

磁気伝送による埋立地盤沈下計測システム

A NEW SYSTEM OF RECLAIMED LAND SETTLEMENT OBSERVATION BY MAGNET ELECTRONIC FLUX

木原 力¹・沖 政和²・大前 延夫²

Tsutomu KIHARA, Masakazu OKI and Nobuo OMAE

¹正会員 工博 株式会社 間組 営業第一本部(107-8658 東京都港区北青山 2-5-8)

²正会員 株式会社 間組 淡路島出張所(656-2212 兵庫県津名郡津名町佐野 1970-1)

Coastal areas in Japan have often been reclaimed for procuring new lands of industrial, agricultural as well as urban areas. In order to construct the new lands economically, it is always necessary to observe the settlement of the reclaimed land during and after construction. It is commonly used for settlement observation such systems as some electronic devices consist of pickups and cables or optical measuring method by use of a supporting tower. These conventional system also bring many troubles and accidents through backfill or reclamation works due to cable cutting and tower collision. Now we have developed a quite new system with magnet electronics. The magnet electronic flux can transmit signals through the soil and the water. The data on land settlement being transmitted by magnetic flux signal are easily received without cables by a receiver loaded on a boat.

Key Words : reclamation, settlement observation, magnet electronic flux, wire less system

1. まえがき

国土の狭いわが国では、空港、発電所などの敷地を確保するために、海上を埋め立てる場合が多くなっている。その際、埋立土砂の荷重により海底地盤が大きく沈下する場合が多く、地盤の不同沈下の抑制、軟弱地盤の圧密強度増加確認などのため、建設中や建設後の埋立地盤の沈下量を把握することが重要である。

海上埋立工事の沈下計測には、沈下板測量、沈下計測センサーと伝送ケーブルによる方法が一般に使われているが、前者は海上に突出し(または海面下にある場合でも)、作業船の障害となるなど海上工事の作業性に問題があり、後者は作業船の係留作業時や地盤の不同沈下によりケーブルが断線

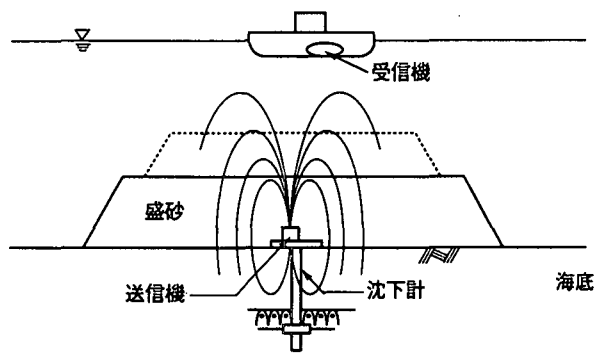
するなど、沈下計測作業の信頼性に問題があった。本システムはケーブルを使わず、また海上あるいは海面下に突出せず、沈下量等のデータを低周波電磁波(磁気)を用いて無線デジタル伝送するもので、従来の沈下計測の問題点を解決したシステムである。磁気は、表-1に示すように他の無線方式に比べ、海水中、盛土中での減衰が小さいことが特徴である。ここでは、本システムの基本性能に関する基礎実験、実際の埋立工事における長期確認実験、護岸工事における本システムの設置と沈下計測状況について述べる。

2. 磁気伝送システムの概要

本システムは、埋立工事に伴う地盤の沈下量など

表－1 無線方式の比較

無線方式	特 徴	適用性
電波	一般に10kHz以上の電磁波をさし、特に海水中の減衰が大きい	△
光	埋立に伴う海水汚濁による減衰が大きい 投光部が埋まらないよう盛替作業が必要	△
超音波	海中では減衰が少ないが、盛土中では減衰が大きい	△
磁気	一般に10kHz未満の電磁波をさし、海水中盛土中とも他方式より減衰が少ない	○



図－1 磁気伝送システムの概念図

を計測し、無線伝送によりデータ収集を行うことを特徴としたシステムである。本システムは、沈下計測センサ、データ送信機、データ受信機、データ処理装置で構成される。沈下計測センサで計測したデータを、あらかじめ設定した時刻に、海底から海面に向けて磁気伝送方式（減衰が小さい数 kHz の低周波数帯を使用）により、無線デジタル伝送し、海面付近でデータを受信する（図－1 参照）。データ送信機には、データストック機能（最大で過去 90 回分）があるため、時々データ回収を行うことで連続した沈下データを得ることが可能である。

本システムの特徴は、以下に示すとおりである。

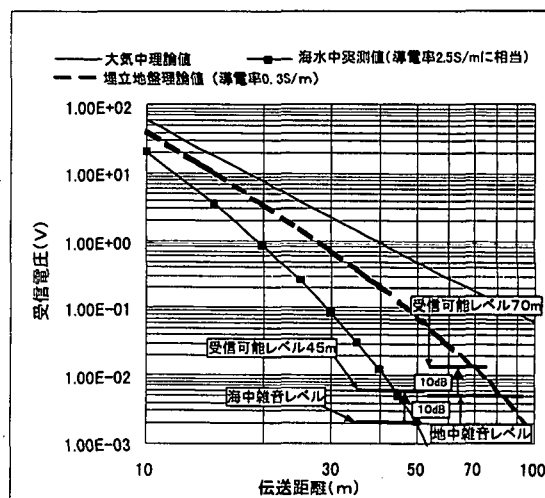
- ① 伝送用ケーブルの断線事故が防止できるため、データ収集の信頼性が高い。
- ② 海面上（または海面下）に突出するものがないため、作業船の航行および作業の支障にならない。水中での伝送可能距離は、45m（土中ではさらに長い）で、大水深の埋立工事にも適用可能である。
- ③ 電源は、送信機に組込まれたリチウム電池であり、データ取得頻度、送信頻度を調整することで、10年以上の長期にわたる沈下計測も可能である。
- ④ 他のセンサ（土圧計、傾斜計、間隙水圧計など）との組合せによる計測も可能である。

また、従来の沈下計測方法との比較を、表－2、表－3に示す。

3. 基本性能に関する基礎実験

磁気伝送システムの実用化に向け重要な要素は、

- ① 受信可能な伝送距離とデータの信頼性の検証



図－2 伝送距離の測定結果

② 磁気伝送送信機に内蔵する電池の寿命の検証などである。これらを検証するために、以下に示す基礎実験を行った。

(1) 伝送媒質と伝送距離

船上より海中に送信機を吊り下げ、海面においた受信機との距離を変えながら、受信電圧を測定した。測定結果は、図－2に示すとおりで海中伝送においては、45mまでの伝送が可能であることを確認した。この時、海中雑音レベルはおおよそ2mVで、受信電圧と雑音の比であるS/Nはおおよそ10dBである。この実験での送信距離と受信電圧の関係から、海中での導電率を逆算すると、2.5S(ジーメンズ)/mとなり、一般に言われている値(4S/m)より小さい値となった。

一方、埋立地盤中の導電率の測定結果はないため、室内試験を行い測定した導電率(≒0.3S/m)を基に、土中での送信距離と受信電圧の関係を求めた。土中では伝送媒質の導電率が海水より低くなるため、同じ送信距離の場合、受信電圧は大きくなる。陸上での雑音レベルは海中でのそれより大きい(後述する埋立工事での実測は、約5mV)が、海中の場合と同程度のS/Nを確保した場合、さらに伝送可能距離が増し、70m程度に達することが判明した。これらのことから大水深の埋立工事の沈下計測にも適用可能であることがわかった。

(2) 送信機の傾斜角と伝送距離

海底に設置された送信機(コイル)は、その後の埋立(土砂直投)工事中に周辺地盤の変形に伴い傾く可能性がある。そのため、送信機(コイル)の傾斜角度と受信電圧の関係を実験した。

送信コイルを水平に置き、その直上に受信コイルを水平において測定した受信電圧を1とし、送信コイルをθ度傾けた時の相対受信電圧を測定した結果を、図－3に示す。相対受信電圧は、θが大きくなるほど小さくなり、θ=90度の時、相対受信電圧は、理論値で0、実測値でも0.2以下となる。次に送信コイ

表-2 従来の沈下計測方法との比較（沈下板との比較）

	沈下板、CB沈下板	水圧式沈下計＋磁気伝送システム
説明図		
システムの信頼性	作業船の衝突などによる破損の可能性がある。 △	ケーブルを使用せず断線事故が発生しないため信頼性が高い。 ○
計測の作業性	- 毎回測量が必要になる。 - 埋立の進捗に合わせてパイプを継ぎ足す必要がある。 △	現地でのデータ回収が必要であるが、過去90回分のデータがストックできるため、データ回収の頻度が少ない。 ○
護岸、埋立工事に及ぼす影響	- 海面に突出するため、作業船舶の航行および作業の障害となる。 - 沈下板設置場所周辺の施工は、慎重に行う必要があり、底開式土運船による直投でなく、ガット船での施工となるため施工性がやや悪くなる。 △	- 沈下計、送信機の養生を適切に行った後は、盛立埋立作業への影響はない。 - 埋設計器の直上でも底開式土運船での直投施工が可能で施工性がよい。 - 沈下板よりコンパクトで、埋立後の建設工事（杭打工事など）の障害とならない。 ○
コスト	- 製作、設置費は、設置水深とともに増大する。 - 破損の補修、パイプの継ぎ足しなどのメンテナンス費が必要となる。 - 毎回測量が必要でデータ回収費が割高となる。 △	- 製作、設置費は、水深に関係なくほぼ一定である。 - メンテナンス費は不要。 - データ回収費は小さい（回収頻度が小さいため）。 ○
総合評価	△	○

表-3 従来の沈下計測方法との比較（伝送ケーブルとの比較）

	伝送ケーブル方式	磁気伝送システム
説明図		
システムの信頼性	作業船のアンカリング、地盤の不等沈下が原因の断線事故の可能性がある。 ×	ケーブルを使用せず断線事故が発生しないため信頼性が高い。 ○
計測の作業性	自動的に測定、データ送信が可能である。 ○	現地でのデータ回収が必要であるが、過去90回分のデータがストックできるため、データ回収の頻度は少ない。 △
護岸、埋立工事に及ぼす影響	- 伝送ケーブル全長の養生が必要である。 - 作業船舶のアンカリングに制約が出る可能性がある。 - データ収録、送信用のヤグラを設ける場合、その設置箇所が多くなると、作業船舶の航行の障害となる場合がある。 - 養生後は底開式土運船での直投施工が可能。 △	- 沈下計、送信機の養生を適切に行った後は、盛立埋立作業への影響はない。 - 埋設計器の直上でも底開式土運船での直投施工が可能で施工性がよい。 - 沈下板よりコンパクトで、埋立後の建設工事（杭打工事など）の障害とならない。 ○
コスト	- 製作、設置費は、離岸距離（ケーブル延長）とともに増大する。または、計測ヤグラの有無により変化する。 - メンテナンス費、データ回収費は小さい。	- 製作、設置費は、離岸距離に関係なくほぼ一定。 - メンテナンス費は不要。 - データ回収費は小さい（回収頻度が小さいため）。
総合評価	△	○

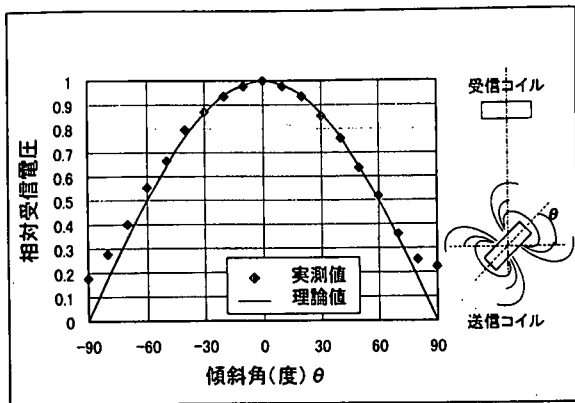


図-3 送信機の傾斜角度と受信電圧(その1)

ルを鉛直($\theta = 90$ 度)に置き、受信コイルを水平から β 度傾けた時の相対受信電圧を測定した結果を図-4 に示す。相対受信電圧は、 β を大きくすることで大きくなり、 $\beta = 90$ 度の時、理論値、実測値とも最大となる。これは、送信コイルが設置後仮に大きく傾いた場合でも、その傾きに応じて受信コイルを傾ければ(あるいは2つの受信コイルを直交させて受信すれば)、相対受信電圧を大きくできることを示している。

相対受信電圧 0.5 を受信可能距離に換算すると、相対受信電圧 1 の時の約 80%に相当(相対受信電圧は距離の3乗に反比例)する。前述のように、海中での伝送可能距離を 45m とすると、最悪でも 36m の伝送が可能となり、実用上問題ないと思われる。

(3) 電源用電池の寿命

送信機の電源用電池(リチウム電池)の寿命を確認するために、海中および気中で長期実験を行った。設計寿命を3年とした試作品を作成し、水深約20mの海底で1年5ヶ月放置し、その後気中で放置した結果、海底設置より3年6ヶ月後に作動停止を確認した。この結果、当初懸念されていたリチウム電池の自己放電は小さいことが判明し、リチウム電池の性能と設計方法の妥当性が検証できた。

4. 実際の埋立工事における長期確認実験

この確認実験は、伝送媒体として磁気を使う本システム(坂田電機が開発)の有効性に着目し、実際の埋立現場でどの程度長期間に亘って使えるものかを確認するために行った。火力発電所敷地造成工事において、層別沈下計に磁気伝送システム(送信機)を接続して埋設し、1996年6月より、約480日間の長期実験を行った(既発表の論文¹⁾では約200日間の結果を報告)。その結果、実現場での使用に耐えうることを初めて確認できた。

(1) 実験概要

敷砂、サンドドレーン、掘削ブリ施工後、水深約4mの海底に本システムを設置した。その設置断

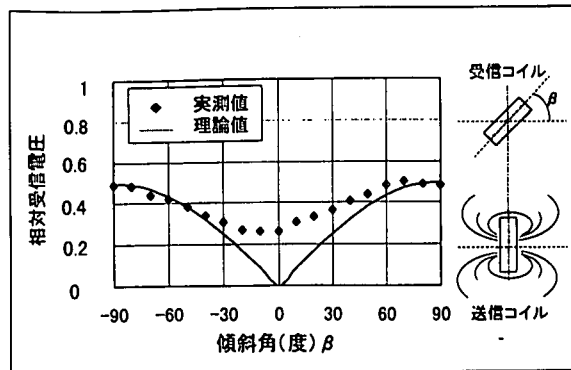


図-4 送信機の傾斜角度と受信電圧(その2)

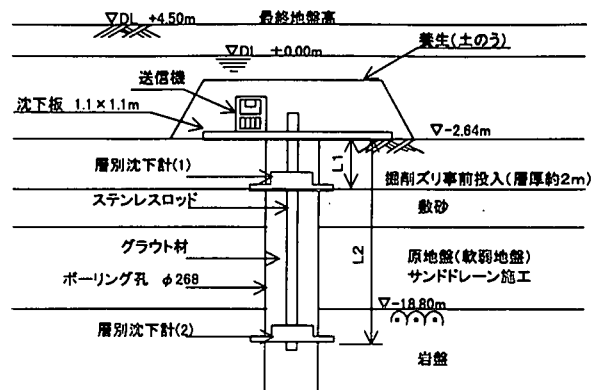


図-5 沈下計設置断面図

表-4 層別沈下計および磁気伝送システムの仕様

機器名	項目	仕様
層別沈下計	方式	摺動抵抗式
	測定範囲	無制限(1サイクル10、100cm切替え)
送信機	非直線性	1.0%F. S. 以内
	通信速度	75bps
	電源	リチウムバッテリー 45Ah
	バッテリー耐用年数	2年
	計測頻度	2回/日(設置前に設定可能)
	データ送信頻度	2回/日(設置前に設定可能)
受信機	送信データ数	過去90データ(45日分)
	電源	DC12V, 1.9Ah
	インターフェース	RS-232C
コンピュータ	機種	PC-9801
	CPU	i 486DX2

面を図-5に示す。まず、海上の作業足場からポーリングを行い、岩盤内に層別沈下計(2)を固定し不動点とした。また掘削ブリ層と敷砂層の境界付近に層別沈下計(1)を固定し、掘削ブリ層の上に沈下板を設置した。データ送信機は沈下板の上に固定し、今後の埋立作業時に衝撃的な力が機器に作用しないように土壌で養生を行った。このシステムでは、埋立土砂の荷重により、沈下板が沈下する時、沈下板と固定されたステンレスロッドが、それぞれの層別沈下計の中を下降していくため、沈下板とそれぞれの層別沈下計の距離 L_1 、 L_2 の変化(沈下量)を測定することができる。また、 L_1 、 L_2 の差から原地盤(軟弱地盤)の沈下量を求めることもできる。設置した層別沈下計および磁気伝送システムの仕様を、表-4に示す。機器設置後、ダンプトラック、ブルドーザを用いた陸上からの片押しで埋立工事を進め、所定の地盤高まで盛り立て

表-5 受信電圧の理論値と実測値

伝送媒質	伝送距離 (m)	受信電圧(Vpp)	
		実測値	理論値
海水	3.8	133	272
埋立地盤	7.9	39	34
	8.6	24	26

注) 理論値における海水の導電率は 2.5S/m 、
埋立地盤の導電率は 0.3S/m と仮定した

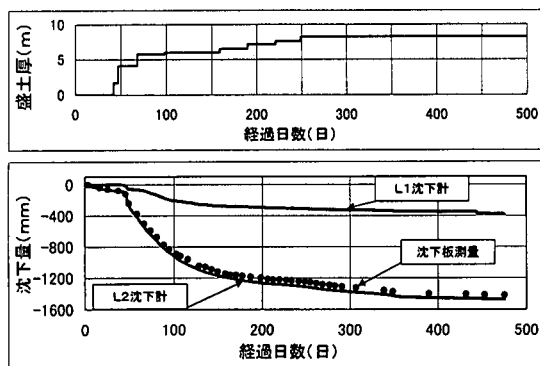


図-6 沈下曲線

を行った。今回の実験では、測定頻度およびデータ伝送頻度を1日2回に設定した。データ回収は、約1ヶ月毎とし、海上の場合には小型船上から、陸地となった後は地面に直接受信機をおいてデータ回収を行った。データ送信機のバッテリー容量は、2年間分とし、沈下計測を行う予定であったが、設置地点の用途変更で構造物を構築することになったため、約480日後に沈下計測を終了させた。

(2) 実験結果および考察

a) 設置性・運用性

今回の設置作業時間の大半はボーリング作業が占め、沈下板、送信機の設置に関わる時間は、短時間であった。今回は伝送距離が比較的小さいため受信電圧も強く、海上、陸上とも容易にデータ回収を行うことができた。また、送信開始時刻の6ヶ月間のズレの実測値は、-2分20秒で、時計精度 -1.5×10^{-5} となり、目標精度($\pm 5 \times 10^{-5}$)を十分満足した。

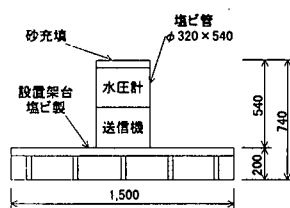
b) 機器の耐久性

送信機に最も衝撃が加えられる可能性のある直上の盛立て(機器設置から45日後)を無事通過し、さらに250日後に埋立工事を終了した。前述したように、設置地点の用途変更で計測期間の短縮を余儀なくされたが、約480日間の計測で、実工事における本システムの耐久性が確認できた。

c) 伝送媒質と受信電圧の関係

磁気は伝送媒質(空気、水、土)中の電気的特性により、受信電圧減衰の程度が大きく異なる。表-5に受信電圧の実測値と理論値を示す。媒質が海水の場合、実測値の方が受信電圧は小さいが、これはボート上から受信信号の最大点をねらった測定で、位置ズレによる受信電圧低下の可能性がある(ちなみに直上より2.7

断面図



平面図

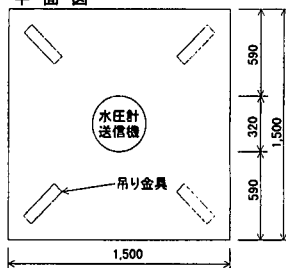


図-7 海底に設置する機器(水圧式沈下計、送信機)

表-6 水圧式沈下計、磁気伝送システムの仕様

機器名	項目	仕様
水圧式沈下計	方式	レゾナント(シリコン単結晶共振)方式
	測定範囲	0~300kPa
	分解能	0.05kPa(深度換算約5mm)
	通信速度	75bps
送信機	電源	リチウムバッテリー 160Ah
	バッテリー耐用年数	5年
	計測頻度	1回/日(設置前に設定可能)
	データ送信頻度	1回/日(設置前に設定可能)
	送信データ数	過去90データ(90日分)
受信機	電源	DC12V, 1.9Ah
	インターフェース	RS-232C
コンピュータ	機種	DOS-V
	CPU	Pentium 100Mhz以上

mズレれば、理論値も133Vとなる)。一方、媒質が土の場合、直上での受信が可能であるため、両者はおおむね良く一致している。従って受信電圧の設計に理論値を使用しても大きな相違はないと考えられる。

d) 沈下板測量との沈下量比較

沈下曲線を図-6に示す。全沈下量(L2沈下量)は、盛立て終了後(沈下計設置45日後)に急激に大きくなっているが、360日経過した時点でほぼ収束に近づいている。沈下計測終了時点(475日経過後)の全沈下量は、1,474mmである。現場の施工管理用として近傍に設置した沈下板測量の沈下データと比較すると、その差は56mmである。この差の大部分は盛立て直後に発生しており、両者の設置位置が約6m離れており、地盤の層厚や埋立進捗状況が若干異なることを考慮すれば、両者の計測データは妥当であると判断できる。

5. 実際の護岸工事における磁気伝送システムの設置と沈下計測状況

護岸工事において、沈下板に代わる簡便な沈下計測方法として、水圧式沈下計に磁気伝送システムを接続し、海底に設置した後、沈下計測を実施した。

(1) 磁気伝送システムの設置

水圧式沈下計と送信機を塩ビ製容器に格納し、架台と一体化した(図-7参照)後、土嚢で養生した。水圧式沈下計、磁気伝送システムの仕様を表-6に示す。それをクレーン船で水深11~13mの敷砂上の所定位置(3カ所)に吊り降ろし、さらにその周辺にガット船により海砂を投入し、養生した。その後盛砂(層厚約1m)を施工し、さらにその上にフェリー台船で運搬

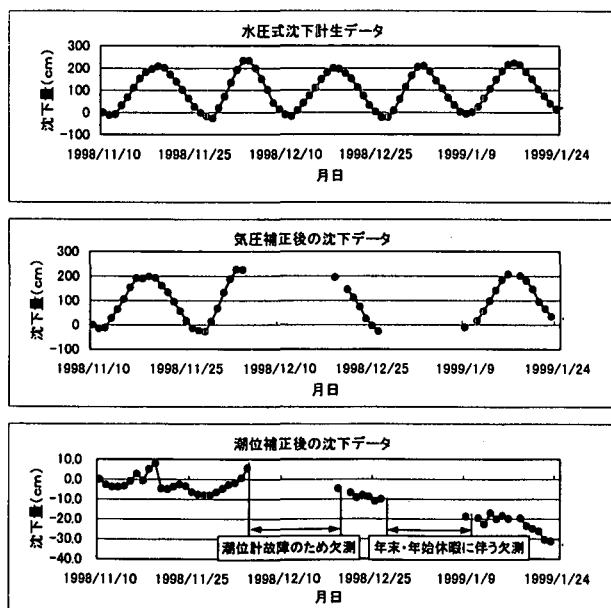


図-8 気圧補正、潮位補正の例

した捨石(5~100kg)をタイヤショベルで投入した。

(2) 沈下データの回収およびデータ補正

沈下データの回収は、2週間~1ヶ月毎に行った。小型船(FRP製)にGPS測位機および磁気伝送受信機を搭載し、GPSで沈下計設置位置直上まで小型船を誘導し、送信予定時刻まで待機した。送信予定時刻前に受信機の電源を入れ、受信コイルを船底においた状態でデータを受信した。1回当たりの受信時間は、約1分間であった。

受信したデータは、潮位変動および気圧変動を含んだ水圧(水深)であるため、潮位補正および気圧補正を行い、沈下量とする必要がある。図-8に水圧式沈下計の生データから気圧補正、潮位補正を行い沈下量を算出した例を示す。

(3) 測定結果および考察

沈下計設置から109日(C地点は102日)経過後までの盛立ての載荷履歴と沈下の関係を図-9に示す。3カ所の沈下計測結果ともほぼ同様の沈下傾向を示しており、これまでの沈下量は、59~70cmである。当初25日間のデータのバラツキが大きいが、原因は潮位補正にあると考えられる。すなわち、この間の潮位データは、約5km離れた場所の観測結果を使用しているが、当該海域は、干満の差が2m以上と大きいため、わずかな距離でも潮位の時間遅れが生じたものと考えられる。このことは、3カ所のデータが同じように変動していることで裏付けられる。その後、現場内既設護岸に設置した潮位標から潮位を読みとることにしたため、まだ若干の読取り誤差はあるものの、前者に比べ沈下データのバラツキは改善されている。今後は、現場内のヤグラに潮位計を設置し、そのデータを利用する予定のため、沈下データのバラツキはさらに小さくできると予想される。

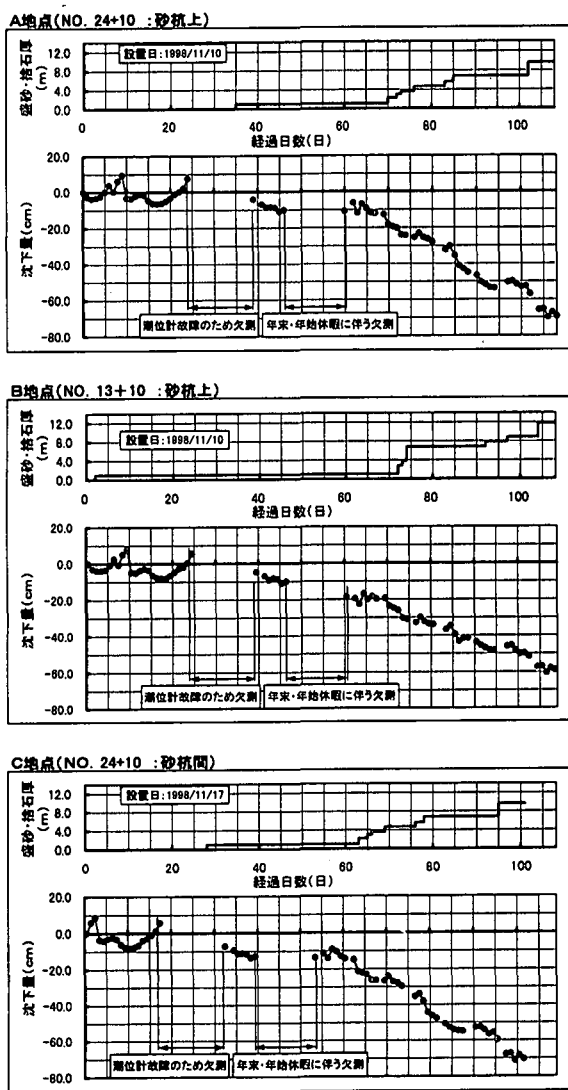


図-9 沈下曲線

6. おわりに

磁気伝送システムの基本性能に関し、各種の確認試験を行った後、実際の現場2カ所において、それぞれ方式の異なる沈下計に接続してデータ伝送を行い、沈下計測を実施した。その結果、本システムが、従来の沈下計測の問題点を解決する、新しい沈下計測システムとなりうることが確認できた。最後に、この一連の試験、実計測のため、フィールドをご提供いただいた企業者の皆様、沈下データ回収等でご協力いただいた現場JVの皆様には謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 山本守邦, 沖政和, 若山裕介, 木村象二郎: 磁気伝送による埋立地盤沈下計測システムの現場実験, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集第VI部門, pp.42-43, 1997

(1999. 4. 19 受付)