

本州四国連絡橋基礎施工上の問題点

本州四国連絡橋公団 浅間敏生

1. まえがき

本四連絡橋の技術的調査が本格的に開始されて既に10年が経過し、その間土木学会の本四架橋に関する委員会活動を主軸として各種の研究、実験が行なわれて来た。土木学会報告書以後における基礎工法の検討並びに基礎施工に関連した技術の進歩をのべ、現段階における施工法の考え方からみた本四連絡橋基礎の問題点にふれてみたい。

2. 本四連絡橋基礎の特異点と施工方法

本四連絡橋は各ルートとも海峡部では大吊橋をいくつも連ねるような橋梁群を構成されている。従って海中に吊橋の主塔橋脚や共用アンカレッヂを建設する必要があるが、このような海中に数多くの大橋梁の基礎工事が行なわれた例は世界にも数が少ない。本四橋の場合、荷重強度が $300 \sim 500 \text{ t/m}^2$ となるので地盤状況は次の如く2つのケースに分けられる。

1) 支持層が海底面から余り深くないところにある場合（岩盤露出がそれに近いもの）

2) 上置層がある場合

i) 一般的に杭の打込みが可能であるような普通の陸上基礎の場合でも支持層となり得ない上置層

ii) 普通の陸上基礎では支持層となり得るが、本四橋の海中基礎では支持層となり得ないような硬い上置層で杭の打込がまず不可能と考えられるもの

また水深は工法上から汀線 $\sim 10\text{M}$ 、 $10\text{M} \sim 30\text{M}$ 、 30M 以上の3種に区別する。

潮流は施工面から $3 \sim 4\text{kt}$ 以下及び 4kt 以上と分けて考える。

このように本四連絡橋の基礎では水深の大きな潮流のある海域で岩盤まで掘削して大橋梁の基礎を作るということが特異な点であるといえる。

本四橋の基礎において用いられると考えられる施工法を一般的にあげると、

締切工

ニューマチックケーソン工法

オープンケーソン工法

設置型ケーソン工法（海中型枠工法、多段式工法を含む）

多柱式工法

となる。

3. 実験用海中作業足場の設置とその精度

海中に基礎を施工する場合には、その箇所に例えばケーソンの保留、掘削、コンクリート打設等の作業を行なう足場を据付ける必要がある。これらの作業を行なう足場には、その作業目的によって固定式の骨組構造のものとSEPといわれる海上移動足場とがある。本四架橋に関連した海上作業の実験を行なうため、これまで次に示すように4回にわたって作業足場が設置されている。

水深 13.5^M, 潮流 3 ~ 3.5 Kt の箇所で
12^M (8.8^M) × 12^M (8.8^M) × 19.5^M,

90t。フロート4ヶで浮揚曳航し現地に係留した双胴バーヂをガイドとして沈設した。

水深 24^M , 潮流最大 5 Kt の箇所で
 $23^M(20^M) \times 23^M(20^M) \times 38.5^M$,

805^t。F.C.で吊り下げ設置し2重管の脚柱でレベルを調整した。この実験では海底に足場の脚柱位置をおとす試みがなされた。

水深 30~35^M, 潮流最大 7Kt の箇所では
24^M(22^M) × 24^M(22^M) × 40^M,

580^t。F.C.で吊下げ曳航設置した。海底面が傾斜しており、地質の関係で図-3にみるような傾斜があった。この傾斜によって上面は水平に約35^{cm}移動している計算となる。

水深 13 ~ 20^M, 潮流最大 2 Kt の箇所をボーリングのため 9 回のシフトを行なった。デッキの大きさ 24^M × 42^M. デッキ厚 3.75^M, スパッド長 53^M (9^{M/hr} で昇降する), 1865^t.

シフト毎にトランシットによる方向視準とテルロメーターによる距離測定によつて位置を決定したが、計測時と設置後との間における位置の移動は図-4に示す。

これらの設置精度に影響する大きな要素は測量誤差と位置調整作業の巧拙である。そのほか丈の高い鉄構では鉛直度が関係してくる。位置修正作業は、F. C.を用いる場合アンカーワイヤーのウインチ操作によることになるが、設置計画位置を正確に指示するためにはで

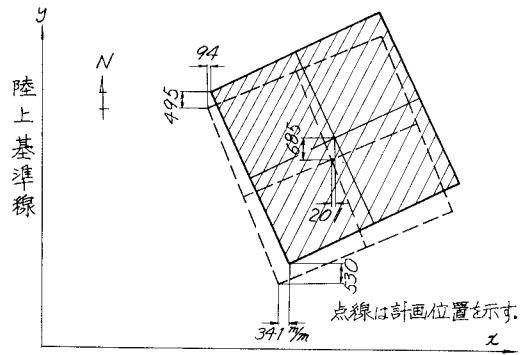


図-1. 岩屋沖海中作業台の設置精度

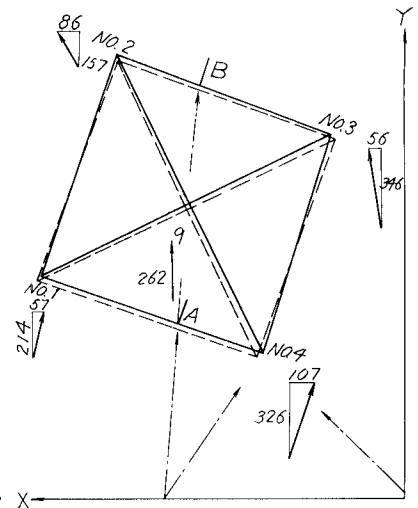


図-2 児島海中作業台の設置精度

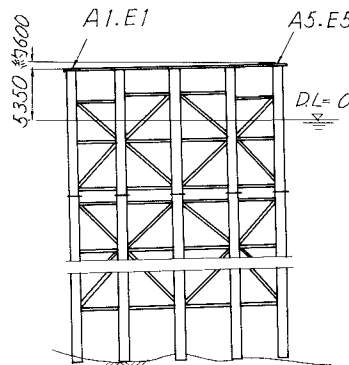


図-3 鳴門海中作業台設置側面図

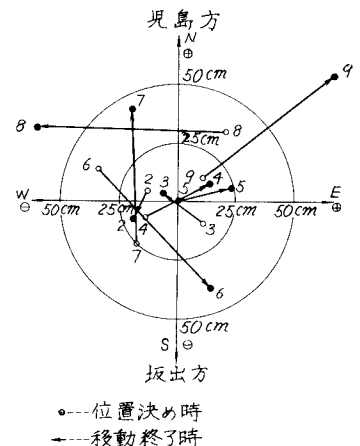


図-4 SEP 設置のすれ

きるだけ直角に2方向から視準できる計測台を海上の設置地点近くに設ける必要がある。250^mの距離で20秒トランシットによって鉄構上の2本のポールを視準すれば±20^{cm}の誤差内に収まるので、このようにすれば現時点においては±30^{cm}の精度が達成するものと予想される。従って構造物の寸法の余裕としては両側に50^{cm}を考慮すればよいと考えている。

4. 海中足場に対する潮流力と波力

設置された海中鉄構等に対して作用する潮流力と波力を実験用作業足場及び橋脚の1つを例にとつて検討を加えよう。

1) 鳴門海中作業台に対する潮流力と波力

表-1に示す各種の場合の作用力からみて、まず毎日2回の干満潮に際して起る潮流に対して設置時に安定であると共に、その後において強風によって起る波を受ける時点までに両者の合計した力に対して安定を確保することが必要である（図-5）。

2) Dルート橋脚の海中型枠工法の場合における潮流力と波力

表-2においてはⅠ、Ⅱの段階をケース1～8に分けたが、当初の海中型枠工法ではこの橋脚の海中鉄構は重量が1300^tあるのでケース2の段階までは設置した状態で安定と考えられ、ケース3以後では海中鉄構の脚柱に根固めパイルを施工することとしていた。そしてその型枠も岩盤面との接触部、水平並びに鉛直の継目部のあるパネル方式としていたが、継目方式などの実験を重ねた結果水平継目のみとする方が施工上望ましいことが判つて来たので、鉄構の外周に底のない重箱状の型枠を4段重ねる方式（型枠重量1350^t）に変更した（図-6）。

しかしながら、この方式でも海中コンクリートを水平の打継目なしに施工するために、鉄構内部に円筒状の区画を挿入して打設面積を分割してコンクリートの打上り速度を高めるほかコンクリートの硬化熱を冷却させることを図つたので、この区画用の鋼材量が鉄構本体あるいは外型枠と同程度の重量を必要とすること、また外型枠及び区画部の重量が鉄構の安定に余り寄

表-1. 鳴門海中作業台に対する潮流力と波力

タイプ	潮流受圧面積 M ²	潮流力 t 3.5% 水深3.5 ^m	波力 t H=5.0, T=0.0 SEC
柱列体	1,457	1,178	137
直立体	794	1,070	2,045
柱列体+10φワイル	1,616	1,306	516

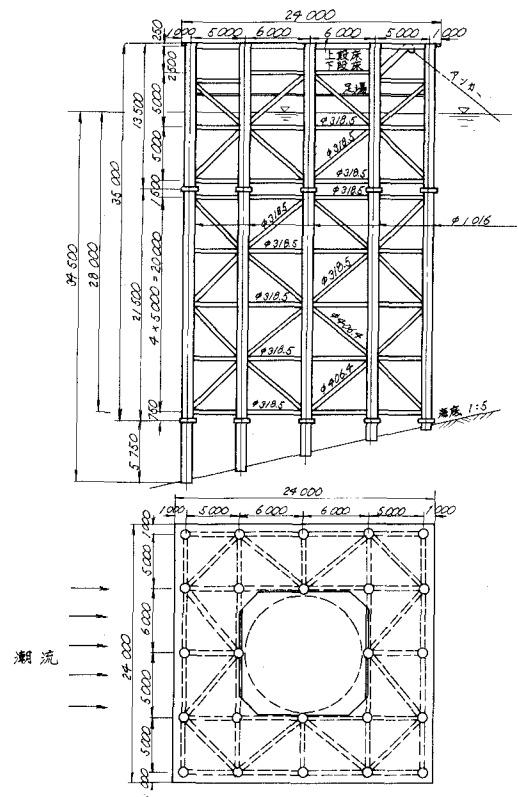


図-5 鳴門海中作業台

与しない点などから、更に検討を加える余地のあるものであった。ここで表からもわかる通り鉄構に型枠をとりつけても潮流力は却って減少すること、本体の重量増加（一体構造とした場合総重量2700^t）により根固めを施さない場合でも強風時に安定であることなど各種の利点のあることが判り、後で説明するように海中型枠工法も2重壁のものとなり、これを設置型ケーソンと呼ぶこととした。

5. 海中工事に関連した各種技術の進歩とその応用

1) 海中作業足場

移動昇降式海上足場（SEPあるいはSPUD BARGE）と固定式海中足場（JACKET）の2種類のあることは前述したが、これらは基礎本体、作業足場、海底測深、地形精査、精査ボーリング、支持岩盤あるいは海底状況の検査等様々な利用が考えられる。またスパッドとそのジャッキ装置も工事への利用価値があるが、この場合にはジャッキの解放によってスパッドが落下する方式が望ましい。また強潮流、大水深用のSEPとしては傾斜脚を有するものが安定上から有利ではないかと考えられる。

2) 潜水技術

最近の潜水技術の進歩を工事の段階で利用すべきことは勿論であるが、SCUBAダイバーによる作業には潮流下や潜水時間などに限界がある。しかも大水深となると特別の熟練を要する。従ってこれらダイバーの潜水作業を容易かつ安全なものとすると同時に、ダイバーによつてはできないような土木や地質の技術専門家による海底地盤の直接的なインスペクションを可能とするためには、SEP+水中エレベーター+潜水球（耐圧閉塞型と有圧開口型の2種）の組合せを考えこれを海中潜水基地とすることが望まれる。この方式によれば潜水球が単なる水中散歩の道具に留まらないで、所定の地点の海底地盤状況のインスペクションをはじめ、そこでの資料採取を潮流下においても安全正確に行なうことができる。

3) 造船技術

大型ドック設備、大ブロック鉄骨部材の建造技術によつて大型ケーソン、大型海中鉄構の製作が可

表-2 50^m×25^m基礎深度-28^mの場合の潮流力及び波力

段階	橋軸直角方向受圧面積 M ²	潮流力 20 ^m /SEC t	波 力	合 計	ケー
I 設置型 鉄構のみ	1785	590	無風H=0 0 ^t	540 ^t	1
			強風H=1 ^m 36	576	2
			季節風H=3.5 ^m 150	690	3
			暴風H=7.0 ^m 160	700	4
II 型枠工 後	739	320	無風H=0 0	320	5
			強風H=1.0 120	440	6
			季節風H=3.5 ^m 680	1000	7
			暴風H=7.0 ^m 1580	1900	8

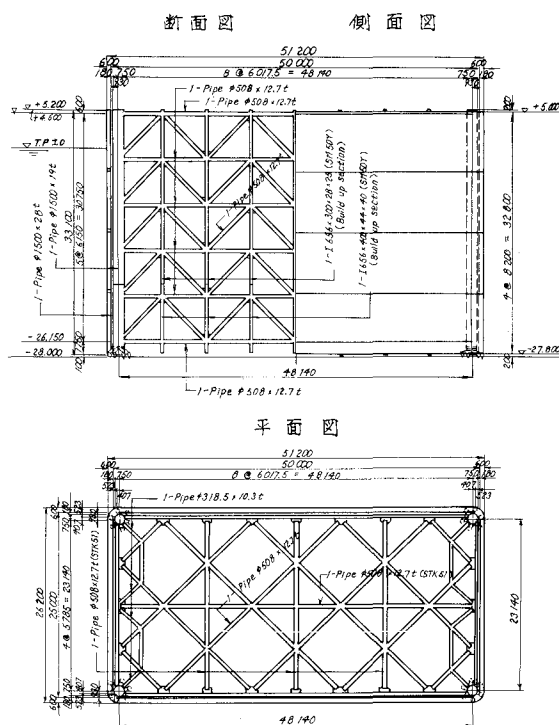


図-6 海中鉄構構造図

能となり急速施工の道が開かれたものと考ええる。

4) 大型クレーン船

大容量、高揚程クレーン船の建造と操船技術の熟練によって大型構造物の移動、設置が可能となり同時に設置精度の向上が期待される。

5) 海底岩盤掘削

大馬力、大水深用カッターポンプ浚渫船、硬土盤用グラブバケット浚渫船の稼動によって海底のオープン面掘削が可能となった。また大口径掘削機の実用機($\phi 3.5^M$)が完成したので、これをSEPに搭載することにより岩盤掘削を精度の高い面掘削に応用することが可能となった。これをさきの浚渫船と組合せれば海底の面掘削を能率的に実施することができる。更に海底岩盤の削孔発破、水中碎岩機も前2者に対して有力な補助手段となる。いずれにしても掘削とずり排出の同時作業を能率的に行なうことが施工上重要なポイントである。

6) 海中コンクリート打設

ここ数年來の大規模実験によってプレパックスドコンクリート工法による大量の海中コンクリート打設方法が確立された。今後は大量急速施工を実施するための大型プラントの実用化や硬化熱対策等に問題がしばられて来た。

7) 計測制御技術

いわゆるエレクトロニクス技術の発展にはめざましいものがあるので、これを工事の実施にあたっての計測や自動制御に応用することが賢明である。海中鉄構やケーソンの設置に関連して考えた場合に、潮流のたるみの約2時間以内に定められた精度で作業を完了させるために、これらの位置計測結果の情報伝達、作業船の誘導指示、作業司令等のリアルタイム化された集中管理方式が可能であろうし、そのためのポータブルな端末機器の開発が望まれるところである。そのほか海中コンクリートプラントの自動化、潜水球の操作や圧力調整の自動制御など応用は多方面に考えられる。

6. 設置型ケーソン工法と作業台付ケーソン工法

1) 設置型ケーソン工法

前述した海中型砕工法の検討結果から、現段階においてDルート of 地質や潮流などの条件に適合していると思われる設置型ケーソン工法についてその概略をのべる。この工法は下に示すような順序で行なわれる(図-7)。

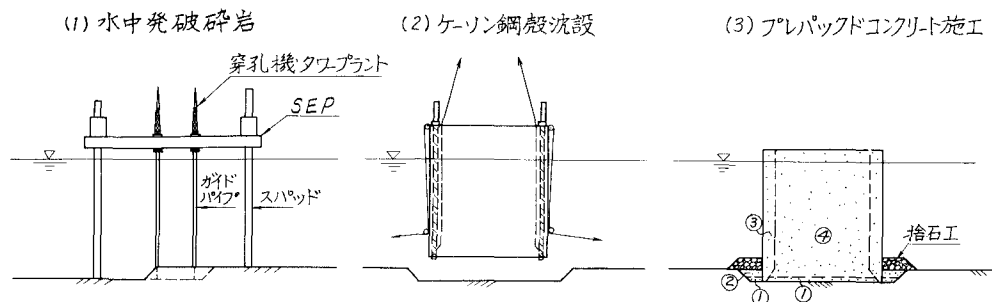
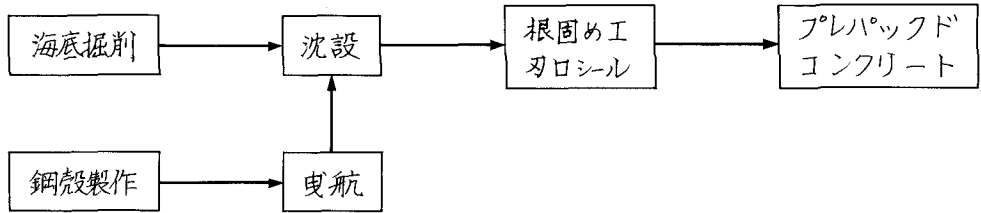


図-7. 設置型ケーソン工法



海底はカッターポンプ浚渫船または大型グラブバケット浚渫船を使用してオープン状態で面掘削し海底表面部土砂及び掘削可能な風化岩を浚渫する。このあと必要に応じてSEP搭載のOD水中削孔機により削孔装薬を行ない、その周囲には気泡カーテンをめぐらして発破を行ない、再びグラブ浚渫船によって破碎岩を浚渫し支持盤まで掘下げる。掘削作業完了後、エヤリフトにより細屑の除去を行ない、SEPによって海底測量及び岩盤検査を行なう。この方式によれば掘削面の仕上げ精度は $\pm 0.5^m$ と予想される。

ケーソンは2重壁構造として浮力利用の曳航を可能とすると共にケーソンのコンクリート打設面積の分割、構造の合理化と剛性が確保をはかる。またケーソンの2重壁内にはスパッド及びジャッキアップ機構を装備し、 1^m 程度の掘付地盤の不陸に対応させる。このケーソンを大型ドックにおいて建造した後、浮揚させ大型クレーン船で吊取りながら現地に曳航する。

橋脚建設地点においては予め設置したアンカーにクレーン船を係留し、計測台によって位置を視準しつつケーソンを誘導する。潮のたるみを待ってケーソンの2重壁内に注水を開始しクレーン船の吊荷重を一定に保ちながら沈降させ、刃口が海底近くに達したときスパッドを降下させ、鋼殻重量をスパッドで支持した後ケーソンを降下着底させる。2重壁内の水位を海水面より高めて荷重を増加させケーソンの自重とによって当面の安定が得られる。

引続いてケーソンの刃口部分にはコンクリート骨材を内部及び外周部に投入し、周囲にはその上に更に骨材防護のため捨石工を施す。内部及び外周に第1段のモルタル注入を施し刃口のシールとする。コンクリートの硬化後強度発現をまってスパッド及びジャッキ装置の撤去を行なってケーソンの安定化が完了する。ケーソン本体のコンクリートの施工はまず2重壁内に碎石を全量填充し、連続してモルタル注入を行ないコンクリートに打継目を作らない。この2重壁内コンクリートの硬化後、ケーソン内部に同様に碎石を投入、モルタル注入してプレパックスコンクリートによって橋脚を完成させる。

2) 作業台付ケーソン工法

支持層の上部に相当な厚さの上置層があってケーソンを沈下させる必要のある海中基礎では、ケーソンの施工箇所のまわりにJACKETを配置しこれによってケーソンを保持させる方法が用いられる。この場合にはケーソンに直接潮流があたり、また沈下途中のケーソンが波浪によって動揺するなど種々の困難のあることが過去の施工例によって知られている。従ってこれらのJACKETにかこまれた水面を静水域とすれば施工の安全性は大いに向上する。

しかし潮流が強く大水深の場合には、海中鉄構自体にかかる潮流圧が大きいため、これを設置する作業やその精度からみてこれだけでも大仕事となる。更に中の大きな壁体であるケーソンにかかる潮

流力をも受持たなければならないから、海中鉄構が益々大型となつてしまい仮設的なものだけに巨額の工費と長い工期をかけることがよいかどうか問題が残る。このような場合には潮流力を減少させることをまず考えなければならないわけで、このためには潮流方向に対して流線形である船形の支持体とするしかないと考えられる。しかも潮流力に抵抗するのに海中鉄構の根固めパイル方式に頼れば十分な安定を得るのにかなりの時間を要する。この時間を節約することと、船形である支持作業台の特長を生かしこの船底と海底地盤との摩擦力に頼ることを考えたわけである。

このような施工法は船形の作業台とケーソンとを組合せたものであるので作業台付ケーソン工法と呼ぶこととする。この施工法の概略をのべると(図-8)

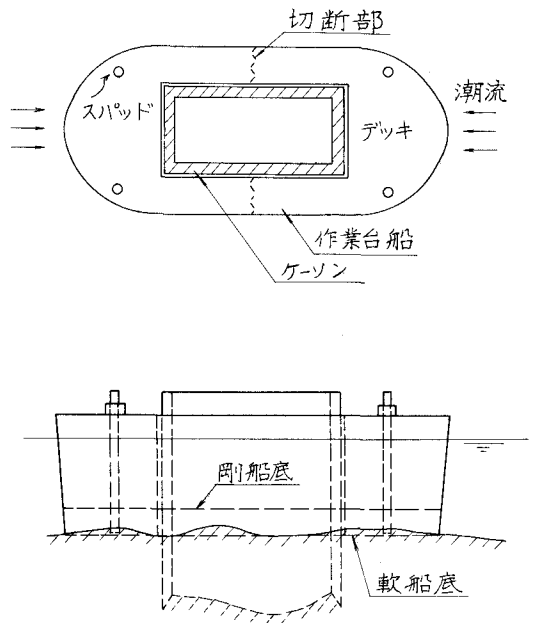


図-8 作業台付ケーソン工法

i) 沈下すべきケーソンを収容する開口を船体中央部に存する平底の船形の作業台を建造する。その2重構造の船底は変形を可能とするよう可撓性の部材と外板で構成し水密を必要としない。この作業台船を橋脚位置に曳航し船首船尾を潮流方向に向けてアンカーに係留する。潮のたるみを利用してケーソン位置を計測して設置型ケーソン工法の場合と同様に船体の各區画に注水して沈設する。この際スパッド装置がガイドとして有効に働く。注水重量と船体重量により軟い船底部は海底地盤の形状に応じて変形し摩擦抵抗を生ずる。また埋設アンカーを、船体内に予め設けた鉛直孔を通して施工し、PSすることにより船体と地盤に締着することも可能であるので補助的に用いて安定を増大させる。

ii) 開口部においてケーソンの沈下作業を行なう。このケーソンは作業台船内のかこまれた静水域内で施工するものであるから、橋脚寸法の隔壁のない単一の浚渫井をもつものとし、大きなグラブバケット等を用いたオープン掘削が可能ようにする。沈降力の不足があれば作業台の重量を利用してジャッキダウンして所定の地盤まで下げる。

iii) 所定の沈下を達成したらケーソン内部に区画を設けて海中コンクリートを分割打設して基礎を完成させる。この後作業台船の中央部を鉛直に切断し船体内部の排水を行なって浮上させ、それぞれ橋脚から引離して曳航撤去する。

7. まとめ

1) 海中基礎施工法の基本的構想

急速施工を主眼とする。これは海象・気象による影響を最少限とし施工の安定性を確保する第1の

要点である。このためには大量施工を可能とする能率の高いオープン掘削、基礎躯体の大ブロッツ建造・設置、プレパックドコンクリートの連ぞく打設を伴うものであるが、これらは最近の技術進歩を以てすれば決して難事ではないと考えられる。海上にあることによる特異な点を、不利となる要素についてはこれをできるだけ回避し、その利点を最大限に利用することに盡きる。

第2の要点はこのような施工法を考慮する場合に良質の基礎、工期の短縮を重点とし工事に用いるSEP等は将来の海洋開発の足がかりを考え技術発展の方向に沿うものは積極的に建造を推進すべきものとする。

2) 大型構造物設置作業時の要件

- i) 潮流の小さい時期及び施工に適した時間を選定する
- ii) 海象・気象の予測を行ない施工時期の選定を誤らない
- iii) 測量精度の向上と設置作業の熟練により設置精度を高める
- iv) 情報・指令の伝達方法のシステム化をはかる。