共同研究報告書
整理番号第 448 号

コンクリート打継目のずれセンサーに関する共同研究報告書

平成 25 年 1 月

独立行政法人土木研究所
株式会社東京測器研究所

Copyright © (2013) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

共同研究報告書
第 448 号 2013 年 1 月

コンクリート打継目のずれセンサーに関する共同研究報告書

独立行政法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター
上席研究員　村越　潤
主任研究員　田中　良樹
株式会社東京測器研究所 開発部
開発部長　末吉　良敏
TR・AP 開発室　浅田　知之

要旨

本共同研究では，コンクリートの打継目の挙動を把握するため，ホール効果に基づく新たな埋込み型変位計(ずれセンサー)を開発した。まず，ホール素子と磁石を用いた変位計の可能性調査，及びずれセンサーの試作と影響因子の調査を行った。また，コンクリート打継目への適用性調査として，鉄筋コンクリート床版の供試体にずれセンサーを埋め込んで，輪荷重走行試験時における打継目の動的挙動を測定した。本報告では，これらの検討の経過をとりまとめ，ホール効果によるずれセンサーの適用性を示すとともに，打継目を有する鉄筋コンクリート床版の輪荷重走行試験におけるずれセンサーの適用事例を紹介する。

キーワード：打継目，床版，ずれ，ホール効果，ホール素子，磁石，変位計

目　　次

1. はじめに …… 1
2. ホール素子と磁石 …… 2
2.1 ホール効果 …… 2
2.2 ホール素子 …… 2
2.3 磁石について …… 3
2.4 ホール素子の適用事例 …… 3
2.5 開発の目標 …… 5
3. ホール効果による変位測定の可能性調査 …… 6
3.1 概要 …… 6
3.2 測定方法 …… 6
3.3 測定結果 …… 6
4. ずれセンサーの試作と測定への影響因子の調査 …… 12
4.1 ずれセンサーの試作 …… 12
4.2 Z 方向への移動の影響 …… 16
4.3 Y 方向への移動の影響 …… 18
4.4 ずれセンサー間の干渉 …… 20
4.5 金属の影響 …… 22
4.6 コンクリートの影響 …… 24
4.7 変位速度の影響（動的測定への適用性） …… 28
4.8 シールドの種類や磁石の磁力が測定精度に及ぼす影響 …… 30
4.9 電磁波の影響 …… 33
4.10 校正値の経時変化（長期安定性の確認） …… 35
4.11 温度の影響 …… 36
5. コンクリート打継目のずれ変位測定への適用性に関する調査 …… 38
5.1 ホール素子と磁石の隙間が打継目のせん断強度に及ぼす影響 …… 38
5.2 打継目を有する鉄筋コンクリート床版への適用 …… 48
6. まとめ …… 73
参考文献 …… 75
巻末資料　試作ずれセンサーの性能表 …… 77

１．はじめに

道路橋のうち，自動車の輪荷重を直接受ける鉄筋コンクリート(RC)床版は，大型車の走行繰返しによって，疲労による劣化が生じることがある [1)]。特に，現行の技術基準で設計された道路橋と比較して，RC 床版の疲労耐久性が低い傾向にある昭和 30～40 年代(1955～1974 年)に建設された橋梁は，既設道路橋の多くを占め，今日も供用されており，それらの RC 床版の効率的な維持管理は，今後の道路橋の維持管理の負担を軽減する上で，重要な課題の一つである [2)]。そのためには，RC 床版の疲労性状をよく把握するとともに，疲労損傷の程度に応じた効果的な補修，補強を適切に適用することが重要である。旧建設省土木研究所では，RC 床版の疲労による早期劣化が顕在化した昭和 40 年(1965 年)頃より，RC 床版の疲労に関するさまざまな調査研究に取り組んでおり，設計基準の見直し，点検，補修，補強方法の検証などにおいて貢献してきた [3)]。しかし，RC 床版や補強された RC 床版の疲労損傷機構は，必ずしも十分に明確にされたとは言い難い。そのため，個々の橋ごとに異なる損傷状況に対して補強の要否の判定や工法選定において，判断が難しい場合が生じる。また，補強された RC 床版の再劣化が見られることもあり，その劣化機構の解明も必要である。

現在，土木研究所では，これらの点を踏まえて，測定方法を改善するなどして，新しい視点から輪荷重走行下の RC 床版の疲労損傷機構の解明に取り組んでいる [4),5)]。その中で，上面増厚や下面増厚された RC 床版あるいは打継目や貫通ひび割れを有する RC 床版の輪荷重走行試験に際して，内部の剥離の挙動をできるだけ正確に観察したいと考えている。打継目のずれ状況(界面のずれや剥離がどの程度の回数で，どこから発生，進展したか)を，できるだけ界面の状態や剥離の進展に悪影響のない方法で把握する必要がある。従来の測定装置としては，カンチレバー型変位計の利用が考えられるが，アーム長が長いため，ずれ変位だけでなく，周囲の弾性変形も測定することとなる。また，埋め込み型のひずみゲージを利用することも考えられるが，初期のずれ発生の確認はできても，ずれ変位の定量的把握が難しいとともに，ずれ発生後の挙動にゲージそのものが影響することも懸念される。このことから，より直接にずれの変位量を測定する，従来にない，ホール素子の特性を利用した小型埋込型の変位計（以下，ずれセンサーという）の開発を行うこととした。ホール素子は，近年，身近な電子機器などに広く利用されており，比較的安価に市販されている。(株)東京測器研究所では，海洋で養殖される二枚貝の生態観測を行うため，その開閉を感知するホール素子を用いたセンサーを開発，実用化した実績を有している [6)]。しかし，変位の測定装置としての性能は必ずしも明確でなく，そのまま使用できるセンサーはこれまで見られない。

本共同研究「コンクリート打継目のずれセンサーに関する研究」(平成 20 年 11 月～22 年 3 月)では，ホール素子と磁石を用いた変位計の可能性調査，及びずれセンサーの試作と影響因子の調査を行うとともに，コンクリート打継目への適用性調査として，打継目を有する RC 床版の供試体にずれセンサーを埋め込んで，輪荷重走行試験時における打継目の静的及び動的挙動を測定した。本報告では，これらの検討の経過をとりまとめ，ホール効果によるずれセンサーの適用性を示すとともに，RC 床版の輪荷重走行試験におけるずれセンサーの適用事例を紹介する。

2．ホール素子と磁石

2.1　ホール効果 [7)-9)]

電流が流れている物質（ホール素子中の物質）に磁場をかけると，電流と直角方向に電位差が現れる(図-2.1.1)。これは，1879 年に米国の物理学者エドウィン･ホール（Edwin Herbert Hall 1855-1938）によって発見された現象であり，ホール効果（Hall effect）と呼ばれる。この電位差 Vは，$V=(R_H I/t)H$，ここに，R_H：ホール係数，I：電流，t：物質の厚さ，H：磁場(または磁界）で表わされる。物質に磁石などの磁極を近付けることによって磁場をかけることができ，そのときの磁場 Hは，$H=k_1(Q/d^2)$，ここに，k_1：定数，Q：磁極の強さ，d：磁極からの距離，で表わされる。よって，電位差 Vは，磁極からの距離 dの 2 乗に反比例する性質がある。

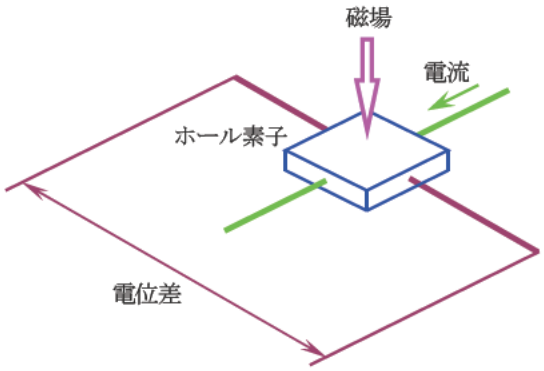


図-2.1.1　ホール効果 説明図

2.2　ホール素子 [7)-9)]

ホール素子とは，ホール効果を利用した磁気センサー(図-2.2.1～2)である。半導体の発展に伴い，1950 年代中頃からホール効果による磁気センサーが商業ベースで流通するものとなった。高品質の材料の使用や製造技術の向上により，電子部品工場での高い生産性が得られるようになった。一方，電子部品の製造技術の向上によって，安価で性能の高い部品の供給を実現している。同磁気センサーは，位置，角度，速度，回転数，電流量などを検出する非接触のセンサーとして広く利用されるとともに，材料特性の調査にも活用されている。

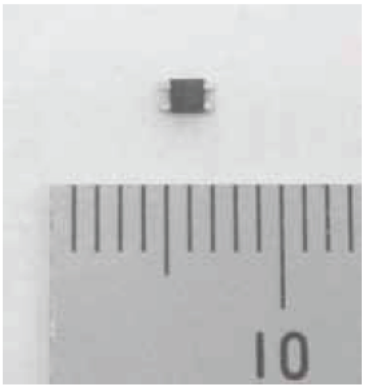


図-2.2.1　ホール素子

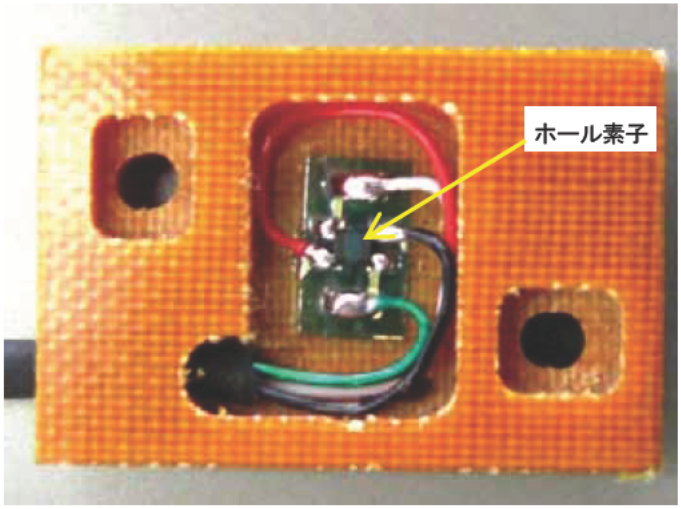


図-2.2.2　ホール素子 結線状況

(試作 1 号，外形寸法は図-4.1.5 に示す)

2.3　磁石について

磁石は一般的に，永久磁石と電磁石に分類される。永久磁石とは，それ自体が磁石としての性質を持ち，その性質を長期間にわたって保持し続ける物体のことであり，電磁石とは，それ本体が磁石でないが，それにコイルを巻き，導通させることで，磁石となる物体のことである。

今回，使用する磁石は，形状，電源供給の有無，長期安定性などの観点より，永久磁石を選択することとした。下記に主な永久磁石について説明する。

・アルニコ磁石

アルミニウム，ニッケル，コバルトなどを原料とした磁石である。数十年前までは，主流の磁石であったが，原料供給の不安や，比較的安価なフェライト磁石に変わっていった。

・フェライト磁石

鉄酸化物粉末を原料にした，一般的な磁石である。耐腐食性，耐酸化性に優れ，安価である。しかし，機械的強度が弱く，割れやすい性質がある。

・ネオジム磁石

ネオジウム，鉄，ホウ素を主成分とする磁石である。流通している磁石の中では最高の磁気特性を持っており，強力な磁石である。硬く，割れ難く，機械的強度に優れている。しかし，熱による減磁が大きく，錆びやすい性質がある。

・サマコバ磁石

サマリウム，コバルトを原料にした磁石である。高い磁気特性を持ち，熱による減磁が小さく，錆び難く，耐食性に優れている。しかし，機械的強度が低く，割れやすい性質がある。

2.4　ホール素子の適用事例

(1)　製品例

a)　磁力測定の例

磁界の大きさを測定する方法として，ホール効果の利用が最も一般的であり，磁界測定器にホール素子が使用される。

b)　回転検出の例

回転体に磁石を取り付け，ホール素子にて磁界を検出することにより，回転，非回転の動作状況，回転数などの回転検出に使用される。

例）ビデオデッキなどのテープの回転制御，パソコンなどの HDD の回転制御 など

c)　位置検出の例

磁石，ホール素子間の距離と磁界の強度変化の関係を利用し，位置検出に使用される。

例）冷蔵庫の開閉時の庫内照明の ON/OFF など

(2)　東京測器研究所における応用例

a)　回転体に適用した事例

ホール素子，磁石にて構成されたシステムとして，回転体の回転位置(回転角度)の検出に適用した事例がある。回転体にホール素子を取り付け，非回転部分に磁石を配置し，磁石がホール素子近傍を通過する際の出力を検出することにより，回転位置（回転角度）を算出するものである。

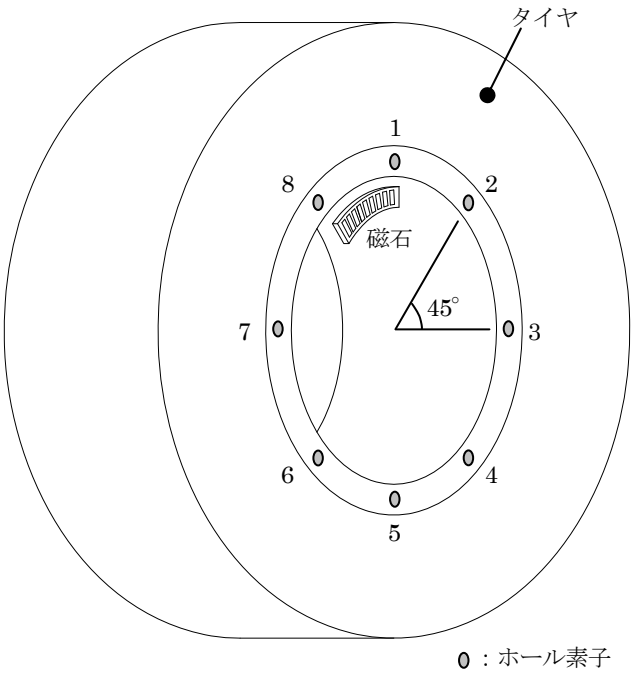


図-2.4.1　回転体へのホール素子，磁石の配置例

具体には，回転体に 45° 間隔でホール素子を取り付け，非回転部に磁石の極性を交互にし，奇数個配置する。その磁石は，45° に相当する範囲に等間隔に配置する（図-2.4.1)。ホール素子 1 に磁石が通過した際の出力は，正弦波を描く波形となり，磁石がホール素子 1 を通過すると，磁石は次のホール素子 2 に進入し，その出力も正弦波を描く。回転中のホール素子出力の和を求めると，回転中途切れること無く，一定の間隔でパルス波（正弦波）を描く（図-2.4.2)。このパルスをカウントすることにより，回転角度（回転位置）を測定することが出来る。

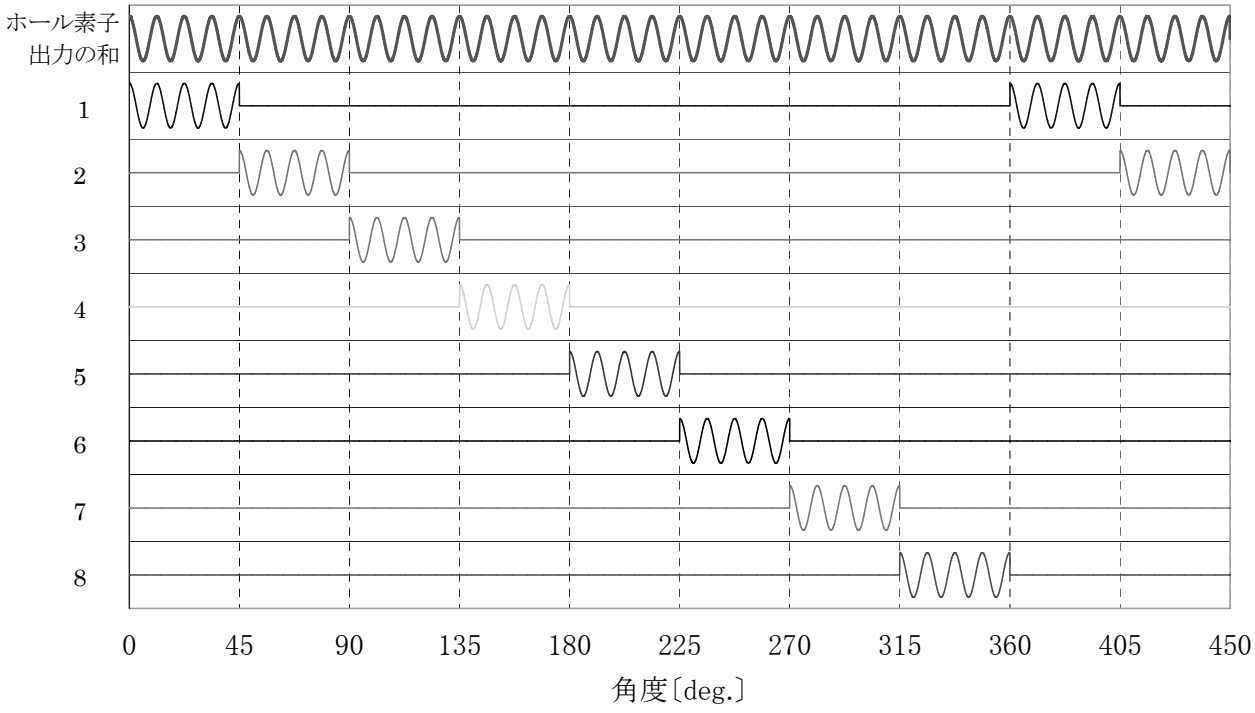


図-2.4.2　ホール素子の出力波形

b)　二枚貝殻体運動測定装置の事例

二枚貝殻体運動測定装置 SL-100 シリーズ「貝リンガル」は，図-2.4.3 に示すとおり，ホール素子を貝殻に装着して，海中の二枚貝の殻体運動の監視に適用したものである。

測定原理は，二枚貝の一方の殻体へホール素子を，もう一方の殻体へ磁石をそれぞれ固定し，殻体の開閉運動によって生じる二枚の殻体距離に応じた磁界の強度変化を測定する。これにより，二枚貝殻体の開閉運動の変化を測定することで，赤潮や貧酸素などの海の環境異常をいち早く察知することができる。

（特許　第 3607284 号「有害な水質環境の検査方法及び水質環境監視システム」）

図-2.4.3　SL-100 シリーズ「貝リンガル」
(右写真は二枚貝への装着例)

2.5　開発の目標

本共同研究では，以下の項目を満足するずれセンサーの提案を行うとともに，試作品を作成してその性能の検証を行う。なお，目標測定精度は，予備試験(3 章)による測定結果を踏まえて，実現可能性のある範囲とした。

a) コンクリート中の打継目付近に埋め込むことができること

b) 床版などの比較的薄い部材にも埋め込むことができること

c) ずれ挙動に影響を及ぼさないように，打継目を交差せずに，測定できること

d) ずれ挙動を把握するために必要な精度を有すること

目標測定精度　移動分解能：0.01 mm　測定可能範囲：±5.0 mm

e) 測定業務で広く一般に使用されているデータロガーを活用できること

３．ホール効果による変位測定の可能性調査

3.1　概要

本研究に先立ち，ホール素子を用いたずれセンサーの実現可能性を調査するため，磁石の種類や配置の影響を考慮しながら，実変位に対する測定値の直線性の測定を行った。また，周囲の温度の影響についても検討を行った。

3.2　測定方法

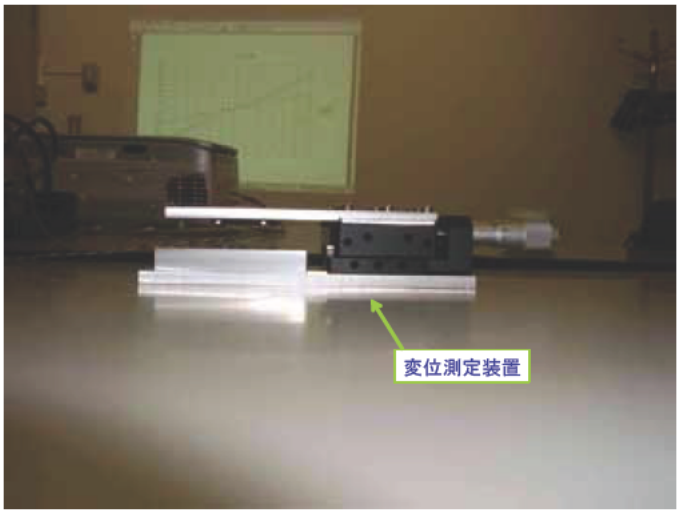
ずれセンサーの基本性能を把握するため，変位測定装置を製作した。図-3.2.1 に，変位測定装置の外観を示す。また，図-3.2.2 に変位測定装置の構成と配線図を示す。データロガー(市販の静ひずみ測定器)にホール素子を接続し，測定を行った。データロガーの表示値 digit (物理量ではなく，単にデジタル表示された値)をずれセンサーの出力値(校正前)とした。図-3.2.1(a)に示した変位測定装置に付属するマイクロメータの読み値(1/100mm)を基準変位として，ずれセンサーによる読み値と比較できるようにした。また，得られた直線関係に基づき，校正値(一次式による補正係数)を求め，具体のずれ変位(mm)に変換を行った。

表-3.2.1 に，本共同研究の検討で使用したホール素子の主な仕様を示す。本共同研究では，すべて同じ仕様のホール素子を使用した。表-3.2.2 に，各測定時におけるホール素子と磁石の間の距離(以下，素子磁石間距離)，2 個の磁石間の距離(以下，磁石間距離)，及び磁石の種類(材質と寸法)を示す。また，温度の影響については，室温 25℃のほか，0℃，50℃で測定を行った。

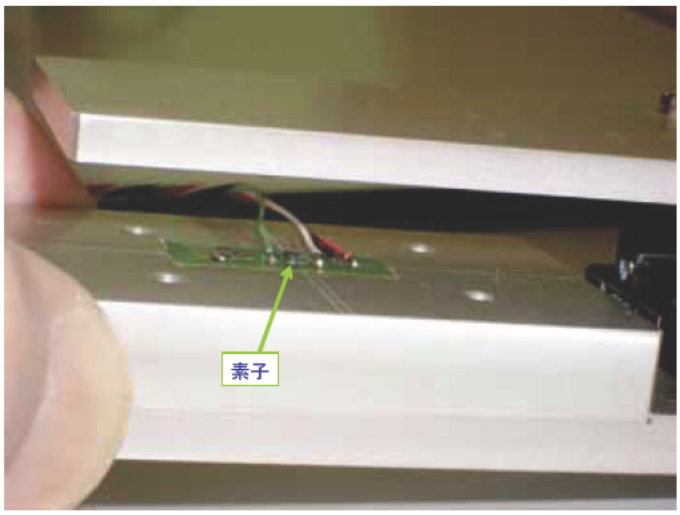
3.3　測定結果

図-3.3.1～2 に, 試験条件ごとの測定変位と基準変位の関係を示す。図中の測定値は, 校正前のずれセンサーの出力値を，測定変位は校正後のずれ変位を示す。これらの結果より，測定範囲を 6 mm とした場合，素子磁石間距離や磁石間距離が 1～2 mm 変化するだけでも直線性に変化が生じることがわかる。これらの測定事例の範囲では，ネオジム系の磁石を用いた場合には，素子磁石間隔が 12 mm，磁石間隔 18 mm の場合(Test25)に, 直線性がもっとも良かった。また, コバルト系の場合は, それぞれ 10 mm, 16 mm の場合(Test32)に，直線性がもっとも良かった。

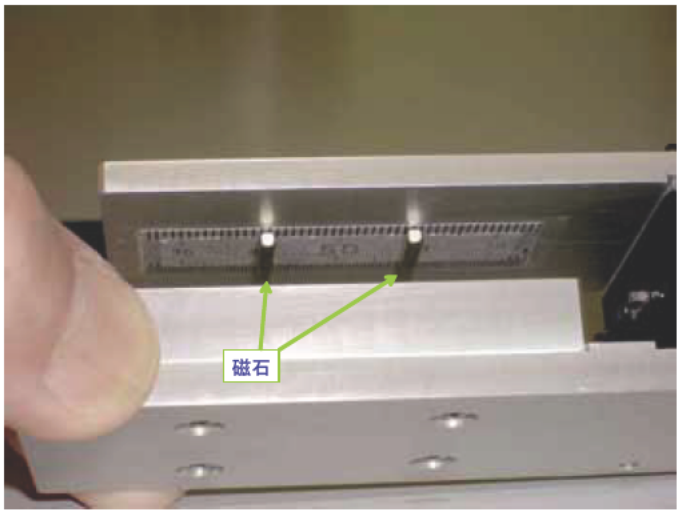
図-3.3.3 に，測定時温度が測定結果に及ぼす影響について測定した結果を示す。これらの結果より，厳密には温度によって測定結果に若干の変化が現れることがわかった。しかし，0℃から 50℃の範囲では顕著な変化が見られなかった。なお，変位測定装置の温度変化に伴う伸縮の影響が生じると考えられるが，ここでは修正していない。



(a)　変位測定装置の外観



(b)　ホール素子



(c)　磁石

図-3.2.1　変位測定装置の外観

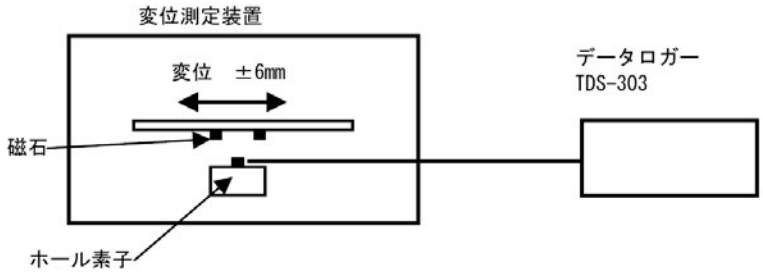


図-3.2.2　変位測定装置の構成と配線図

表-3.2.1　使用したホール素子の主な仕様

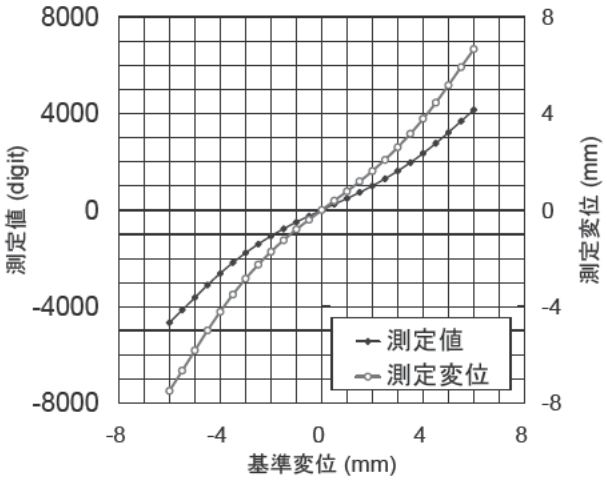
項　目	仕　様	単 位	備　考
制御電圧	8	V	
動作温度	-40 ～ +125	℃	
保存温度	-40 ～ +150	℃	
ホール素子出力	75 ～ 95	mV	50mT，6V
不平衡電圧	-16 ～ +16	mV	0mT，6V
出力電圧の温度係数	-0.06	%/℃	

表-3.2.2　試験条件

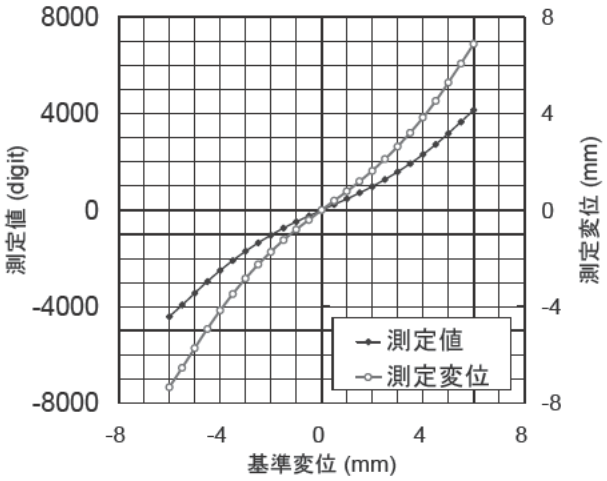
試験名	素子磁石間距離 (mm)	磁石間距離 (mm)	磁石 (mm)
Test20	10	18	15×2×2　ネオジム系
Test21	10	20	15×2×2　ネオジム系
Test22	11	18	15×2×2　ネオジム系
Test23	10	18	15×2×2　ネオジム系
Test24	11.5	18	15×2×2　ネオジム系
Test25	12	18	15×2×2　ネオジム系
Test30	10	13	14×2×1　コバルト系
Test31	10	14	14×2×1　コバルト系
Test32	10	16	14×2×1　コバルト系
Test33	10	18	14×2×1　コバルト系

注) 14×2×1 コバルト系磁石の表面磁束密度は 140mT,

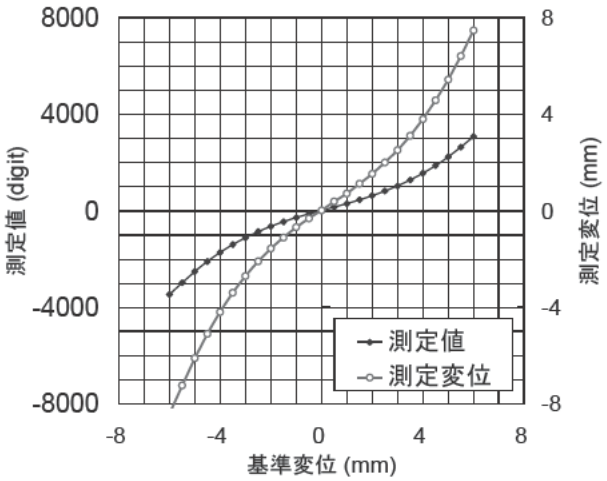
15×2×2 ネオジム系磁石の表面磁束密度は不明。



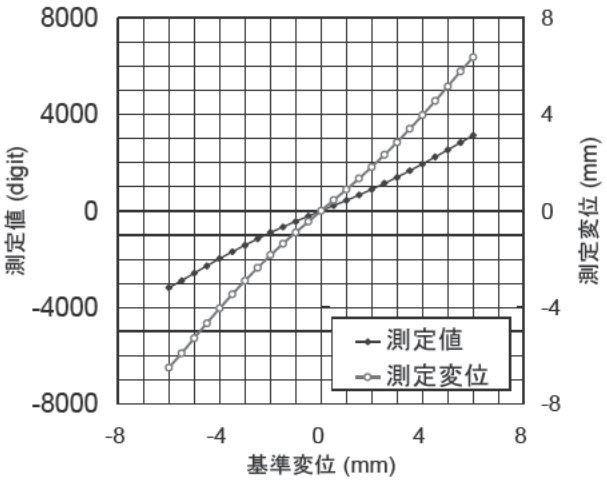
(a) Test20



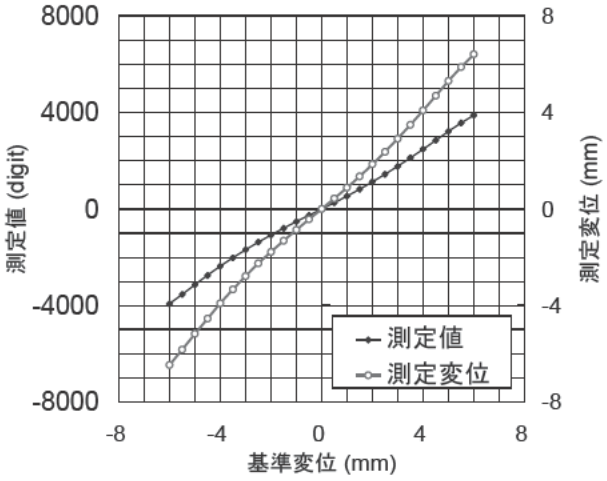
(d) Test23



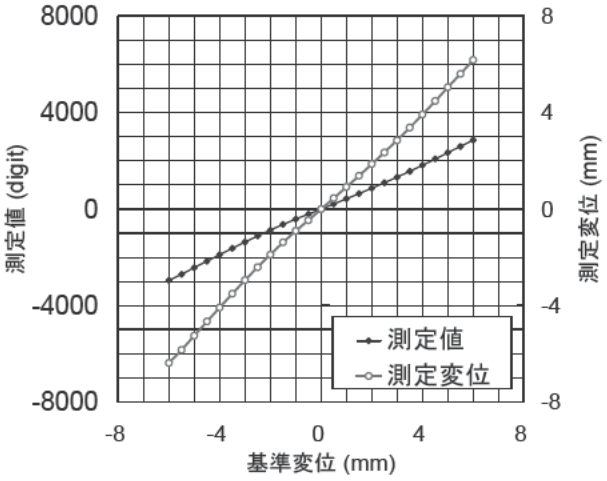
(b) Test21



(e) Test24

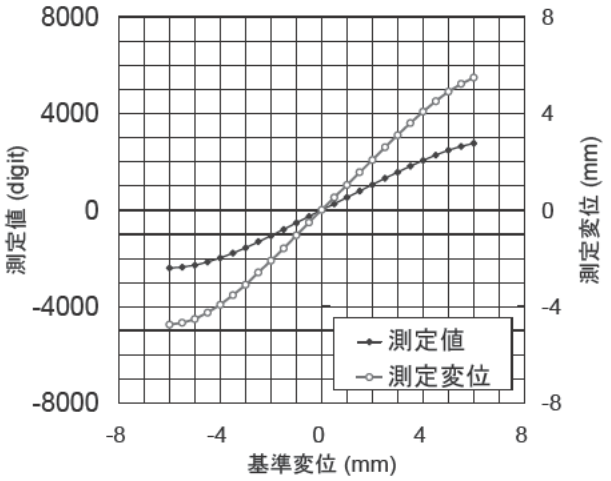


(c) Test22

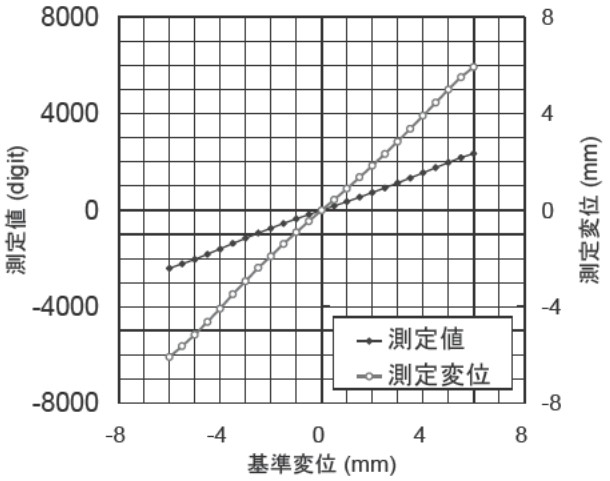


(f) Test25

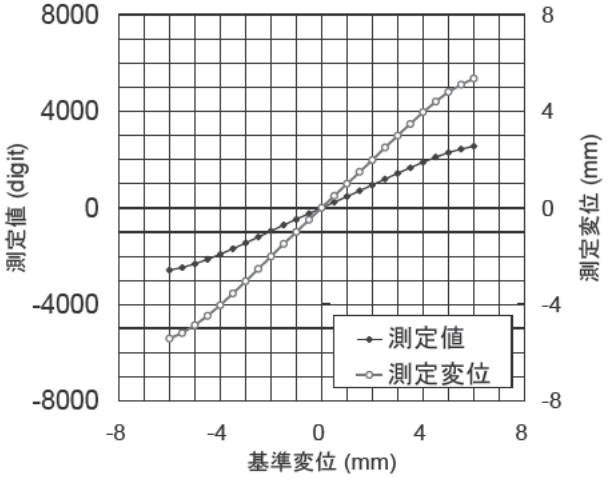
図-3.3.1　ネオジム系磁石を用いた場合の測定結果



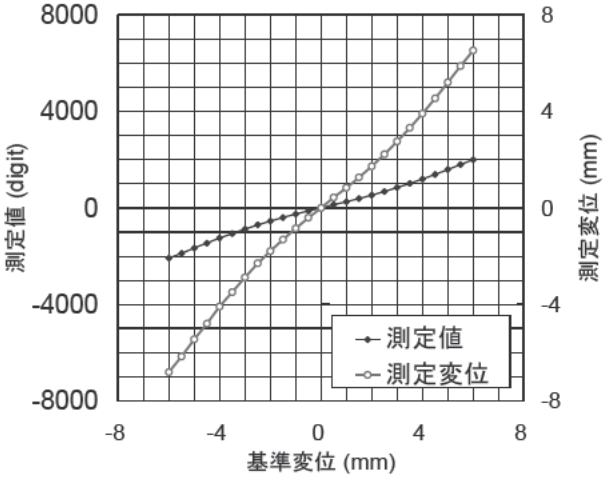
(a) Test30



(c) Test32



(b) Test31



(d) Test33

図-3.3.2　コバルト系磁石を用いた場合の測定結果

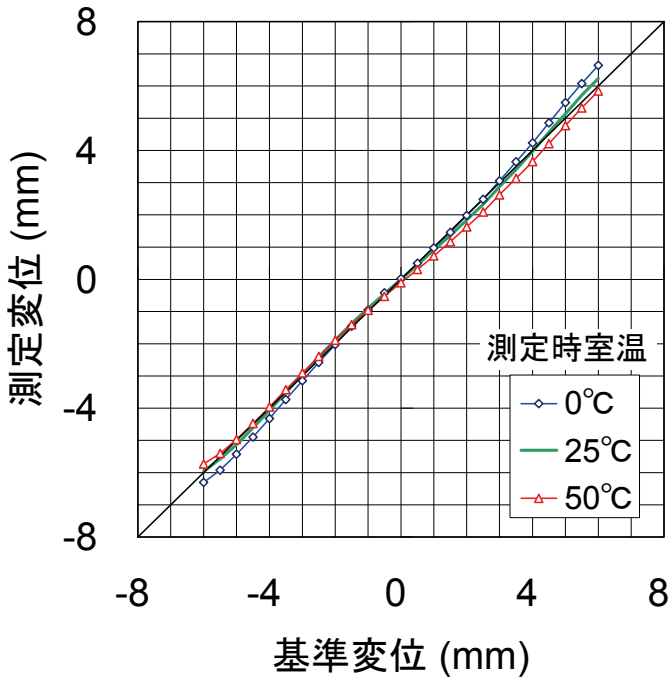


図-3.3.3　測定時温度の影響

(測定条件：素子磁石間距離 10mm，磁石間距離 16mm，14×2×1 コバルト系磁石)

４．ずれセンサーの試作と測定への影響因子の調査

4.1　ずれセンサーの試作

(1)　ずれ変位の測定方法に関する検討

変位測定の原理は，ホール素子と磁石の間の変位（距離）と，ホール素子によって感知される磁石の磁力強度の関係を用い，測定しようとするずれの面をはさんでホール素子と磁石を配置して，ずれに伴うホール素子にて測定した磁力強度の変化量からずれ変位に換算するものである。図-4.1.1～2 に示すように，磁石 S 極（又は，N 極）上方にホール素子を配置し，そのホール素子を左右方向に移動させた際，ホール素子の出力は，磁石直上を最大に減少する。そこで，図-4.1.3 のように，2 つの磁石を用意し，磁石間中央の上方にホール素子を配置する。2 つの磁石の 1 つは，極性を反転させ配置する。そして，ホール素子を移動させ，ホール素子の出力を測定すると，2 つの磁石の中間を 0 出力と仮定した場合，それぞれの磁石の極性が異なるため，ホール素子出力は，それぞれの磁石に近づくと，逆極性の出力をし，正弦波に近い波形を示す（図-4.1.4)。さらに，0 出力の近く（2 つの磁石の中間）では，出力の直線性が良好で，ホール素子出力とホール素子移動距離（変位）が，ほぼ比例関係となる。その比例関係区間を利用することで，一般的な変位計と同様に，一つの校正値を持つセンサーとすることが可能になる。これにより，測定後の事後補正をすることなく，市販のデータロガーに接続して，ずれ変位を測定することができる。ホール素子の出力，比例関係区間は，2 つの磁石，ホール素子の位置，距離により異なるため，最適な配置を導き出す必要がある。

ずれセンサーの測定可能範囲の目標値を±5mm としていることから，試作品を検討する際における測定範囲（変位）を±6mm とした。

使用する磁石は，磁気特性，温度特性，耐食性，入手性などを考慮し，サマコバ磁石を選定した。また，センサー本体の筐体材料は，磁気特性に影響を与えない非磁性体であることが必要条件である。今回，入手性，機械的強度，加工性，耐食性などを考慮し，フェノール樹脂（ベークライト）を筐体材料とした。なお，ホール素子は，3 章で使用したものと同じである(表-3.2.1)。

(2)　試作 1 号

基本性能を把握するため，図-4.1.5 に示す試作 1 号，2 台を製作した(巻末資料の試作番号 1, 2)。14mm×2mm×1mm，表面磁束密度 140mT のサマコバ磁石 2 個を用いて，その磁石間距離を 14mm とし，磁石の上方 8mm の位置にホール素子を配置した。そして，ホール素子側を 0.5mm ピッチで±6mm 変位させ，各変位時のホール素子出力を測定した。±4mm 変位時のホール素子出力の平均値より校正係数を求め，測定変位を算出した。基準変位と測定変位の差の最大値は 0.13mm となった。

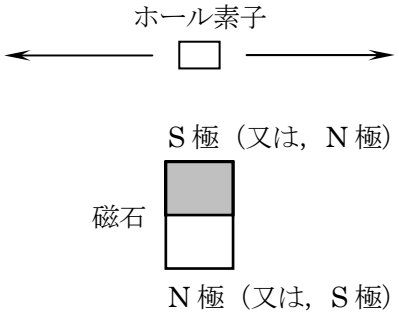


図-4.1.1　ホール素子，磁石の配置 1

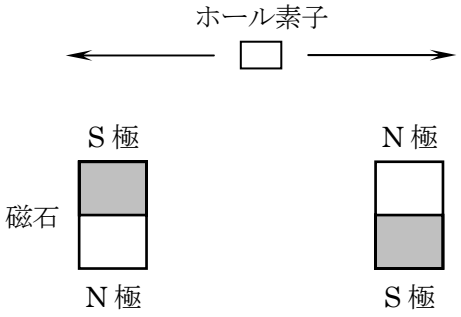


図-4.1.3　ホール素子，磁石の配置 2

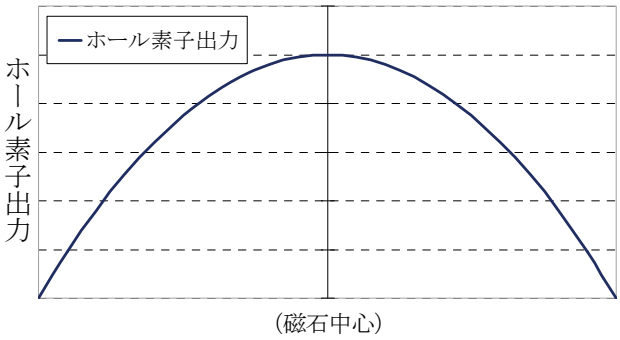


図-4.1.2　ホール素子，磁石の配置 1 の
ホール素子出力(概念図)

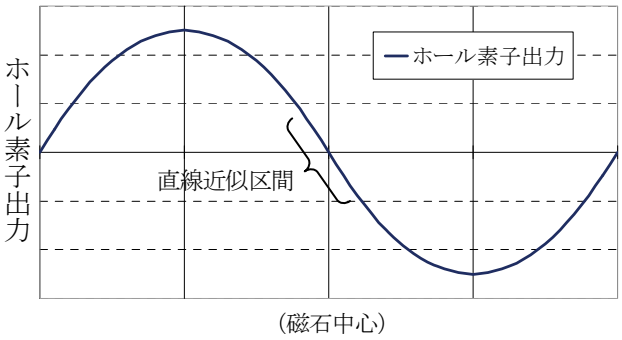


図-4.1.4　ホール素子，磁石の配置 2 の
ホール素子出力(概念図)

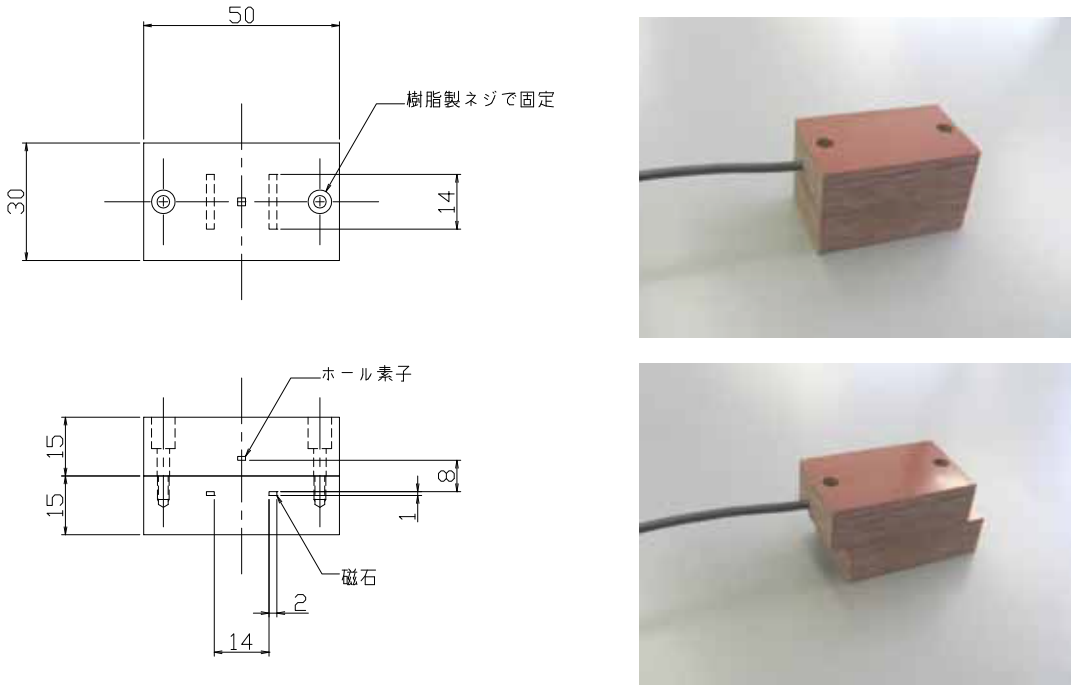


図-4.1.5　試作 1 号

(3)　試作 2 号

試作 1 号を小型化した試作 2 号，2 個を製作した(巻末資料の試作番号 3，4)。図-4.1.6 に寸法形状を示す。磁石の種類や配置は，試作 1 号と同様で，筐体形状を小型化した。試作 1 号と同様の測定を行い，基準変位と測定変位の差の最大値は 0.12mm（再校正時 0.14mm）となった。

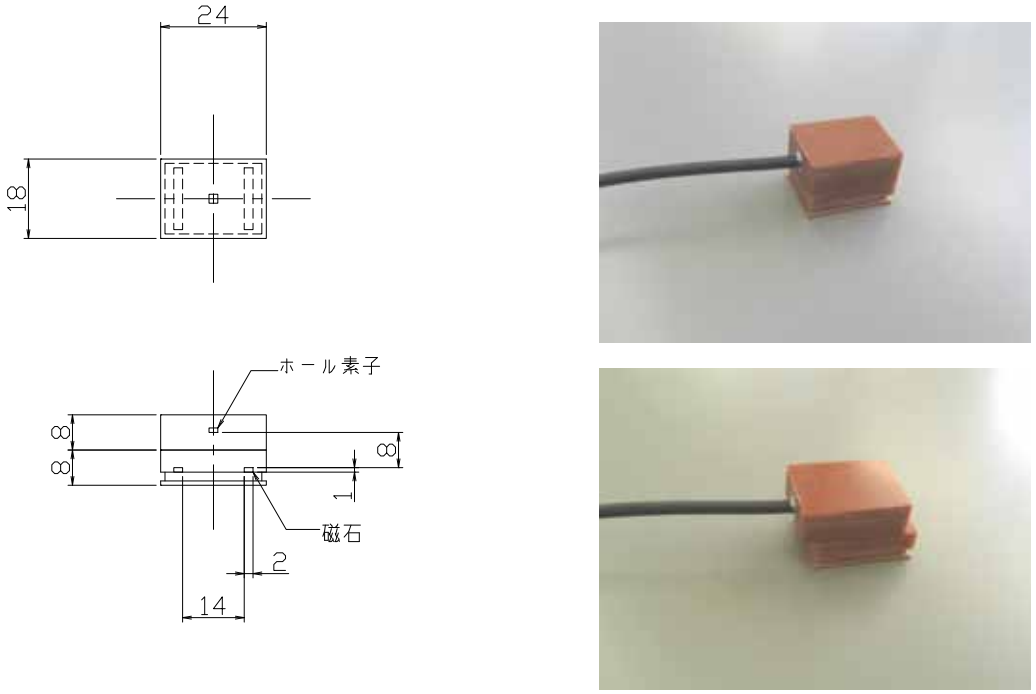


図-4.1.6　試作 2 号

(4)　試作 3 号

4.8 項の検討を踏まえて，出力の測定精度を改善するため，また，コンクリートの打継目付近に埋め込むことを考えて，磁石の仕様と筐体の寸法形状を見直し，図-4.1.7 に示す試作 3 号，6 個を作成した(巻末資料の試作番号 5～10，うち同 6～8 の 3 個は床版供試体に使用(5.2 項))。磁石は 18mm×5mm×4mm，表面磁束密度 280mT のサマコバ磁石 2 個とした。打継目をはさんで埋め込むことから，ホール素子側と磁石側の筐体間の空間を設けた。校正時は，プラスチックスペーサーをはさんで，プラスチックねじで固定した。製作した 6 個の基準変位と測定変位の差の最大値は，測定範囲±5mm の範囲で 0.07mm であった。

種類：サマコバ磁石

大きさ：18mm×5mm×4mm

磁束密度：280mT

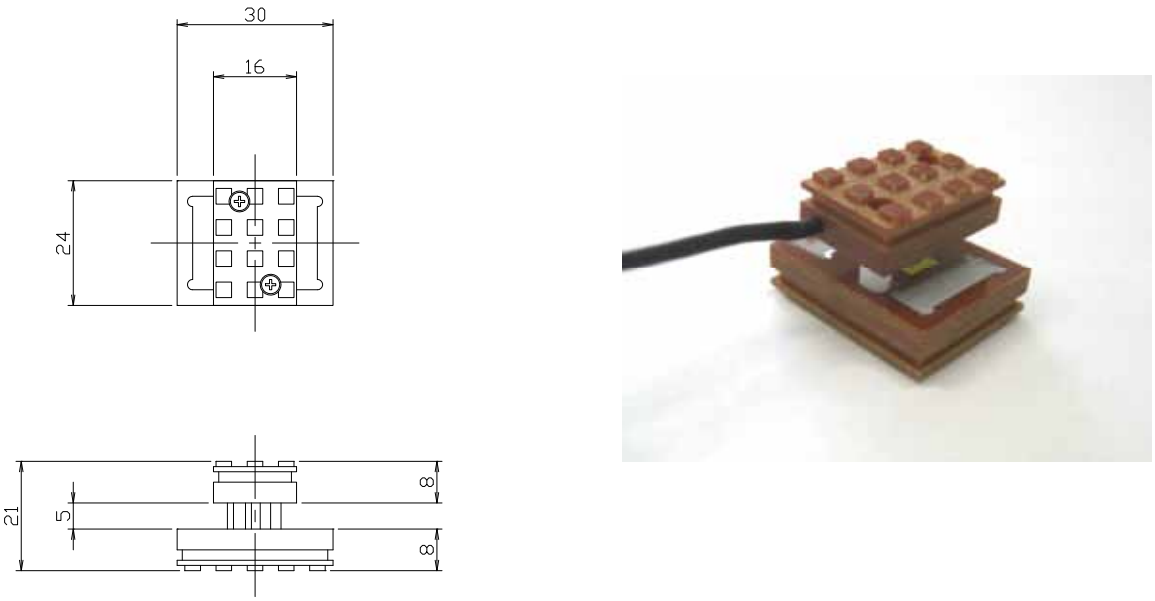


図-4.1.7　試作 3 号

4.2　Z 方向への移動の影響

ずれセンサーが Z 方向（ホール素子が磁石から離れる方向）に移動した際，出力に影響を与えると想定される。そのため，試作 2 号を用いて，図-4.2.1 のとおり，ずれセンサーの素子磁石間距離(Z 方向の距離)を変化させ，そのときの出力の変化を測定した。

最初に試作 2 号の素子側と磁石側の筐体の隙間が 0mm の状態で，通常の校正を行う（巻末資料のとおり，X 方向に±6mm の範囲で測定した）。次に，ホール素子側と磁石側の間隔 d（図-4.2.2）を 0.5mm ピッチで 6mm まで増加させ，Z 方向の各間隔ごとに，X 方向±6mm の範囲における出力の変化を測定するとともに，非直線性[注1)] を算出した。

図-4.2.3 に，その結果を示す。出力は，素子磁石間距離が 10mm 時の出力を 100%とし，各測定時の出力をプロットした。測定の結果，Z 方向の変位が増加するにつれ，ずれセンサーの出力の低下が確認された。また，X 方向変位の非直線性が悪化する傾向が見られた。図-4.2.4 に，図-4.2.3 の元となった定格出力と素子磁石間距離の関係を示す。一般にホール素子の出力は素子磁石間距離の 2 乗に反比例する関係があり(2.1 節)，測定結果にその傾向が明確に表れていることがわかる。

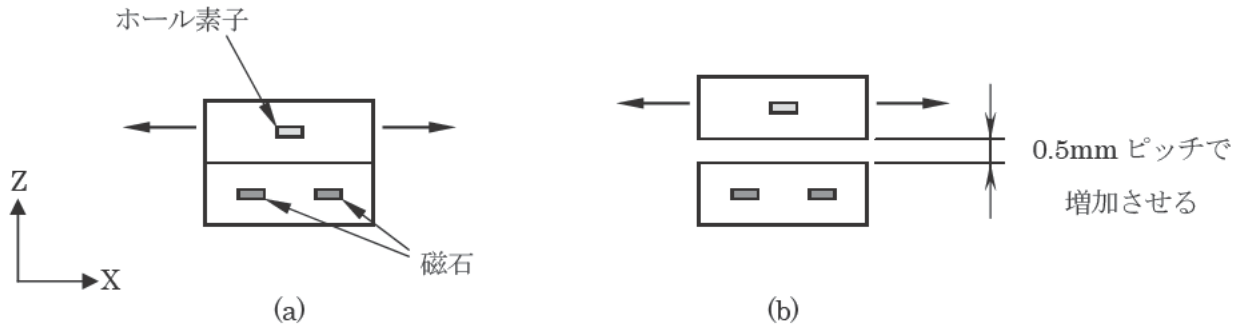
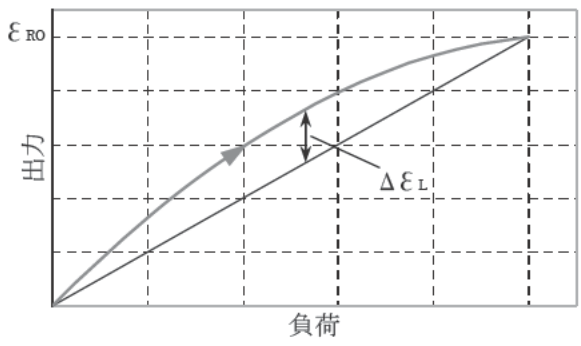


図-4.2.1　Z 方向の影響に関する測定方法

注 1）非直線性（Non-linearity）とは，負荷増加時における校正曲線の基点と定格負荷点とを結ぶ直性からの最大の隔たり（$\Delta\varepsilon_L$）で，定格出力（ε_{RO} ）に対する割合（%RO）で表す。

$$\text{非直線性（\%RO）} = \frac{\Delta\varepsilon_L}{\varepsilon_{RO}} \times 100\ (\%)$$



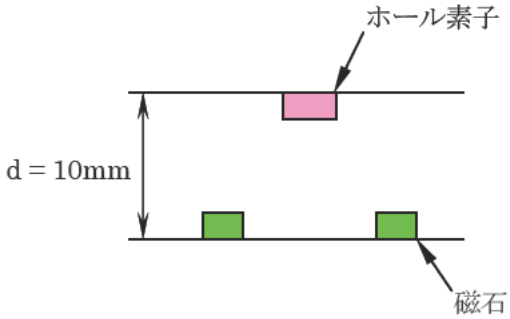


図-4.2.2　素子磁石間距離

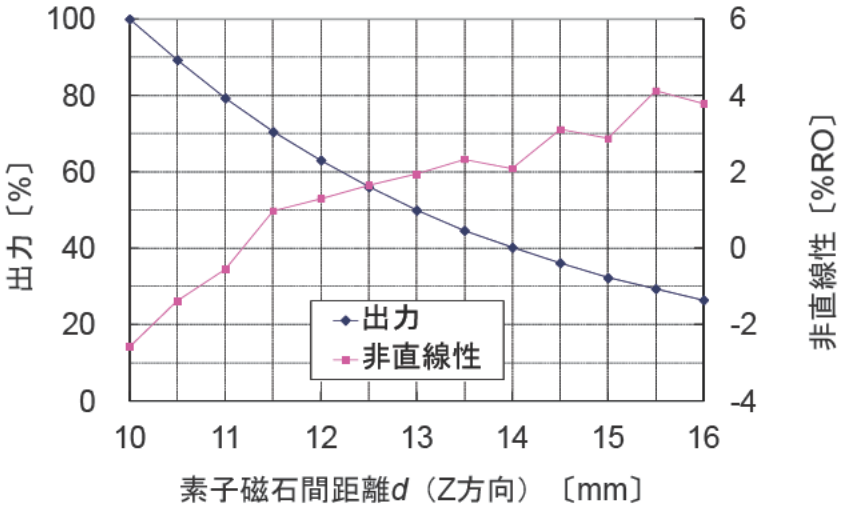


図-4.2.3　ずれセンサーの Z 方向の影響測定結果

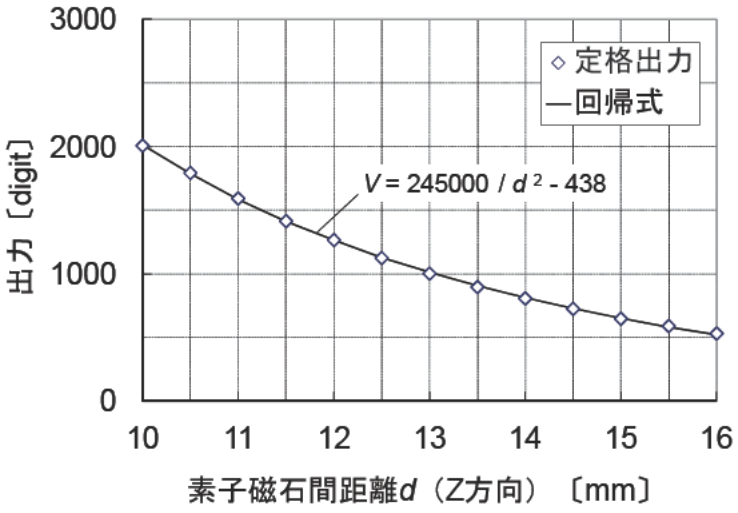


図-4.2.4　ずれセンサー出力と素子磁石間距離の関係

4.3　Y 方向への移動の影響

ずれセンサーでは，図-4.3.1 に示すように，磁石を Y 方向に長くして Y 方向のずれの影響が小さくなるように配慮している。しかし，ホール素子と磁石が Y 方向に大きく離れた際にはやはり出力に影響を与えると想定される。そのため，ずれセンサー(試作 3 号)を用いて，ホール素子側を Y 方向に 0.5mm ピッチで±5mm まで移動させ，それぞれの Y 方向の距離にて X 方向の変位測定を±6mm の範囲で行った。測定結果を図-4.3.2 に示す。同図(a)は，ずれセンサーの出力値，同図(b)は y=0 時の出力を 100%としたときの出力割合を示す。測定の結果，Y 方向の変位が増加するにつれ，ずれセンサーの出力の低下が確認された。同図(a)には，ずれセンサーの出力値が素子と磁石中心の直線距離の 2 乗に反比例すると仮定して回帰した結果を併せて示す。Z 方向の素子磁石間距離は 10mm，Y 方向の初期のずれ量を実測値に基づき+側に 0.3mm とした。Y 方向への移動の影響は，図中に示した回帰式で概ねよく表せており， Z 方向と同様に，ホール素子と磁石間の距離に応じた磁場の変化に依存していることがわかる。

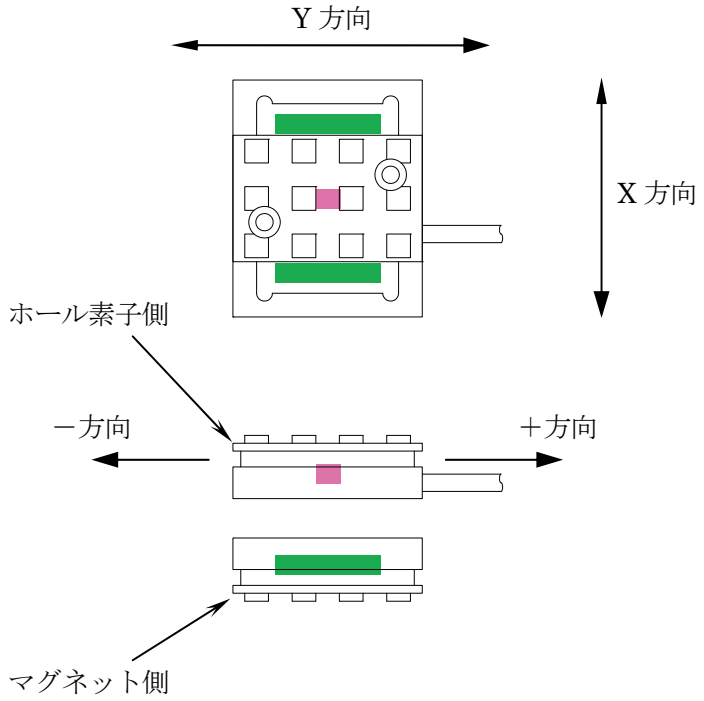
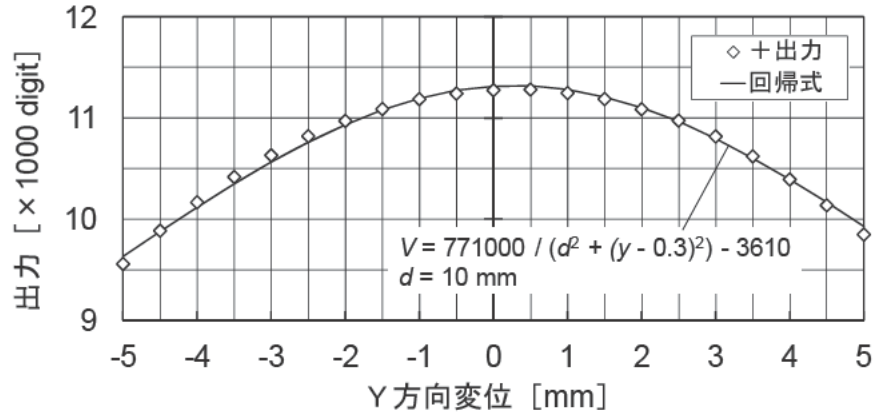
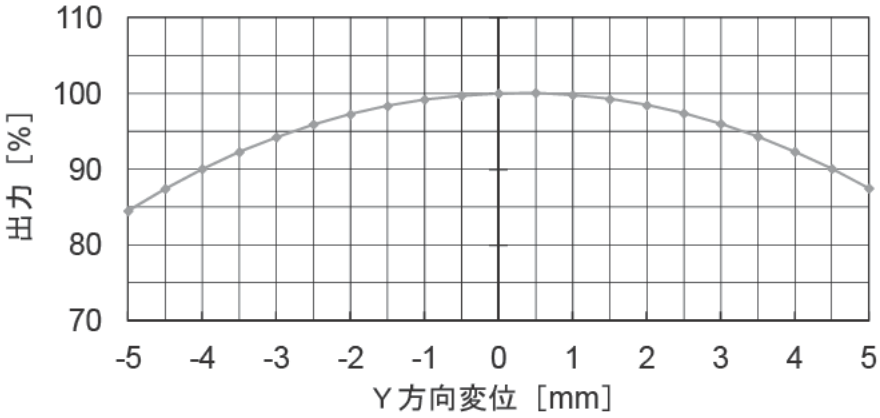


図-4.3.1　ずれセンサーの Y 方向



(a)　ずれセンサー出力値



(b)　y = 0 のときの出力に対する割合

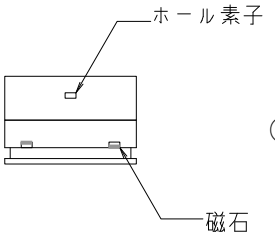
図-4.3.2　ずれセンサーの Y 方向の影響測定結果

4.4　ずれセンサー間の干渉

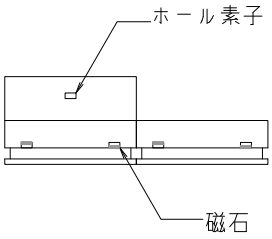
ずれセンサーを連続して配置し，測定を行うことも想定される。その際，隣接したずれセンサーが出力に影響を与える可能性があるため，確認を行った。

干渉の影響を確認するため，ずれセンサー（試作 2 号）2 台を図-4.4.1 に示す①～⑤の状態に置き，±6mm 変位時の出力を測定した。

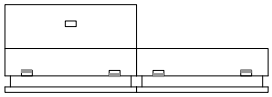
表-4.4.1 及び図-4.4.2 に測定の結果を示す。縦並びにした場合，近接させた磁石の極性に出力が影響を受けていた。また，横並びの場合は，影響を受けないことが判明した。



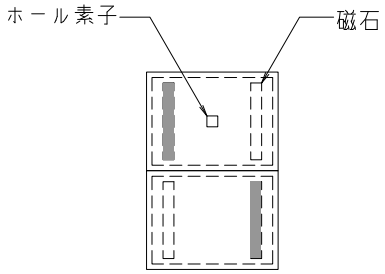
① ずれセンサー単体



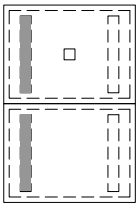
② ずれセンサーの磁石側に，縦並びで逆極性の磁石を近接させる



③ ずれセンサーの磁石側に，縦並びで同極性の磁石を近接させる



④ ずれセンサーの磁石側に，横並びで逆極性の磁石を近接させる



⑤ ずれセンサーの磁石側に，横並びで同極性の磁石を近接させる

図-4.4.1　ずれセンサーの隣接状況

表-4.4.1　ずれセンサー間の干渉測定結果

		① 単体	② 縦並び 逆極性	③ 縦並び 同極性	④ 横並び 逆極性	⑤ 横並び 同極性
－定格出力	測定値〔digit〕	−2025	−2010	−2031	−2021	−2020
	出力比〔%〕	100.0	99.3	100.3	99.8	99.8
＋定格出力	測定値〔digit〕	1978	1776	2208	1982	1989
	出力比〔%〕	100.0	89.8	111.6	100.2	100.6
定格出力 （平均）	測定値〔digit〕	2002	1893	2120	2002	2005
	出力比〔%〕	100.0	94.6	105.9	100.0	100.1

注）測定値〔digit〕とは，測定器に接続した際の表示値。

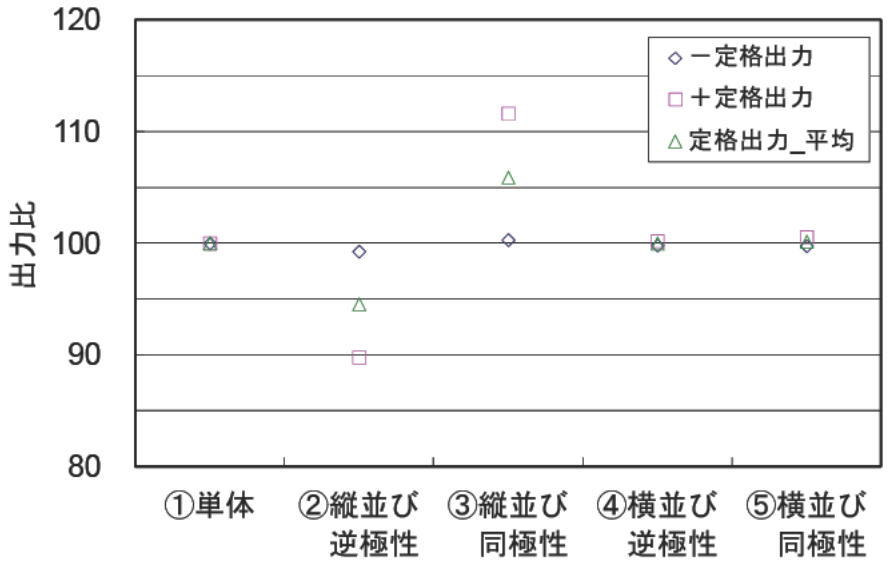
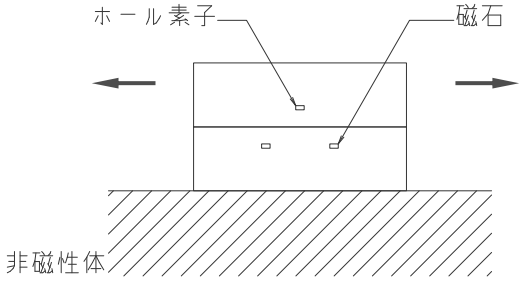


図-4.4.2　ずれセンサー間の干渉測定結果

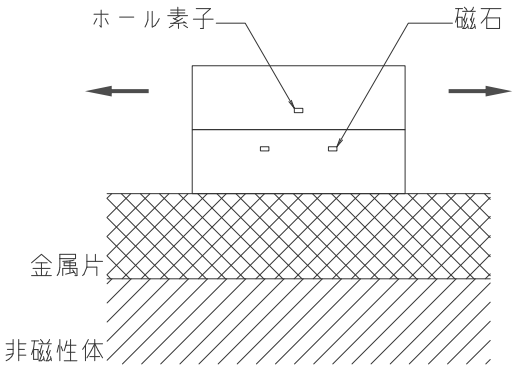
4.5　金属の影響

変位測定装置を用いて測定した際，ホール素子と磁石の間に金属を挿入すると，金属の存在が測定値に大きな影響を与えることを確認した(データは記録していない)。それ以外の周囲に金属がある場合には，影響が見られなかったが，データがなく，必ずしも明確でない。ずれセンサーを使用する際，近傍に金属が存在することも考えられるため，金属の影響を確認することとした。

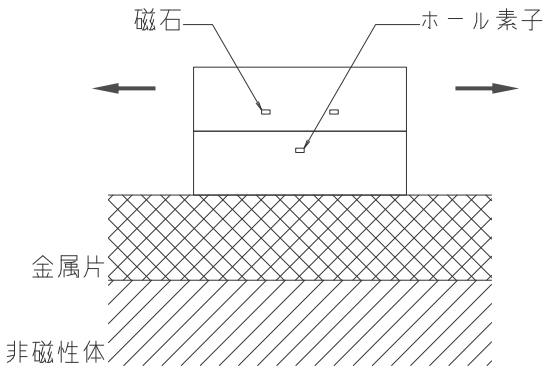
ずれセンサー（試作１号）近傍に金属片（SS400　100mm×100mm×t=20mm）を配置し，±6mm（1mmピッチ）にてずれセンサーの出力を測定した。尚，金属片は，磁化されていない。金属の影響を確認するため，図-4.5.1 に示す①～④の状態について測定を行った。表-4.5.1 及び図-4.5.2 に，測定の結果を示す。ずれセンサー近傍に磁化されていない金属が存在しても，ずれセンサーへの影響は小さいことが判明した。



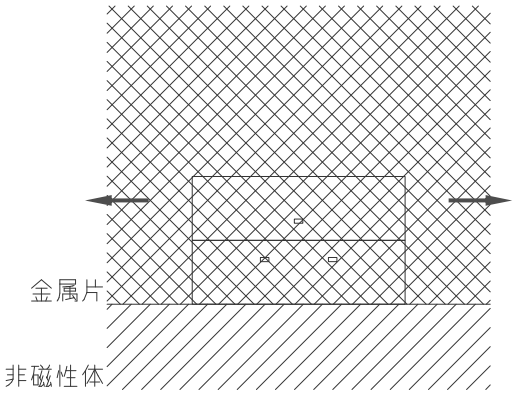
①近傍に金属が無い状態



② 金属を磁石側



③ 金属をホール素子側



④ 金属をずれセンサー側面

図-4.5.1　ずれセンサーと金属片の位置関係

表-4.5.1　ずれセンサーの金属の影響測定結果

	近傍に金属が無い状態	金属を磁石側	金属をホール素子側	金属をずれセンサー側面
定格出力〔digit〕	1997	2028	2010	1997
非直線性〔%RO〕	1.87	1.80	1.70	1.70
変化率〔%〕	100.0	101.6	100.7	100.0

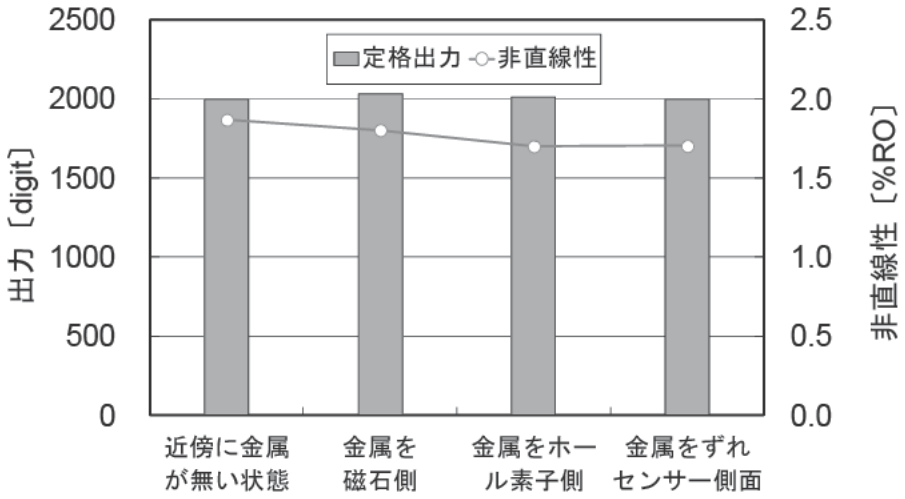


図-4.5.2　ずれセンサーの金属の影響測定結果

4.6　コンクリートの影響

コンクリート中にずれセンサーを埋め込んで使用する場合，ホール素子と磁石の間にコンクリートが存在することとなる。その際における，素子，磁石間のコンクリートが測定結果に及ぼす影響を把握するため，変位測定装置に取り付けたホール素子と磁石(磁石の種類は 15mm×6mm×3mm，サマコバ磁石)の間に，硬化したコンクリートを挿入した状態で，変位の測定を行った。図-4.6.1 にその測定状況を示す。表-4.6.1～3 に試験に用いたコンクリートの配合と骨材の種類，及び圧縮強度試験結果を示す。コンクリートは，水セメント比の異なる 3 種類とした。測定時の材齢は，No.1, 2 が 3 年 8 カ月，No.3 が 2 年である。コンクリートの板厚は約 10mm である。それぞれの板厚の測定結果を表-4.6.4 に示す。図-4.6.2 に，コンクリート供試体の外観を示す。

図-4.6.3 にコンクリートの影響に関する測定結果を示す。ホール素子の出力に関して，磁石との間におけるコンクリートの有無の影響は見られなかった。

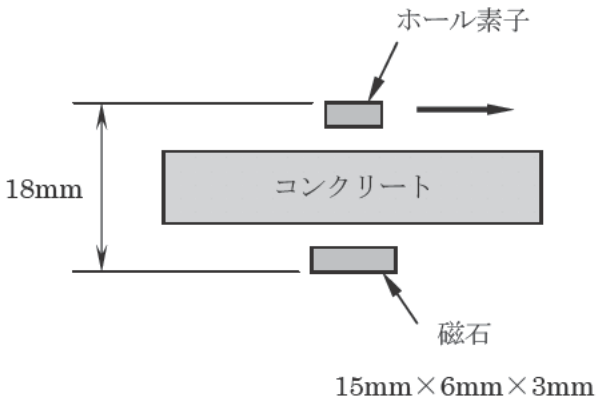


図-4.6.1　コンクリート片の挿入状況

表-4.6.1　コンクリートの配合

配合	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	実測空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位質量(kg/m³)				
						水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
No.1	20	8.0	5.1	40	45	185	463	730	916	27.8 ml
No.2	20	16.8	6.0	50	45	185	370	764	958	22.2 ml
No.3	20	20.5	3.4	73.5	49.1	188	256	609	942	2.56kg/m³

セメント：普通ポルトランドセメント，混和剤：空気量調整剤(303)，ただし，配合 No.3 は AE 減水剤(78R，遅延形)
打設日：No.1, 2 は平成 17 年 12 月 7 日，No.3 は平成 19 年 8 月 7 日(床版供試体 N と同じ [4),5)])

表-4.6.2　コンクリートに用いた骨材

配合	骨材	産地	種類	表乾密度 (g/cm³)	吸水率 (%)	最大寸法
No.1, 2	細骨材	小笠	陸砂	2.61	1.05	－
	粗骨材	笠間	砕石 5 号 同 6 号	2.67 2.67	0.47 0.75	20mm
No.3	細骨材*	君津市吉野 津久見	陸砂 砕砂	2.56 2.64	1.94 1.67	－
	粗骨材	津久見	砕石	2.70	0.75	20mm

*) No.3 の細骨材は 7：3 の混合砂

表-4.6.3　コンクリートの圧縮強度試験結果

配合	圧縮強度 (N/mm²)	見かけ密度 (kg/m³)
No.1	55.5	2350
No.2	41.3	2320
No.3	21.4*	2250

*) No.1, 2 は 28 日標準養生，No.3 は 3 日脱型，材齢 28 日

表-4.6.4　コンクリートの板厚測定結果

配合	板厚実測値 (mm)	板厚平均値 (mm)
No.1	10.65	10.7
	10.71	
	10.63	
	10.67	
No.2	9.31	9.3
	9.29	
	9.34	
	9.37	
No.3	9.79	9.8
	9.76	
	9.75	
	9.74	

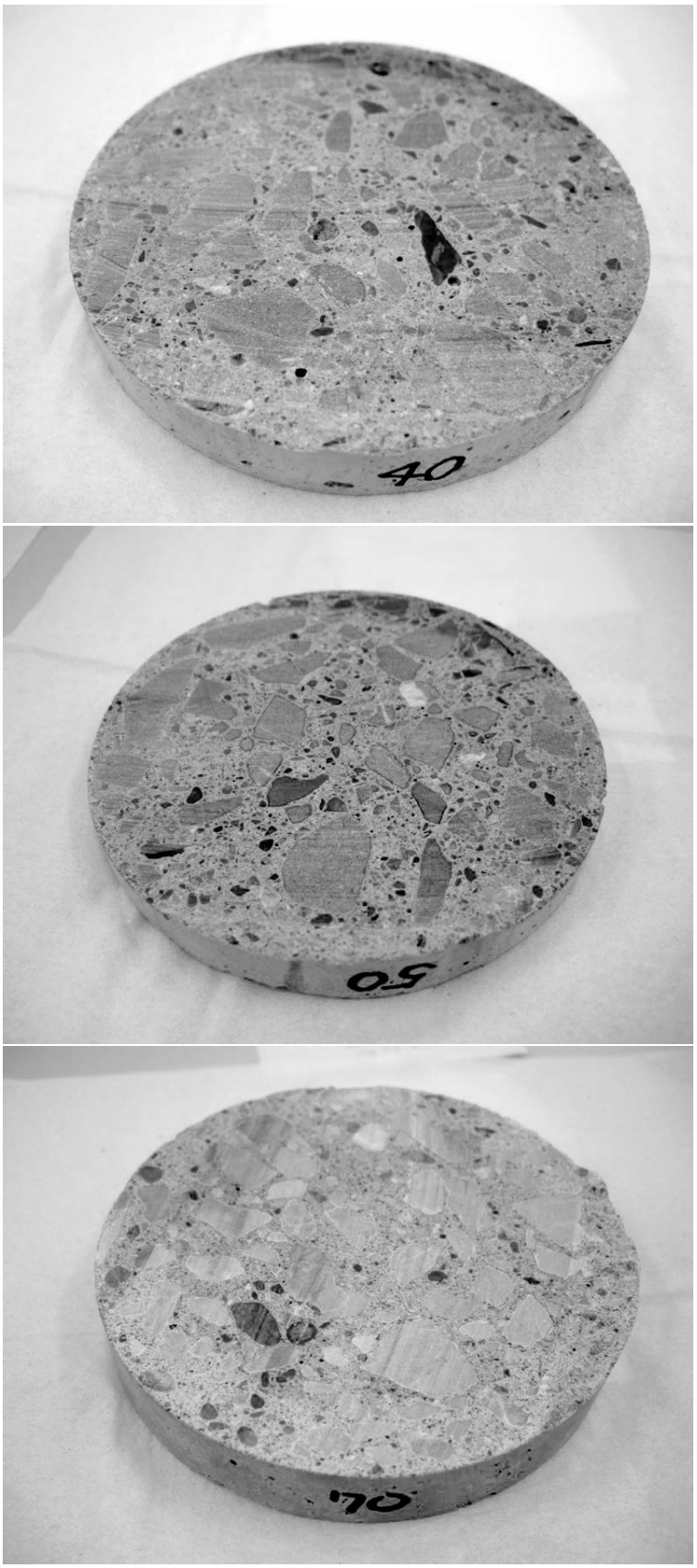


図-4.6.2　コンクリート供試体

（上から W/C=40, 50, 73.5%）

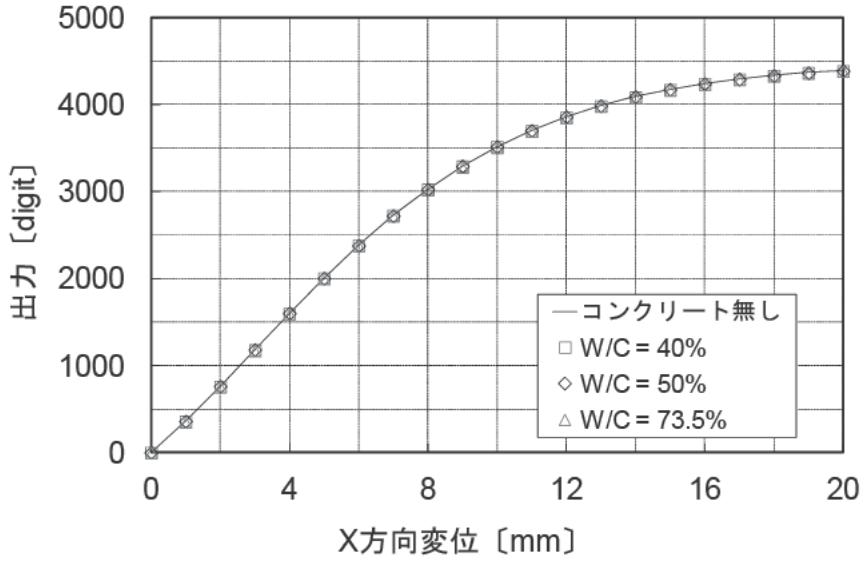


図-4.6.3　ずれセンサーへのコンクリートの影響測定結果

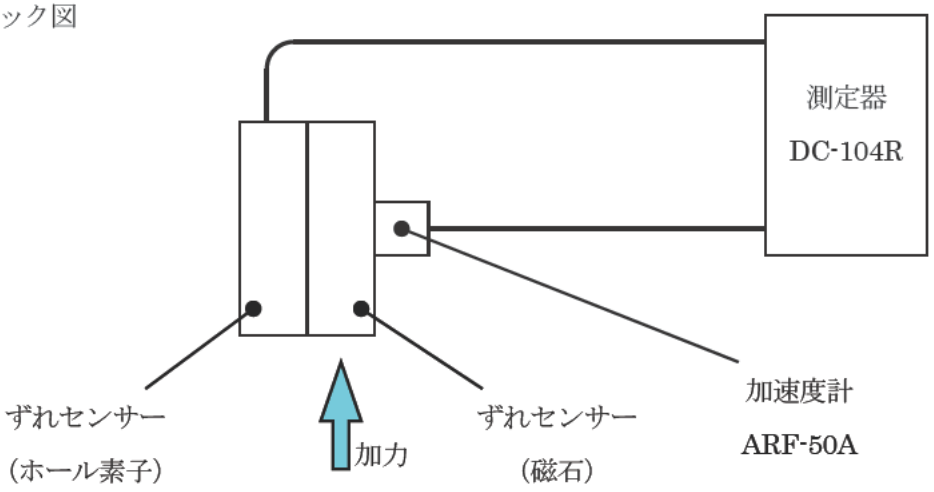
4.7　変位速度の影響（動的測定への適用性）

ずれセンサーの動的測定への適用性の検討として，ずれセンサー(試作１号)を一般の動ひずみ計に接続し，動的測定を行う際における変位速度の限界について測定を試みた。

ずれセンサーは，市販の変位計と同様に一般の動ひずみ計に接続することができる。図-4.7.1 に示すように，ずれセンサーに取り付けた加速度計により加速度を測定し，その加速度を２回積分して変位に換算して，ずれセンサーによる変位と比較することにした。動ひずみ測定器には DC-104R，加速度計には ARF-50A（容量 50m/s²）を用いた。サンプリングは 1msec（1kHz）で行った。

図-4.7.2 に測定の結果を示す。ずれセンサーによる測定結果と加速度計による測定結果は，変位－3.4mm まではほぼ一致しており，動的測定への適用も特に支障ないことが確認できた。また，同図の傾きから，約 333mm/sec の応答速度に追従可能であることがわかった。なお，本測定では，変位 3.4mm を超えると，加速度計による変位から大きく乖離していた。これは，Z 方向の変位を拘束していなかったために途中から素子磁石間距離が大きくなったことによるものと考えられる。

測定ブロック図



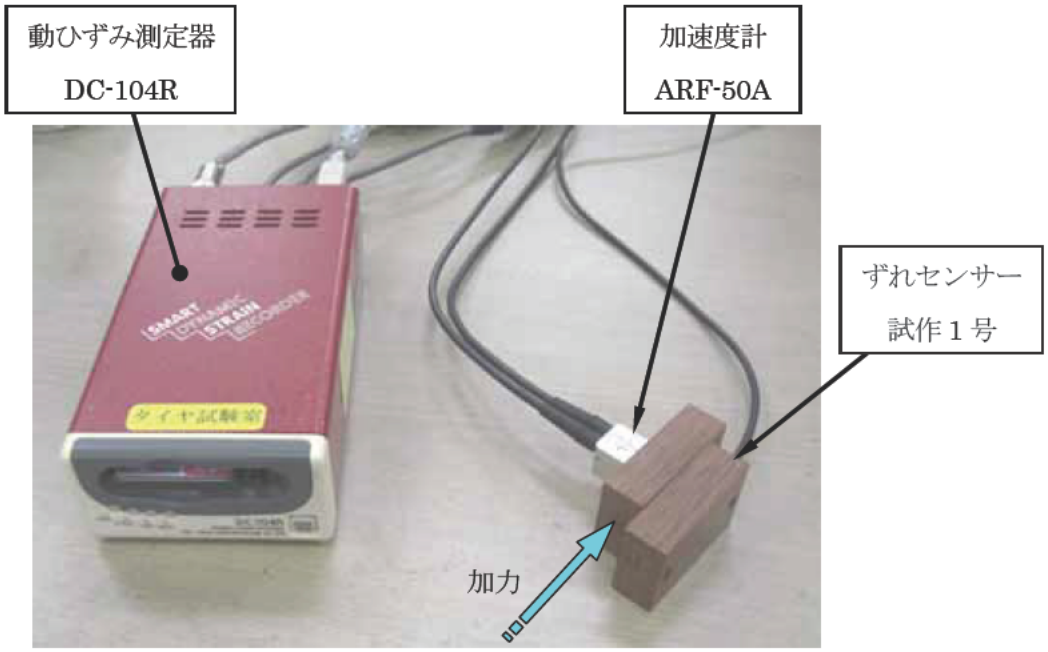


図-4.7.1　ずれセンサーの動的挙動測状況

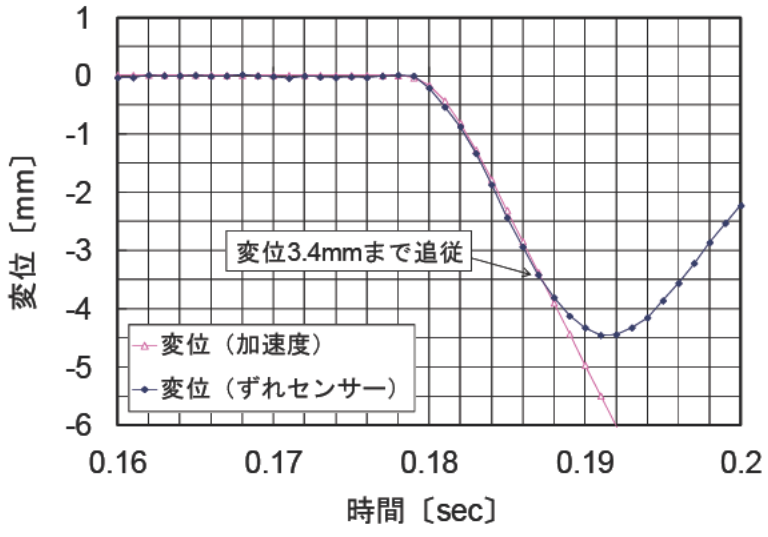


図-4.7.2　ずれセンサーの動的挙動測定結果

4.8　シールドの種類や磁石の磁力が測定精度に及ぼす影響

ずれセンサーでの測定時，測定値にばらつきが生じることから，その要因として，シールドの種類の影響と磁石の磁力の影響を調査した。

(1)　シールドの種類

ずれセンサー(試作 1 号をベースとしたもの)を静ひずみ測定器 TDS-303 に接続し，ずれセンサーの筐体材料，ケーブルの種類及びシールドの状態を変え，同測定器に備わっているばらつきチェック機能により，測定値のばらつきを測定した。表-4.8.1 に測定の結果を示す。筐体の材質，ケーブルの種類及びシールド状況がばらつきに及ぼす影響は見られず，ずれセンサー(ホール素子と磁石の組み合わせ)固有のばらつきであると推測される。

表-4.8.1　筐体材質及びケーブル種類，シールド状況がばらつきに及ぼす影響

	筐体材質	ケーブル	ずれセンサー側シールド状況	ばらつき測定結果 (digit)
①	フェノール樹脂 (ベークライト)	4 対ツイスト シールドケーブル	シールドはフリー	10
②	〃	〃	シールドをホール素子のマイナス(−)入力端子へ短絡	9
③	アルミニウム	4 芯シールドケーブル	シールドはフリー	10
④	〃	〃	シールドをホール素子のマイナス(−)入力端子へ短絡	10
⑤	〃	〃	シールドを筐体へ短絡	10
⑥	〃	〃	シールドをホール素子のマイナス(−)入力端子，筐体へ短絡	10
⑦	〃	〃	シールドはフリー。ホール素子のマイナス(−)入力端子と筐体を短絡	8

※ ばらつき測定結果は，各条件にて 5 回測定し，その平均値

(2)　磁石の磁力

次に，3 章で用いたものと同様の変位測定装置を用いて，ずれセンサーの出力をマグネットの種類，素子磁石間距離を調整することにより，2000digit，5000digit，10000digit の 3 レベルについて出力させ，各出力時のばらつきを確認した。図-4.8.1～3 に，測定の結果を示す。ずれセンサーの出力レベルに関係なく，ばらつきは 20digit 程度であることが確認された。このことから，ずれセンサーの出力レベルを上げることにより，物理量（変位量）に換算した際の，見かけ上のばらつきを小さくすることができることがわかる。例として，図-4.8.4～6 に，ずれセンサーを 6mm 変位させた際，2000digit，5000digit，10000digit それぞれの出力であったと仮定して，物理量（変位量）に換算した値を示す。これより，10000digit の出力を確保すれば，0.01mm の測定精度を概ね確保できる可能性があることがわかった。前述のずれセンサーの試作 3 号は，これを踏まえて，改良したものであり，所要の目標を概ね達成するずれセンサーを得ることができた。

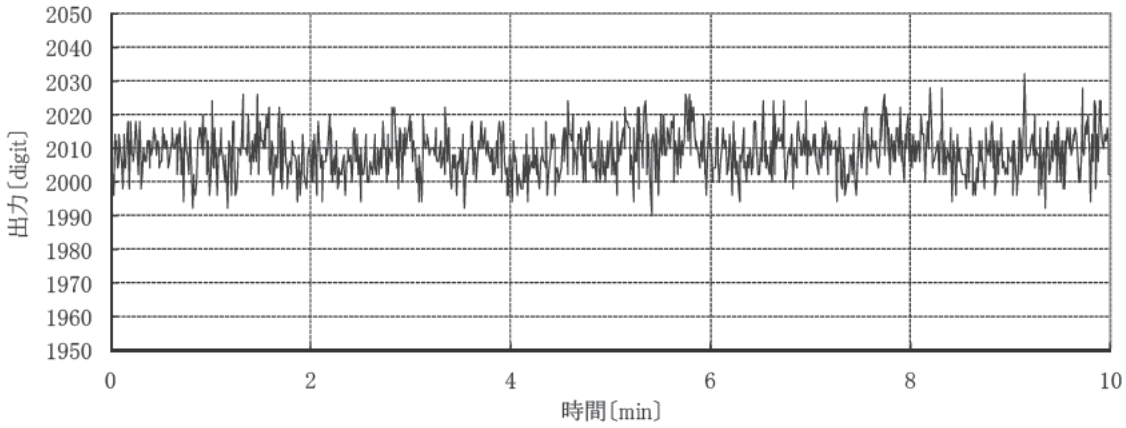


図-4.8.1　2000digit 時のばらつき

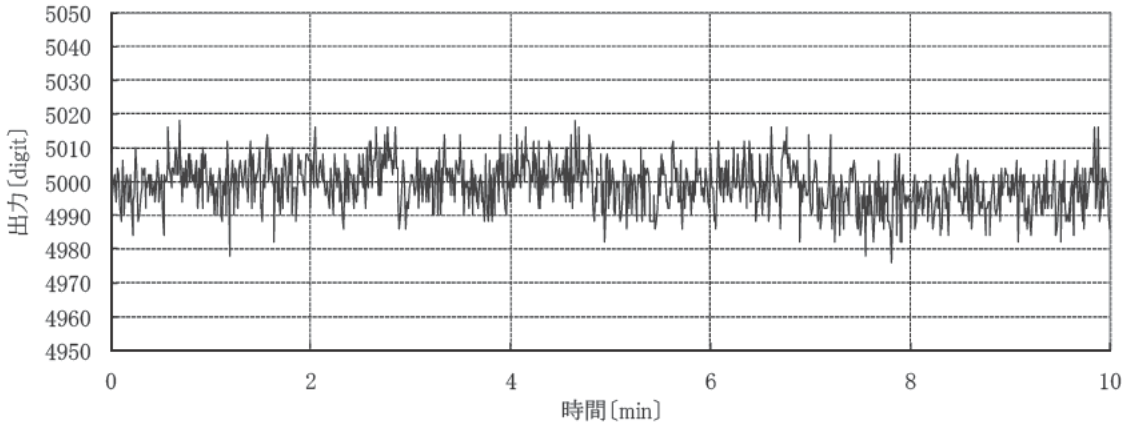


図-4.8.2　5000digit 時のばらつき

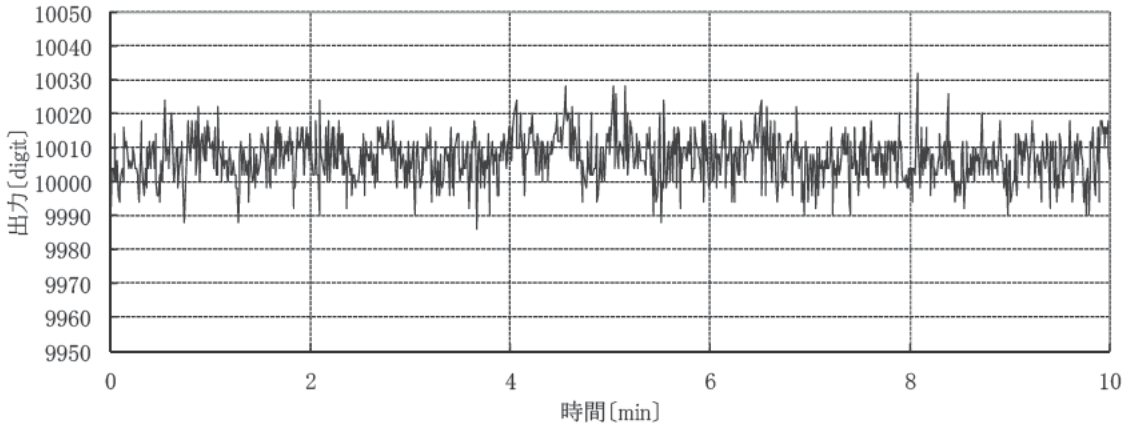


図-4.8.3　10000digit 時のばらつき

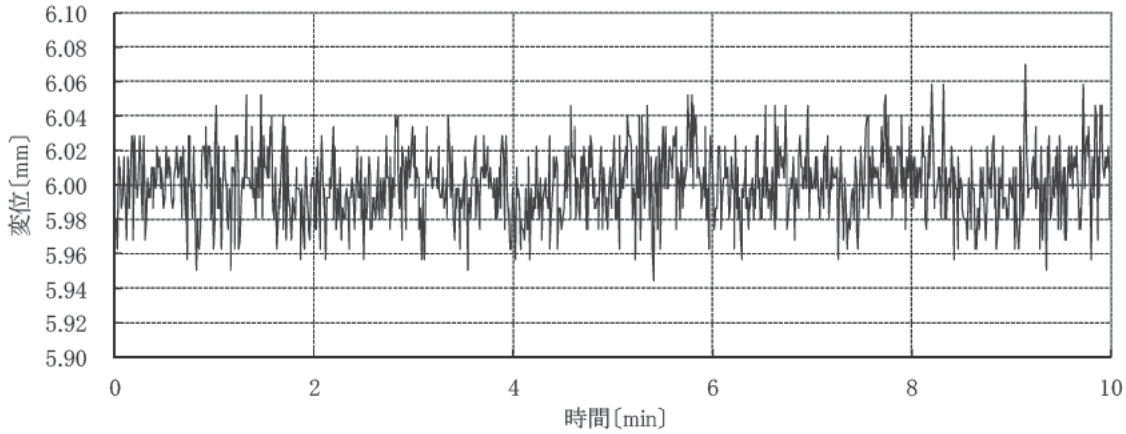


図-4.8.4　2000digit 時の変位量換算

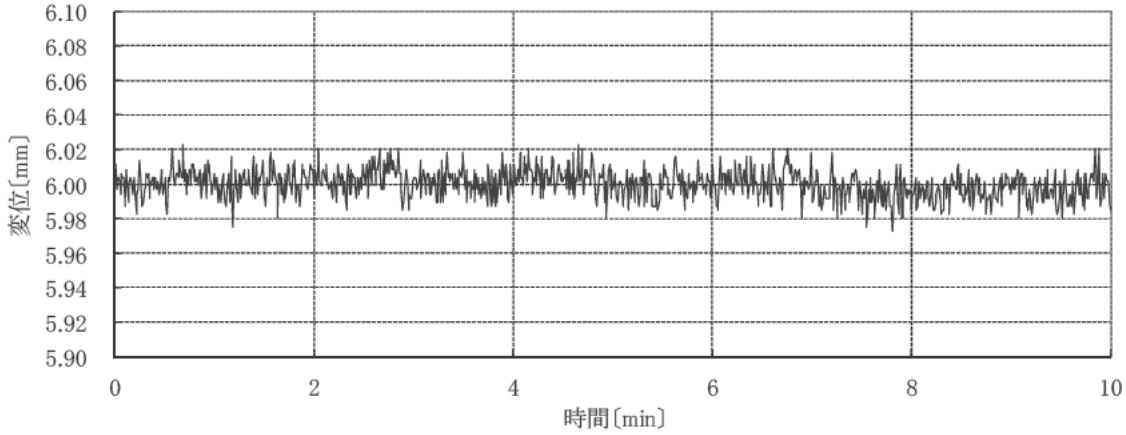


図-4.8.5　5000digit 時の変位量換算

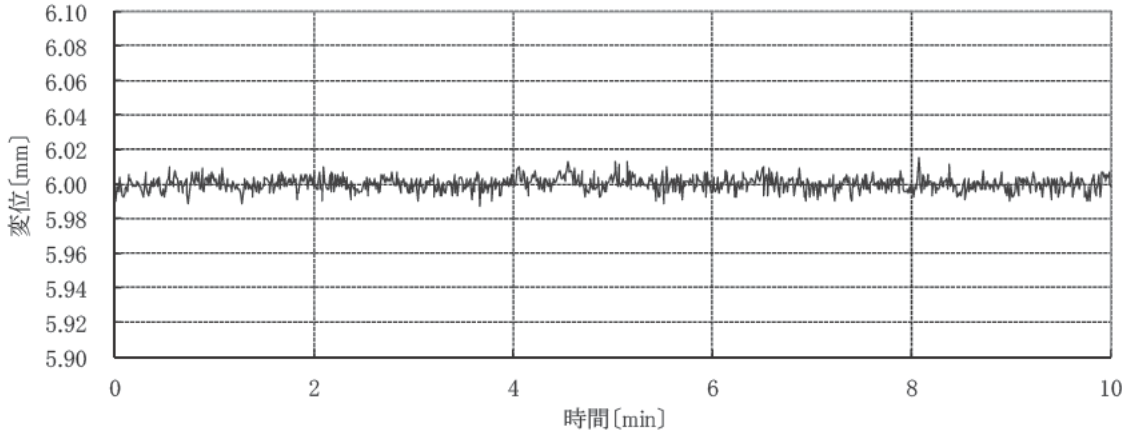


図-4.8.6　10000digit 時の変位量換算

4.9　電磁波の影響

ずれセンサーの測定精度について検討を行う際に，ずれセンサーの測定における周囲の一般的な電磁波の影響も懸念されたことから，その影響について調査を行った。ずれセンサー(試作 2 号)にシールド処理(金属容器に入れ，電磁波を遮断すること)を施し(図-4.9.1)，電磁波を遮断した状態と遮断していない状態，それぞれにおける出力を測定した。測定は，東京測器研究所内の室内において，静ひずみ測定器 TDS-303 に接続し，30 分間，2 秒ごとのインターバル測定を行った。

図-4.9.2 に，測定結果を示す。これらの測定の範囲では，シールド処理の有無による明確な差は見られなかった。ずれセンサーの測定結果における値のばらつきは，電磁波に起因するものではないと推定される。

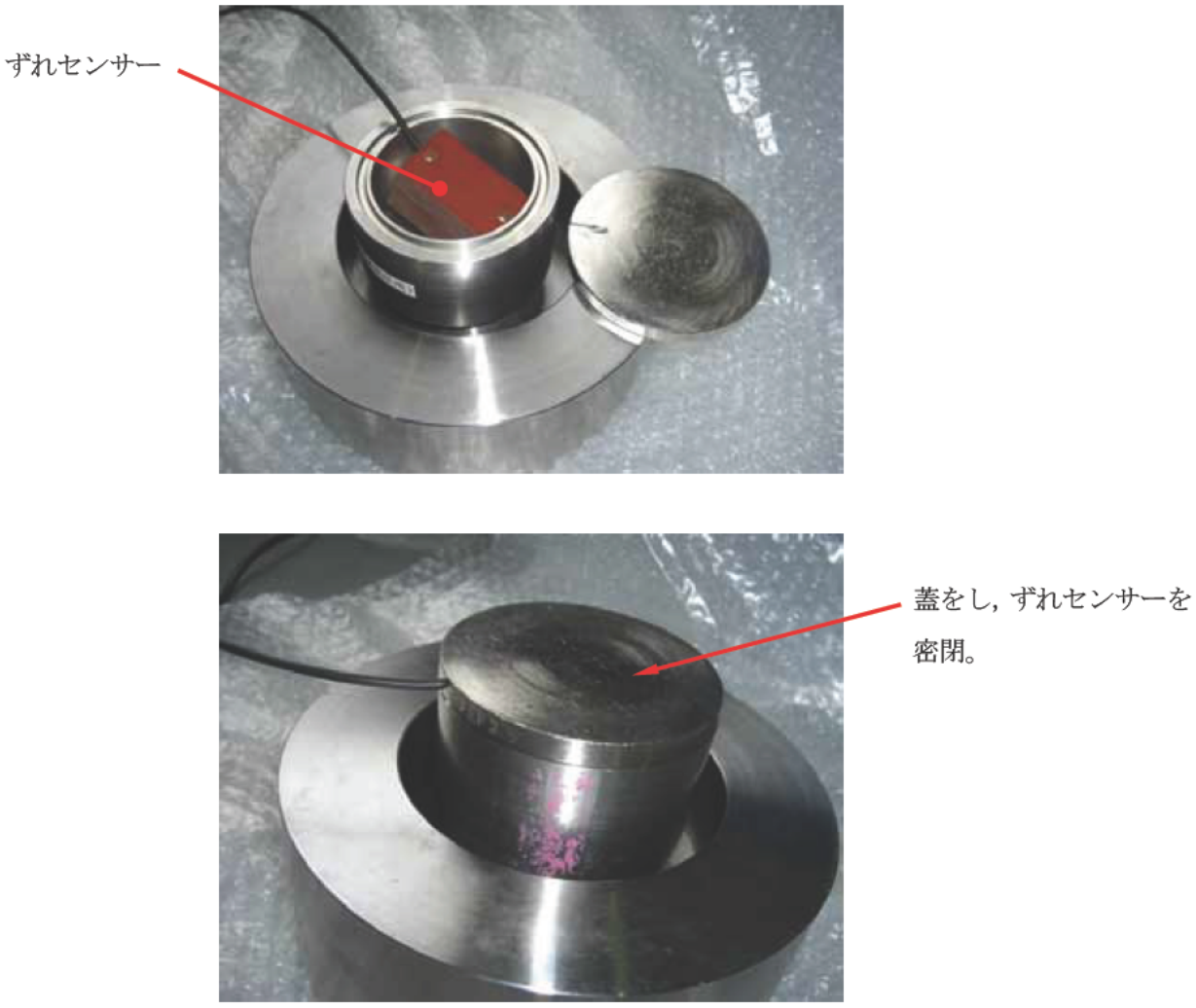
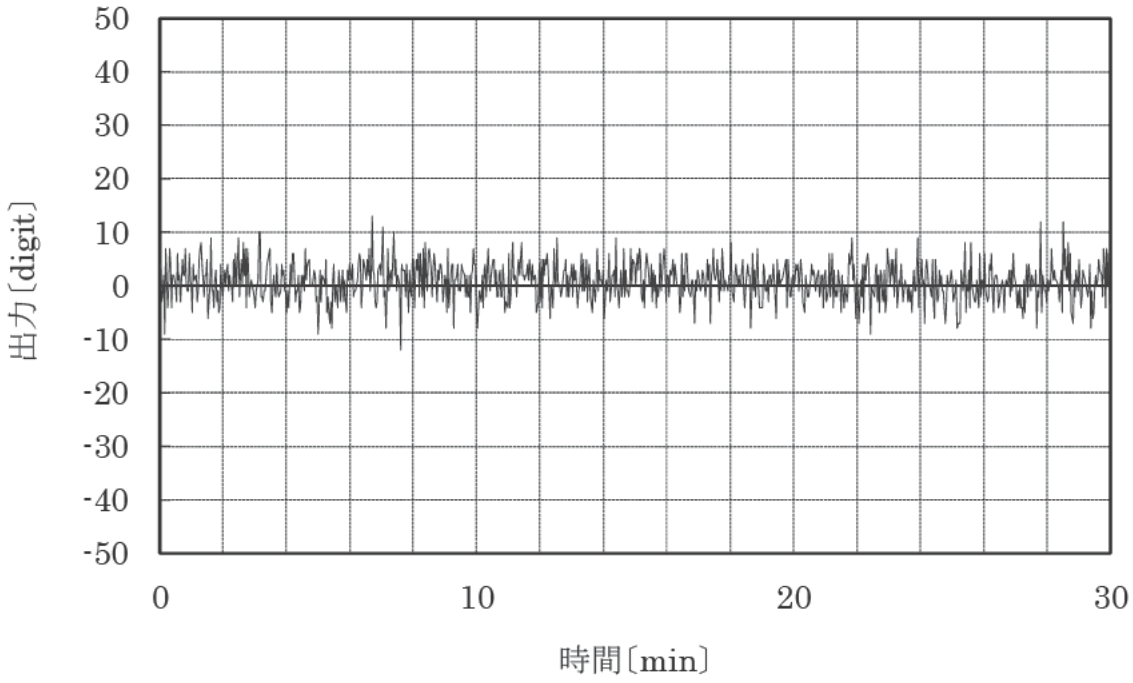
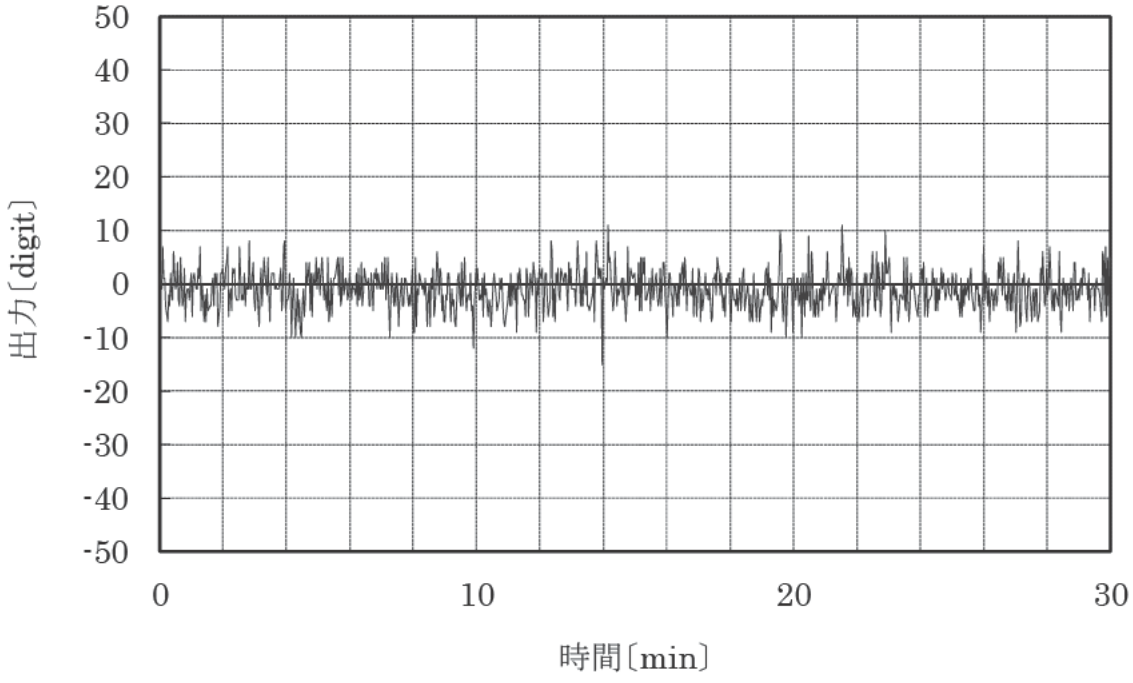


図-4.9.1　ずれセンサーのシールド処理



(a)　シールド処理あり



(b)　シールド処理なし

図-4.9.2　電磁波の影響に関する測定結果

4.10　校正値の経時変化（長期安定性の確認）

試作 2 号(試作番号 No.3, 4)について，製作から 2 年 5 カ月後に再度校正を行った。これらのずれセンサーは，試験的な測定に用いた後，室内に置かれた。表-4.10.1 に，各校正値を示す(校正時の測定結果の詳細は巻末に添付した)。これらの結果より，ずれセンサーの校正値の変化は 0.4～1.2%であり，長期に安定していることがわかった。

表-4.10.1　ずれセンサー(試作 2 号)の校正値の変化

校正日時	試作番号 No.3	試作番号 No.4
2009 年 5 月 8～9 日	0.002941　(1.000)	0.002931　(1.000)
2011 年 10 月 3 日	0.002954　(1.004)	0.002965　(1.012)

注)　校正値の単位は mm/digit
括弧内数値は，初期の測定を 1 としたときの比を示す。

4.11　温度の影響

ずれセンサーの周囲の温度の影響については，3 章で述べたとおり，温度 0～50℃の範囲において，ずれセンサーの測定結果にほとんど影響しないことを述べた。このときは，磁石の出力が小さかったことから，試作 3 号ではその影響がより小さくなっていると考えられる。しかしながら，わずかであっても温度の影響が生じることから，ここでは，その原因を確認するための一つの試みとして，図-4.11.1～2 に示すように，東京測器研究所の地下ピットにおいて，ホール素子の近傍に磁石がない場合(Case1)と，近傍に磁石を配置して約 10000digit の負荷がある場合(Case2)について，それぞれ出力値と周囲の温度の変化を 35 日間にわたって記録した。図-4.11.3～4 に，ホール素子を固定した筐体の形状寸法と外観を示す。

図-4.11.5 に，各出力値と温度の経時変化を示す。Case1（無負荷）では，約 1 箇月間出力値の変動がほとんど見られなかった。一方，Case2（約 10000digit 負荷）では，出力値が温度変化に応じて変動が見られた。ただし，Case2 で，13 日目に出力値がシフトしているのは，他の作業のため，測定中に機器の配置を変えたときに，磁石との距離がわずかに変化したことによると考えられる。

図-4.11.6 に，温度と出力値の関係を示す。なお，Case1（無負荷）で温度との相関が明確でないのは，単に出力がないことによるものであり，ホール素子の性能が温度に依存しないというわけではない。Case2（約 10000digit 負荷）の結果は，ずれセンサーの出力と温度の間にある程度の相関があることを示す。この測定事例の場合，同図の傾きから，－0.19%/℃の影響があったことがわかる。使用したサマコバ磁石の温度依存性(メーカー値)は－0.03%/℃，ホール素子の温度依存性(メーカー値)は－0.06%/℃であることから，測定結果における温度の影響の約半分は，ホール素子と磁石の性能によるものであったと推察される。また，固定していた鋼板の温度変化による収縮膨張の影響があったものと考えられる。

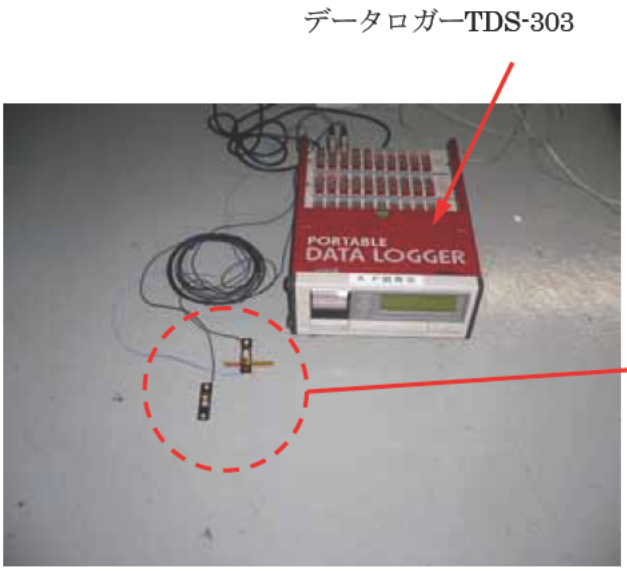


図-4.11.1　測定状況

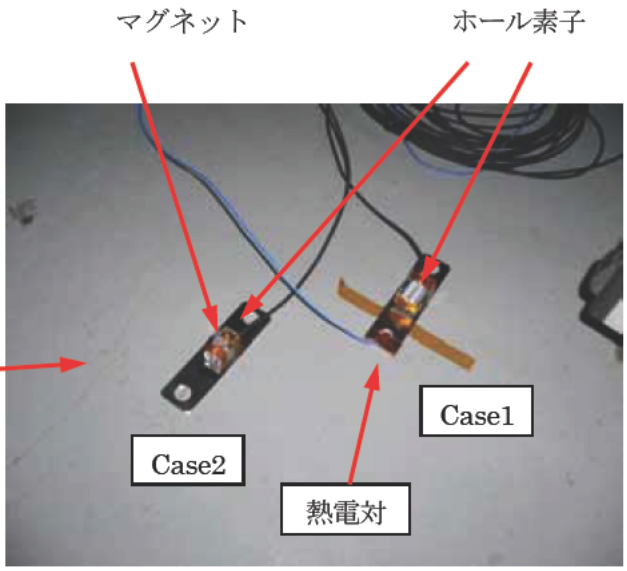


図-4.11.2　ホール素子と熱電対の配置

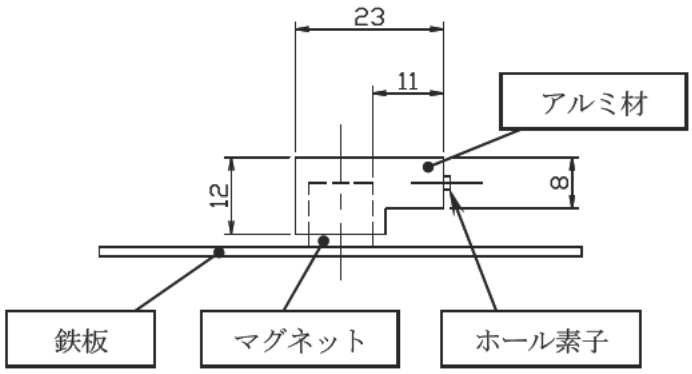


図-4.11.3　ホール素子を固定した筐体の形状寸法

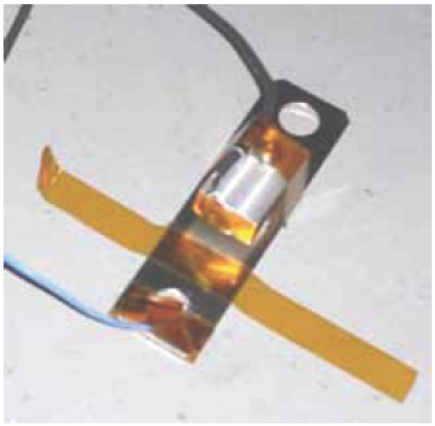


図-4.11.4　Case1 無負荷の外観

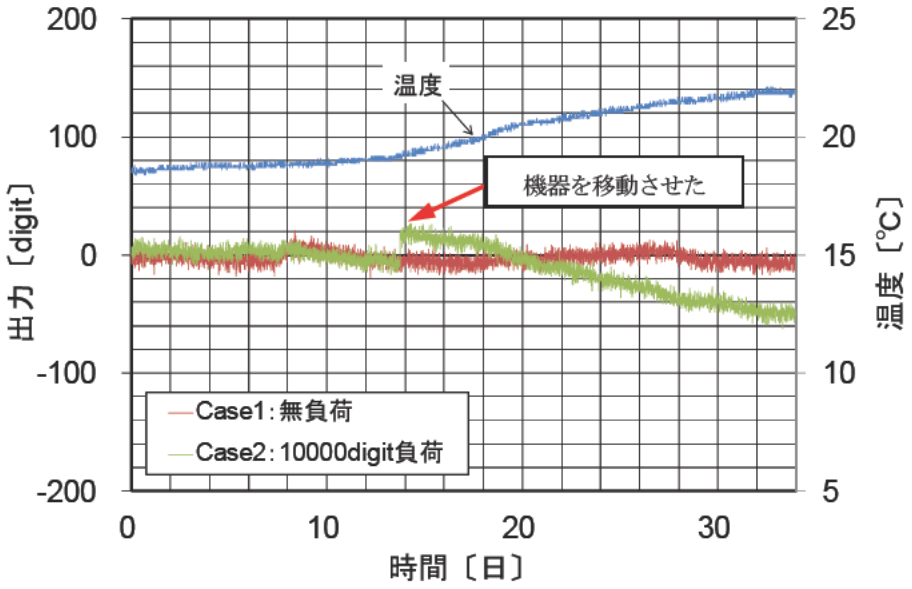
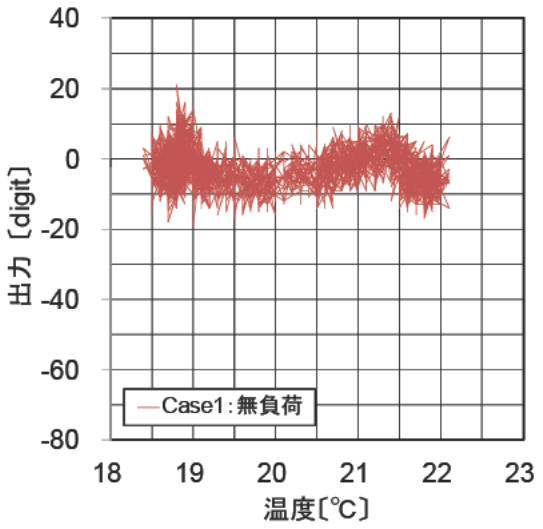
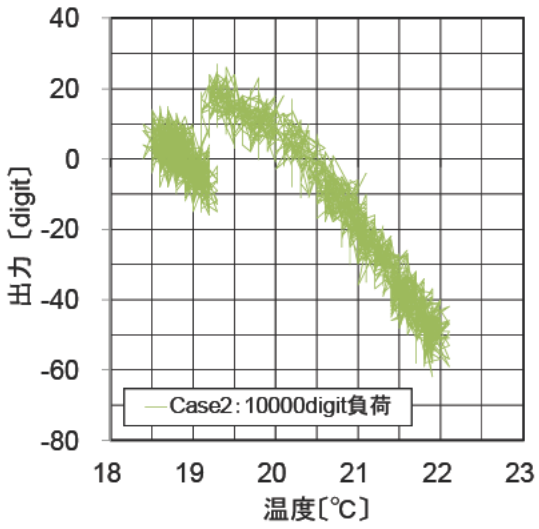


図-4.11.5　経時変化



(a)　Case1（無負荷）



(b)　Case2（10000digit 負荷）

図-4.11.6　温度と出力値の関係

５．コンクリート打継目のずれ変位測定への適用性に関する調査

5.1　ホール素子と磁石の隙間が打継目のせん断強度に及ぼす影響

(1)　概要

コンクリートの打継目をはさんで，ずれセンサーのホール素子部と磁石部を埋め込んだときに，それらの存在が，打継目の破壊面に悪影響を及ぼすことが懸念されることから，素子と磁石の間隔をパラメータとして，模擬のずれセンサー(ベークライトのみ)をコンクリートの打継目に埋め込み，せん断試験を実施して，せん断強度を確認するとともに，破壊面の観察を行った。その際，ずれセンサー(試作 2 号)を供試体の側面に設置して，カンチレバー型変位計との比較を試みたが，試作 2 号の出力レベルが小さいことによるばらつきが大きいため，明確な比較ができなかった。

(2)　試験方法

打継目を有するコンクリートブロックを 3 体製作して，2 面せん断試験を実施した。打継目付近には，ずれセンサーを模擬したベークライトを埋め込んだ。

図-5.1.1 に，供試体の形状寸法，載荷方法及び測定機器の設置位置を示す。供試体には，打継目を 1 箇所設けることとして，一次打設から 2 箇月後に，二次打設を行った。表-5.1.1 及び図-5.1.2 に模擬センサーの埋め込み位置を示す。二次打設時に打継目から模擬センサーまでの距離(目標値)を 1, 3, 5 mm として，それぞれ 1 体ずつ製作した。図-5.1.3～4 に，模擬センサーの設置状況と，コンクリートの二次打設時の状況をそれぞれ示す。打継面は，約 1mm の金網を型枠に固定した状態で一次打設した後，脱型とともに金網をとり外した。表-5.1.2 に各コンクリートの配合を示す。一次打設時のコンクリートの W/C は 62.5%，二次打設時は同 45%とした。表-5.1.3 に各コンクリートの圧縮強度試験結果を示す。

載荷方法は，図-5.1.1 に示したとおり，二面せん断試験において打継目の位置で破壊するように載荷点と支点を配置した(いずれも載荷面は 20 mm×150 mm)。打継目のずれ変位を測定するため，A 面側にカンチレバー型変位計を，B 面側にずれセンサーを，それぞれ供試体高さの中央に配置した。また，打継目のない側の載荷点下にも対称に配置した。図-5.1.5 に，測定機器の設置状況の写真を示す。表-5.1.4 にカンチレバー型変位計及びずれセンサーの機器名称を記す。ずれセンサーは，試作番号 3 及び 4 を用いた(主な仕様は 4.1 項，性能は巻末資料に示す)。載荷は，載荷速度 0.05mm/min(試験機変位)の一定速度で静的載荷とした。測定はいずれも動ひずみアンプを用いてデータレコーダに記録した(サンプリング間隔 5 Hz)。ずれセンサーによる変位測定値は，較正値を用いてずれ変位に変換した。

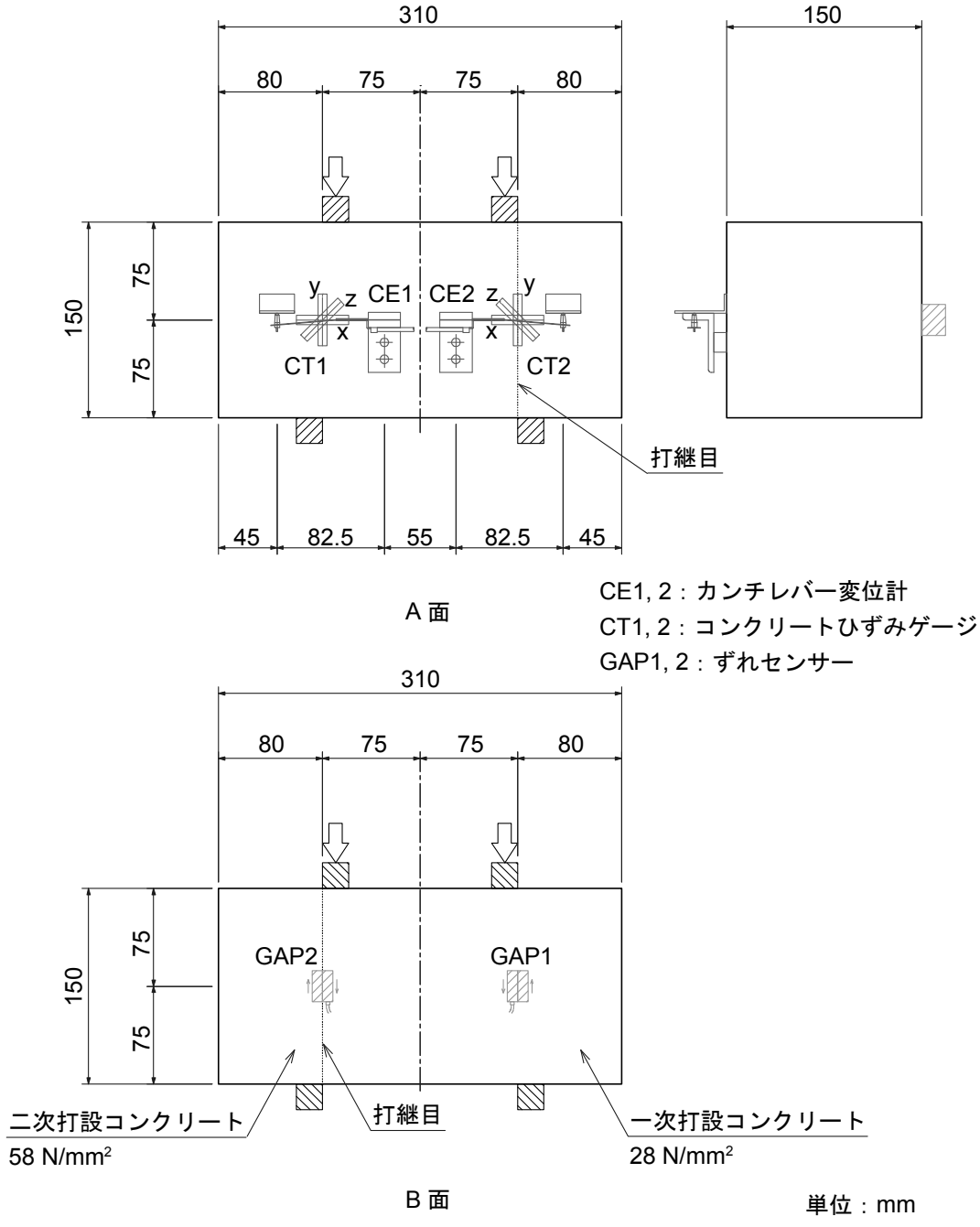


図-5.1.1　供試体の形状寸法，載荷方法，測定機器の設置位置

表-5.1.1　模擬センサーの埋め込み位置 g

供試体	コンクリート	目標値 (mm)	実測値 (mm)
No.1	一次打設	1	1
	二次打設	1	2
No.2	一次打設	3	2
	二次打設	3	3
No.3	一次打設	5	3.5
	二次打設	5	5

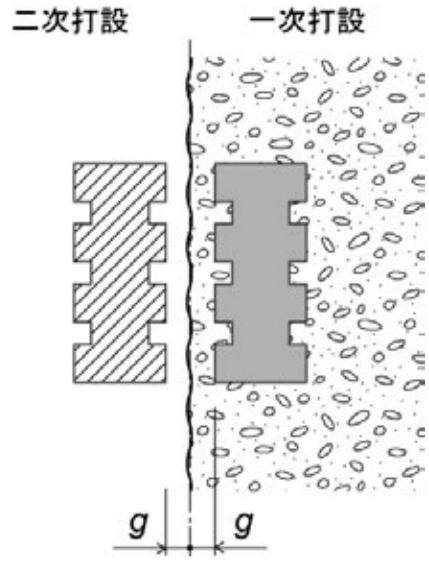
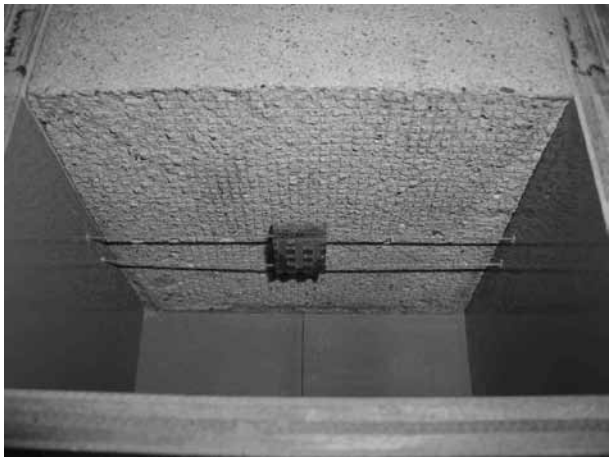


図-5.1.2　模擬センサー(ベークライト)
の形状寸法と埋め込み位置

(a)　一次打設前



(b)　二次打設前

図-5.1.3　模擬センサー取り付け状況

図-5.1.4　二次打設状況

表-5.1.2　コンクリートの配合

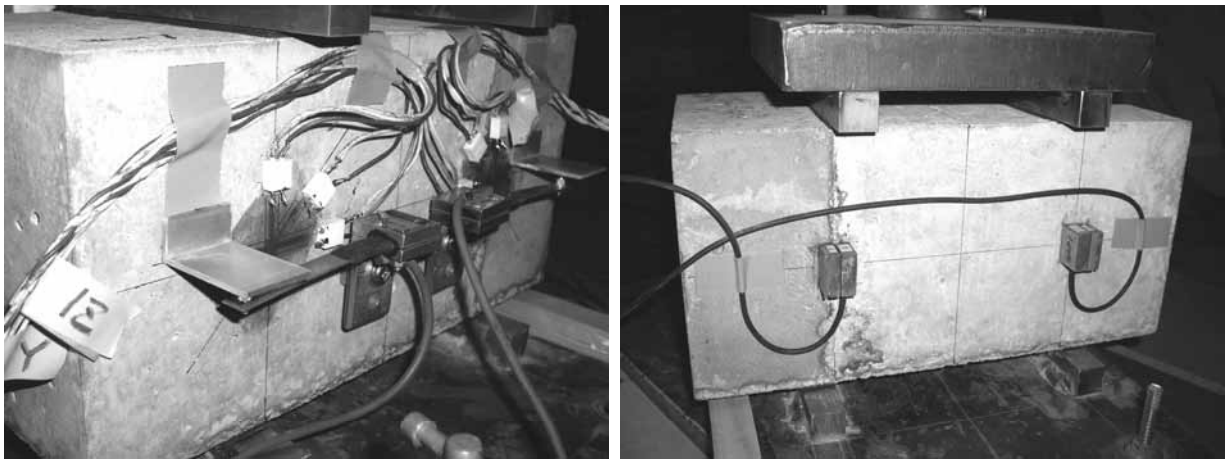
打設	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位質量(kg/m³)					
						水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤	AE 剤
一次	20	7.5	4.0	62.5	46.2	159	255	858	1032	2.70	－
二次	20	13.5	3.9	45	43	162	360	759	1034	180ml	54ml

セメント：普通ポルトランドセメント

混和剤：一次打設　AE 減水剤(No.70)，二次打設　高性能 AE 減水剤(SP8SV)，AE 剤(No.202)

表-5.1.3　コンクリートの強度試験結果

打設	圧縮強度 (N/mm²)	弾性係数 (kN/mm²)	割裂引張強度 (N/mm²)	見かけ密度 (kg/m³)	材齢
一次	27.7	21.1	2.29	2310	28 日
	32.8	21.2	2.44	2280	146 日(せん断試験時)
二次	57.9	－	－	2420	28 日



(a)　A 面　　(b)　B 面

図-5.1.5　測定機器の設置状況(供試体 No.1)

表-5.1.4　測定機器

	名称・型式	備　考
カンチレバー型変位計	CE-5	測定容量 5mm
ずれセンサー	試作品 (#3, #4)	測定容量±6mm

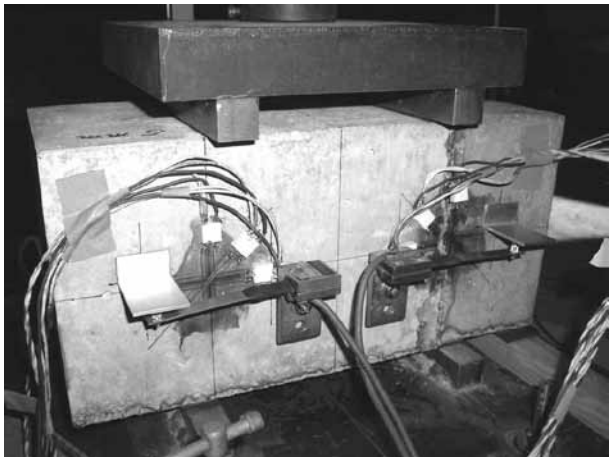
(3) 試験結果

いずれの供試体においても打継目で破壊した。図-5.1.6 に，供試体 No.3 の破壊例を示す。破壊が生じるまで目視観察を行ったが，破壊直前までひび割れなどの変状は見られなかった。表-5.1.5 に，破壊荷重と打継目における付着せん断強度(破壊荷重/2/打継面の面積)を示す。

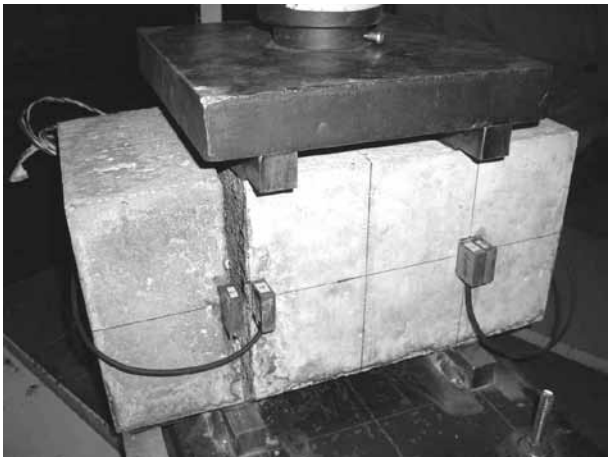
図-5.1.7 に，各供試体の破壊面の状況を示す。供試体 No.1 の破壊面のうち，下側の白い部分が一次打設コンクリート，上側の黒い部分が二次打設コンクリートである。いずれも破壊面に模擬センサーは見られない。

図-5.1.8～10 に，試験後に供試体の長手軸方向に沿って切断して，内部の模擬センサーの配置状況を確認したときの写真を示す。同図(b)に示すように，一次打設側の打継面から模擬センサーまでの距離は，1～2mm 程度であっても，打継面の割れは見られず，模擬センサーの存在は打継面のせん断破壊に影響しなかったことがわかる。

参考として，図-5.1.11 に，供試体 No.3 の打継目におけるずれ変位測定結果を示す。同図(a)にカンチレバー型変位計による測定結果を，同図(b)にずれセンサーによる測定結果をそれぞれ示す。ずれセンサーによるずれ変位は，前述のとおり，試作 2 号の出力不足によるばらつきに加えて動ひずみアンプのノイズが大きく(同図(a)のとおり)，カンチレバーによる変位との明確な比較はできなかった。



(a) A 面

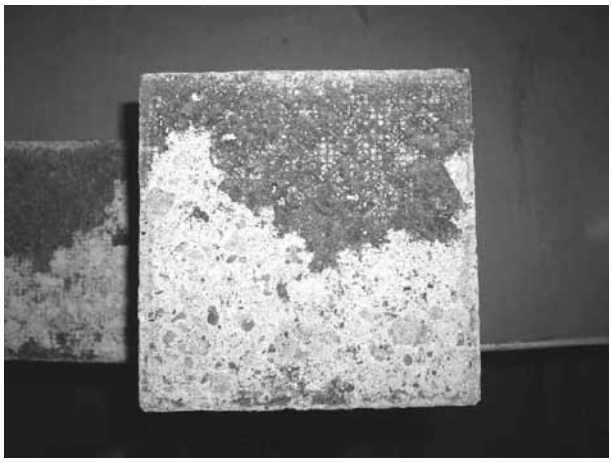


(b) B 面

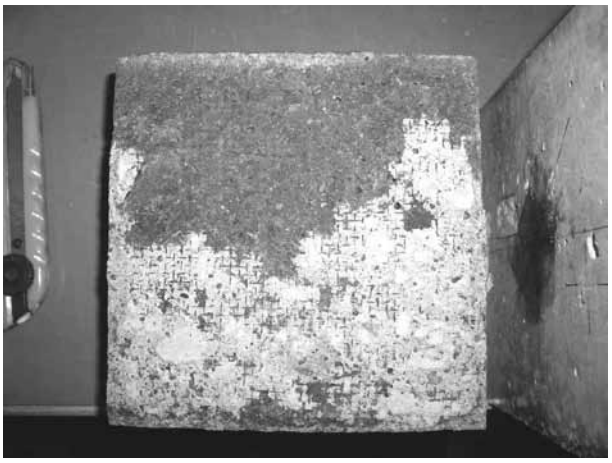
図-5.1.6 供試体 No.3 の破壊状況

表-5.1.5 破壊時せん断力と付着せん断強度

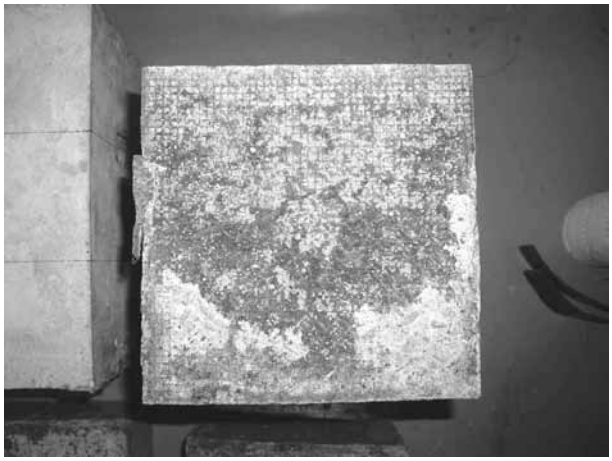
供試体	破壊時せん断力 (kN)	付着せん断強度 (N/mm^2)
No.1	94.2	2.09
No.2	76.0	1.69
No.3	84.8	1.88
平均値	－	1.89



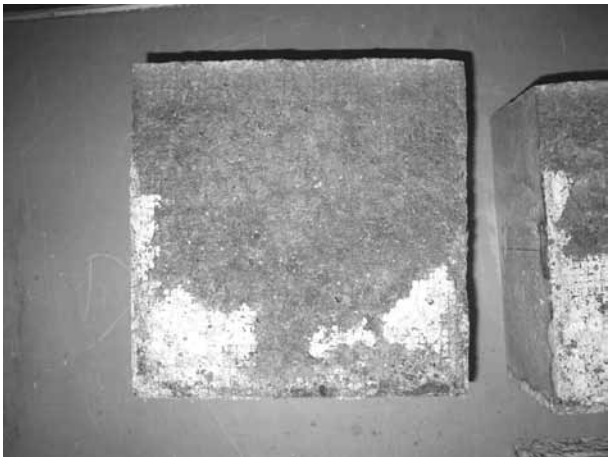
(a) 供試体 No.1，一次打設側



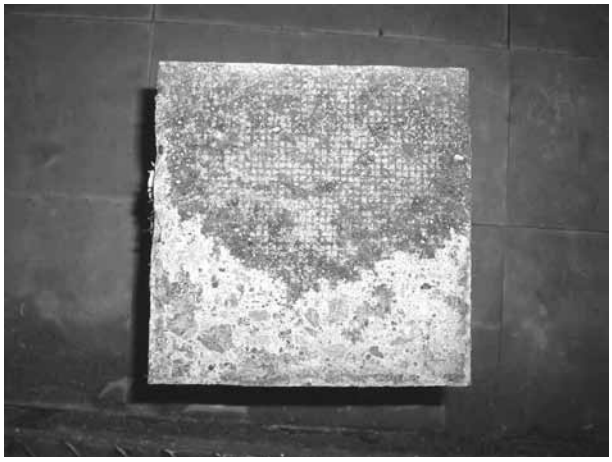
(b) 供試体 No.1，二次打設側



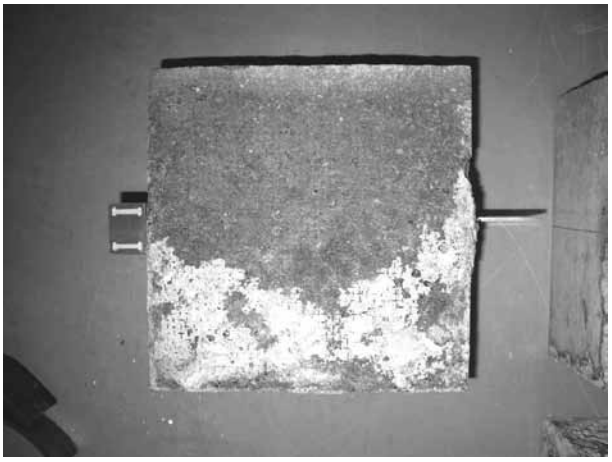
(c) 供試体 No.2，一次打設側



(d) 供試体 No.2，二次打設側

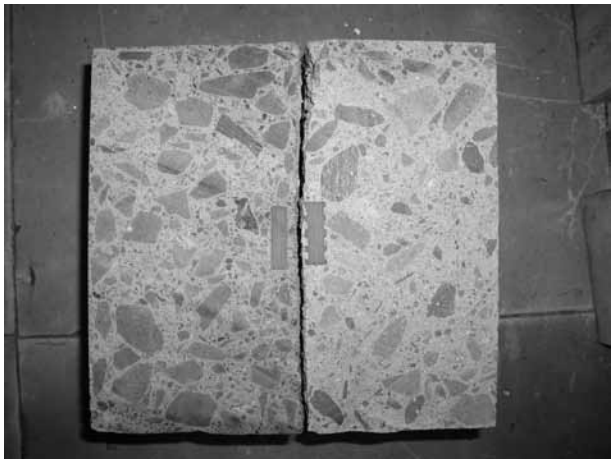


(e) 供試体 No.3，一次打設側

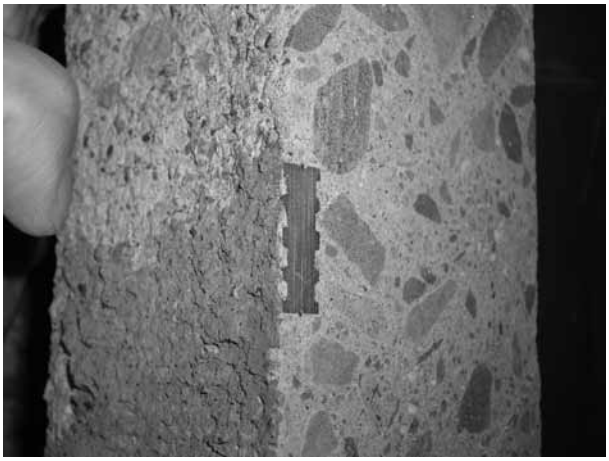


(f) 供試体 No.3，二次打設側

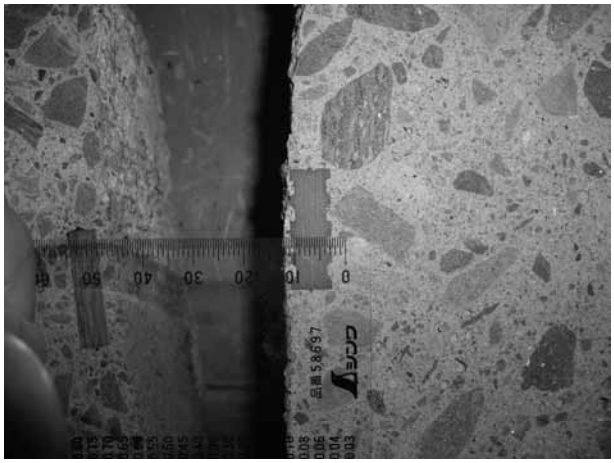
図-5.1.7　破壊面の状況



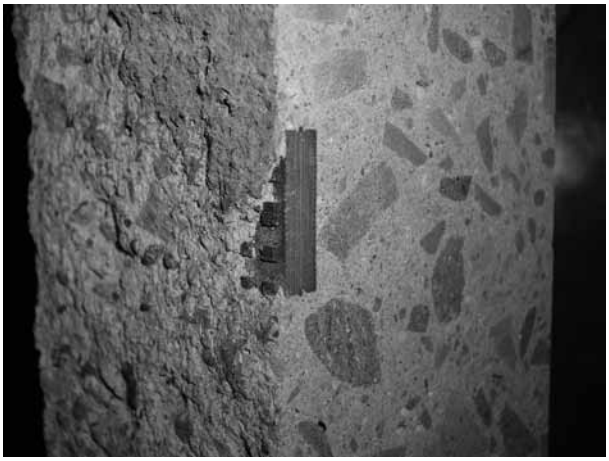
(a) 切断面



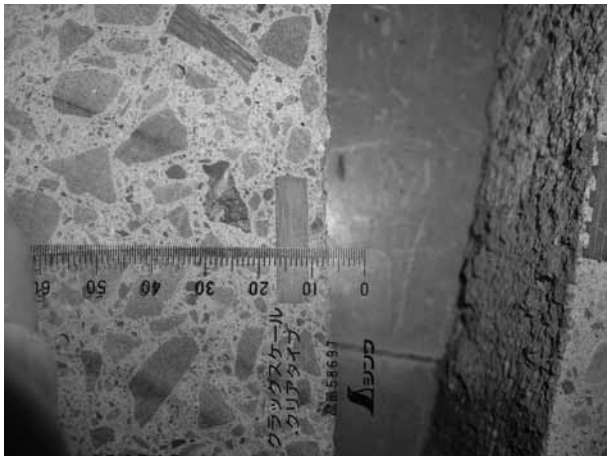
(d) 一次打設側



(b) 一次打設側



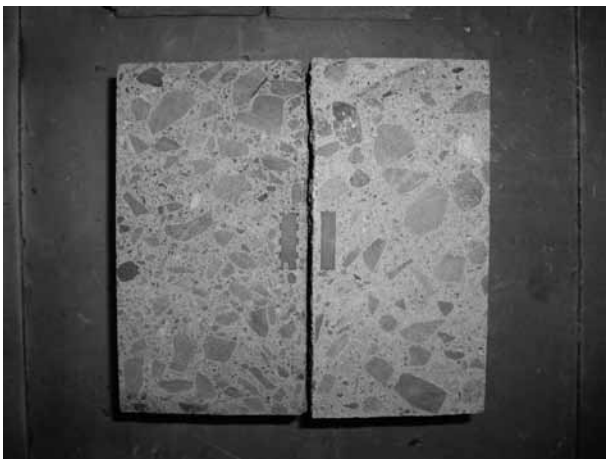
(e) 一次打設側，切断時割れ



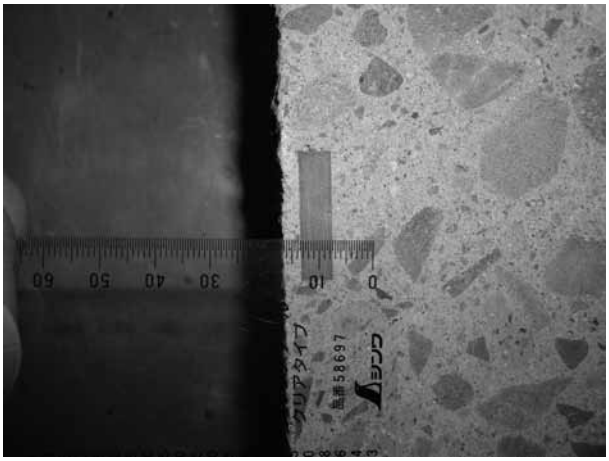
(c) 二次打設側

(f) 二次打設側，充填状況

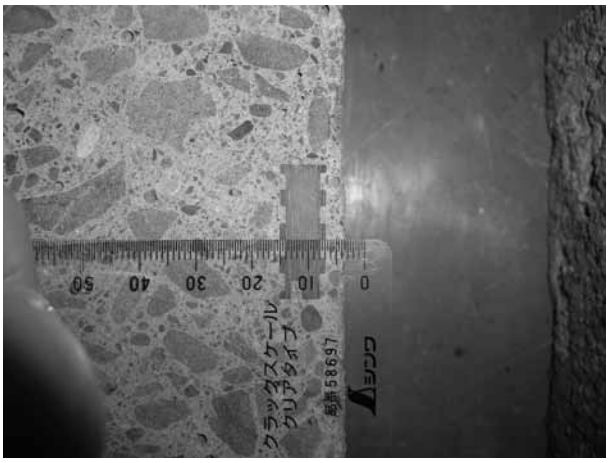
図-5.1.8　供試体 No.1，解体状況



(a) 切断面

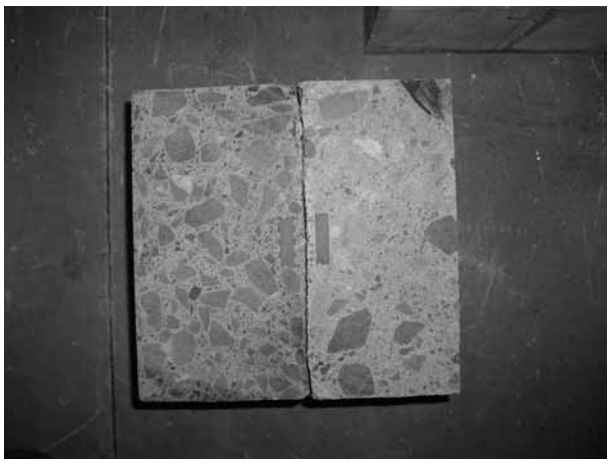


(b) 一次打設側

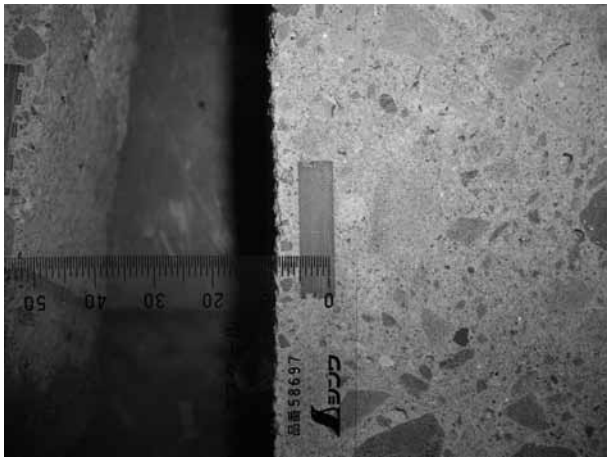


(c) 二次打設側

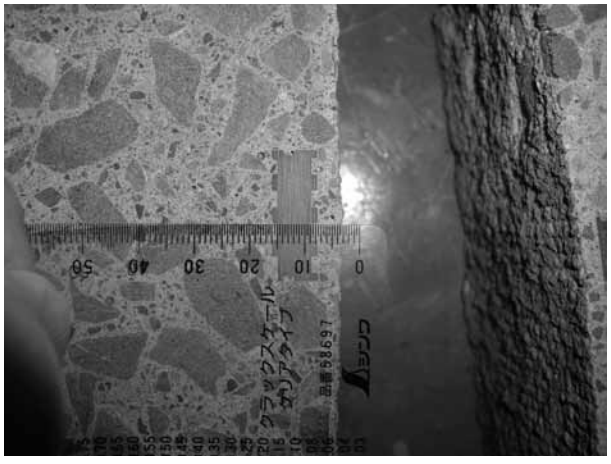
図-5.1.9　供試体 No.2，解体状況



(a) 切断面

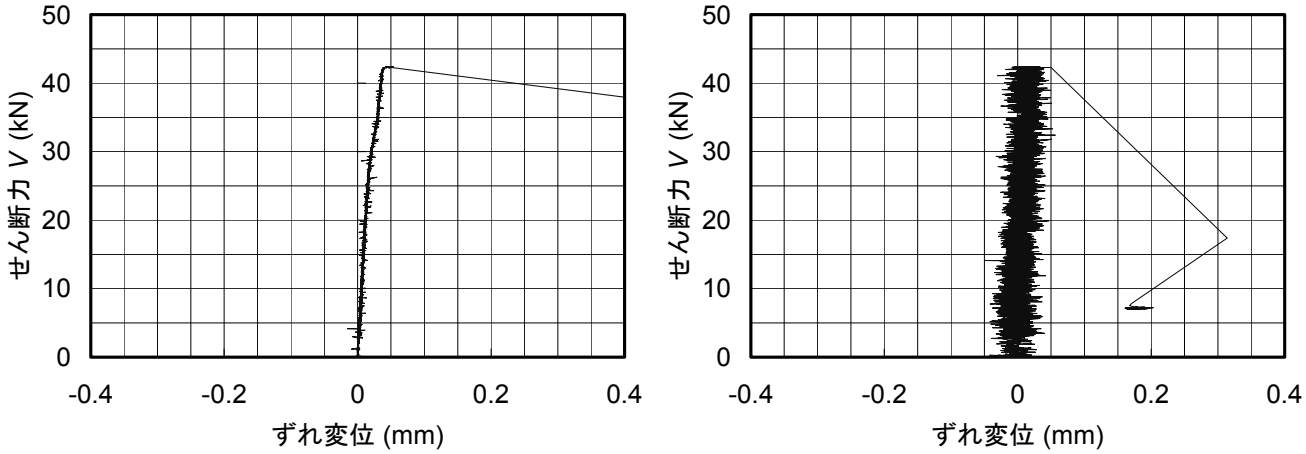


(b) 一次打設側



(c) 二次打設側

図-5.1.10　供試体 No.3，解体状況



(a) No.3，カンチレバー型変位計(CE2)　　(b) No.3，ずれセンサー(GAP2)

図-5.1.11　打継目のずれ変位測定結果の例

注) ずれセンサー試作 2 号の出力不足によるばらつきに加えて，動ひずみアンプのノイズが大きかったため，明確な比較ができなかった。

5.2　打継目を有する鉄筋コンクリート床版への適用

(1)　概要

コンクリートの打継目が RC 床版の疲労耐久性に及ぼす影響を調査するため，打継目を設けた RC 床版の実物大供試体を 1 体作成して，輪荷重走行試験を実施した(図-5.2.1～2)。その際，コンクリート打継目へのずれセンサー配置の可能性を確認するとともに，打継目の動的挙動を把握するため，打継目をはさんで 3 個のずれセンサーを配置して，走行試験中の動的波形を測定した。ここでは，輪荷重走行試験の概要と，ずれセンサーの測定結果を示すとともに，周囲の変位計及びモールドゲージの測定結果との比較を行う。

(2)　試験方法

図-5.2.3～4 に供試体の形状寸法と設置方法を示す。表-5.2.1 に供試体の主な諸元を示す。表-5.2.2 にコンクリートの配合を，表-5.2.3 にコンクリートの材料試験結果を，表-5.2.4 に鉄筋の材料試験結果をそれぞれ示す。打継目は，床版中心から 600 mm 離れた位置で，主鉄筋の配置位置と一致する断面とした。一般に打継目が主鉄筋位置に配置されることは少ないと考えられるが，輪荷重走行試験では主鉄筋位置にひび割れが発生しやすい傾向にあり，打継目の開きが発生しにくくなる可能性があったため，あえて主鉄筋位置に打継目を設けることとした。

輪荷重の走行載荷は，157 kN 一定荷重で行った。ただし，走行開始時は，図-5.2.5 に示すように，荷重 80 kN から 100 回ごとに 10 kN 増加させる方法として，これを 2 度繰り返した後，一定荷重走行載荷に移行した。走行速度は，初期載荷の 1 回目のみ 5rpm とし，2 回目の階段載荷以降は 15rpm とした。

図-5.2.6 に，打継目におけるずれセンサーの設置位置を示す。3 個のずれセンサー(それぞれ GAP1, GAP2, GAP3)は，いずれも打継目をはさんで配置することとし(図-5.2.7)，輪荷重走行位置の直下(中心から 50mm)に GAP2 を，GAP2 の位置から左右 300 mm の位置に GAP1 と GAP3 を配置した。図-5.2.8～16 に，打継目を形成するための型枠と，ずれセンサーの設置状況を示す。ずれセンサーは床版厚の中心に設置した。一次打設時は，打継目の表面粗さを一律にするため，直径 1mm，5mm 間隔の格子状の金網を型枠に両面テープで貼り付けた。一次打設側には，ずれセンサーの磁石部分を埋め込むため，図-5.2.7 に示すとおり，小さい木片と両面テープを用いて型枠に固定した(ずれセンサーに付属しているプラスチックの治具を利用して固定することも考えたが，ここでは使用していない)。打継目型枠を取り外す際に GAP1 付近のモルタルが剥離した(図-5.2.12)。二次打設側には，ずれセンサーのホール素子部分を同様に設置した。コンクリートの打設の際，ずれセンサーの内側にモルタル分が入るように，その周囲での振動機の振動時間をやや長くした。

ずれセンサー以外に打継目の挙動を把握するため，前掲図-5.2.6 及び図-5.2.17～22 に示すとおり，ずれセンサーGAP3 近傍に，床版供試体の上下面にカンチレバー型変位計(CE-5)とパイ型変位計(PI-5-100，ただし固定点間距離を 150mm とした)を配置して，上下の段差，横ずれ，開きの三軸方向の変位を測定した。輪荷重走行位置直下に配置したずれセンサーGAP2 の近傍には，供試体の下面のみに，GAP3 付近の下面と同様に変位計を配置した。また，図-5.2.6 に示したとおり，ずれセンサー以外に打継目内部の開きを確認するため，プラスチック製モールドゲージ(PMFL-60)を，各ずれセンサー付近で，打継面に直角に貫通させて配置した(図-5.2.9)。その他，従来の輪荷重走行試験 [4),5)] と同様に，床版下面のたわみ変位を変位計により測定す

るとともに，鉄筋のひずみをひずみゲージを用いて測定した。

床版中央での静的載荷は，繰返し数(走行回数であり，1 往復で 2 回とする)20000 回までは 2000 回ごとに，それ以降は 20000 回ごとに行った。また動的測定は，繰返し数 20000 回までは 2000 回ごとに，それ以降は 5000 回ごとに行った。動的測定は常時行っているが，所定の繰返し数に達する直前 30 秒間のデータのみをインターバルで保存した。動的測定は，50 msec 間隔で測定した。

(3) 輪荷重走行試験の主な結果

図-5.2.23 に，試験終了後の床版下面及び上面のひび割れ状況を示す。また，図-5.2.24 に，床版中央変位の変化を示す。床版下面の打継目の開きは，走行開始早々に発生した。また，床版上面の打継目の開きは，繰返し数 4000 回(図-5.2.5 に示した初期の階段載荷 1700 回を含む)で既に広範囲に見られた。輪荷重による床版の抜け落ちは，297 万回で一次打設コンクリートの範囲で発生した。

(4) 打継目近傍の測定結果

図-5.2.25 に，GAP3 近傍を例に，カンチレバー型変位計とパイ型変位計による打継目の 3 方向の変位の呼び方と極性を示す(GAP2 も同様)。図中のカッコ内記号は，GAP3 近傍の各測定機器の番号を示す。ずれセンサーによる測定は，段差の測定に相当し，極性も同様に表す。

打継目の貫通ひび割れが発生した可能性のある繰返し数 4000 回の前後で比較するため，繰返し数 50 回と 10000 回のときの測定結果を比較する。その際，50 回時は，5rpm，78kN で載荷したことから，本文では，比較のために走行速度と荷重をそれぞれ 15rpm，157kN に相当する値に換算して表す。図-5.2.26 に，荷重の実測値について，補正前後の値を示す。なお，荷重 78kN 時は，試験機の性質上，輪荷重の荷重制御の精度が悪いため，ばらつきが大きい傾向にある。

図-5.2.27 に，ずれセンサーの測定結果を示す。繰返し数 50 回のとき，値が 0.02～0.05mm を示しているのは，載荷による弾性変形分と考えられる。繰返し数 10000 回のときは，GAP2，GAP3 で，打継目を通過する度に値が 0.05～0.06mm の範囲で明確に変化していた。

図-5.2.28 に，GAP3 近傍，床版上下面のカンチレバー型変位計及びパイ型変位計の測定結果を示す。同図(a)は，床版の上面で打継目の段差を測定しようとしたものであるが，打継目を通過する度に値が往復ともに負方向に大きく変化する傾向が見られた。同図(b)は，床版の下面で打継目の段差を測定しようとしたものであるが，打継目を通過する度に値が往復ともに正方向に大きく変化する傾向が見られた。また，打継目上に輪荷重がないときにおいても，輪荷重が一次打設側にある場合(周期が長い方)と二次打設側にある場合とで，値に差が見られる。この差は，繰返し数 50 回のときでも見られ，床版上面では，同 50 回，10000 回ともに輪荷重が一次打設側にあるときに正の方向に増加する。一方，床版下面では，同 10000 回のときは，床版上面と同様に，輪荷重が一次打設側にあるときに正の方向に増加するが，同 50 回のときは，逆に輪荷重が一次打設側にあるときに負の方向に変化する傾向が見られる。横ずれや開きに関しても，輪荷重が打継目を通過する度に，大きく値が変化する傾向が見られた。

同様に，図-5.2.29 に，輪荷重直下の GAP2 近傍の測定結果を示す。段差，開きの変化の傾向は，GAP3

近傍の結果と類似するところが多い。横ずれは，発生しにくい位置であり，輪荷重が打継目上にないときは，一次打設側と二次打設側の差がほとんどない。しかし，輪荷重が打継目を通過する際に大きく負側に変化していた。

図-5.2.30 に，打継目を跨いで設置したモールドゲージのひずみ測定結果を示す。いずれの測定結果においても，既にコンクリートの引張限界ひずみ(概ね 100～150μ)を大きく超えており，床版厚の中心付近では，既に打継目の開きが発生していたと考えられる。

(5) 打継目近傍の挙動

カンチレバー型変位計の測定結果において，輪荷重が打継目上を通過する度に値が大きく変化する傾向が見られたのは，打継目の段差だけでなく，床版の弾性変形を測定していたためと推測される。図-5.2.31 に，GAP3 近傍を例に，カンチレバー型変位計とパイ型変位計の測定結果に基づき想定した，打継目の挙動の変化の概念図を示す。同図(a)～(c)のうち，上段の図は，カンチレバー型変位計の測定結果に基づく，変化の極性を示す。同図(a)は，輪荷重が打継目を通過する際の動きを表す。一方，同図(b)，(c)は，輪荷重が打継目上にないときの打継目の変化を表す。同図(a)，(b)に示すように，床版の上面と下面で，段差の極性が異なっていた。各図の下段の図は，打継目付近の変形を想定した図である。

同図(a)は，均一なコンクリートの場合における床版の弾性変形で発生する変化を表している。この場合には，床版の上面と下面で，カンチレバー型変位計の測定値が上下で極性が異なるものと考えられる。その値は，床版の弾性変形の程度と，カンチレバー型変位計のアーム長に依存すると考えられる。

同図(b)に示すように，輪荷重のような集中荷重を受ける床版の弾性変形は，着目点と載荷位置との関係によって，負曲げモーメントが発生する箇所が生じる。また，通常の床版のたわみに加えて，一次打設と二次打設のコンクリートの違いによって生じる剛性の差によって，打継目の挙動に影響を及ぼす可能性がある。ただし，走行回数 50 回という走行初期の段階において，コンクリートの剛性の差はごく軽微であると考えられる。

同図(c)では，床版の上下面で，段差の方向が一致しており，打継目に段差が生じていたことを表す。ただし，カンチレバー型変位計の測定結果には，同図(b)に示す変形分が，段差発生によって影響の程度は異なるかもしれないが，含まれると考えられる。同図(c)の状態での，GAP3 近傍のカンチレバー型変位計の測定結果による段差量は，図-5.2.28(b)に示したとおり，0.054mm であり，ずれセンサーの測定値 0.045mm(図-5.2.27)よりもやや大きい値であった。一方, GAP2 近傍のカンチレバー型変位計の測定結果による段差量は，図-5.2.29(a)に示したとおり，0.056mm であり，ずれセンサーの測定値 0.061mm(図-5.2.27)よりもやや小さい値であった。

同図(d)～(f)は，打継目の上下の開きの傾向を示す。同図(a)～(c)で示した打継目の変形が生じていたとした場合，開きの測定結果も傾向は一致することを表す。

以上のように, カンチレバー型変位計による測定は, 打継目の挙動の理解に役立つ部分もあるが, 例えば, 図-5.2.28(b)の 50 回時の結果のように，実際には打継目で明確な段差が生じていないと考えられるにもかかわらず，変位計のアーム長の影響が大きいために段差が生じているような値を示す場合がある。このことか

ら，本試験における打継目の段差を正確に把握するには，段差量をより直接に測定することができるずれセンサーを用いる必要があると考えられる。

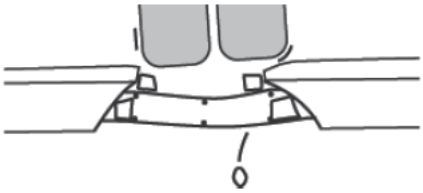
(6) ずれセンサーの測定誤差

表-5.2.5 に，ずれセンサー設置時及び走行試験中に生じる誤差の要因と，ずれセンサーGAP3 の測定結果におけるその影響の程度を示す。ずれセンサーを用いた測定では，4 章で述べたとおり，Z 方向(開き)と Y 方向(ずれ)の位置関係の影響を受けることから，各変位方向ごとに，設置時，走行試験中それぞれにおける状況と程度，影響と具体の影響度を整理して示した。

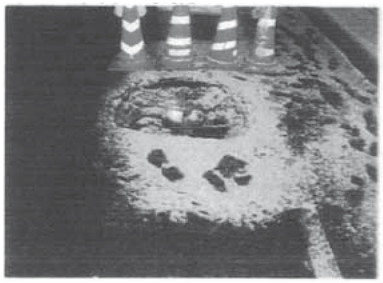
図-5.2.7 に示したずれセンサーの設置方法の場合，設置位置の誤差は，各方向ともに±0.5mm 程度に収めることができると考えられる。この場合，Z 方向の設置誤差の影響が顕著であり，図-4.2.3 に示した結果によれば－10%の出力低下が生じることから，測定結果も同等の影響を受けることとなる。なお，X 方向，Y 方向の設置誤差は測定値にほとんど影響しない。

走行試験中における Z 方向の誤差に関して，図-5.2.32 に，ずれセンサーGAP3 付近における，上下面のパイ型変位計 PIU14 と PIL15 による測定値の平均値 z を示す。この値はパイ型変位計による床版高さ中央における開きに相当するものであり，ずれセンサーGAP3 の位置での輪荷重走行中におけるホール素子と磁石の開きを示すものである。この値 z に対する誤差の影響(補正値)α を，図-4.2.3 に基づき(Z 方向に 0.5mm 開くことによって概ね－10%の出力低下が生じる)，5 / (5+z)で算定した結果を図-5.2.33 に示す。これらの図に示したとおり，走行試験中における開きによる誤差は，1 万回時に－1.6%であった。また，抜け落ち直前の 296 万回時で－4.2%であった。Y 方向の変位は，床版上下面のカンチレバー型変位計による測定結果から，輪荷重通過時での変位を含めても，±0.5mm を大きく超えることはなかったことから，図-4.3.2 の結果を踏まえると，ほとんど影響を受けない範囲であったことがわかる。

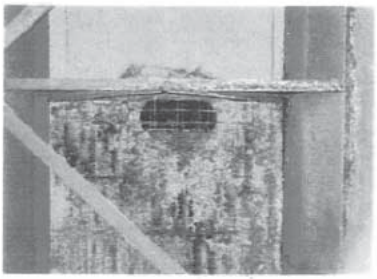
以上の点から，ずれセンサーGAP3 の測定結果には，主として Z 方向の影響により，打継目に貫通ひび割れが発生した時点で，－12%程度の誤差が生じる可能性があったこと，Z 方向の設置誤差の改善が測定精度の向上に大きく寄与することがわかった。



RC床版の抜け落ちイメージ



抜け落ち箇所の路面



抜け落ち箇所の床版下面

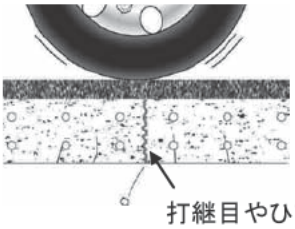


図-5.2.1　輪荷重の走行繰返しによる RC 床版の疲労損傷と打継目のイメージ

図-5.2.2　RC 床版の輪荷重走行試験

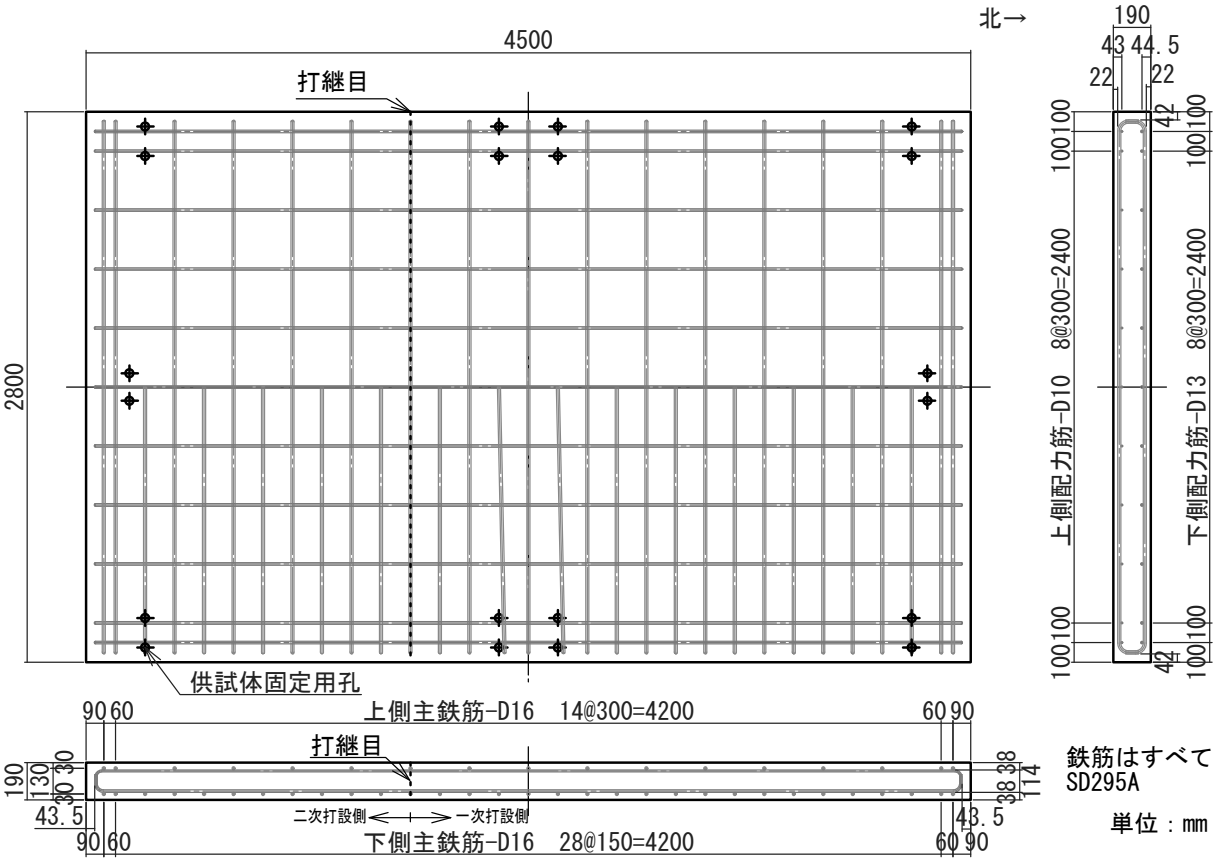


図-5.2.3　供試体 NC の形状寸法

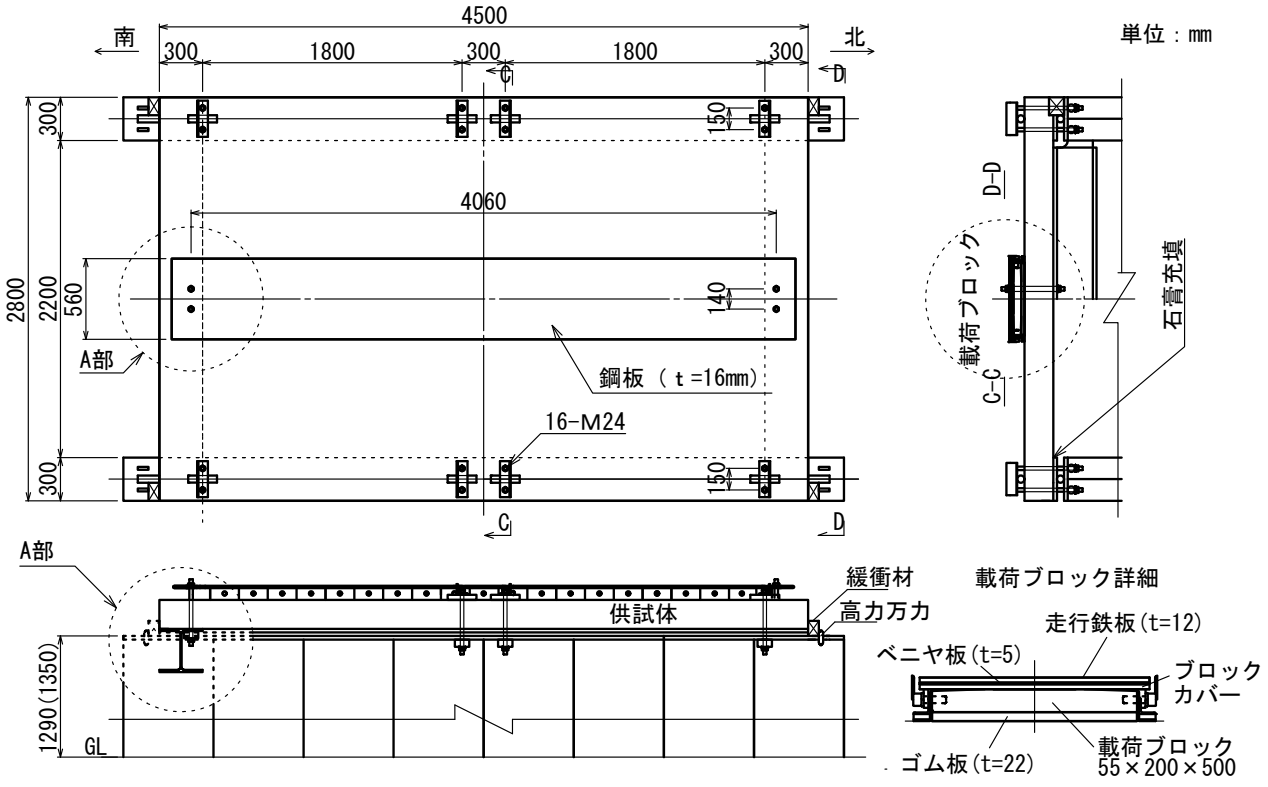


図-5.2.4　供試体の設置方法（輪荷重は鋼板上を往復走行する）

表-5.2.1　供試体の主な諸元

供試体		床版厚 mm	主鉄筋			配力筋	
			呼び径	間隔 mm	上縁からの距離 1) mm	呼び径	間隔 mm
NC1	上段	190	D16	300	30	D10	300
	下段		D16	150	160	D13	300

注 1) 床版上縁から鉄筋中心までの距離
2) いずれも設計値を示す。

表-5.2.2　コンクリートの配合及び打設記録

	W/C %	空気量 %	s/a %	単位量 (kg/m³)					スランプ cm	温度 ℃
				W	C	S	G	AE		
一次打設	57.0	3.9	45.9	170	299	824	1000	2.99	14.5	24.0
二次打設	37.0	4.7	42.5	165	446	718	1000	4.46	13.5	26.0

セメント：普通ポルトランドセメント，AE：AE 減水剤(一次打設)，高性能 AE 減水剤(二次打設)
最大粗骨材寸法 G_{max} = 20mm

注) 二次打設は一次打設の 1 週間後に行った。

表-5.2.3　コンクリートの材料試験結果

供試体	圧縮強度 N/mm²	弾性係数 kN/mm²	ポアソン比	割裂引張強度 N/mm²	みかけ密度 kg/m³	材齢 (日)
一次打設	26.9	23.0	0.161	2.78	2260	39
	30.0	22.8	0.156	2.71	2270	130
二次打設	36.7	25.6	0.185	3.02	3040	32
	39.5	24.2	0.138	3.31	2280	123

注) いずれも平均値，*) コアの疲労試験前 4 本，試験後 3 本

表-5.2.4　鉄筋の引張試験結果

鉄筋	降伏点 N/mm²	引張強さ N/mm²	弾性係数 kN/mm²
D10	338	484	190
D13	349	499	193
D16	341	507	190

注) いずれも SD295A，3 本の平均値

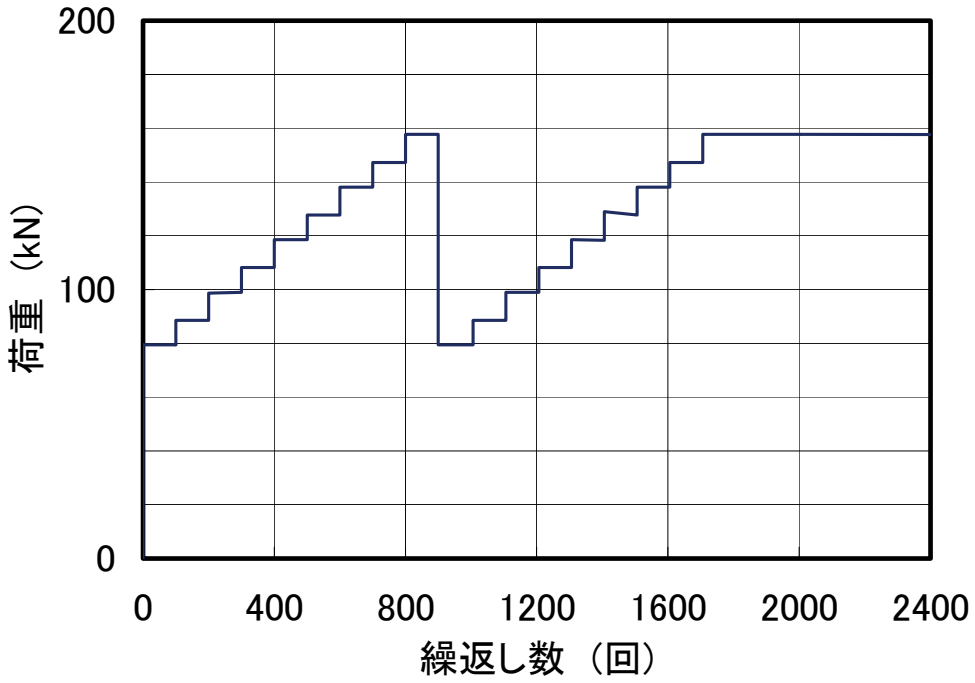


図-5.2.5　輪荷重走行試験の初期載荷条件

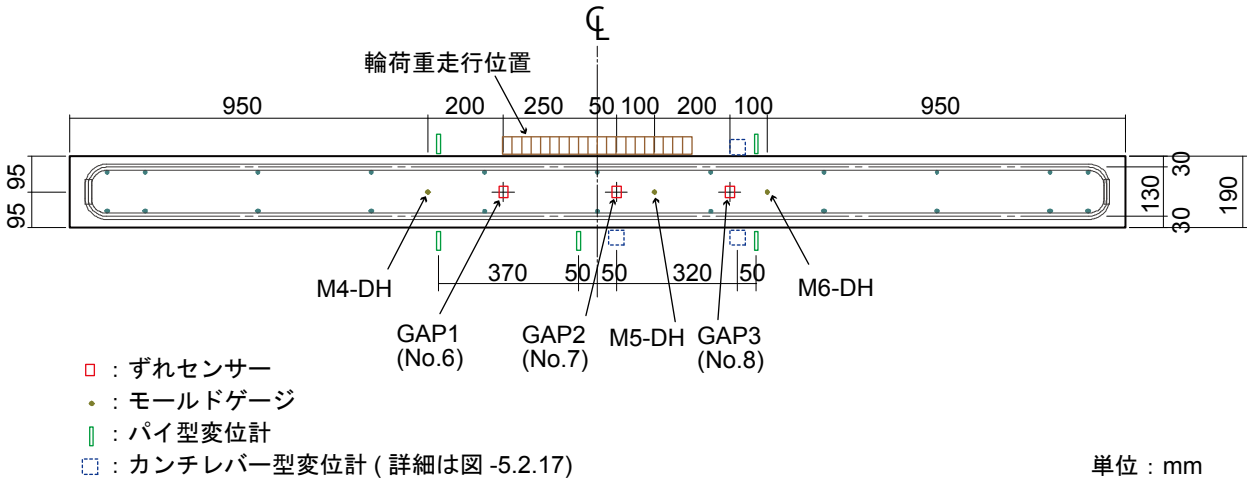


図-5.2.6　打継目におけるずれセンサー，モールドゲージ及び従来型変位計の設置位置

(北側から見た図)

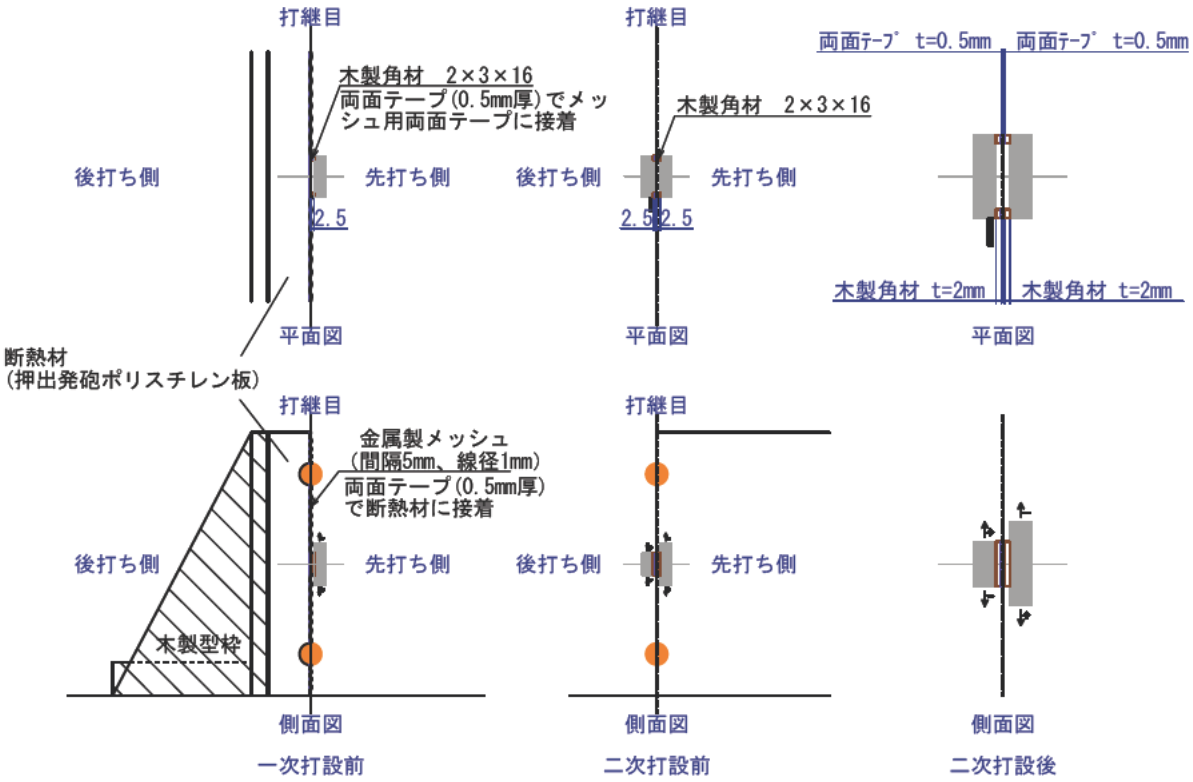


図-5.2.7　ずれセンサーの設置方法

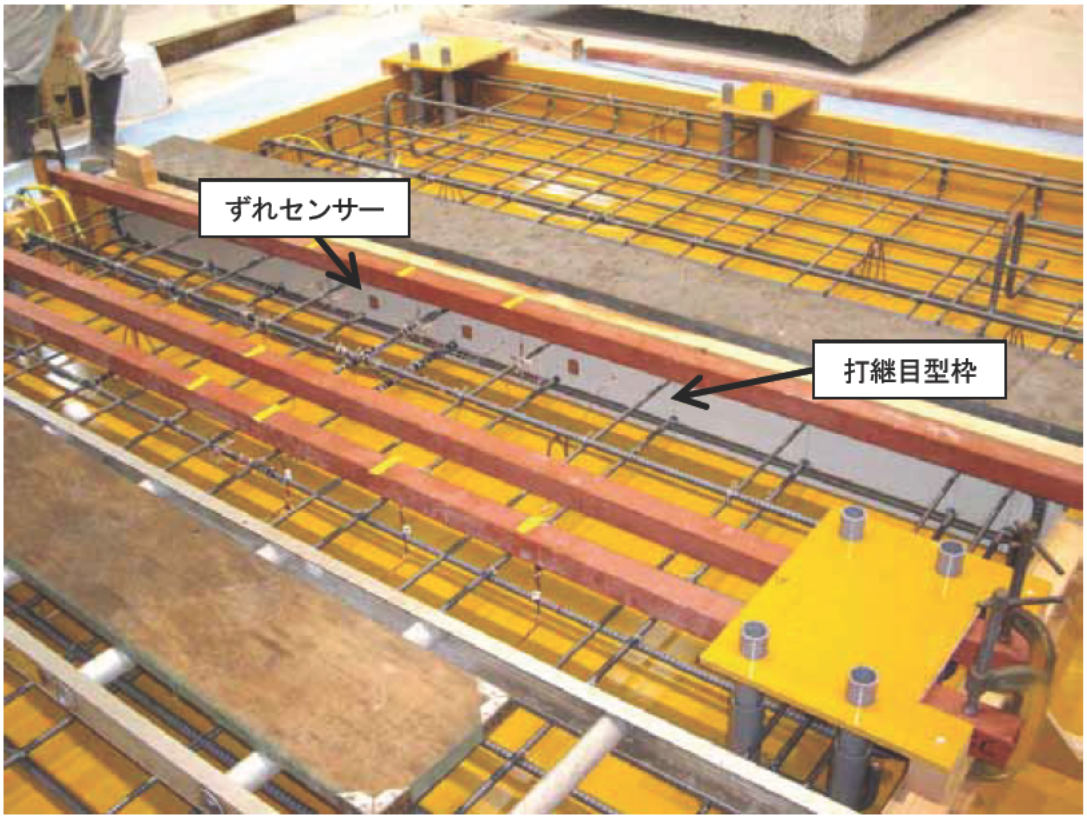


図-5.2.8　一次打設時の打継目の型枠

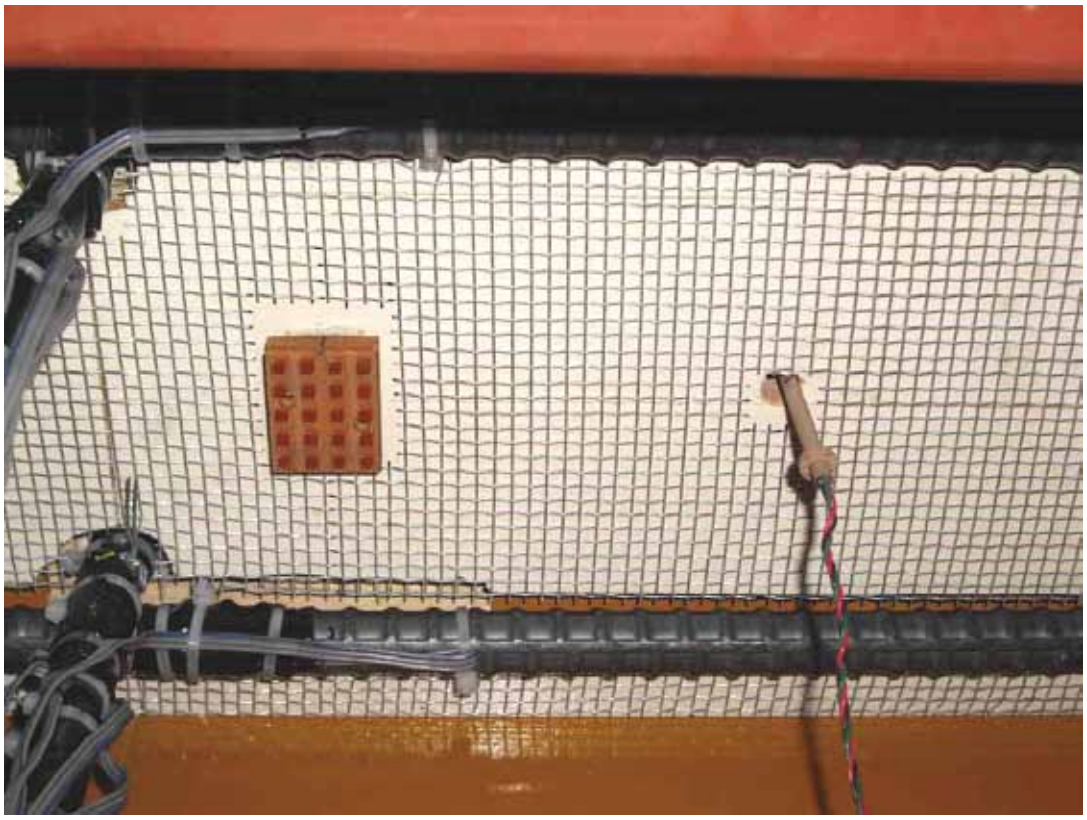


図-5.2.9　一次打設側のずれセンサーの取り付け状況
（右は打継目に直角に設けた埋め込みゲージ）

図-5.2.10　一次打設の状況

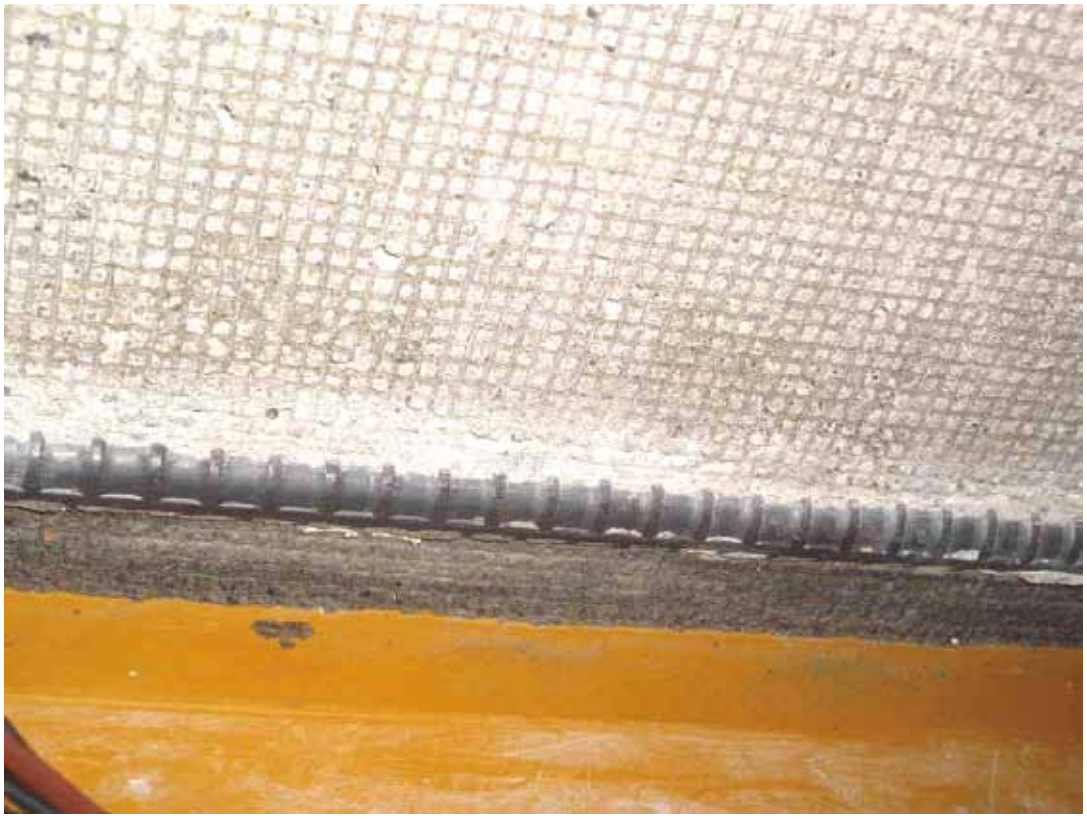


図-5.2.11　二次打設前の打継目

（打継目用型枠の脱型後，鉄筋は打継目に沿った引張主鉄筋）

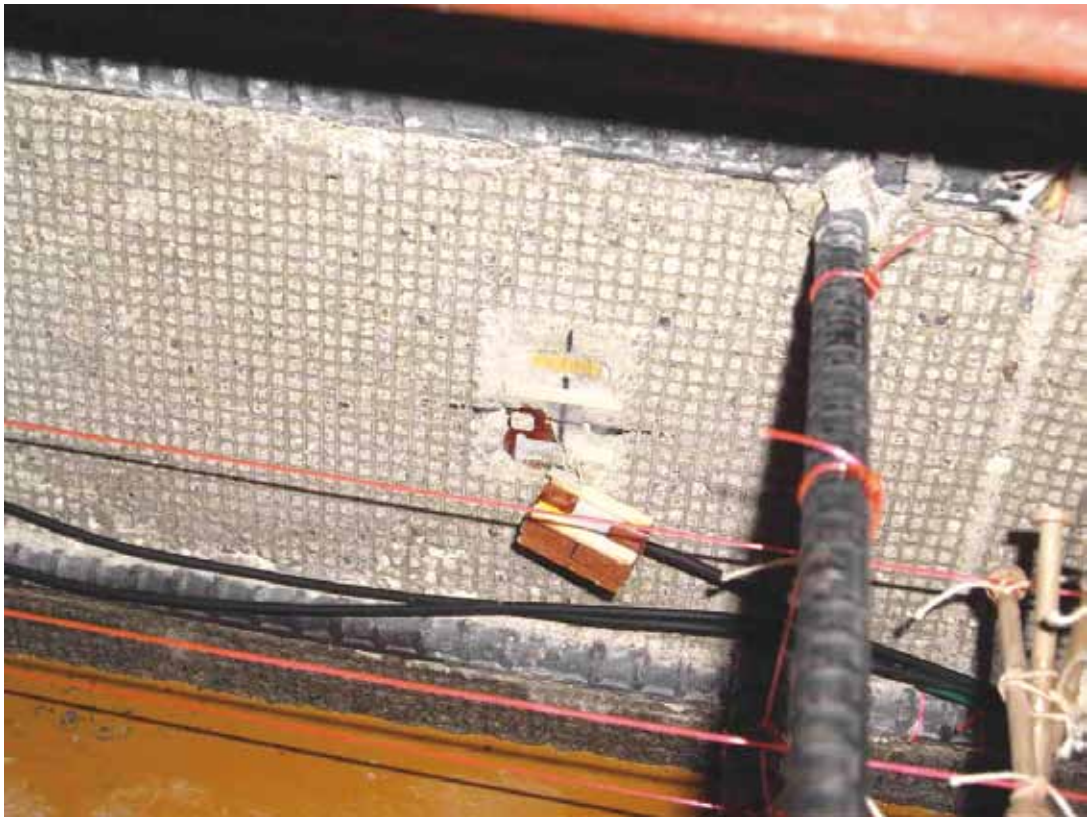


図-5.2.12　ずれセンサーGAP1 の脱型後の状況，ずれセンサー取り付け直前の状況

図-5.2.13　二次打設直前の状況

図-5.2.14　二次打設の状況

図-5.2.15　二次打設におけるずれセンサー周囲の施工状況

図-5.2.16　二次打設直後の状況

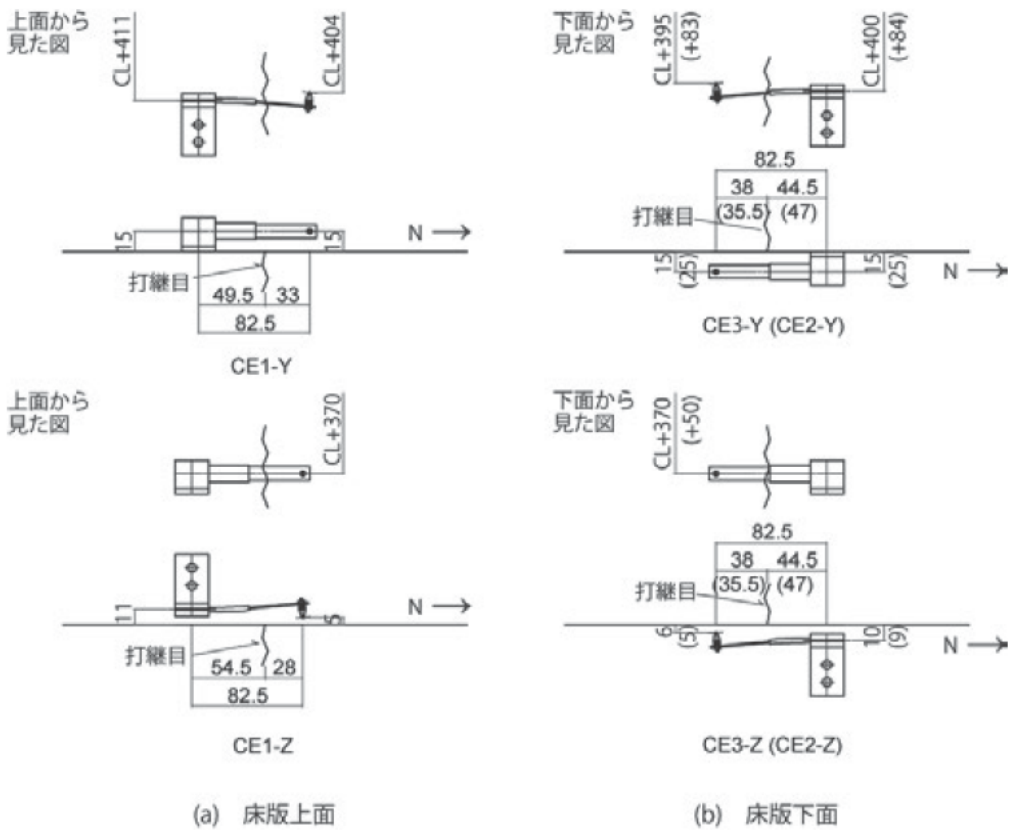


図-5.2.17　カンチレバー型変位計の取り付け位置詳細図

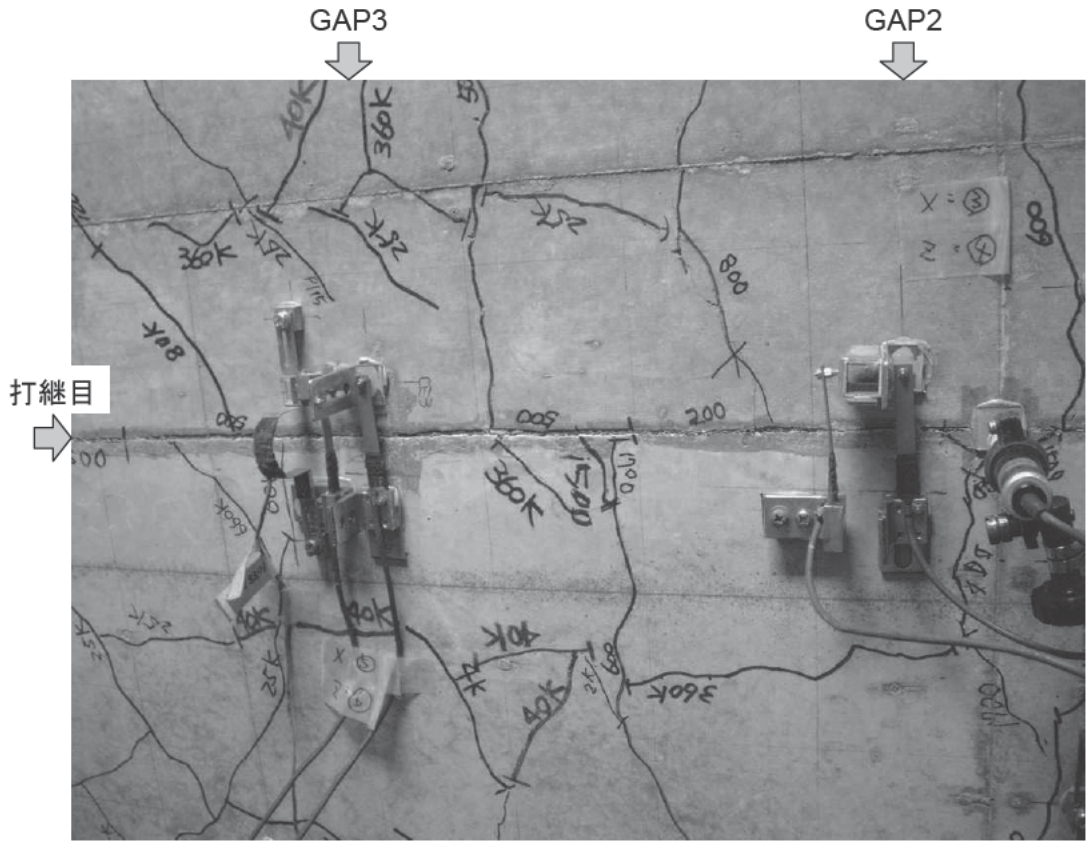


図-5.2.18　供試体下面の変位計取り付け状況（ずれセンサーGAP2，GAP3 埋め込み位置近傍）

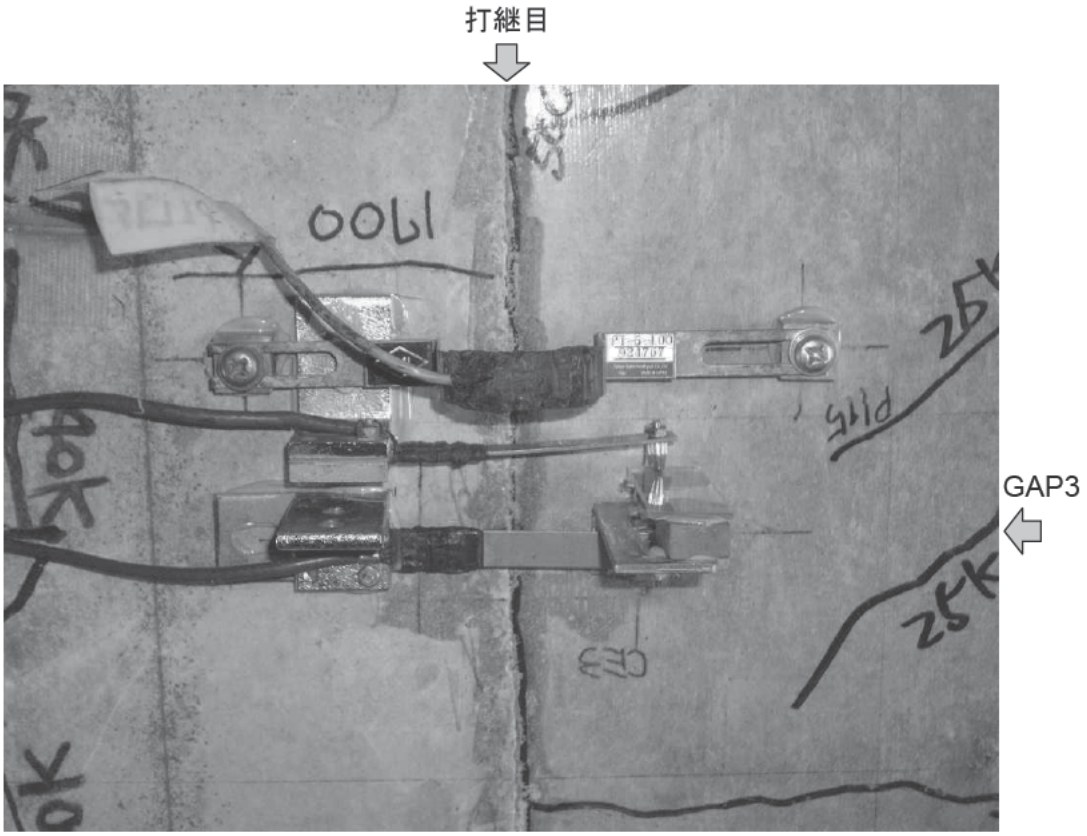


図-5.2.19　供試体下面の変位計取り付け状況（ずれセンサーGAP3 埋め込み位置近傍）

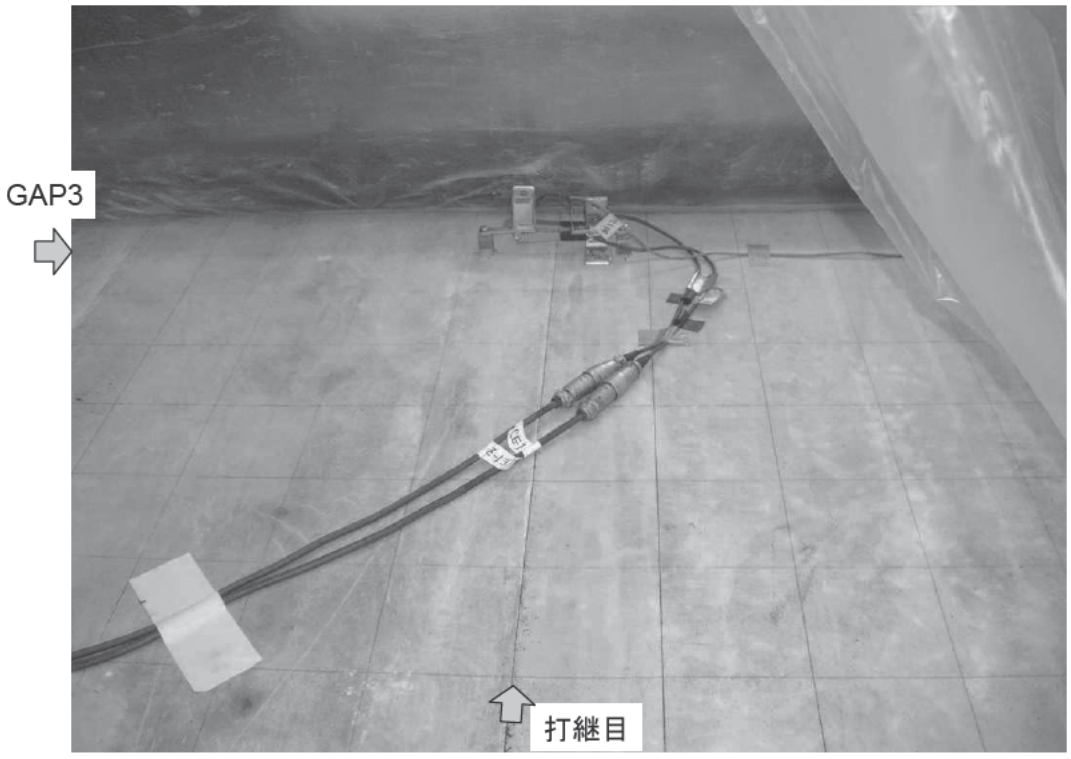


図-5.2.20　供試体上面の変位計取り付け状況（ずれセンサーGAP3 埋め込み位置近傍）

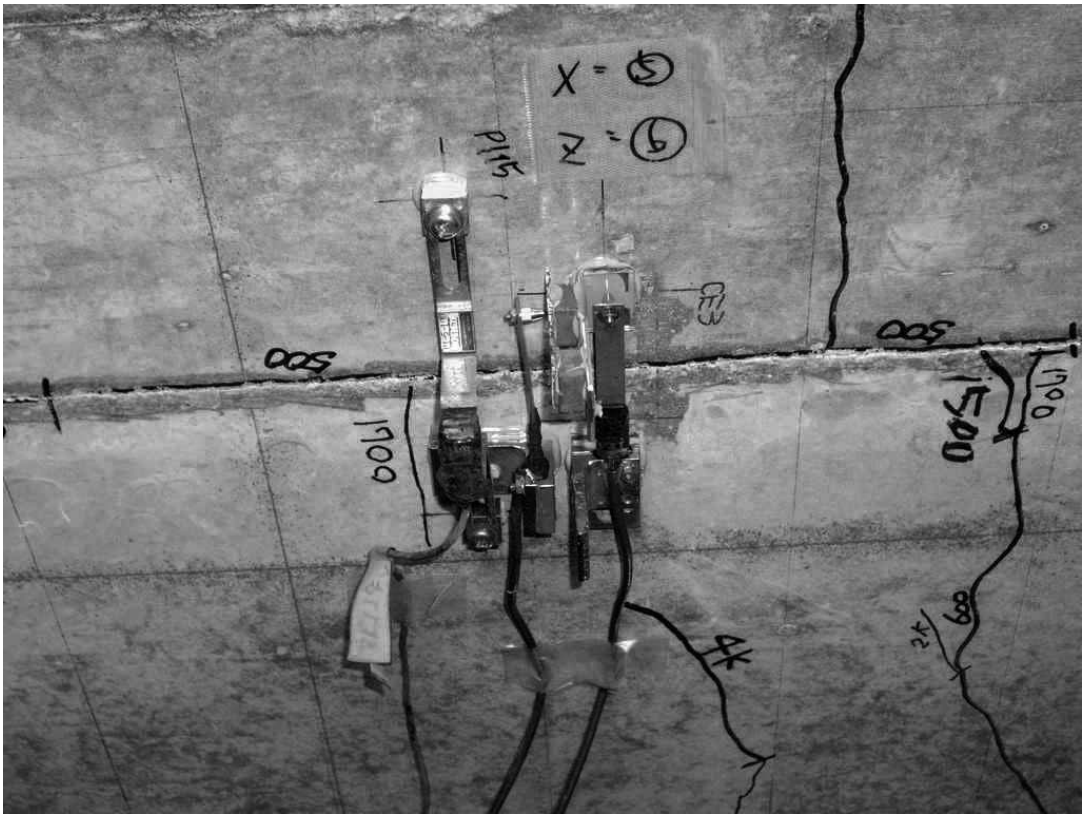
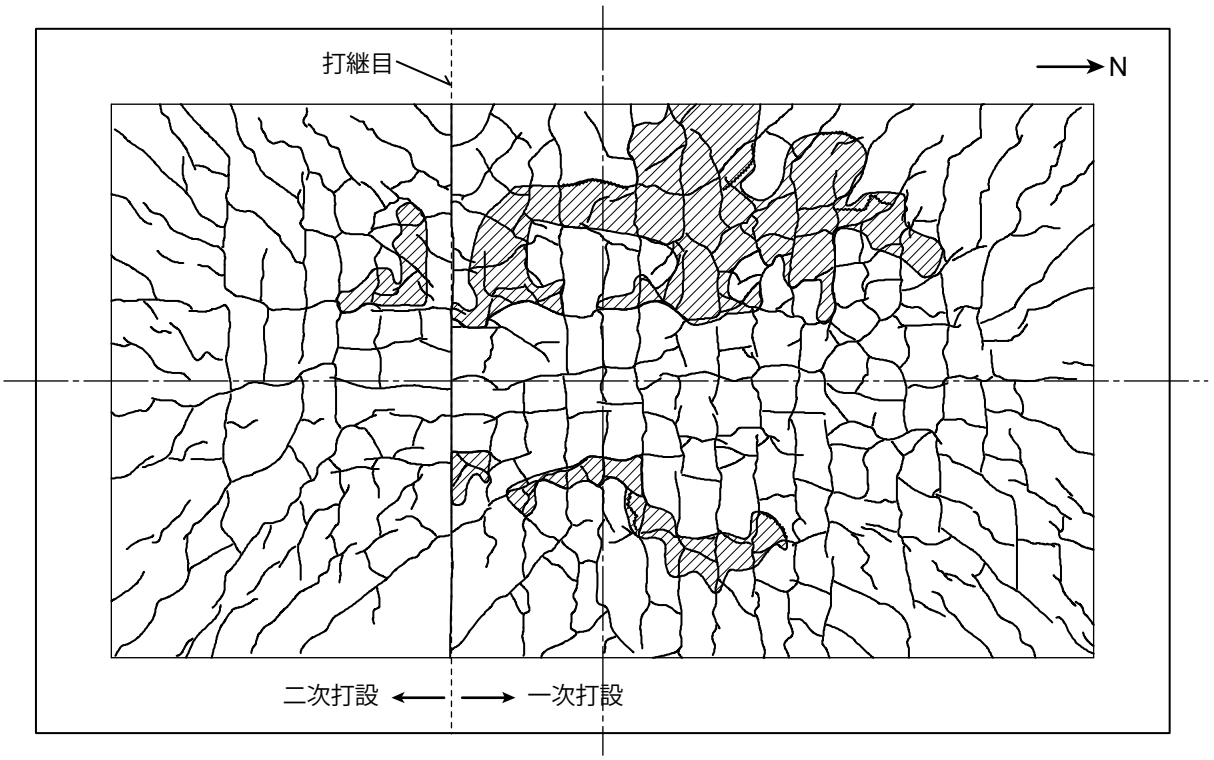
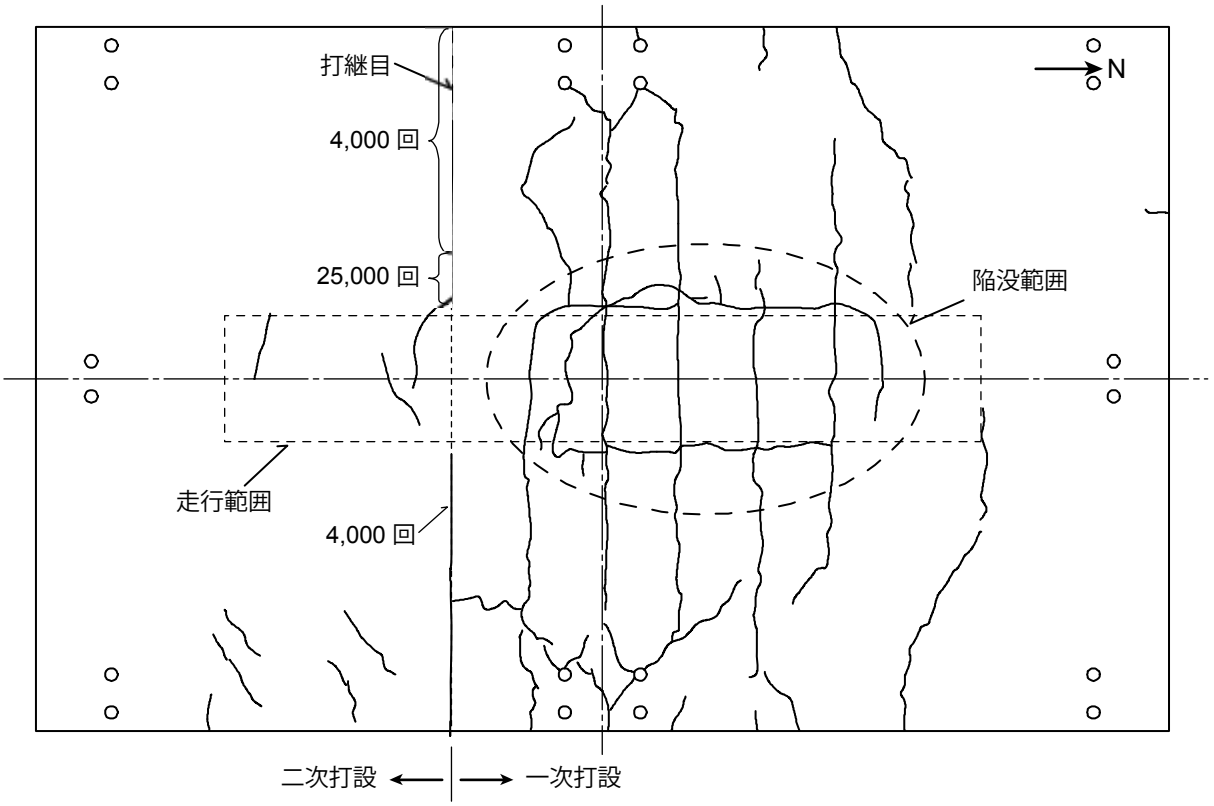


図-5.2.21　繰返し数約 4000 回の打継目（ずれセンサーGAP3 埋め込み位置近傍）

図-5.2.22　繰返し数約 4000 回の打継目（ずれセンサーGAP2 埋め込み位置近傍）



（a）床版下面（網掛け部は剥離箇所）



（b）床版上面

図-5.2.23　試験終了後のひび割れ状況（297 万回）

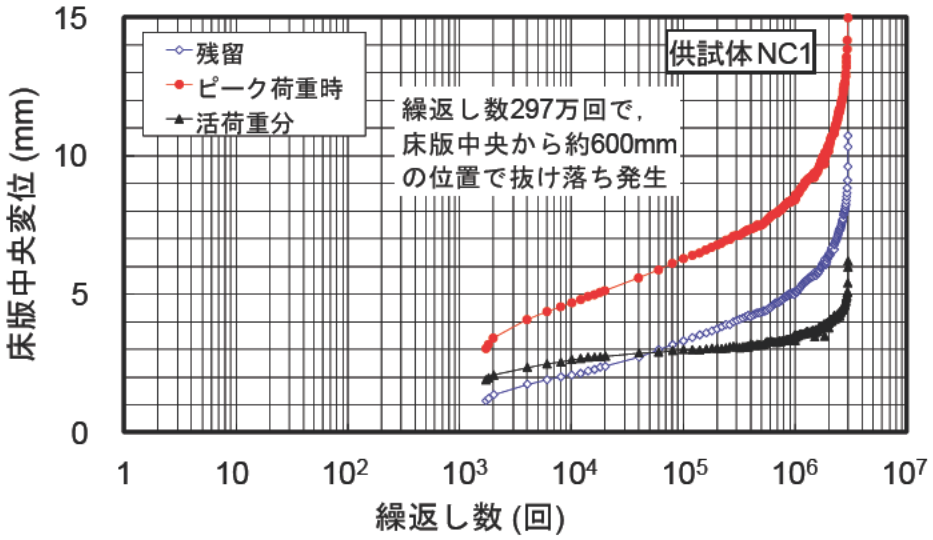


図-5.2.24　床版中央変位の変化

注）　載荷初期の階段載荷の部分はプロットしていない。

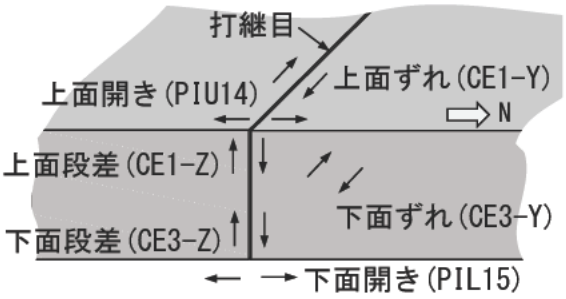
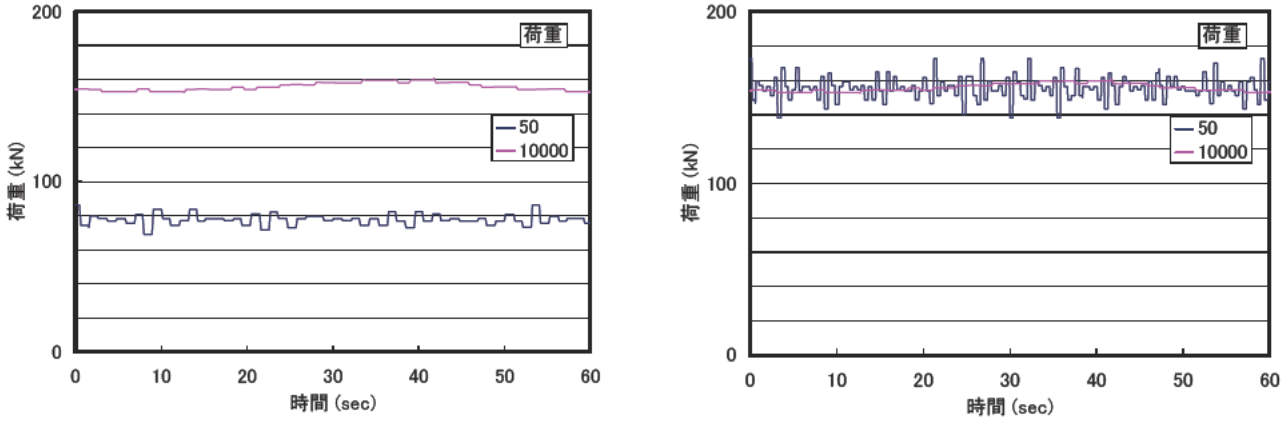
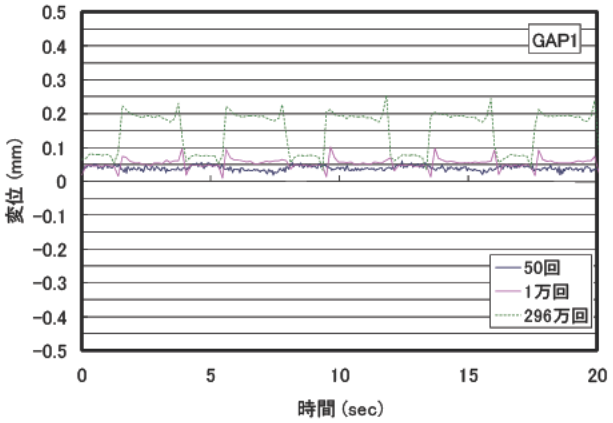


図-5.2.25　GAP3 付近における打継目の変位（矢印方向を正とする）

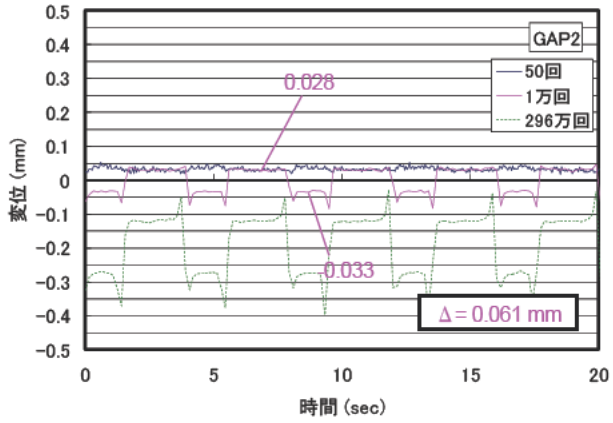


(a)　補正前の荷重　　(b)　補正後の荷重

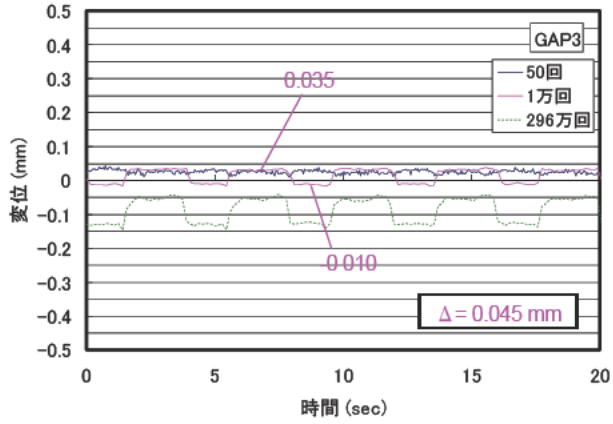
図-5.2.26　繰返し数 50 回と 10000 回のデータ比較のための換算



(a)　GAP1



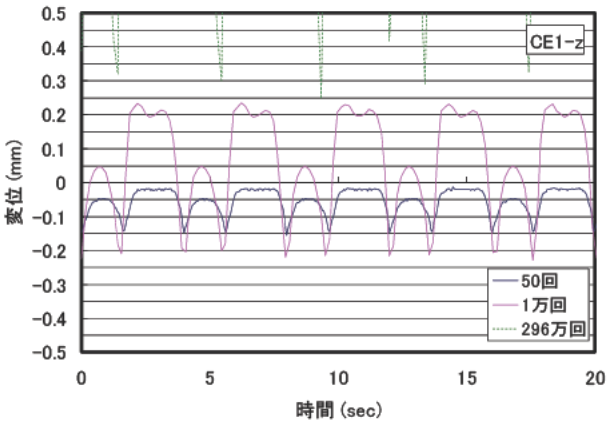
(b)　GAP2



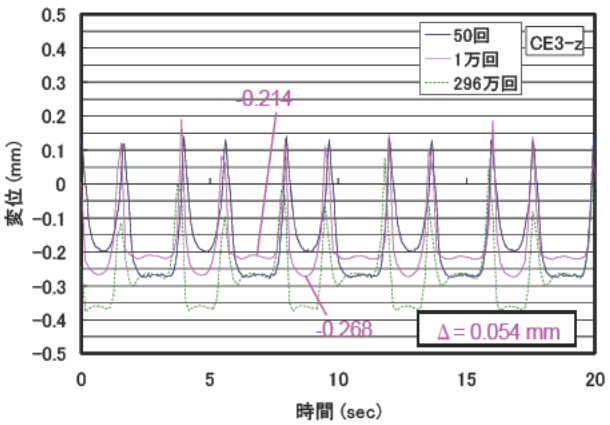
(c)　GAP3

図-5.2.27　ずれセンサーの測定結果

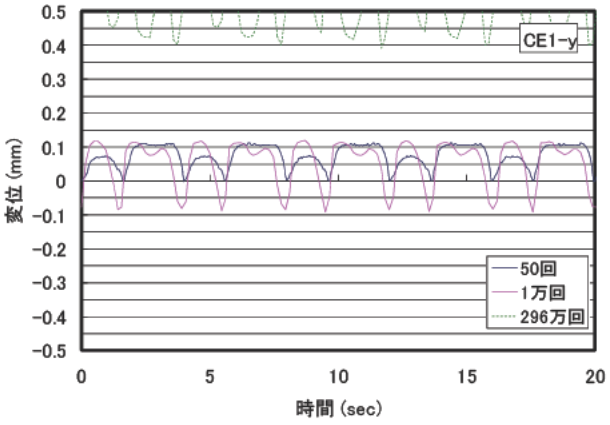
（打継目貫通ひび割れ発生前後の比較，凡例は繰返し数，50 回のデータは 157kN 換算値）



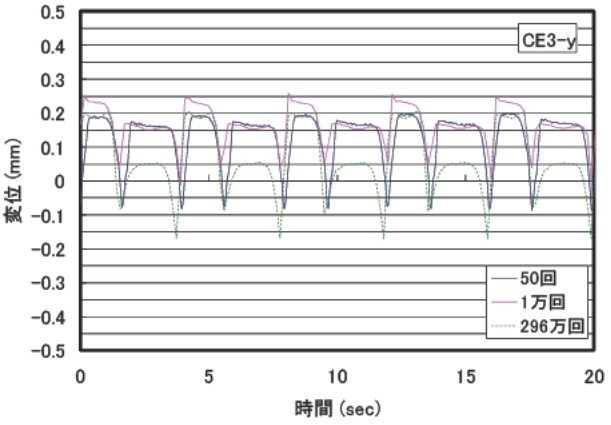
(a)　段差，床版上面



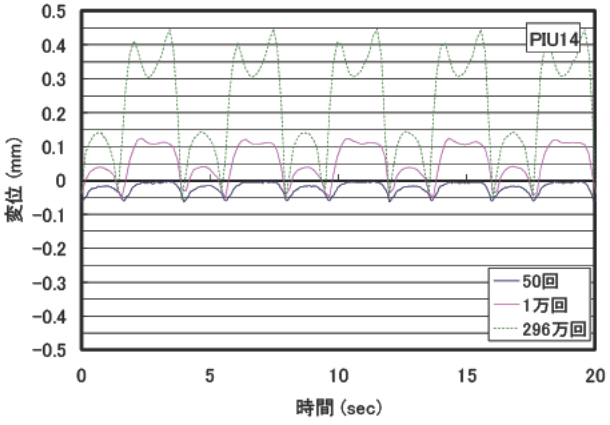
(b)　段差，床版下面



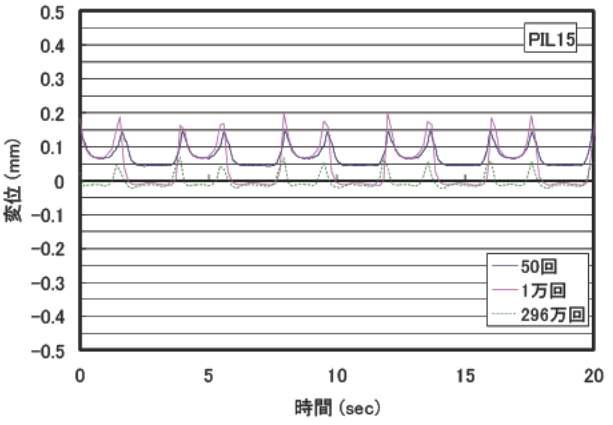
(c)　横ずれ，床版上面



(d)　横ずれ，床版下面



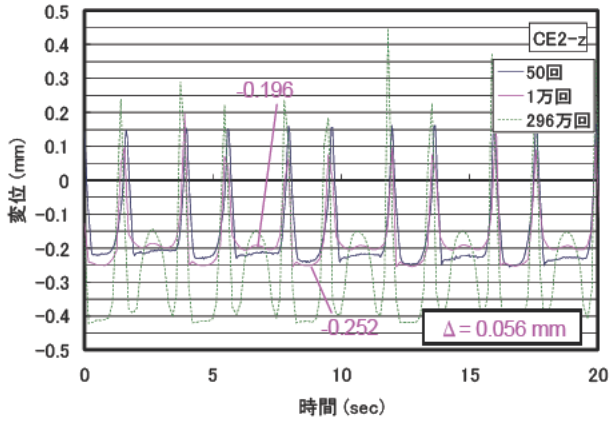
(e)　開き，床版上面



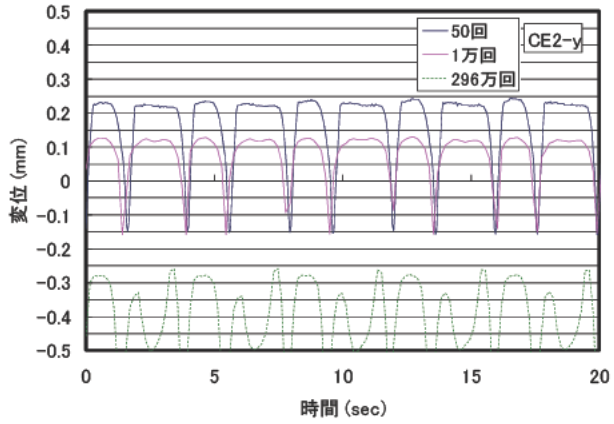
(f)　開き，床版下面

図-5.2.28　GAP3 近傍の変位計による段差，横ずれ，開きの測定結果

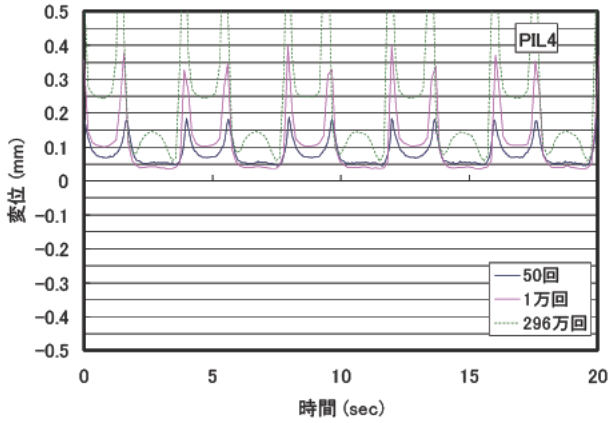
（打継目貫通ひび割れ発生前後の比較，凡例は繰返し数，50 回のデータは 157kN 換算値）



(a)　段差，床版下面



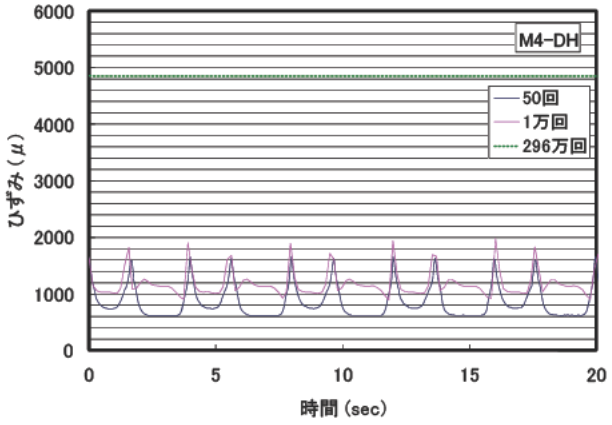
(b)　横ずれ，床版下面



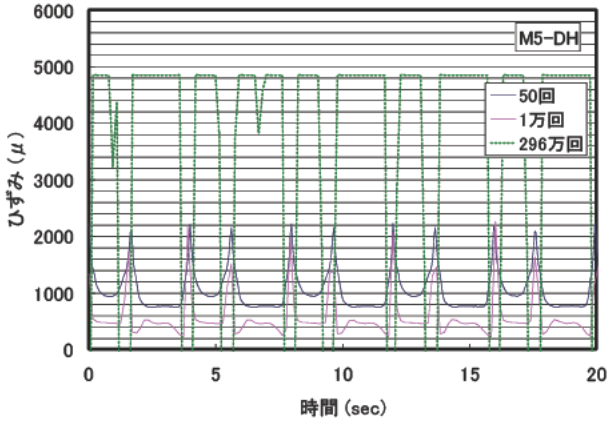
(c)　開き，床版下面

図-5.2.29　GAP2 近傍の変位計による段差，横ずれ，開きの測定結果

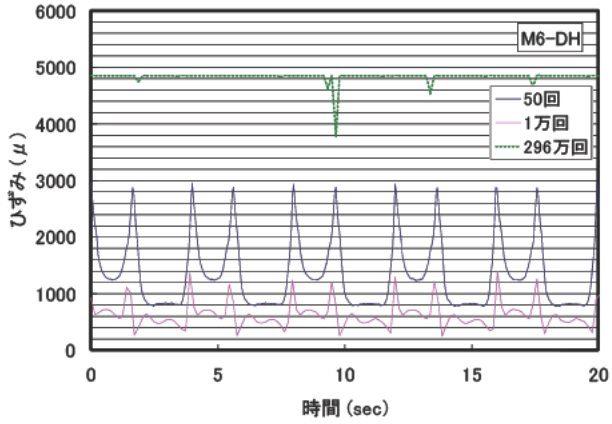
（打継目貫通ひび割れ発生前後の比較，凡例は繰返し数，50 回のデータは 157kN 換算値）



(a)　GAP1 近傍



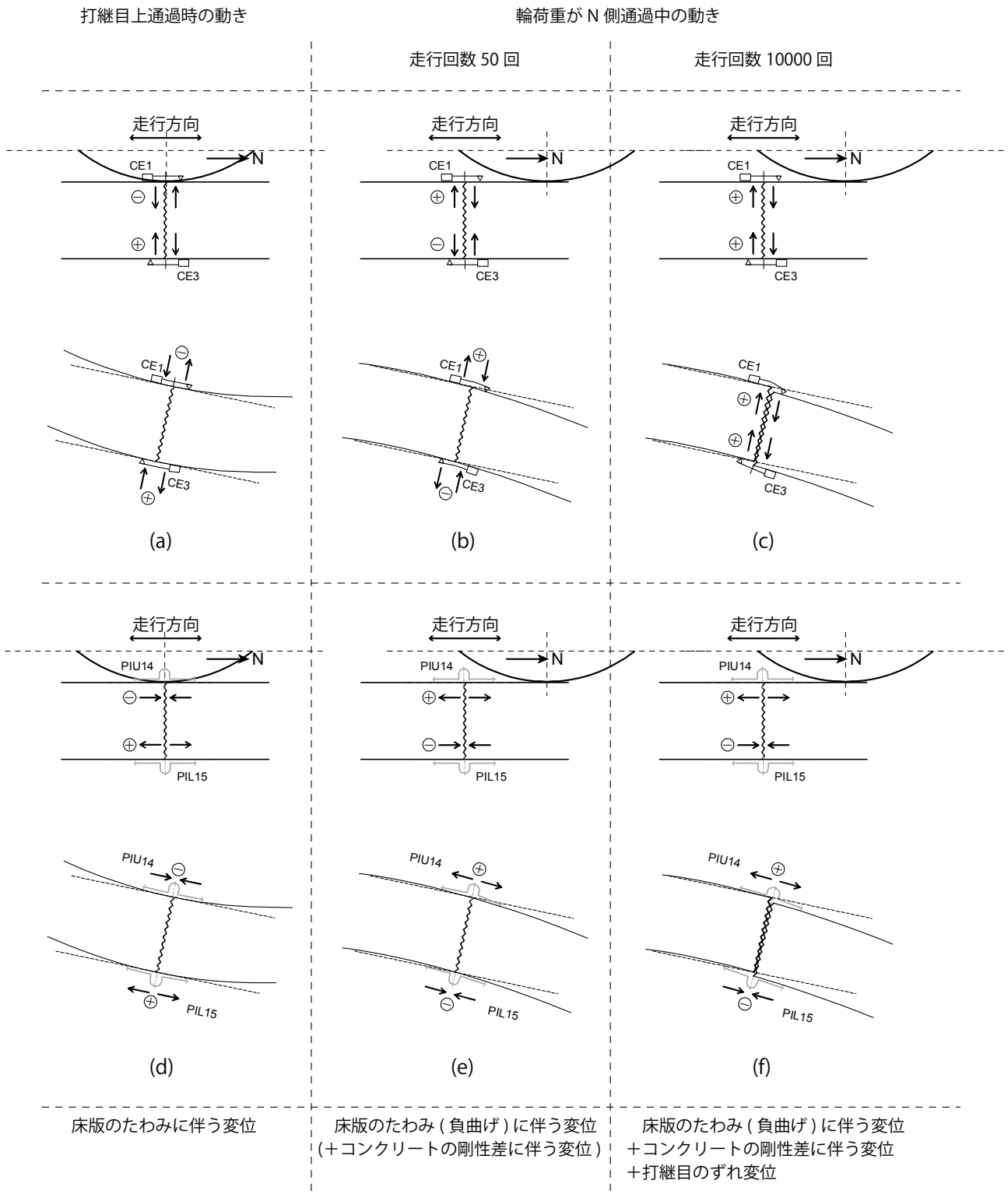
(b)　GAP2 近傍



(c)　GAP3 近傍

図-5.2.30　打継面に直角に貫通させて配置したモールドゲージの測定結果

（打継目貫通ひび割れ発生前後の比較，凡例は繰返し数，50 回のデータは 157kN 換算値）



注） 各図の上段の図は，測定結果に基づく極性を示す。
同下段の図は，想定し得る動きを誇張して表した図を示す。

図-5.2.31　輪荷重走行下の床版打継目の挙動(概念図)

表-5.2.5　設置時及び走行試験中に生じる誤差とずれセンサーGAP3 の測定結果における影響の程度

変位の方向	設置時に生じる誤差		走行試験中に生じる誤差	
	状況／影響	程度／影響度	状況／影響	程度／影響度
Z 方向(開き)	木片と両面テープの厚さで，所定の素子磁石間距離 5mm を確保することとした。	±0.5mm 程度	床版上下面でのパイ型変位計による測定結果の平均値から，ずれセンサー位置における開きを測定した結果，打継目に貫通ひび割れが発生するまでで，約 0.05mm 以下であること，その後の繰返し回数に応じて徐々に大きくなることがわかった。図-5.2.32	＋0.05mm
	Z 方向に 0.5mm 開くことによって，概ね－10%の出力低下が生じる。図-4.2.3	－10%	左記のとおり。図-4.2.33	1 万回時に－1.6% (296 万回時に－4.2%)
Y 方向(ずれ)	二次打設時に，打継目に見える木片の位置に合わせて，素子側の筐体を設置した。	±0.5mm 程度	床版上下面でのカンチレバー型変位計による測定結果から，輪荷重通過時での変位を含めても，±0.5mm を大きく超えることがなかった。	＋0.3～－0.1mm の範囲
	±0.5mm 程度の範囲の Y 方向の影響はほとんどない。図-4.3.2	0%	左記のとおり	0%
X 方向(段差)	設置位置は底型枠からの距離に基づき設置した。	±0.5mm 程度	床版上下面でのカンチレバー型変位計による段差でも±0.5mm(296 万回時に＋2mm)の範囲であり，測定限界(±5mm)を超えない範囲での測定であった。	－
	±5mm の範囲で直線性を確保している。巻末データ等	0%	－	－

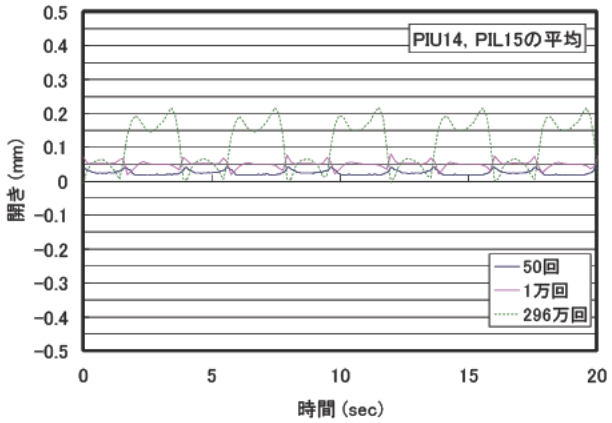


図-5.2.32　上下面のパイ型変位計による床版打継目の平均開き
(ずれセンサーGAP3 付近，PIU14 と PIL15 の測定結果の平均値)

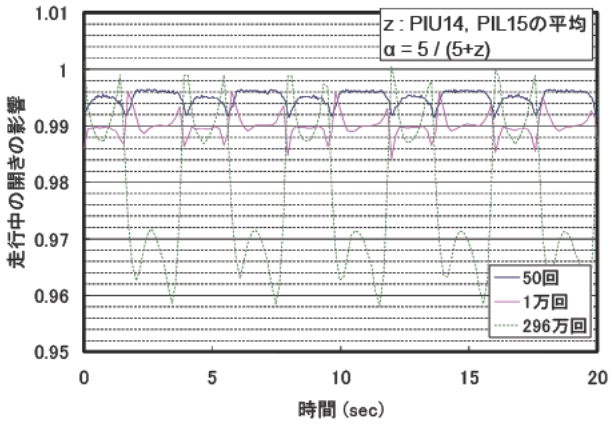


図-5.2.33　走行中の開きがずれセンサーGAP3 の測定結果に及ぼす影響

６．まとめ

(1)　ずれセンサーの開発

コンクリート打継目のずれ挙動を解明するため，打継目界面の状態に影響を及ぼすことなく，内部の打継目のずれをより正確に測定できる，ホール素子と磁石を用いた，埋め込み型の変位計(ずれセンサー)を開発した。共同研究では，測定結果に影響を及ぼすかもしれないさまざまな因子について，試験測定を行い，それらの影響度を把握した上で，所要の性能の目標として掲げた測定範囲±5mm，分解能 0.01mm を実現するに至った。

(2)　測定に及ぼす影響因子

試験測定の結果より，ずれセンサーの利用にあたって留意すべき事項として，ずれ変位の方向を X 方向とした場合にそれと直角方向である Y 方向及び Z 方向それぞれの変位の影響をある程度受けること，複数のずれセンサーを近接して使用する際に所要の間隔を確保する必要があることを明らかにした。また，試作のずれセンサーを対象として，それらの影響の範囲を把握した。一方では，ずれセンサー周囲の金属の影響が意外に小さいこと，測定時の温度の影響が比較的小さいこと，ホール素子と磁石の間にコンクリート(磁性に影響する骨材を含まない)が介在しても影響がないことを明らかにした。

(3)　打継目を有する RC 床版の輪荷重走行試験への適用事例

打継目を有する鉄筋コンクリート床版の輪荷重走行試験において，その打継目にずれセンサーを設置して，輪荷重走行下における打継目の動的挙動を測定した。また，比較のため，打継目の上下面に従来のカンチレバー型変位計及びパイ型変位計を設置して，三軸方向の動的挙動を測定した。従来型の変位計による測定結果は，輪荷重が打継目の直上を通り過ぎる瞬間に，打継目周囲に局部的な変形が発生して，かつ測定機器のアーム長に増幅されて著しく大きな値として測定されるため，本来測定したいずれ量の測定が必ずしも容易でないことがわかった。このことは，ずれセンサーによる測定結果との比較によって，理解することができた。ずれセンサーによるずれ量の測定結果には，ずれセンサー固有の Y 方向，Z 方向の変位による誤差が含まれるものの，打継目の局部的な変形の影響はごく軽微であり，打継目のずれ挙動をより直接に測定できることがわかった。

(4)　輪荷重走行試験への適用事例における測定誤差

輪荷重走行試験の供試体の例では，ずれセンサーを所定の位置に精度よく設置することが必ずしも容易でなかった。各方向ともに±0.5mm 程度の設置誤差が想定され，測定結果に及ぼす影響のほとんどは Z 方向の設置誤差によるもので，測定結果に約 10%の誤差が生じる可能性がある。走行試験中にも開きが生じて誤差が生じるが，パイ型変位計による実測開き量は打継目に貫通ひび割れが発生した時点で 0.07mm 程度で，1.6%程度の誤差が生じていたと考えられる。コンクリートの打継目のずれを正確に測定するためには，打継目をはさんでずれセンサーを正確な位置に設置する必要があり，特に Z 方向(開き)の設置精度が測定結果に大きく影響することがわかった。

(5) ずれセンサーの普及と応用

ホール効果に基づく，ホール素子と磁石の活用は，電化製品をはじめ，既に広く一般に利用され，さまざまな形態で普及している。このため，ホール素子と磁石は，比較的安価で入手が容易である。また，海洋において長期に利用される貝リンガル(東京測器研究所製)の例があるように，防水性に優れた製品を比較的容易に製造できることから，コンクリートなどへの埋め込み型のセンサーにも適している。既存のデータロガーに接続して，従来のひずみゲージや変位計と同様に測定できるように配慮した点も，利用，普及を容易にすると考えられる。

本共同研究では，ホール素子と磁石を測定機器として利用するため，測定機器として一定の測定精度を確保することに成功した点が大きな成果である。これらの成果は，さまざまな形に変化して，新たな測定機器の開発，発展に寄与することが期待される。

参考文献

1) 国広哲男：道路橋床版の問題点，橋梁と基礎，2-7，pp. 1-5，1968.7.

2) 西川和廣，村越潤，山本悟司，杉山純：活荷重による橋梁上部構造の損傷と対策，土木技術資料，34-8，pp. 58-65，1992.8.

3) 松尾伸二，西川和廣，内田賢一，川間重一：既設鉄筋コンクリート床版の補修・補強に関する検討，橋梁と基礎，pp. 25-32，2000.11.

4) 長屋優子，村越潤，田中良樹：繰返し移動荷重を受ける鉄筋コンクリート床版のひび割れ挙動に関する検討，コンクリート工学年次論文集，pp. 907-912，2008.7.

5) 田中良樹，村越潤，長屋優子：道路橋 RC 床版の疲労損傷過程における上面かぶりの剥離の影響，コンクリート工学年次論文集，pp. 913-918，2008.7.

6) 東京測器技術カタログ資料, 2011-12.

7) 中川康昭：磁気のおはなし，日本規格協会，155 pp.，1995.

8) Popovic, R. S., Hall Effect Devices, 2nd Ed., Institute of Physics Publishing, 419 pp., 2004.

9) 高梨弘毅：磁気工学入門，日本磁気学会編，共立出版，119 pp.，2008.9.

巻末資料　　試作ずれセンサーの性能表

校正時のダイレクト値

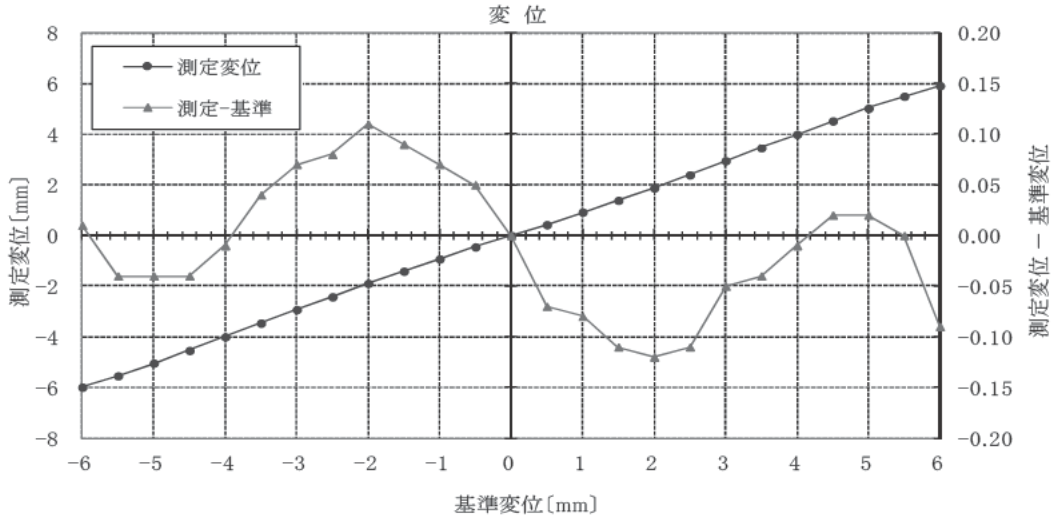
単位：digit

試作番号		ダイレクト値	備 考
試作１号	No. 1	-59	
	No. 2	-130	
試作２号	No. 3	-350	（再校正）-250
	No. 4	-263	（再校正）-113
試作３号	No. 5	―	
	No. 6	-459	
	No. 7	10	
	No. 8	814	
	No. 9	-810	
	No. 10	725	

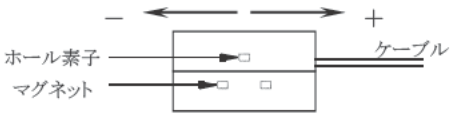
試　験　結　果

製 品 名	ずれセンサー		試作番号	1	
容　量	±6　mm		ケーブル	0.05 mm^2　5　m	
校正係数	0.002877　mm /digit　（±4mm時の出力より算出）				
試験年月日	2009年5月9日	温　度	23　℃	湿　度	46　%

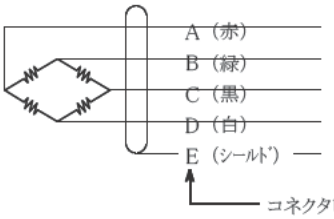
基準変位〔mm〕	出力〔digit〕	測定変位〔mm〕	測定変位－基準変位	基準変位〔mm〕	出力〔digit〕	測定変位〔mm〕	測定変位－基準変位
0.0	0	0.00	0.00	0.0	0	0.00	0.00
−0.5	−157	−0.45	0.05	0.5	148	0.43	−0.07
−1.0	−322	−0.93	0.07	1.0	321	0.92	−0.08
−1.5	−490	−1.41	0.09	1.5	482	1.39	−0.11
−2.0	−658	−1.89	0.11	2.0	652	1.88	−0.12
−2.5	−842	−2.42	0.08	2.5	832	2.39	−0.11
−3.0	−1017	−2.93	0.07	3.0	1025	2.95	−0.05
−3.5	−1203	−3.46	0.04	3.5	1204	3.46	−0.04
−4.0	−1393	−4.01	−0.01	4.0	1388	3.99	−0.01
−4.5	−1579	−4.54	−0.04	4.5	1572	4.52	0.02
−5.0	−1753	−5.04	−0.04	5.0	1746	5.02	0.02
−5.5	−1927	−5.54	−0.04	5.5	1911	5.50	0.00
−6.0	−2083	−5.99	0.01	6.0	2056	5.91	−0.09



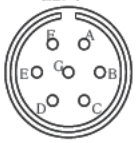
① 極 性



② 結 線



NDISプラグのピン配列



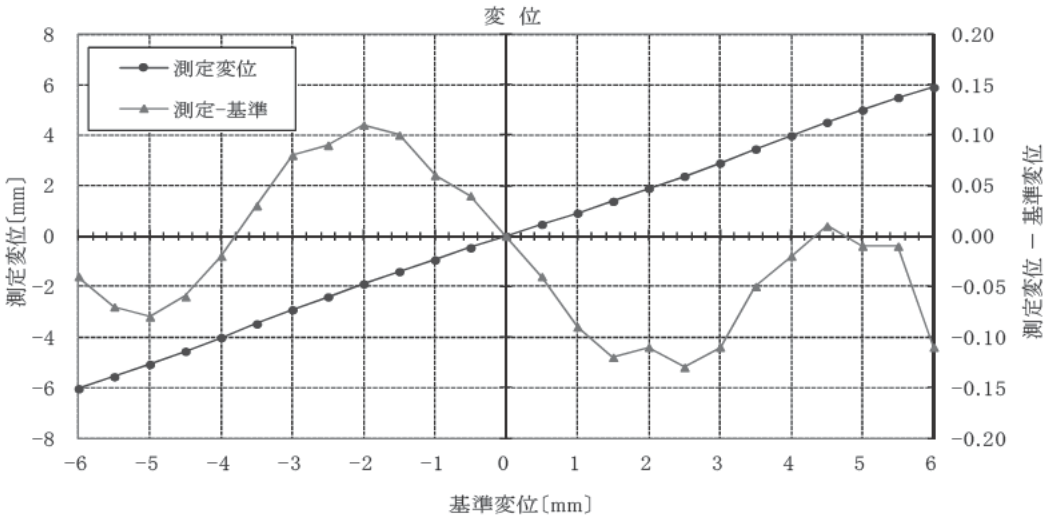
③ 校正係数

測 定 変 位〔mm〕 ＝ 出 力〔digit〕 × 校 正 係 数〔mm /digit〕

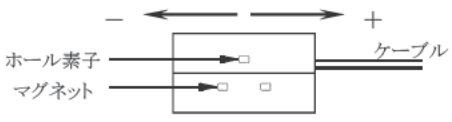
試　験　結　果

製 品 名	ずれセンサー		試 作 番 号	2	
容　量	±6　mm		ケーブル	0.05 mm^2　5　m	
校 正 係 数	0.002939　mm /digit　（±4mm時の出力より算出）				
試験年月日	2009年5月9日	温 度	23　℃	湿 度	46　%

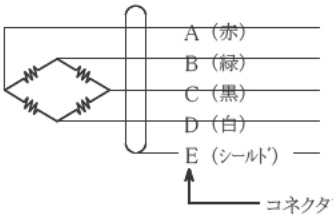
基準変位〔mm〕	出 力〔digit〕	測定変位〔mm〕	測定変位－基準変位	基準変位〔mm〕	出 力〔digit〕	測定変位〔mm〕	測定変位－基準変位
0.0	0	0.00	0.00	0.0	0	0.00	0.00
−0.5	−157	−0.46	0.04	0.5	158	0.46	−0.04
−1.0	−321	−0.94	0.06	1.0	311	0.91	−0.09
−1.5	−478	−1.40	0.10	1.5	469	1.38	−0.12
−2.0	−644	−1.89	0.11	2.0	643	1.89	−0.11
−2.5	−819	−2.41	0.09	2.5	807	2.37	−0.13
−3.0	−992	−2.92	0.08	3.0	985	2.89	−0.11
−3.5	−1182	−3.47	0.03	3.5	1173	3.45	−0.05
−4.0	−1368	−4.02	−0.02	4.0	1354	3.98	−0.02
−4.5	−1552	−4.56	−0.06	4.5	1534	4.51	0.01
−5.0	−1729	−5.08	−0.08	5.0	1699	4.99	−0.01
−5.5	−1895	−5.57	−0.07	5.5	1868	5.49	−0.01
−6.0	−2056	−6.04	−0.04	6.0	2005	5.89	−0.11



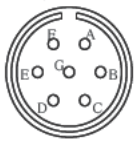
① 極 性



② 結 線



NDISプラグのピン配列



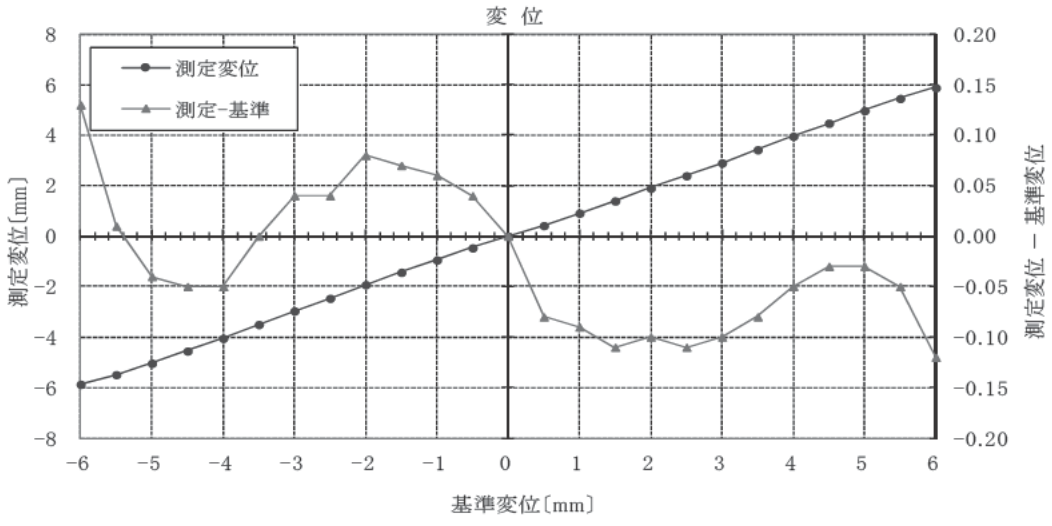
③ 校正係数

測 定 変 位〔mm〕＝ 出 力〔digit〕× 校 正 係 数〔mm /digit〕

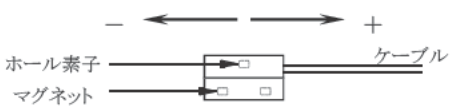
試　験　結　果

製 品 名	ずれセンサー		試 作 番 号	3	
容　量	±6　mm		ケーブル	0.05　mm^2　5　m	
校 正 係 数	0.002941　mm /digit　（±4mm時の出力より算出）				
試験年月日	2009年5月8日	温 度	23　℃	湿 度	57　%

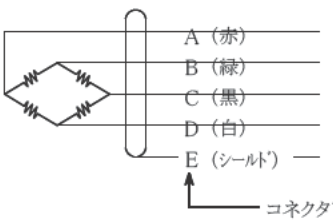
基準変位〔mm〕	出 力〔digit〕	測定変位〔mm〕	測定変位－基準変位	基準変位〔mm〕	出 力〔digit〕	測定変位〔mm〕	測定変位－基準変位
0.0	0	0.00	0.00	0.0	0	0.00	0.00
−0.5	−158	−0.46	0.04	0.5	142	0.42	−0.08
−1.0	−321	−0.94	0.06	1.0	310	0.91	−0.09
−1.5	−487	−1.43	0.07	1.5	474	1.39	−0.11
−2.0	−654	−1.92	0.08	2.0	645	1.90	−0.10
−2.5	−837	−2.46	0.04	2.5	814	2.39	−0.11
−3.0	−1007	−2.96	0.04	3.0	986	2.90	−0.10
−3.5	−1189	−3.50	0.00	3.5	1164	3.42	−0.08
−4.0	−1376	−4.05	−0.05	4.0	1344	3.95	−0.05
−4.5	−1548	−4.55	−0.05	4.5	1521	4.47	−0.03
−5.0	−1712	−5.04	−0.04	5.0	1690	4.97	−0.03
−5.5	−1865	−5.49	0.01	5.5	1854	5.45	−0.05
−6.0	−1995	−5.87	0.13	6.0	1998	5.88	−0.12



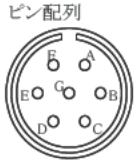
① 極 性



② 結 線



NDISプラグのピン配列



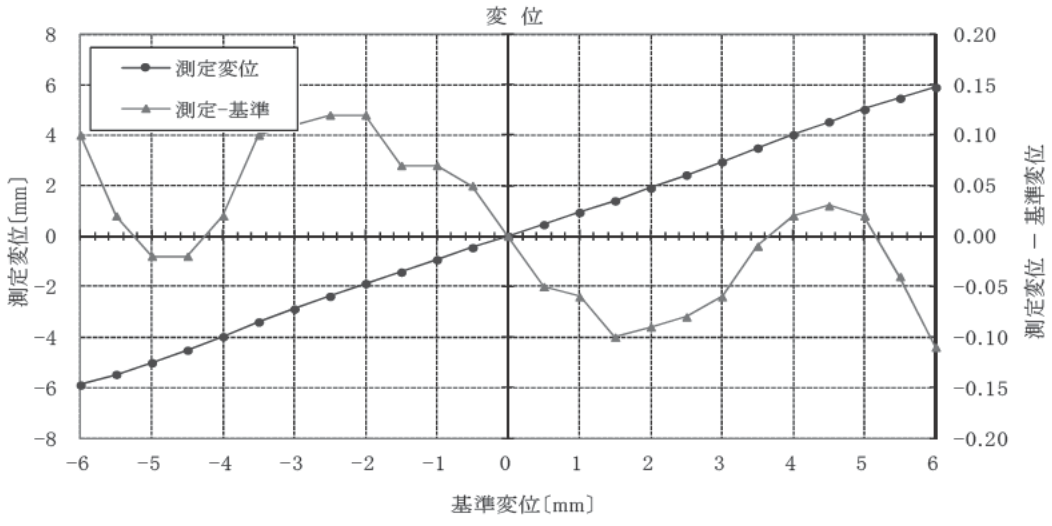
③ 校正係数

測 定 変 位〔mm〕＝ 出 力〔digit〕× 校 正 係 数〔mm /digit〕

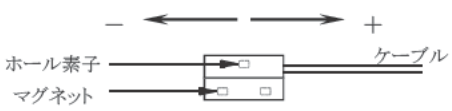
試　験　結　果

製 品 名	ずれセンサー		試 作 番 号	4	
容　量	±6　mm		ケーブル	0.05　mm^2　5　m	
校 正 係 数	0.002931　mm /digit　（±4mm時の出力より算出）				
試験年月日	2009年5月9日	温 度	23　℃	湿 度	60　%

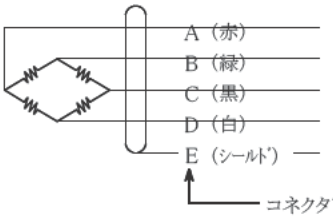
基準変位〔mm〕	出 力〔digit〕	測定変位〔mm〕	測定変位－基準変位	基準変位〔mm〕	出 力〔digit〕	測定変位〔mm〕	測定変位－基準変位
0.0	0	0.00	0.00	0.0	0	0.00	0.00
−0.5	−155	−0.45	0.05	0.5	155	0.45	−0.05
−1.0	−318	−0.93	0.07	1.0	320	0.94	−0.06
−1.5	−487	−1.43	0.07	1.5	478	1.40	−0.10
−2.0	−640	−1.88	0.12	2.0	650	1.91	−0.09
−2.5	−813	−2.38	0.12	2.5	826	2.42	−0.08
−3.0	−985	−2.89	0.11	3.0	1004	2.94	−0.06
−3.5	−1160	−3.40	0.10	3.5	1191	3.49	−0.01
−4.0	−1359	−3.98	0.02	4.0	1370	4.02	0.02
−4.5	−1541	−4.52	−0.02	4.5	1545	4.53	0.03
−5.0	−1711	−5.02	−0.02	5.0	1712	5.02	0.02
−5.5	−1868	−5.48	0.02	5.5	1862	5.46	−0.04
−6.0	−2012	−5.90	0.10	6.0	2009	5.89	−0.11



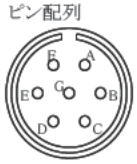
① 極 性



② 結 線



NDISプラグのピン配列



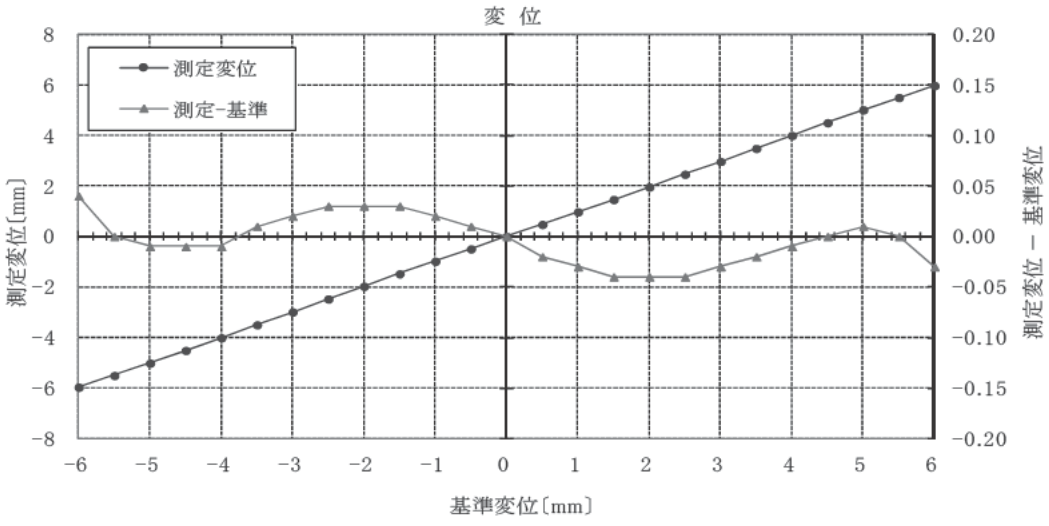
③ 校正係数

測 定 変 位〔mm〕＝ 出 力〔digit〕× 校 正 係 数〔mm /digit〕

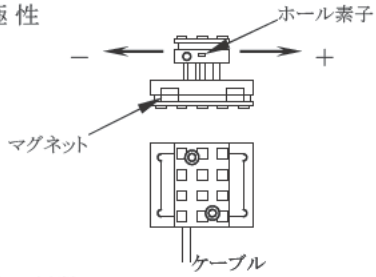
試　験　結　果

製 品 名	ずれセンサー		試 作 番 号	5	
容　量	±6　mm		ケーブル	0.05 mm^2　5　m	
校 正 係 数	0.000555　mm /digit　（±4mm時の出力より算出）				
試験年月日	2010年5月26日	温 度	23　℃	湿 度	52　%

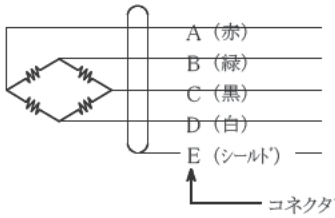
基準変位〔mm〕	出 力〔digit〕	測定変位〔mm〕	測定変位－基準変位	基準変位〔mm〕	出 力〔digit〕	測定変位〔mm〕	測定変位－基準変位
0.0	0	0.00	0.00	0.0	0	0.00	0.00
−0.5	−883	−0.49	0.01	0.5	858	0.48	−0.02
−1.0	−1763	−0.98	0.02	1.0	1757	0.97	−0.03
−1.5	−2655	−1.47	0.03	1.5	2639	1.46	−0.04
−2.0	−3549	−1.97	0.03	2.0	3529	1.96	−0.04
−2.5	−4450	−2.47	0.03	2.5	4440	2.46	−0.04
−3.0	−5378	−2.98	0.02	3.0	5346	2.97	−0.03
−3.5	−6295	−3.49	0.01	3.5	6279	3.48	−0.02
−4.0	−7219	−4.01	−0.01	4.0	7200	3.99	−0.01
−4.5	−8122	−4.51	−0.01	4.5	8113	4.50	0.00
−5.0	−9023	−5.01	−0.01	5.0	9029	5.01	0.01
−5.5	−9905	−5.50	0.00	5.5	9906	5.50	0.00
−6.0	−10736	−5.96	0.04	6.0	10753	5.97	−0.03



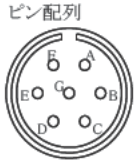
① 極 性



② 結 線



NDISプラグのピン配列



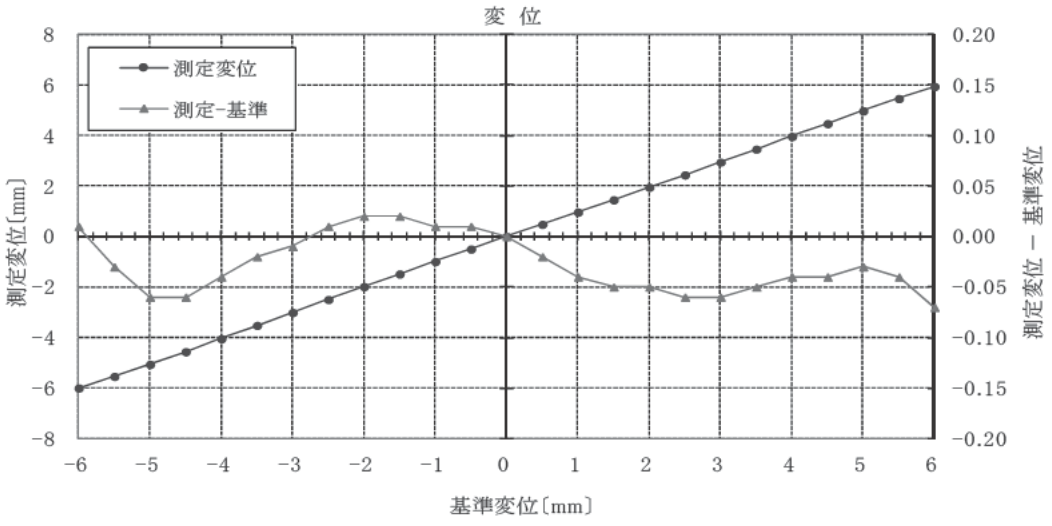
③ 校正係数

測 定 変 位〔mm〕 ＝ 出 力〔digit〕 × 校 正 係 数〔mm /digit〕

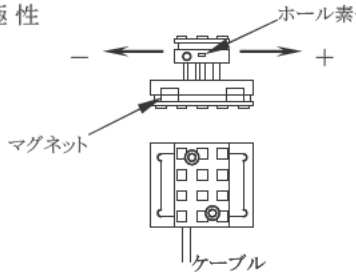
試　験　結　果

製 品 名	ずれセンサー		試 作 番 号	6	
容　量	±6　mm		ケーブル	0.05　mm^2　5　m	
校 正 係 数	0.000531　mm /digit　（±4mm時の出力より算出）				
試験年月日	2010年8月24日	温　度	23　℃	湿　度	57　%

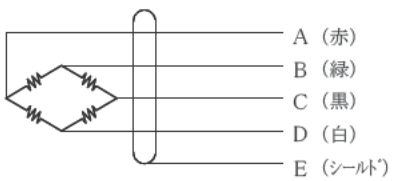
基準変位〔mm〕	出 力〔digit〕	測定変位〔mm〕	測定変位－基準変位	基準変位〔mm〕	出 力〔digit〕	測定変位〔mm〕	測定変位－基準変位
0.0	0	0.00	0.00	0.0	0	0.00	0.00
−0.5	−929	−0.49	0.01	0.5	906	0.48	−0.02
−1.0	−1860	−0.99	0.01	1.0	1816	0.96	−0.04
−1.5	−2788	−1.48	0.02	1.5	2733	1.45	−0.05
−2.0	−3727	−1.98	0.02	2.0	3667	1.95	−0.05
−2.5	−4691	−2.49	0.01	2.5	4586	2.44	−0.06
−3.0	−5658	−3.01	−0.01	3.0	5535	2.94	−0.06
−3.5	−6621	−3.52	−0.02	3.5	6501	3.45	−0.05
−4.0	−7611	−4.04	−0.04	4.0	7451	3.96	−0.04
−4.5	−8579	−4.56	−0.06	4.5	8400	4.46	−0.04
−5.0	−9521	−5.06	−0.06	5.0	9359	4.97	−0.03
−5.5	−10413	−5.53	−0.03	5.5	10271	5.46	−0.04
−6.0	−11279	−5.99	0.01	6.0	11165	5.93	−0.07



① 極 性



② 結 線



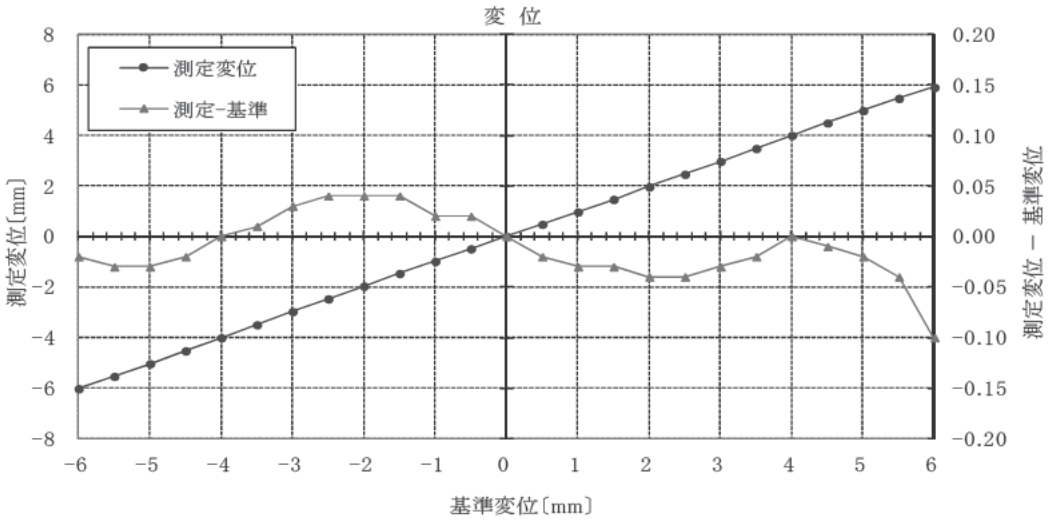
③ 校正係数

測 定 変 位〔mm〕 ＝ 出 力〔digit〕 × 校 正 係 数〔mm /digit〕

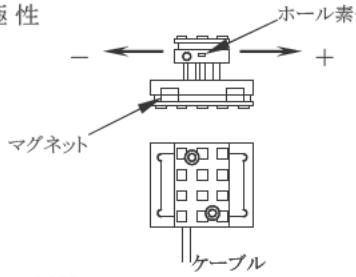
試　験　結　果

製 品 名	ずれセンサー		試 作 番 号	7	
容　量	±6　mm		ケーブル	0.05　mm^2　5　m	
校 正 係 数	0.000537　mm /digit　（±4mm時の出力より算出）				
試験年月日	2010年8月24日	温　度	23　℃	湿　度	57　%

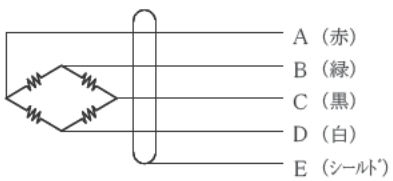
基準変位〔mm〕	出 力〔digit〕	測定変位〔mm〕	測定変位－基準変位	基準変位〔mm〕	出 力〔digit〕	測定変位〔mm〕	測定変位－基準変位
0.0	0	0.00	0.00	0.0	0	0.00	0.00
−0.5	−902	−0.48	0.02	0.5	897	0.48	−0.02
−1.0	−1828	−0.98	0.02	1.0	1805	0.97	−0.03
−1.5	−2721	−1.46	0.04	1.5	2730	1.47	−0.03
−2.0	−3653	−1.96	0.04	2.0	3657	1.96	−0.04
−2.5	−4589	−2.46	0.04	2.5	4582	2.46	−0.04
−3.0	−5530	−2.97	0.03	3.0	5536	2.97	−0.03
−3.5	−6504	−3.49	0.01	3.5	6483	3.48	−0.02
−4.0	−7460	−4.00	0.00	4.0	7443	4.00	0.00
−4.5	−8427	−4.52	−0.02	4.5	8361	4.49	−0.01
−5.0	−9371	−5.03	−0.03	5.0	9276	4.98	−0.02
−5.5	−10307	−5.53	−0.03	5.5	10174	5.46	−0.04
−6.0	−11211	−6.02	−0.02	6.0	10983	5.90	−0.10



① 極 性



② 結 線



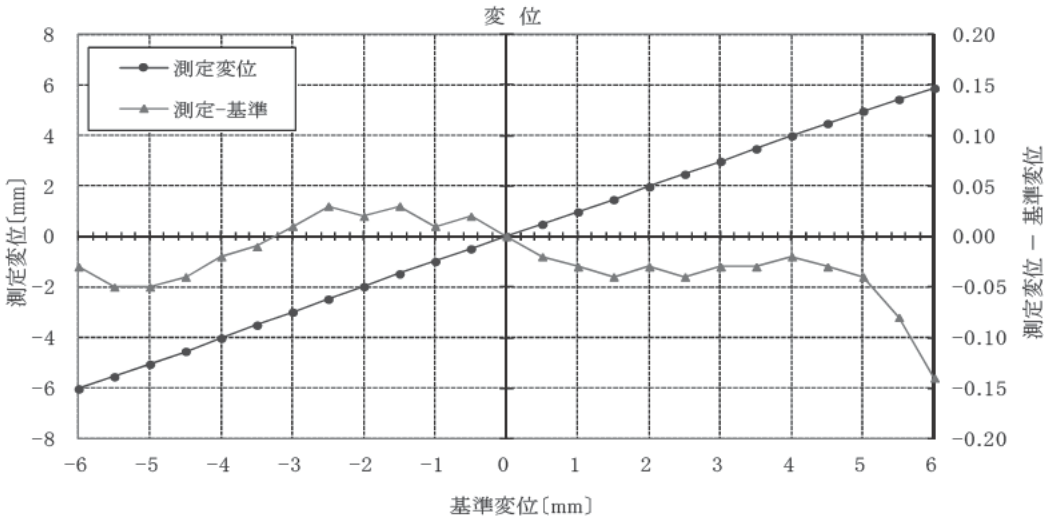
③ 校正係数

測 定 変 位〔mm〕＝ 出 力〔digit〕× 校 正 係 数〔mm /digit〕

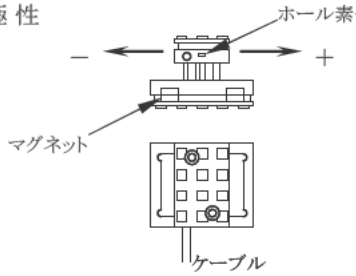
試　験　結　果

製 品 名	ずれセンサー		試 作 番 号	8	
容　量	±6　mm		ケーブル	0.05　mm^2　5　m	
校 正 係 数	0.000528　mm /digit　（±4mm時の出力より算出）				
試験年月日	2010年8月24日	温　度	23　℃	湿　度	57　%

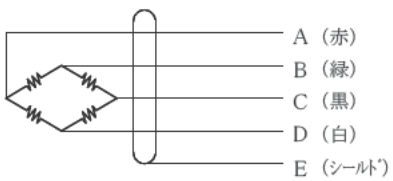
基準変位〔mm〕	出 力〔digit〕	測定変位〔mm〕	測定変位－基準変位	基準変位〔mm〕	出 力〔digit〕	測定変位〔mm〕	測定変位－基準変位
0.0	0	0.00	0.00	0.0	0	0.00	0.00
−0.5	−919	−0.48	0.02	0.5	915	0.48	−0.02
−1.0	−1869	−0.99	0.01	1.0	1837	0.97	−0.03
−1.5	−2794	−1.47	0.03	1.5	2767	1.46	−0.04
−2.0	−3751	−1.98	0.02	2.0	3726	1.97	−0.03
−2.5	−4689	−2.47	0.03	2.5	4665	2.46	−0.04
−3.0	−5665	−2.99	0.01	3.0	5626	2.97	−0.03
−3.5	−6647	−3.51	−0.01	3.5	6569	3.47	−0.03
−4.0	−7621	−4.02	−0.02	4.0	7540	3.98	−0.02
−4.5	−8609	−4.54	−0.04	4.5	8470	4.47	−0.03
−5.0	−9573	−5.05	−0.05	5.0	9392	4.96	−0.04
−5.5	−10512	−5.55	−0.05	5.5	10280	5.42	−0.08
−6.0	−11421	−6.03	−0.03	6.0	11106	5.86	−0.14



① 極 性



② 結 線



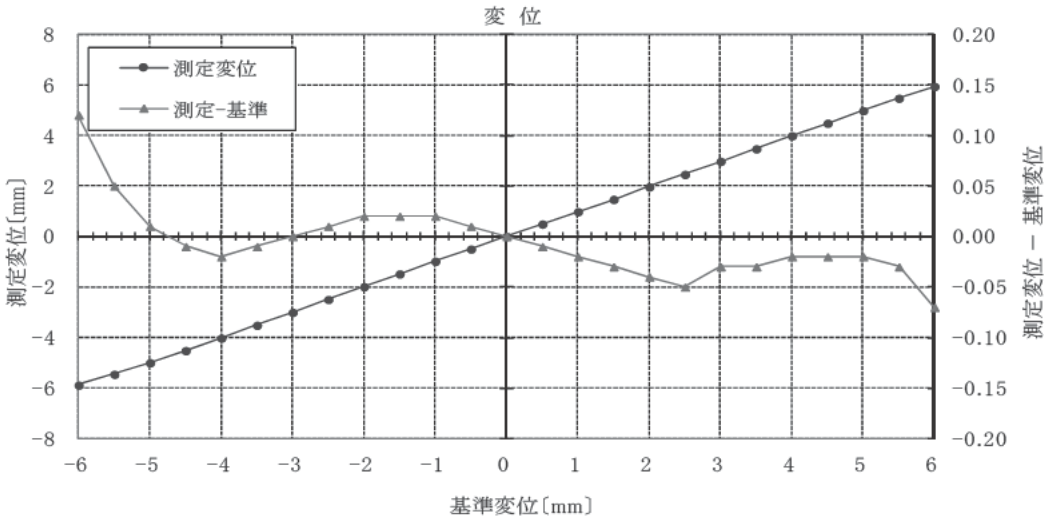
③ 校正係数

測 定 変 位〔mm〕＝ 出 力〔digit〕× 校 正 係 数〔mm /digit〕

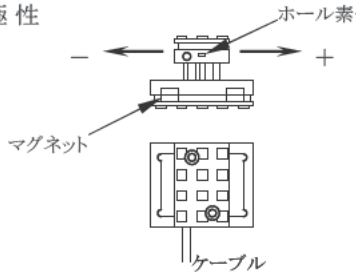
試　験　結　果

製 品 名	ずれセンサー		試 作 番 号	9	
容　量	±6　mm		ケーブル	0.05　mm^2　5　m	
校 正 係 数	0.000518　mm /digit　（±4mm時の出力より算出）				
試験年月日	2010年8月24日	温　度	23　℃	湿　度	57　%

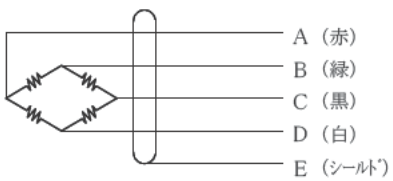
基準変位〔mm〕	出 力〔digit〕	測定変位〔mm〕	測定変位－基準変位	基準変位〔mm〕	出 力〔digit〕	測定変位〔mm〕	測定変位－基準変位
0.0	0	0.00	0.00	0.0	0	0.00	0.00
−0.5	−954	−0.49	0.01	0.5	946	0.49	−0.01
−1.0	−1892	−0.98	0.02	1.0	1889	0.98	−0.02
−1.5	−2855	−1.48	0.02	1.5	2829	1.47	−0.03
−2.0	−3829	−1.98	0.02	2.0	3788	1.96	−0.04
−2.5	−4806	−2.49	0.01	2.5	4738	2.45	−0.05
−3.0	−5788	−3.00	0.00	3.0	5732	2.97	−0.03
−3.5	−6778	−3.51	−0.01	3.5	6691	3.47	−0.03
−4.0	−7754	−4.02	−0.02	4.0	7686	3.98	−0.02
−4.5	−8710	−4.51	−0.01	4.5	8646	4.48	−0.02
−5.0	−9638	−4.99	0.01	5.0	9608	4.98	−0.02
−5.5	−10510	−5.45	0.05	5.5	10555	5.47	−0.03
−6.0	−11341	−5.88	0.12	6.0	11444	5.93	−0.07



① 極 性



② 結 線



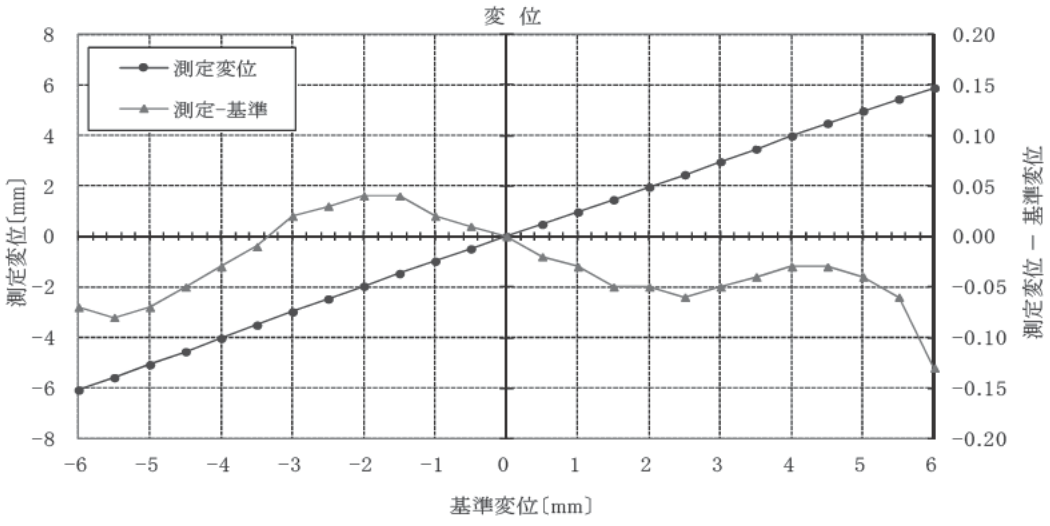
③ 校正係数

測 定 変 位〔mm〕＝ 出 力〔digit〕× 校 正 係 数〔mm /digit〕

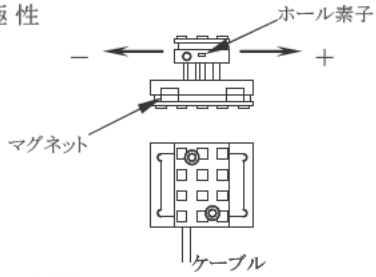
試　験　結　果

製 品 名	ずれセンサー		試 作 番 号	10	
容　量	±6　mm		ケーブル	0.05 mm^2　5　m	
校 正 係 数	0.000544　mm /digit　（±4mm時の出力より算出）				
試験年月日	2010年8月24日	温　度	23　℃	湿　度	57　%

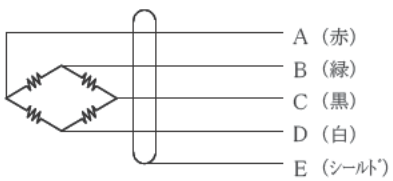
基準変位〔mm〕	出 力〔digit〕	測定変位〔mm〕	測定変位－基準変位	基準変位〔mm〕	出 力〔digit〕	測定変位〔mm〕	測定変位－基準変位
0.0	0	0.00	0.00	0.0	0	0.00	0.00
−0.5	−892	−0.49	0.01	0.5	881	0.48	−0.02
−1.0	−1792	−0.98	0.02	1.0	1773	0.97	−0.03
−1.5	−2685	−1.46	0.04	1.5	2670	1.45	−0.05
−2.0	−3608	−1.96	0.04	2.0	3591	1.95	−0.05
−2.5	−4533	−2.47	0.03	2.5	4491	2.44	−0.06
−3.0	−5470	−2.98	0.02	3.0	5426	2.95	−0.05
−3.5	−6440	−3.51	−0.01	3.5	6358	3.46	−0.04
−4.0	−7399	−4.03	−0.03	4.0	7296	3.97	−0.03
−4.5	−8362	−4.55	−0.05	4.5	8215	4.47	−0.03
−5.0	−9313	−5.07	−0.07	5.0	9118	4.96	−0.04
−5.5	−10252	−5.58	−0.08	5.5	9987	5.44	−0.06
−6.0	−11152	−6.07	−0.07	6.0	10789	5.87	−0.13



① 極 性



② 結 線



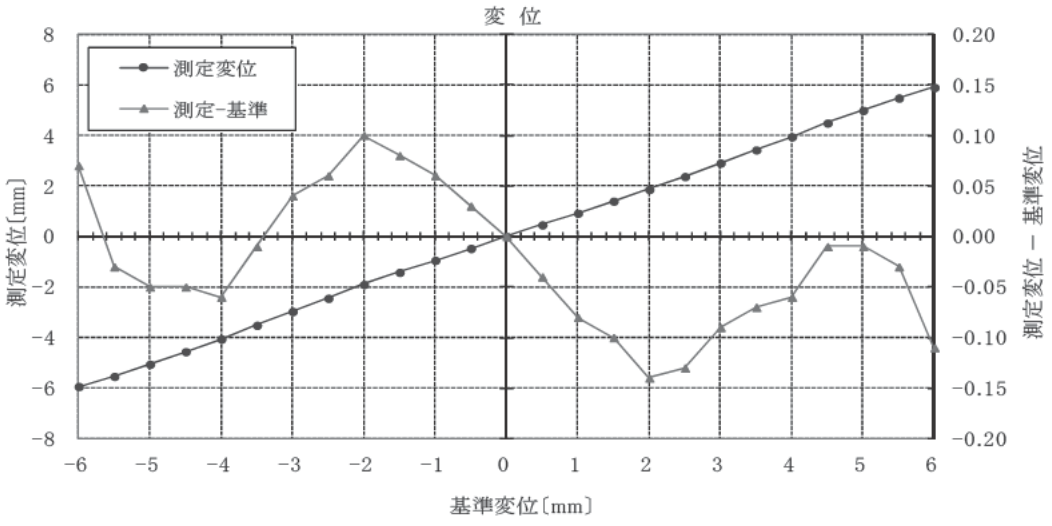
③ 校正係数

測 定 変 位〔mm〕＝ 出 力〔digit〕× 校 正 係 数〔mm /digit〕

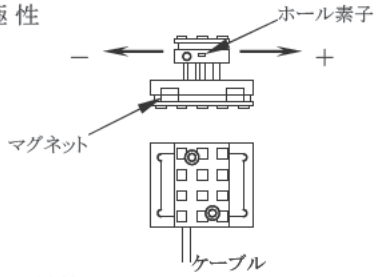
試　験　結　果

製 品 名	ずれセンサー		試 作 番 号	3	
容　量	±6　mm		ケーブル	0.05 mm^2　5　m	
校 正 係 数	0.002954　mm / digit　（±4mm時の出力より算出）				
試験年月日	2011年10月3日	温　度	23　℃	湿　度	41　%

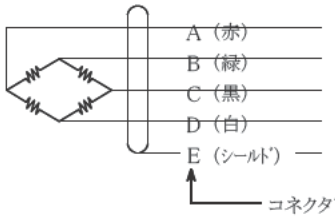
基準変位〔mm〕	出 力〔digit〕	測定変位〔mm〕	測定変位－基準変位	基準変位〔mm〕	出 力〔digit〕	測定変位〔mm〕	測定変位－基準変位
0.0	0	0.00	0.00	0.0	0	0.00	0.00
−0.5	−159	−0.47	0.03	0.5	156	0.46	−0.04
−1.0	−319	−0.94	0.06	1.0	313	0.92	−0.08
−1.5	−480	−1.42	0.08	1.5	473	1.40	−0.10
−2.0	−643	−1.90	0.10	2.0	630	1.86	−0.14
−2.5	−826	−2.44	0.06	2.5	803	2.37	−0.13
−3.0	−1003	−2.96	0.04	3.0	984	2.91	−0.09
−3.5	−1189	−3.51	−0.01	3.5	1160	3.43	−0.07
−4.0	−1373	−4.06	−0.06	4.0	1335	3.94	−0.06
−4.5	−1541	−4.55	−0.05	4.5	1519	4.49	−0.01
−5.0	−1710	−5.05	−0.05	5.0	1688	4.99	−0.01
−5.5	−1872	−5.53	−0.03	5.5	1853	5.47	−0.03
−6.0	−2008	−5.93	0.07	6.0	1995	5.89	−0.11



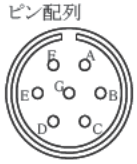
① 極 性



② 結 線



NDISプラグのピン配列



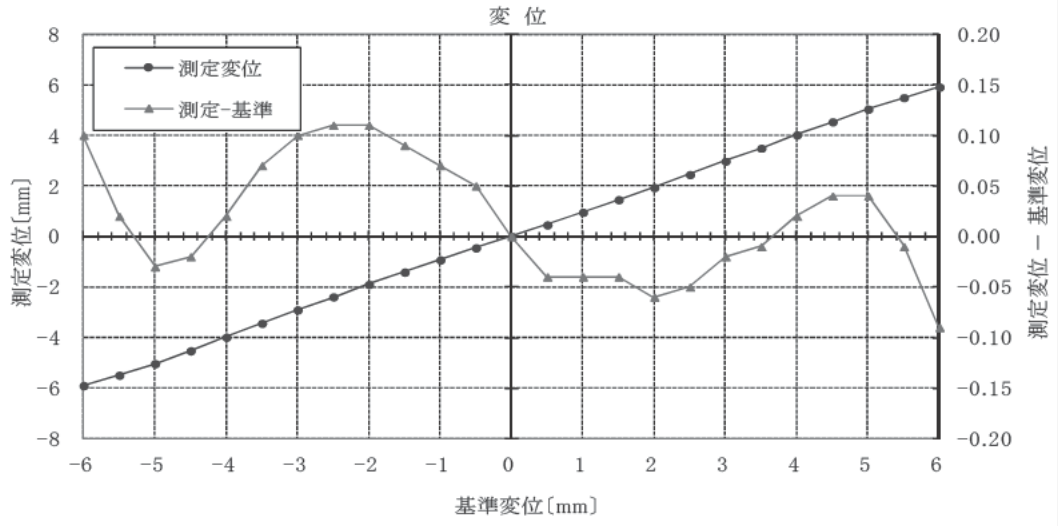
③ 校正係数

測 定 変 位〔mm〕 ＝ 出 力〔digit〕 × 校 正 係 数〔mm /digit〕

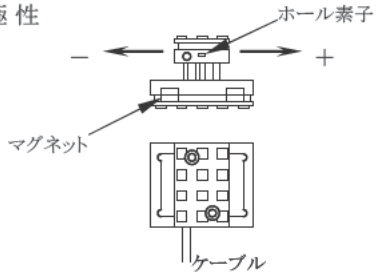
試　験　結　果

製 品 名	ずれセンサー		試 作 番 号	4	
容　量	±6　mm		ケーブル	0.05 mm^2　5　m	
校 正 係 数	0.002965　mm / digit　（±4mm時の出力より算出）				
試験年月日	2011年10月3日	温　度	23　℃	湿　度	41　%

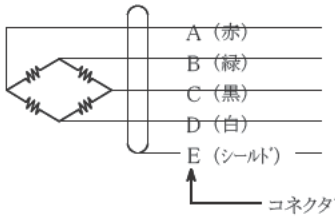
基準変位〔mm〕	出 力〔digit〕	測定変位〔mm〕	測定変位－基準変位	基準変位〔mm〕	出 力〔digit〕	測定変位〔mm〕	測定変位－基準変位
0.0	0	0.00	0.00	0.0	0	0.00	0.00
−0.5	−151	−0.45	0.05	0.5	155	0.46	−0.04
−1.0	−312	−0.93	0.07	1.0	323	0.96	−0.04
−1.5	−476	−1.41	0.09	1.5	491	1.46	−0.04
−2.0	−639	−1.89	0.11	2.0	654	1.94	−0.06
−2.5	−806	−2.39	0.11	2.5	826	2.45	−0.05
−3.0	−979	−2.90	0.10	3.0	1006	2.98	−0.02
−3.5	−1158	−3.43	0.07	3.5	1177	3.49	−0.01
−4.0	−1343	−3.98	0.02	4.0	1355	4.02	0.02
−4.5	−1525	−4.52	−0.02	4.5	1530	4.54	0.04
−5.0	−1695	−5.03	−0.03	5.0	1699	5.04	0.04
−5.5	−1849	−5.48	0.02	5.5	1852	5.49	−0.01
−6.0	−1989	−5.90	0.10	6.0	1993	5.91	−0.09



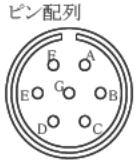
① 極 性



② 結 線



NDISプラグのピン配列



③ 校正係数

測 定 変 位〔mm〕 ＝ 出 力〔digit〕 × 校 正 係 数〔mm /digit〕

共同研究報告書
Cooperative Research Report of PWRI
No. 448 January 2013

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所 企画部 業務課
〒305－8516 茨城県つくば市南原1－6 電話029－879－6754