

52. GPS による地盤改良船位置決めシステム

不動建設(株)：川上 高弘
フドウ技研(株)：*出口 敏博, 石田 修

1. はじめに

GPS (Global Positioning System)による建設機械の位置決め、浚渫船・測量船の位置決めについての実験報告は多数発表されているが、実工事に適用した例は少ない。

当社は地盤改良のパイオニアとして、いち早くGPSの特長に目をつけ平成3年頃から地盤改良船の位置決めに応用できないかと調査・基礎実験を繰り返してきた。

最近GPSの技術が飛躍的に向上したのを受け、システムとして完成させ現場テストを経て本工事に導入した。

特に、障害物による捕捉衛星数不足による測位不能状況が操船作業に及ぼす影響を調査し、さらに調査データからジャイロ支援システムの付加による効果も予測したので報告する。

2. 海上の地盤改良工法(サンドコンパクションパイル工法)

サンドコンパクションパイル工法は振動機によって中空鋼管を地中に打ち込み、この中空鋼管を通して砂を地盤中に排出し、拡張することで、よく締まった砂杭を地中に造成し海底軟弱地盤の安定をはかるものである。

サンドコンパクションパイル(SCP)工法の施工手順を図-1に示す。

①作業船を打設位置へ移動し、固定する。改良材としての砂を中空鋼管(ケーシングパイプ)内に投入後、貫入工程に入る。

②所定深度まで貫入したら造成工程に入る。

③砂杭造成工程では、ケーシングパイプを引き上げながら管内の砂を強制排出する。

④続いてケーシングパイプを再貫入しながら排出した砂を圧入し、地盤中に締め固まった砂杭を造成する。途中で安定材(砂)を補給し、③、④を繰り返しながら砂杭を造成する。

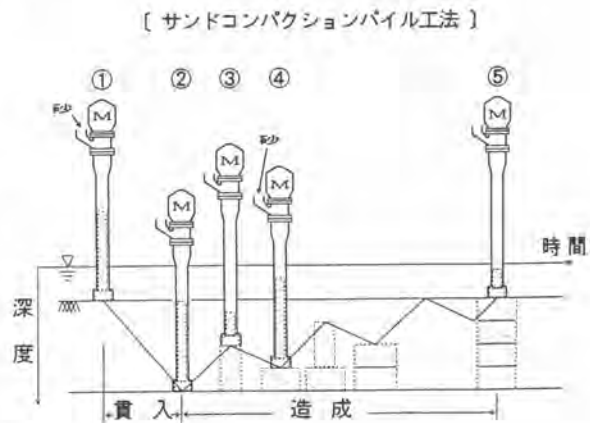


図-1 施工手順

⑤造成完了後、つぎの打設位置へ作業船を移動する。

上記工程に示した作業船の打設位置への移動に際して、従来から光波測位システムを使用しているが、雨・霧などの悪天候には追従機能が動作しなかったり、可動部の故障が多い事から、天候に左右されづ軽量で耐久性に富むGPSを利用したシステムの開発を行った。

3. GPSによる作業船位置決めシステム

GPSとは人工衛星を使った測位システムである。24個のGPS衛星が地球の重心位置を中心に地表から約2万km上空を約12時間で1周する速さで回っている。図-2にGPS衛星の軌道を示す。図-3にGPSの測位原理を示す。GPS衛星を既知点として地球上の位置を求める測位方法で4衛星の電波を受信して衛星からの距離を求め、地上での位置を決定する。

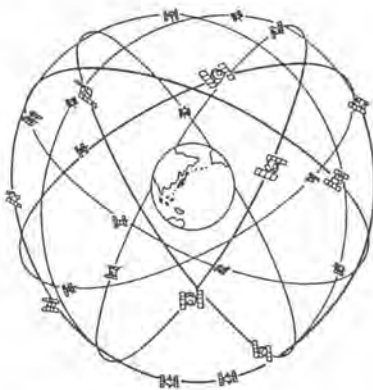


図-2 GPS衛星の軌道

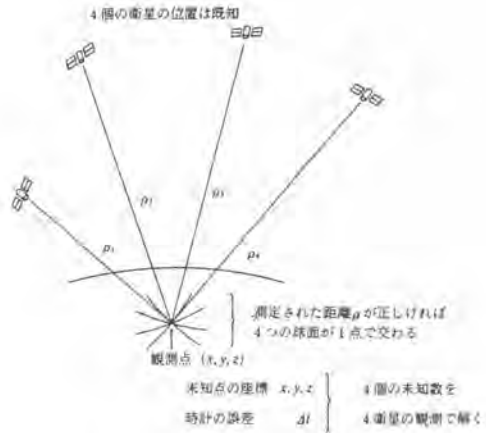


図-3 GPSの測位原理

作業船位置決めシステムのGPS配置を図-4に示す。固定局にGPSを1台、移動局(船上)にGPSを2台設置する。

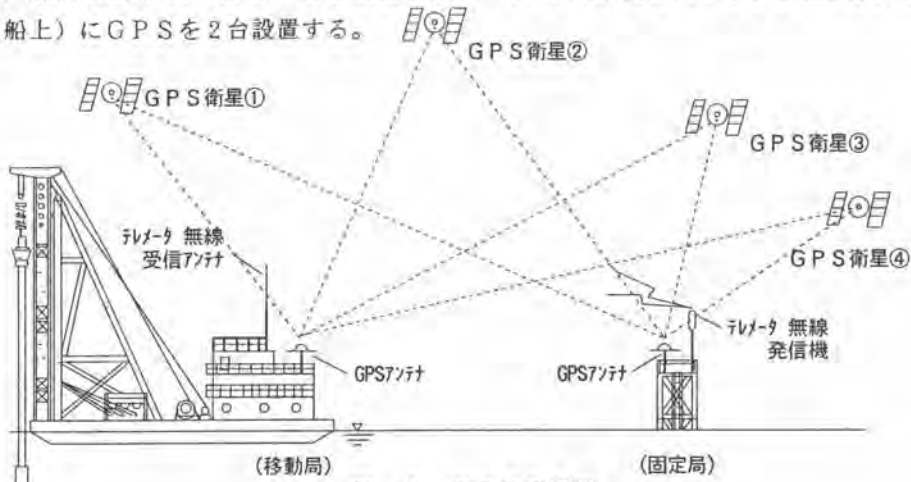


図-4 GPSの配置

工事エリアから4 km以内（使用テレメータの安定到達距離）の周囲が開けた既知点に固定局GPSを設置する。固定局には、誤差情報を送信するテレメータ無線発信機とバッテリーとソーラ発電機が付属設備されている。図-5に固定局の機器構成を示す。移動局アンテナは作業船上後部の障害物が少ない場所、2箇所に配置する。さらに、テレメータ無線アンテナと受信機を操船室屋上に設置する。図-6に移動局の機器構成を示す。

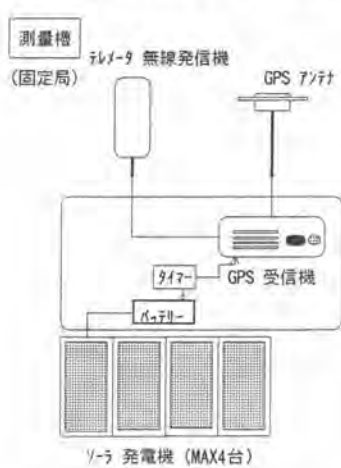


図-5 固定局の機器構成

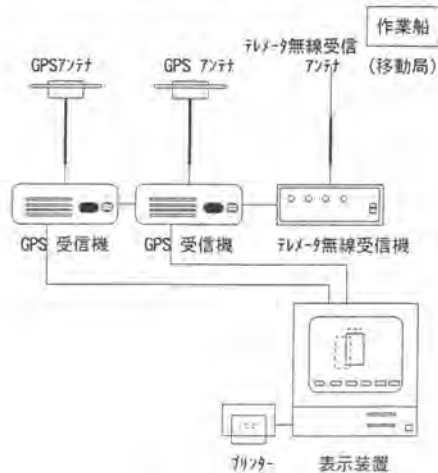


図-6 移動局の機器構成

固定局からの誤差情報をテレメータ無線で受信して、移動局GPS内で補正し移動局アンテナ座標を1秒毎に求める。移動局アンテナ座標は固定局アンテナ座標を基準として、 $\pm(1\text{cm} + 2\text{ppm}D)$ の精度で求まる。（但し、D：固定～移動局アンテナ間距離）船上2箇所のGPSアンテナの位置が求まると、図-7のGPSアンテナとケーシングとの位置関係からケーシングの座標が求まる。

杭の座標は、設計上決まっているのでケーシングの座標と目標杭座標のズレ量を計算・表示する。図-8に表示画面を示す。

4. 測位状況調査

障害物の少ない海上においては24時間切れ目無く測位出来る。

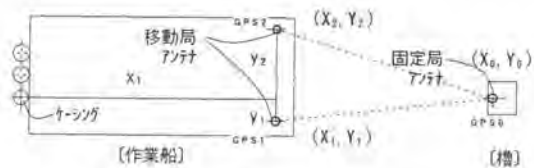


図-7 GPSアンテナとケーシング位置

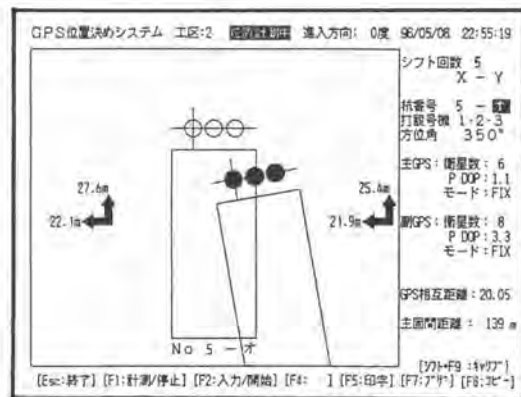


図-8 表示画面

しかし、地盤改良船（写真-1）のように、前面部に高い構造物を有していると、天空から衛星電波が遮られ測位不能状況が発生し、操船作業に支障を来す懸念がある。

そこで、東京湾内の当社船第31不動号にGPSシステムを搭載して、GPSの測位状況を3日間にわたり調査した。内容は、作業船上の2基のGPSを主と副と定め、主・副各々の測位状態（測位中・測位不能中）を10秒間隔で収録した。2基のGPSの内、1基でも測位不能になると方向がわからなくなりシステムが測位不能状態になる。

システムの測位不能時間を秒単位で調査し、測位不能原因がGPSの主か副かを明らかにした。調査結果例（3月19日分）を表-1に示す。表-1から、作業開始の6時41分から17時42分の作業終了までの約11時間の内、測位不能回数が26回、測位不能時間が68分であることが判る。同様に3月20日、3月21日について、回数と時間をまとめたものを表-2に示す。



写真-1 地盤改良船

表-1 測位不能時間調査結果（3月19日）

時	分	秒	不能時間	測位不能GPS	測位不能NO	時	分	秒	不能時間	測位不能GPS	測位不能NO
6	42	46	56	11	主	13	20	07	30	副	13
			3	21	主						
7	8	8	27	57	副		40	37	40	主	13
			0	30	副						
	9	10	07	47	副		49	17	07	主	13
			1	30	副						
8	40	41	57	37	副	14	25	47	30	副	13
			0	40	副						
	42	43	57	37	副		26	50	57	3	50
			0	40	副						
9	8	10	27	07	副		36	38	37	2	00
			1	40	副						
10	57	58	37	27	副		55	55	27	0	20
			0	50	副						
11	2	3	17	27	主		55	58	47	2	50
			0	50	主						
12	3	6	27	37	主	15	5	21	47	16	00
			3	10	主						
	12	13	07	27	主	17	9	16	37	7	10
			1	20	主						
	30	32	37	27	主		20	21	17	1	30
			1	50	主						
	33	38	47	07	主		20	50	17	1	00
			4	20	主						
13	8	18	37	27	副		38	39	17	1	00
			9	50	副						
作業開始 6:41:19 ~ 作業終了 17:42:57						合計 68分41秒					

5. 調査結果とシミュレーション

測位状況のまとめ（表-2）から測位不能回数21～34回、測位不能時間55～85分程度であることが判る。

砂杭造成完了から次の打設位置に移動する時に測位不能状態になると操船が出来なくなり作業が停止する。通常、1回の操船時間は2～3分とわずかであり、砂杭造成時間は施工長により変化する。南本牧の実績から施工砂杭長と造成時間を表-3のように3区分することができる。そこで、造成時間の3タイプについてGPS測位不能時間帯と操船時間帯が合致する回数と停止時間をシミュレーションにより求める。但し、操船時間を2～3分の範囲でランダムに決定し、造成時間も各タイプの10分間の範囲でランダムに決定す

表-2 測位状況のまとめ

項目	作業時間	測位不能回数	測位不能時間
3月19日	11時間01分	26回	68分41秒
3月20日	11時間09分	21回	55分20秒
3月21日	11時間14分	34回	85分25秒

表-3 施工砂杭長と造成時間

施工深度YP	50m	55m	60m
砂杭長	10m	15m	20m
造成時間	20～30分	30～40分	40～50分

る。表-4に3月19日、20日、21日のGPSデータを使用して3つの造成時間パターンについてシミュレートした時の操船停止回数と合計停止時間（100回の平均）を示す。結果、造成時間が短くなるほど1日の移動回数が増え、停止回数・時間とも増加する。2~6

表-4 シミュレーション結果

GPSデータ	作業開始時間 } 作業終了時間	作業時間パターン		操船停止回数		合計停止時間 平均値 (100回)
		操船時間	造成時間	1日操船回数		
3/19	6:41:19 } 17:42:57	2~3分	20~30分 30~40分 40~50分	5回/23回 4回/17回 3回/13回	23分 17分 13分	
3/20	6:47:09 } 17:56:29	2~3分	20~30分 30~40分 40~50分	4回/23回 3回/17回 2回/13回	15分 12分 4分	
3/21	6:39:21 } 17:53:01	2~3分	20~30分 30~40分 40~50分	6回/23回 5回/17回 4回/13回	25分 18分 18分	

操船時間・造成時間は~範囲でランダムに決定

回の停止回数で4~25分の停止時間となることが判る。

この停止回数・時間をさらに短縮させるために、主・副どちらかのGPSが測位不能になった場合でも、操船可能なようにジャイロを用いることにした。それを以下に述べる。

6. ジャイロ支援システム

GPSシステムは主・副2セットのGPSにより作業船の位置と方向を求めている。主副GPSが共に測位状態で、はじめてシステムは動作する。しかし、主・副のどちらかが測位しなければ、他の手段で作業船の方向を検知すればGPSシステムを短期的にサポートすることができる。そこで、変化角度を精度よく検出する光ファイバジャイロを活用して支援システムを構築する。光ファイバジャイロの角度検出精度は0.01度以下であり、GPSによる検出精度0.04度(2/3000)を上回っているため精度的には問題ない。図-9にケーシング位置とGPSの関係を示す。作業船前方に配置したケーシングの位置は、主GPSの座標と主・副間GPS基線の方向角(北を基準とした回転角)と主GPSからの距離で求まる。ケーシング1号機の座標 (X_s, Y_s) は式①②で表される。 (X_1, Y_1) 、 α はGPSで求められ、 ℓ 、 θ は作業船上での実測値であることから、式①、②でケーシング1号機の座標が判る。

$$X_s = X_1 + \ell \cos(\alpha - \theta) \quad \text{--- ①}$$

$$Y_s = Y_1 + \ell \sin(\alpha - \theta) \quad \text{--- ②}$$

$$(\tan \alpha = Y_2 - Y_1 / X_2 - X_1)$$

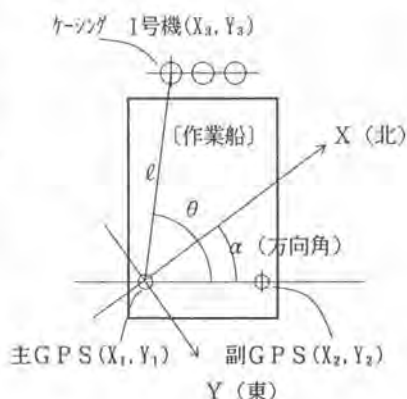


図-9 ケーシング位置とGPSの関係

今、副GPSが測位不能になると方向角 α が判らなくなりシステムとして動作しなくなる。そこで、副GPSが測位不能になった時から、GPSで求めていた方位角 α からの変化角をジャイロが継続して検出することでシステムは支障なく動作させることができる。これがジャイロ支援システムである。主GPSが測位不能になっても、副GPSを基準に

した計算方式を用いれば支援システムは動作する。

7. ジャイロ支援システムによる改善効果予測

ジャイロ支援システムを付加した場合の操船停止回数、停止時間をシミュレーションにより求める。GPSデータは3月19日、20日、21日分を用いる。表-1（測位不能時間調査結果）の測位不能GPSの項目を見ると、主と副が同時に測位不能状態になっている場合は少ない。ジャイロ支援システムを付加すると、ほとんどの時間帯で作業船位置位置決めシステムが動作することが判る。

表-5 シミュレーション結果
（ジャイロ支援システムを付加した場合）

3月19日、20日、21日分のGPSデータを用いて、主と副が同時に測位不能の時間帯に操船作業が何回重なり何分停止するかを100回のシミュレーションを行って求めた。その結果を表-5に示す。3月19日、20日については、ほとんど操船停止は発生しない。3月21日は操船停止が1回で最大7分程度の停止時間があることが判る。

GPSデータ	作業時間パターン		操船停止回数 / 1日操船回数	合計停止時間 平均値 (100回)
	操船時間	造成時間		
3/19	2~3分	20~30分	0回 / 23回	0分
		30~40分	0回 / 17回	0分
		40~50分	0回 / 13回	0分
3/20	2~3分	20~30分	0回 / 23回	0分
		30~40分	0回 / 17回	0分
		40~50分	0回 / 13回	0分
3/21	2~3分	20~30分	1回 / 23回	7分
		30~40分	1回 / 17回	5分
		40~50分	1回 / 13回	3分

操船時間・造成時間は～範囲でランダムに決定

8. あとがき

海上CP船は、障害物が多くGPS衛星の電波を遮る状況が多く発生するとの懸念があった。南本牧の第31不動号で調査したGPSシステムの測位不能時間データを用いてシミュレーションした結果、操船時間帯と重なる確率が高いものの1日の作業時間（約11時間）に対してわずかに4~25分の停止時間に収まることが判った。通常の現場ではGPSシステムで十分に対応できるものと思われる。

作業船が輻輳してGPSの電波が遮られ、頻繁にGPSシステムの測位不能が発生する場合は、ジャイロ支援システムを付加することで操船停止回数・停止時間が大幅に減少することも確認した。

すでに、当社では全ての地盤改良船にGPSシステムを搭載する計画で、96.7 現在11隻に搭載している。今後は、引き続き稼働データの集積、分析を行い、さらに稼働率アップへ向けてシステムの安定化を図っていく所存である。

参考文献

- (1) (株)日本建設機械化協会「建設機械と施工法シンポジウム」論文集 1996.10
- (2) (株)日本測量協会「やさしいGPS測量」