに

建築工事において工期の点からも、コストの点からも地下工事の占め

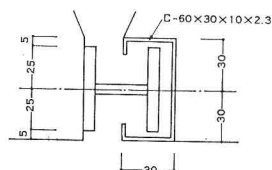


図-14 ガイド金物

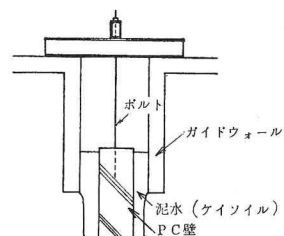
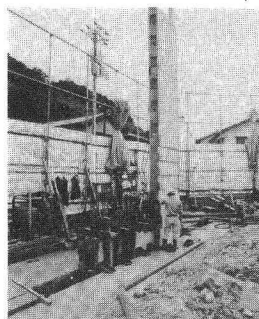


図-15 P C 板仮支持



写-3 P C 板建入れ風景

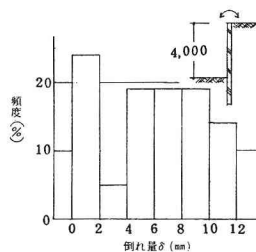


図-16 P C 板面外倒れ測定結果

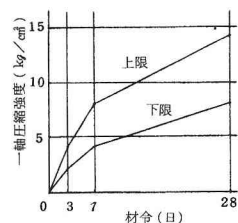
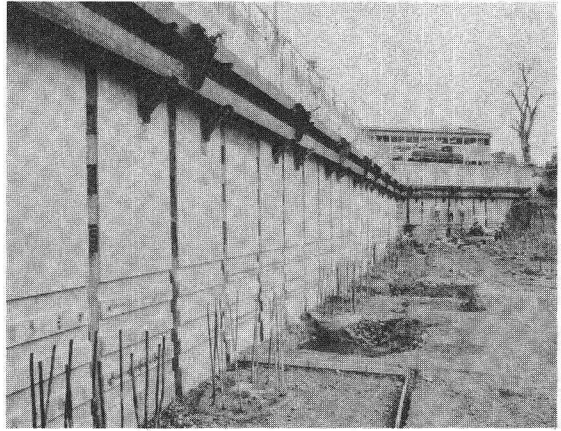


図-17 ケイソイル強度試験結果

る割合は非常に大きく、その施工は悪条件を強いられる場合が多い。それにもかかわらず、地下工事の工業化は建築施工の他のどの工事部門にも増して著しく遅れており、そのことが工事費全般に占める地下工事費の割合を一層引き上げる原因となっている。

建物の工業化は、単に現場作業を減少させるだけでなく、建物全体の品質の向上に大きく寄与するわけで、地下工事を工業化していく努力は建設技術者に強く求められている技術のひとつと考える。



写-4 根切り完了後のパネウォール

ケイソイル工法は装置の簡便さと工法の信頼性の高さによって広い応用範囲をもつ工法として開発以来建築工事のみならず土木工事にも広汎に適用され、高い止水性と経済性で好評を得ている。

パネウォール工法は地下工事の工業化のひとつとして新しい発展の道を拓くものとして、さらに研究を進め適用範囲の拡大に努めたいと考えている。

参考文献

- 1) 増沢：「プレキャストコンクリート板を用いた地中連続壁工法」土と基礎，土質工学会，1976年9月号
- 2) 増沢：「泥水固化工法における配合と固化物の物性に関する研究」日本建築学会論文報告集第283号，日本建築学会，1979年9月号
- 3) 増沢ほか：「泥水固化工法における気泡攪拌による泥水と固化剤の混合度」日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和54年9月
- 4) 増沢ほか：「プレキャストコンクリート板を使用した地下外周壁の強度に関する実験的研究」日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和54年9月
- 5) 増沢ほか：「耐震地下壁のプレハブ化—PC耐震地中連続壁の構造と実施例」建築技術，1982年8月号

PC DIAPHRAGM WALL METHOD with SLURRY-SOLIDIFYING METHOD
(The PA-NE Wall Method)

by Sachio Masuzawa^{*1},^{*2} Riichi Hirai^{*2}
Hiroshi Hashimoto², Keiko Saito^{*2}

For the underground construction of a building, a temporary retaining wall has to be installed to stop water seepage and ground collapsing. The conventional underground diaphragm wall methods are now widely accepted as methods to permit installation of temporary walls. However, they have not been without their technical problems;

1. An uneven wall surface is unavoidable. Vertical precision is also difficult to maintain.
2. Concrete quality may be lowered since pouring is performed in slurry.
3. Bond strength between steel and concrete may be lowered due to presence of slurry particles.

To solve these problems, the PA-NE Wall Method has been developed by combining slurry-solidifying method and precast concrete (PC) panels.

The characteristics of the PA-NE Wall Method are;

PC panels, made under strict quality control, are used to produce a wall of high strength and reliability in comparison to earthquake-proof walls constructed by conventional methods.

The layer of K-Soil, the substance solidified by the K-Soil System, is well known for its watertight property. Since the PC panels are completely encased by K-Soil to stop water seepage, there is no danger of ground subsidence.

Use of PC Panels ensures verticality and smoothness of the wall surface which profile of the excavated trench does not affect.

Since no concreting is involved, there is no need to consider slurry deterioration and quality control of slurry is easy. Slurry can be solidified in place doing away with waste slurry disposal.

Trench excavation, PC panel installation and slurry solidification can be systematically integrated into the overall construction schedules for earlier completion.

Remarkable workability and shorter work period warrant substantial economy.

The PA-NE Wall Method enables underground work immediately adjacent to existing structures or lot boundaries. A wider basement space is made available by thinner walls.

In this paper, we introduce the PA-NE Wall installation system, slurry-solidifying method, planning way of this method together with one example of construction.

General Manager (*1) & Research Engineer (*2) of Institute of Construction Technology, KUMAGAI GUMI CO., LTD.