

建築基礎工法(XII)

建築基礎工法講座編集委員会

第5章 圧縮空気潜函工法

1. 沿革

圧縮空気潜函工法（以下単に潜函工法と称す）は1840年頃フランスで始められたと言われている。我国では明治35年横浜港岸壁工事で水中作業用の移動式潜函が初めて使用され、次で明治42年朝鮮鴨緑江の橋梁工事に最初の本格的な基礎用潜函が用いられたのであるが、今日の如く広く利用されるようになったのは大正13年東京隅田川の永代橋工事にアメリカ式潜函工法が導入されてからの事である。昭和7年に至り初めて大阪で建築の基礎工事に用いられた。

2. 潜函の原理

例えばコップを逆さにして水中に押込んでも、内部の空気が圧縮されるだけで水は浸入しない。井筒の刃先から少し上ったところに天井を張ってその下を作業室とし、ここへ圧縮空気を送り込み上記の原理を応用したのが潜函であると考えればよい。従って潜函作業室での作業は圧縮空気中の dry work でいかなる場合でも水替作業の必要が無い。

3. 潜函工法の概要

圧縮空気を応用する点を除けば、潜函工法の施工要領は井筒工法のそれと大差ないから、ここでは潜函独特の事項に就てのみ工程順に説明する（図-1, 図-2参照）。

(a) 潜函作業室の構築 地上に皿板を並べその上に刃口金物を据付け、セントル（作業室内型枠）を組んで作業室コンクリートを打つ。刃口金物には山形鋼または溝形鋼が多く用いられ、刃先巾は15cm～20cm程度、天井高は1.8mが普通ではあるが、地質其の他の作業条件に適合するように、その都度検討して決める。潜函沈下作業中、刃口部は片持梁として外側からは主働、受働の土圧を、また内側からは作業気圧を、更に急激な沈下による衝撃など不特定かつ複雑な外力を受ける。また作業室床版は水荷重の全重量を直接支え、同時に作業気圧による上圧力も受ける。しかも潜函作業室を形成する刃口部並びに床版こそ、作業員の生命の防壁であるから充分丈夫に設計施工されねばならぬ。尚、軟弱地盤でのセントル取外し作業に際して急激な傾倒事故を起し易いから注意を要する（図-2a参照）。

(b) 潜函の艤装 作業室の構築が終れば引続き気閘、豊管、送気管等の圧縮空気用機器並びに作業室照明用器具の取付を行う。これを艤装と言い、初めて潜函としての形態が整う（図-2b参照）。

気閘は図示の如く上下2個の転開扉を有し、これを交互に開閉することに依り気圧差のある潜函の内外を連絡する主要機器である。気閘1基が能率的に受持てる潜函の大きさには限度があるから、大型潜函には数個の気閘を取付ける。

豊管は作業室天井と気閘とを堅固気密に連結する鉄管で寸法は普通 $\phi 1.2$ m、長さ3m内側には作業員昇降用と掘鑿用バケットのガイドとを兼ねた鉄梯子を備え、潜函の沈下に伴い逐次継足されてゆく。

作業室照明用としては特に100Vの低圧電源を使うが場所柄、漏電、スパーク等が意外な事故の誘因となる懼れがあるから電気配線の絶縁には特に注意する。

(c) 圧縮空気設備 空気圧縮機→空気冷却器→空気蓄積槽→送気本管→気圧調節室→ゴム管を経て送気パイ

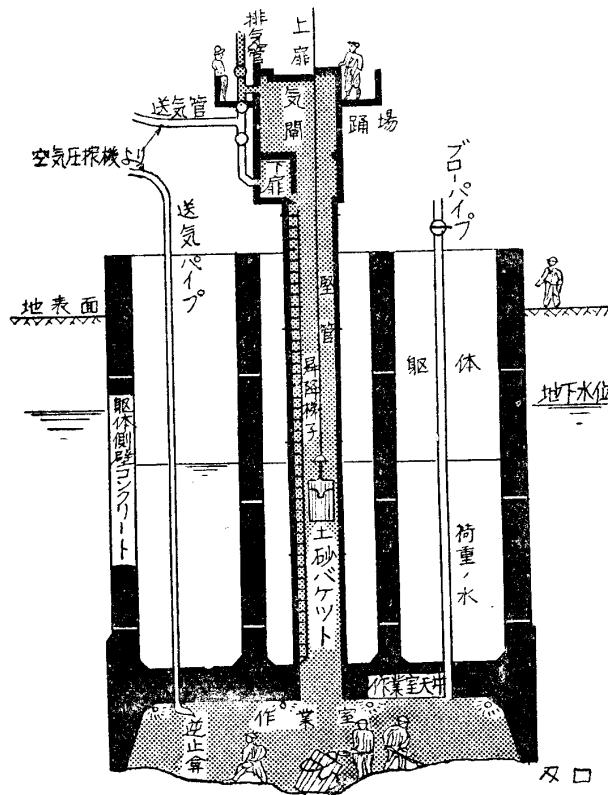
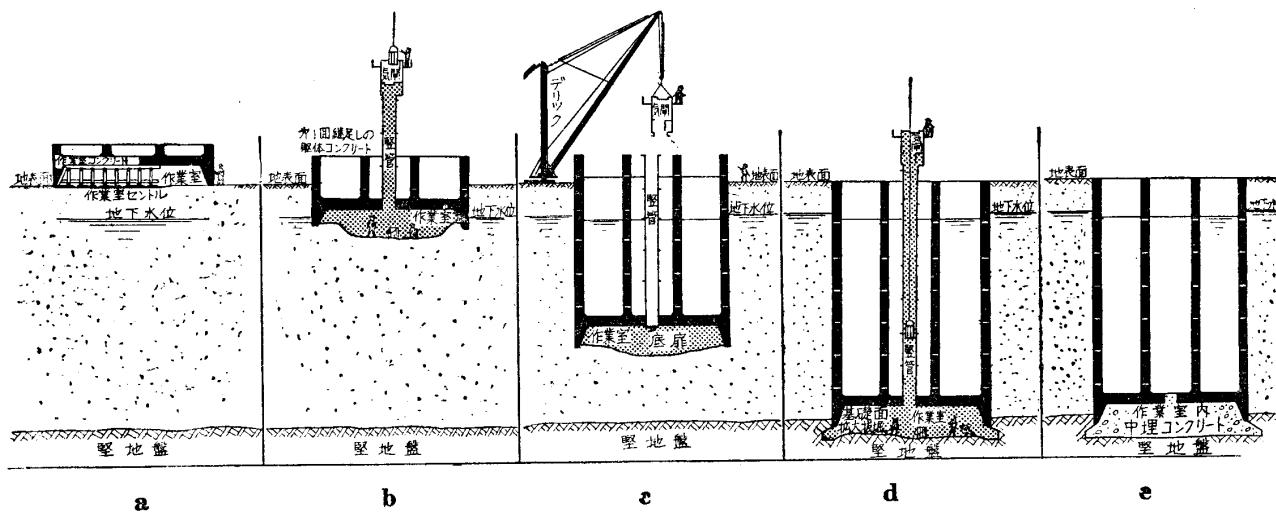


図-1 潜函の構造



- a. 地表面に作業室の組立
- b. 第1回軸体コンクリート継足し気間堅管を取りつけて空気掘さく
- c. 堅管の継足作業一底扉をつけて作業室内の圧縮空気が漏れぬようする。
- d. 空気掘さく沈下作業進歩一刃口は堅地盤に達し基礎面拡大の抜掘作業を行うこともある。地盤耐圧試験もこの堅地盤の表面で行われる。
- e. 潜函沈下作業終了一作業室内は中埋コンクリートで充填され堅地盤に確固と据えた基礎がかくして構築された。

図-2 沈下作業の順序

ブにつながる一連の設備をいう。空気圧縮機は 4 kg/cm^2 程度の低圧用で良く、必要な設備容量は掘鑿中の気間開閉回数(パケット回数)、作業人員数(法定送気必要量 = $45 \text{ m}^3/\text{人/時}$)、刃口からの推定漏気量並びに同時施工の潜函数等から、単位時間当たりの最大空気消費量を算定し余裕も見込んで決める。空気冷却器は水冷式が使われ高温の圧縮空気はここで冷却され同時に油や水分も取除かれる。空気蓄積槽は送気本管内の気圧脈動を防ぎ、かつ不時の停電の際でも暫時は送気を続け得る保安的役目もある。送気本管の太さは空気圧縮機の設備容量と送気距離から決まる。気圧調節室には空気調整弁並びに気圧計が取付けられ専任係員が昼夜常勤して作業気圧の調節を行う。送気パイプの先端すなわち作業室開口部には安全のため逆上弁を取付け、圧縮空気の逆流を防止しておく。

(d) 掘鑿沈下作業 潜函の艤装並びに送気設備が完了すれば掘鑿を始めるが、刃口が地下水表面を通り越す迄は送気の必要はない。潜函夫により掘鑿された土砂は鉄製バケットに入れて吊上げ気間から搬出されるが、井筒の場合と異り圧縮空気のため土砂中の水分が若干切れて居るから掘鑿、残土運搬共始末が良い。沈下を開始してから $2 \sim 3 \text{ m}$ 位下る迄の間は、潜函の自重も重く、Top heavy であり、また不測の地下障害物に出会ったりして潜函が大きく傾いたり横滑りしたりし易いから油断できない。また潜函の形状、大きさ、重量並びに地質等の条件によって異なるが、通常潜函の沈下深度が、 10 m 程度に達する迄に予じめ傾斜を直しておかぬとあとでは矯正困難となる。

潜函を順調に沈下せしむるためには常に次の不等式が成立するよう、予じめ作成する沈下関係図表に基き、臨

機の施工が必要である。

$$W + L > F + U + R$$

W : 潜函の自重 L : 沈下用荷重 F : 表面摩擦力
 U : 作業気圧に依る上圧力 R : 刃口下の地耐力

従って潜函の軸体は事情の許す限り重く設計される事が望ましく、また沈下の途中での軸体立上りコンクリートはなるべく早目に打足するのが良い。

沈下用荷重としては軸体内に水荷重を容れる。従って荷重の調節も容易であるし、かつ潜函全体の重心が下るから傾斜防止の効果もある。小型潜函の場合、荷重の代りに最寄の構造物を利用して水圧ジャッキで押下げる事もある。

表面摩擦力の適確な測定は困難であるが、通常は $1.5 \sim 2.0 \text{ t/m}^2$ 程度として計算している。潜函が深くなるに従い表面積の増大と共に表面摩擦力が大きな沈下抵抗となる。これを軽減する目的で、作業室から上の側壁を $3 \sim 10 \text{ cm}$ 程度内側へ引込めたり、側壁面に air jet, Water jet 等を使用する事もあるが、周囲の地盤を弛めるから注意すること。

作業室内の圧縮空気は地下水の浸入を防ぐと同時に潜函を上向きに押上げている。従って潜函が浅いからは潜函を支える効果をもつ、深くなるに従い沈下抵抗に変る。この上圧力は作業気圧に比例し、作業気圧の大きさは地下水表面下の潜函深度と地層の透水度とで決る。砂利、砂等の場合では地下水表面から刃口までの水頭がそのまま必要な作業気圧となるが、かかる気圧を理論気圧という。一般に粘土質の地層では理論気圧よりはるかに低い作業気圧で作業できる。潜函が深くなり沈下しにくくなると作業室内の気圧を下げ、一時的に上圧力を軽減を

講 座

はかる事がある。これを減圧沈下法と言うが、減圧のため作業室内へ土砂が浸入し周囲の地盤を荒す怖れがあり濫用してはならぬ。

潜函が極めて浅い間は刃口下の地耐力だけで支えられているが、表面摩擦力と作業気圧による上圧力とが潜函の自重以上に増大する段階になれば、刃口の下は常に掘越されるから刃口下地耐力は沈下作業の支障にはならない。この場合の掘越高は刃口下 50 cm 程度が限度で、それ以上の大きな掘越は空気の濫費や潜函の傾斜を招來する。

沈下が進行して軸体天端が地上 1 m 位にまで下ったら、掘鑿を中止して鉄筋型枠を組み立上りコンクリートを打足し、又、この期間を利用して豎管継足作業を行う。然しながらその間でも作業室への送気は止めない。(図-2c)

掘鑿中古い構造物の基礎や大玉石其の他の障害物に出会っても作業室内では鑿岩機や火薬が使用できるから容易に取除けるし、潜函を岩盤に食い込ませる事も出来る

但し圧縮空気中で使用する鑿岩機には特別高圧の空気を送らぬと能率が悪い。

(e) 地耐力試験 潜函が予定の地盤に達したら(図-3)に示すような装置を用い、作業室床版を固定受台としオイルジャッキで載荷版を地盤に押込みつつ、荷重沈下曲線を描き地耐力を判定する。但し地耐力試験の結果を如何に解釈して実際面に適用するかという点に就ては、(i)…潜函の底面積に比べ載荷版面積が極めて小さい(?)…この方法では地表での載荷試験と同じく載荷版直下の土は周囲へ容易に膨出するが、実際の基礎は根入を有して居るから、条件に相異がある。(ii)…短時間の試験であるから圧密に関するデータが入っていない。等の理由により、色々と問題もあるが、自然状態の基礎地盤を直接検査し得ることは潜函工法の大きい特長である。

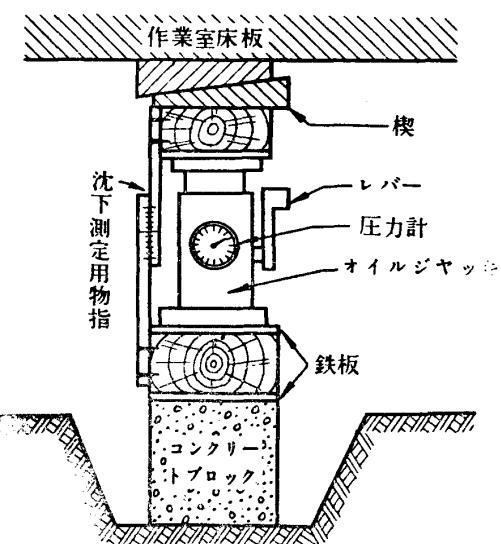


図-3 地耐力試験装置

(f) 作業室中埋コンクリート 地耐力試験が済めば作業室をコンクリートで填充する。もちろん圧気中の作業であるからコンクリートは、気閘、豎管を通じてバケットに依り又は自然落下で作業室に送られ、初めの中は潜函夫により隅々まで搔均らされるが、途中から潜函夫は全員作業室を出てその後は軟練りコンクリートの投入を続ける。その際空気は気閘から送れるよう送気管を切換えて従来の送気パイプは下端の逆止弁を外し上端にコックを取付けてブローパイプに改造しておく。填充コンクリートの天端が次第に上昇して天井に届くようになったら、コンクリートを投入するたびにブローパイプのコックをあけて急激に排気し、これによって生ずる空気の運動を利用してコンクリートを横引きし天井の隅まで填充する。最後にブローパイプからコンクリートが噴出するのを見て填充作業の完了を確認するのであるが、更に24時間送気を続けたあとで断気する。填充作業中作業気圧の調節を誤ると打立てのコンクリート中を地下水や空気が流通して硬化を妨げるから注意を要する。コンクリートは強度の点からは貧配合でよいが、完全に填充するのが主目的であるから Workability の良い事が必要である。

基礎地盤良好の場合、作業室内に地山の一部を残してコンクリート量の節約を計ることもある。

地耐力試験の結果地耐力に若干の不足ある場合(図-2-d)の様に刃口から外方へ掘拵げを行い、時には鉄筋も入れてコンクリートを填充し拡大基礎を作る事がある。

地盤が粘土質で掘拵げ中の漏気が少なく山留も容易な時に応用すれば極めて効果的である。

深い小型潜函が中途で沈下困難となったら、そこで潜函の沈下を打切り、その後は刃口下を圧気中で垂直に掘越し、コンクリートで巻立てながら予定の地盤まで到達する特殊工法も行われる。

4. 潜函病

高気圧の作業室内で長時間従業し、しかも急速に外へ出ると潜函病に罹ることがある。経験に依れば作業気圧 20#/□以下ではこの心配なく、20#/□を越して高圧に向うに従い漸次発生の傾向を示す。潜函病は予防、治療共に簡単ではあるが、何分にも特異な身体障害であるから、高気圧潜函工事の関係者はその原因並びに処置に關し充分の心得が要る。

(a) 原因 作業員が潜函に入る際、空気は人体組織中に自由にとけ込んでゆくから、欧氏管閉塞等の耳鼻異常がない限り、物理的圧迫や特異な感覚を覚えることなく大気中におけると全く同様の気分で作業し得る。この時人体中にとけ込む空気量は原則として気圧の高さと作業時間とに比例する。次に潜函から出る際、気閘内で徐

余に減圧するにつれ体内の空気も自然に人体から遊離して無事旧態に復するのであるが、もし急速に減圧すると、体内空気中の窒素だけは細かい気泡となって体内に残留し易く、この気泡が潜函病の原因と言われている。

(b) 症状 最も軽症は皮膚が痒くなる程度、普通は関節部の激しい疼痛や麻痺となって現れ、しかも潜函を出た直後でなく30分～2時間位たってから起る事が多い。

(c) 予防対策 作業気圧に対応して潜函夫一回の作業時間を加減し、更に潜函から出る時の減圧速度が適当であれば完全に予防できる。これに関し労働安全衛生規則にはつぎのように規定してある。

作業気圧	1回の作業時間
1.3kg/cm ² 以下	4時間以内
1.8 "	3 "
2.3 "	2 "
2.6 "	1.5 "
3.0 "	1.0 "
3.3 "	45分 "
3.3 " 以上	35分 "

減圧速度	作業気圧の1/2迄は毎分0.3kg/cm ² の割合で減圧する。
作業気圧 1.05kg/cm ² 以下は毎分0.2kg/cm ² 以下	
" 1.4 "	0.15 "
" 2.1 "	0.1 "
" 2.1 " 以上は毎分0.08 "	

特に減圧速度を守る事が一番大切であるが、作業を終えた潜函夫は帰りを急ぎ早目に出たがる傾向があるから注意せねばならぬ。

(d) 治療法 潜函病患者は直ちに療養閘（図-4）と称するタンクに収容し罹病時の作業気圧まで再圧を加えた後規定の減圧方式に従って計画的に減圧すれば完全に治り後遺症はない。ただし他の療法では絶対に治らぬから潜函現場近くに必ず療養閘を備える。

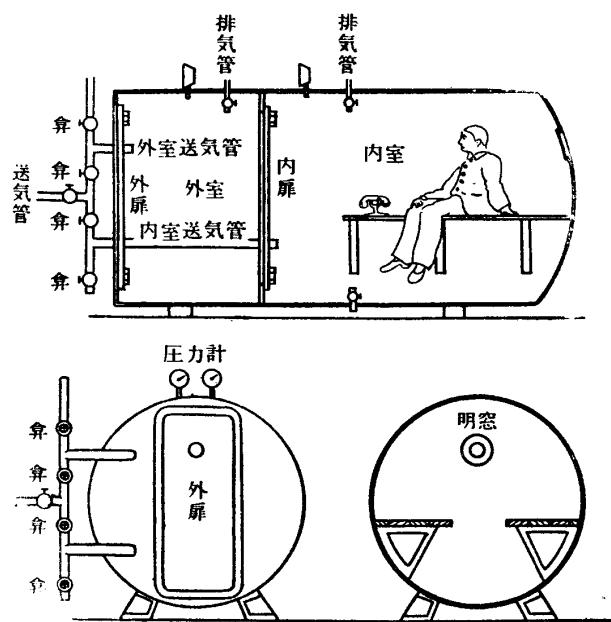


図-4 療養閘

5. 保安上の注意事項

沼沢地その他特殊の地層にあっては潜函作業室内に催涙性ガスやメタンガス等が発生する事がある。特にメタンガスは無色無臭でしかも爆発の危険があるから携帯用ガス検定器等によって早期検出に努めると共に作業室内は火気厳禁とする。久しく沈下作業休止中であった潜函に入る場合にははじめ充分に換気すべきはもちろん作業中の潜函でも地中からガス誘出の危険があるから潜函夫を作業室内においていたままで減圧する事は注意を要する。

不時の停電に備え作業室内に懐中電灯を常備する事も必要である。

6. 潜函の類別

(a) 据付位置に依る類別 陸上潜函と水中潜函とに大別されるが、水深の浅い個所では築島工の上で陸上潜函とする。水深の深い個所に潜函を据付けるには (イ)…陸上の船台で木製、鉄製またはコンクリートと鉄板組合せで浮潜函を作り進水浮揚させて据付地点に曳航し、コンクリートを打足しつつ水底に沈設する方法。(ロ)…据付位置に設けた棧台上に場所打でコンクリート潜函を構築しつつボルトを用いて水底へ吊下す方法。(ハ)…乾船渠内で潜函を作り、満水して浮揚曳航する方法。(シ)…小型潜函を起重機船で吊下す方法。等いろいろの方式がある。

何れの場合でも水中の据付地盤掘えには注意を要するが据付後の施工要領は陸上潜函と変りない。

(b) 形状に依る類別 井筒工法では水中掘鑿が多く、従って隅角部刃口付近が掘りにくい関係上、形状は専ら円形、橢円形等に限定されるが潜函工法にはこのような制約がないから形状は多様で、矩形が最も多いが、梯形、L形、凸形など異形の実例もある。

(c) 大きさに依る類別 今日迄の我国の実例では直径1.8mの円型潜函が最小、39.30m×24.50mの矩形潜函が最大であるが何れも建築基礎用潜函である。原則として余り小型の潜函は自重に比べて表面積が大きいから深くなると鋼塊等特別の荷重を載せるか、jetを用いるかしないと沈下困難となるし、また特に大型の潜函になると沈下中の二次応力にたいする軸体の補強に特別の設計が必要となる。

(d) 応用目的に依る類別 当初橋梁基礎工事用として出発した潜函工法もその後は極めて広範囲に応用されるに至ったが、今日迄の応用実績に就き、利用件数の多いものから順に記すとつぎのようになる。

工場機械基礎、橋梁基礎、建物基礎、棧橋突堤基礎、水力発電工事、地下鉄工事、乾船渠、地下油槽、樋門、岸壁、豊坑、揚排水ポンプ室、地質調査用、河底隧道、鉄塔基礎、防空壕。

講 座

この中前三者の実績が圧倒的に多い。

建築基礎としての利用方式を大別すると、(イ)…柱基礎式 (ロ)…取囲式 (ハ)…単独大型式の三種類になる。

柱基礎式は柱一本宛を小型潜函で受ける方式と数本の柱を一基の潜函で受ける方式とに分けられるが、今日ではもっぱら後者が採用されて居る(図-5)。

取囲式とは建物の外周に添って Wall caisson と言われる細長い潜函を下げ、これ等相互をつなぐことにより、外周一連の潜函は、将来建物の基礎並びに地下室の一部となるのみならず、取囲式擁壁として建物中央部の総掘中は完全な締切工の役目をはたす工法である(図-6)。

Wall caisson には、巾広く総掘中自立するものと、巾狭くして自立し得ず相対する潜函同志を切梁で支えるものとあるが、何れにせよ取囲式潜函では建物の外壁に相当する側壁を除き他の三方の壁が将来不用になるからこの部分の設計に当ってはなるべく取毀しやすいよう、そして出来れば一部をそのまま使えるよう工夫する必要がある。隣接した潜函の間の狭い接手工事は普通水替し

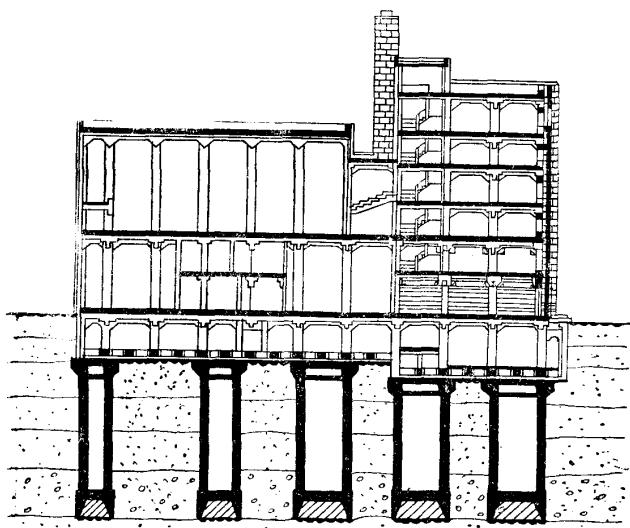


図-5 柱基礎式潜函

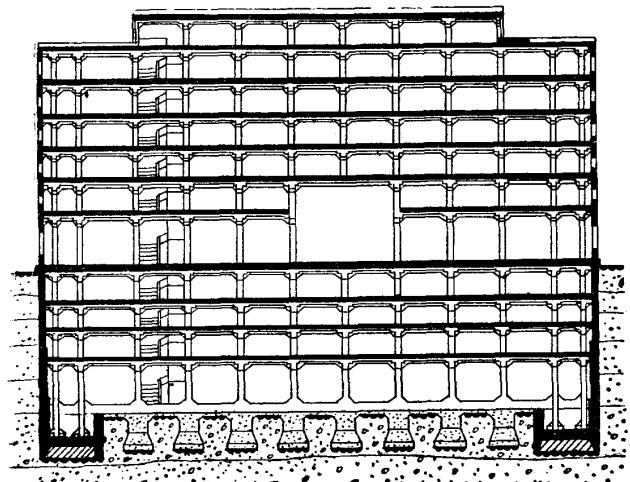


図-6 取囲式潜函

て空掘施工する事が多いが、湧水の著しい場合には接手部分に鉄筋コンクリートの天井を作り潜函同様に圧縮空気を送って施工する事もある。

単独大型式とは建物全体を一つの大型潜函に作って下げる方式である。従って建物全体が潜函基礎で支えられ、かつ潜函の軸体内部はそのまま地下室になる(図-7)。この方式に依れば如何に湧水の多い場所でも地下数階の建物が容易に出来る。特に大きい建物の場合にはこれを2~4基の単独潜函に分割し、下げるから接続する方がよい場合もある。

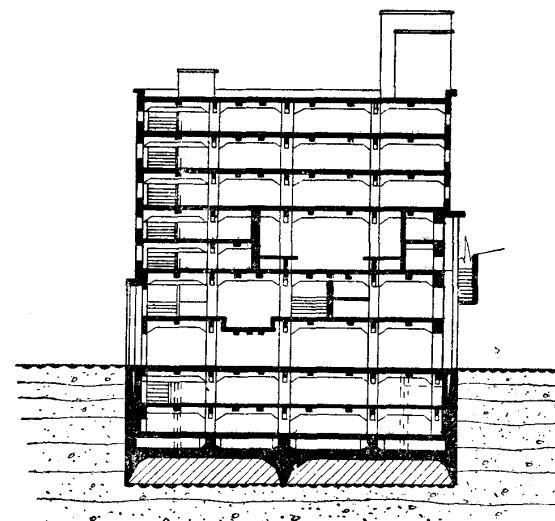


図-7 単独大型式潜函

7. 潜函工法の得失

潜函工法の基本的特質が圧縮空気を使うことにあるから、圧縮空気作業の得失がそのまま潜函工法の得失になる。

長所 (a) 基礎地盤を直接見ながら地耐力の試験が出来る。

(b) 水替をしないから地下水の状態に変化を与えることなく、従って付近の地盤を荒すことがない。

(c) 沈下中の傾斜矯正が容易である。

(d) 地下障害物の取除きが容易である。

(e) 沈下用の荷重として水を使うから、荷重の増減調節が簡易である。

(f) 地質に依っては簡単に拡大基礎ができる。

(g) 工期が確実である。

短所 (a) 圧縮空気中の作業であるから労務者の調達に当り健康上の制約がある。

(b) 作業気圧が上るに従い、労務者一回の作業時間が短縮されるから、潜函を利用し得る基礎の深さに経済的限度がある。

(c) 空気圧縮機用の電力設備が普通の工事に比べ大規模になり電力消費量も多い。

(白石基礎工事 K.K. 岡本東一郎)