

## 高精度傾斜計を用いた実橋載荷試験時のたわみ角測定

Deflection angles measurement on bridge loading test by using many high resolution tiltmeters

○黒墨 秀行<sup>\*</sup> 出戸 秀明<sup>\*\*</sup> 村上 功<sup>\*\*\*</sup> 岩崎 正二<sup>\*\*</sup> 向井 正二郎<sup>\*</sup>  
Hideyuki KUROZUMI, Hideaki DETO, Isao MURAKAMI, Shoji IWASAKI and Shojiro MUKAI

**ABSTRACT** We measured deflection angles in the bridge loading test by using many high resolution tiltmeters which can measure tilt enough to 1 nano-radian in two directions at once. As the results of this method, we could estimate complicate twists of a bridge on the bridge loading test. So we got important data to infer the movement of main girder on the loading. It is a useful method to measure deflection angles in the bridge loading test by using many high resolution tiltmeters.

**Keywords:** 高精度傾斜計、実橋載荷試験、たわみ角、ねじれ、新測定技術  
high resolution tiltmeter, bridge loading test, deflection angle, twist,  
new measurement technique

### 1. はじめに

道路橋梁設計荷重が平成5年11月に20tから25tに改定された。また、社会的要請として車両の大型化に対応すべく、既設橋梁の耐久性を定量的に把握し補修・補強などの要否の判定材料とする必要が生じている。このような背景のもと、社団法人岩手県土木技術センターは、既設橋梁の耐荷力評価については補修・補強設計の一助とすることを目的として、既設の道路橋上部工にどのような問題があるかを、大学や関連企業から構成される共同研究会において、平成10年10月より調査研究を行っている。従来の調査研究により、既存資料に基づく机上で耐荷力を算定する方法はいくつか提案されている。しかしながら、実際の橋梁は理論値よりも大きな耐荷力を有していることが多く、実橋にそぐわないケースがあることは否めない。そこで、この共同研究会は机上の調査方法ではなく、「実橋の載荷試験により実応力を測定し、理論値との対比を行う」という考えに基づき調査研究を進め、平成11年5月と平成12年3月に、岩手県内の4橋梁において実橋載荷試験を実施した。この試験の中で新しい計測も試みることで、従来方法と比べ簡単に設置でき、質の高いデータ取得が可能な計測技術の確立を検討し、実橋載荷試験の体系化を図っている。

本論文では、実橋載荷試験における変位計測の新しい試みとして実施した、高精度傾斜計を用いたたわみ角の計測結果を報告し、載荷時の主桁挙動について議論する。さらに、たわみ角による変位量の算出結果、たわみ角の計測値と理論値の比較、既設橋梁支承部の回転機能の点検への適用の可能性について述べる。

<sup>\*</sup> 地熱エンジニアリング株式会社 (〒020-0172 岩手県岩手郡滝沢村鶴飼笹森72)

<sup>\*\*</sup> 岩手大学 工学部建設環境工学科 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田4-3-5)

<sup>\*\*\*</sup> 社団法人岩手県土木技術センター (〒020-0122 岩手県盛岡市みたけ4-4-20)

本論文の一部は社団法人土木学会の平成11年度東北支部技術研究発表会および平成12年度全国大会第55回年次学術講演会にて口頭発表

## 2. 高精度傾斜計

今回用いた米国 Pinnacle 社製の高精度傾斜計(Pinnacle 5500 series)の模式図とセンサー部を図1に示す。本高精度傾斜計は、従来品と比べ高い精度(最高1ナノラジアン:1 nrad,  $10^{-9}$ rad, 約  $10^{-4}$ 秒)で広い範囲( $\pm 10^\circ$ )の傾斜測定が可能である。この高精度傾斜計は、水準器と同様の気泡式センサーを使用している。センサー内にある電解質溶液中の気泡が重力場に応じて移動することにより、電極間の電位が変化する。センサー内にある電解質溶液中の気泡が重力場に応じて移動することにより、電極間の電位が変化する。この電位の変化を直交する2方向について測定することによって、X・Y方向の傾斜を同時計測する。

今回の実橋載荷試験では図1で示した高精度傾斜計を箱に納めた箱型高精度傾斜計を使用した。箱型高精度傾斜計(以下、傾斜計と称す:図4(1))の仕様表を表1に示す。センサーで測定された電位は、アナログアンプで増幅された後、センサー内部の24ビットのA/D変換器でデジタル化される。このためデータ伝送時のノイズに強い。アナログアンプのゲイン調整は4段階可能で、分解能は1~100ナノラジアンまで変更でき、測定対象に応じた分解能を設定できる。本傾斜計は、本体内にメモリを内蔵し、A/D変換後のデジタルデータを内部保存できる。内部メモリに保存する場合は、サンプリング間隔が約30秒の場合、約30日分のデータ保持が可能である。さらに、自動レベリング機能を有しており、手動によるレベリングの手間を省け非常に簡単に傾斜計の設置ができる。

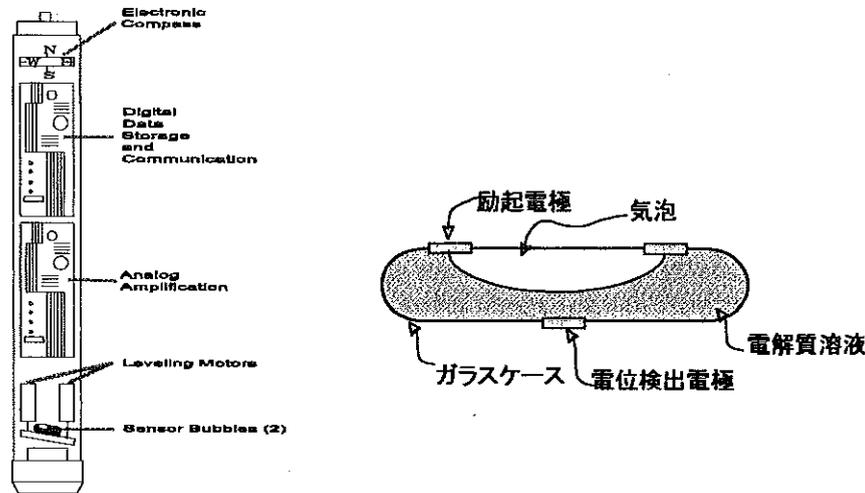


図1 高精度傾斜計の模式図とセンサー部

表1 箱型傾斜計の仕様表

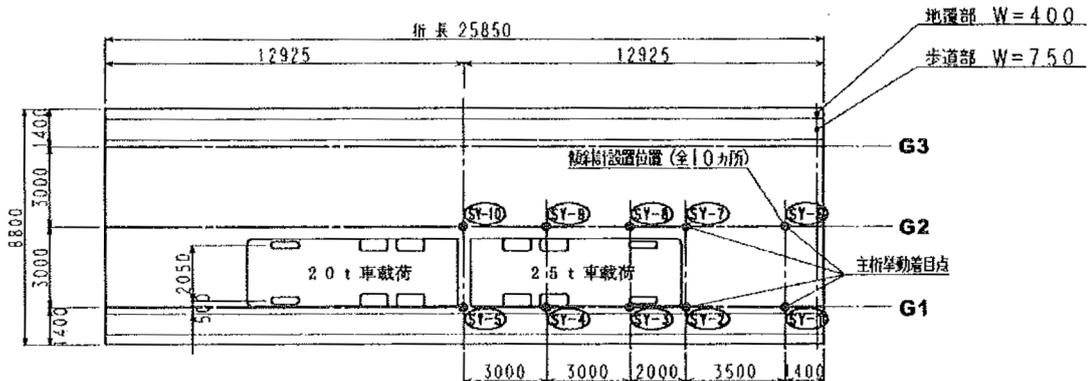
項目	仕様
傾斜分解能	1ナノラジアン(約 $2 \times 10^{-4}$ 秒, 約 $6 \times 10^{-4}$ 度) ゲイン調整により1nR~100nRに変更可能
測定可能傾斜範囲	鉛直から $\pm 10^\circ$
出力(最大値)	傾斜に比例した電圧出力(1000mV/ $\mu$ R)
ゲイン調整	4段階
水平保持機能	自動
サンプリング間隔	2秒~4分
データ記録可能期間 (サンプリング間隔30秒の場合)	約30日
データ記録	内部A/D変換・記録
A/D変換/データ転送速度	24 bits / 9,600 Baud
方位検知	内部コンパス( $\pm 2^\circ$ )
測定方向	X・Y 2方向
内部温度検知	内部温度計
設置場所	構造物表面・地表
寸法/重量	12.9×18.6×37.8cm / 5.35kg
消費電力	平均 280 mV

### 3. 実橋載荷試験時の高精度傾斜計によるたわみ角測定方法

実橋載荷試験は、着目する各部へ予め計量された車両を停止させて載荷する静的載荷試験と、同車両を一定速度で走行させて載荷する動的載荷試験を実施している(社団法人岩手県土木技術センター<sup>1),2)</sup>)。実橋載荷試験を実施した橋梁の諸元を表2に、静的載荷試験の載荷状況及び傾斜計配置例を図3に、傾斜計の設置状況を図4に示す。それぞれの試験においてひずみや変位量と共に、傾斜計を用いてたわみ角を測定した。ただし、動的載荷試験においては、載荷に伴う主桁挙動の急激な変化にセンサーの気泡挙動が追いつかず、有意な計測データが得られなかった。

表2 実橋載荷試験を実施した橋梁の諸元

橋名	正徳橋	有根橋	矢崎橋	西鉛橋
路線	一般県道網張温泉線	一般県道西山生保内線	一般県道花巻田瀬線	主要地方道花巻大曲線
橋長	52.00m	60.00m	107.7m	18.24m
支間長	25.35m	29.25m	26.30m	17.84m
幅員	8.00m	8.00m	9.75m	6.00m
形式	単純活荷重合成桁			
活荷重	一等橋(TL-20)			二等橋(TL-14)
試験年月	平成11年5月		平成12年3月	



SY-1~10は傾斜計設置位置を示す。

図3 正徳橋における載荷状況及び設置位置例

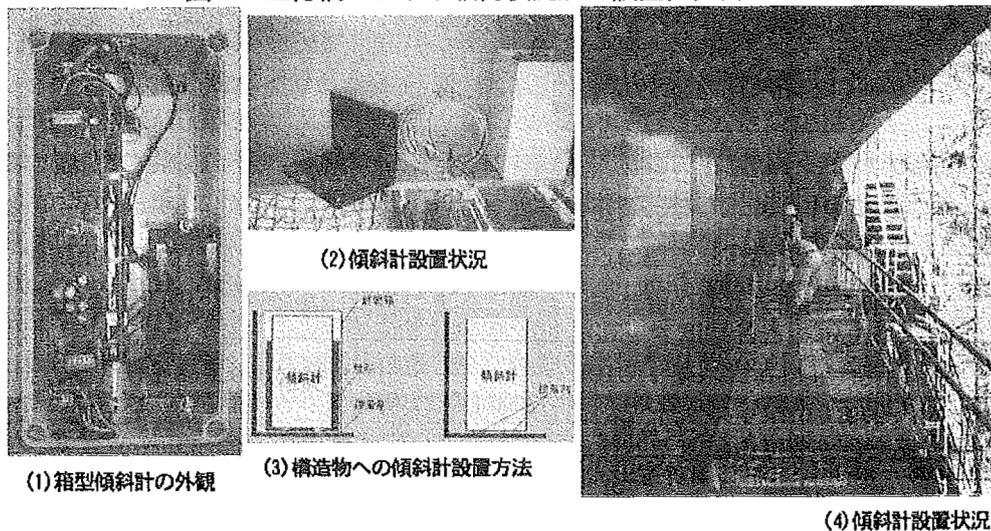


図4 箱型高精度傾斜計とその設置状況

傾斜計は基本的に耳桁と中桁の支点と中央支間の間の下フランジに設置した。また、載荷時には橋梁が橋端付近においてもたわみ角が大きいことから、実橋載荷時の主桁挙動をより正確に把握できるように、できる限り橋端付近に多くの傾斜計を配置した。傾斜計は直接下フランジに接着すると、載荷時の主桁挙動に伴い傾斜計が振動し、載荷後も安定しない。そこで、傾斜計は下フランジに接着したアダプタ内に納め、傾斜計とアダプタ間の隙間を完全に充填できる細粒な珪砂を用いて固定した(図4(3))。また、設置は珪砂による充填を考慮して1日前に行った。このようにして設置した各位置における各載荷試験時の2方向(橋軸方向と橋軸直角方向)のたわみ角を測定した。

#### 4. たわみ角計測結果

実橋載荷試験時のたわみ角測定結果の一例として、正徳橋の計測結果を図5に示す。傾斜計で計測する方向は、橋軸方向と橋軸直角方向の2種類である。本図の横軸は時間、縦軸は傾斜角を示しており、静的載荷に伴う傾斜変化が非常に良く捉えられている。したがって、これらの結果を用いたたわみ角の読みとり、垂直変位量の算出、載荷時における主桁挙動状況等の考察が可能である。これらの計測は同じ内容の載荷試験で2回以上実施し、再現性を確認した。なお、試験全体に見られる緩やか傾斜角の変化は、気泡の膨張すなわち温度による影響と考えられる。

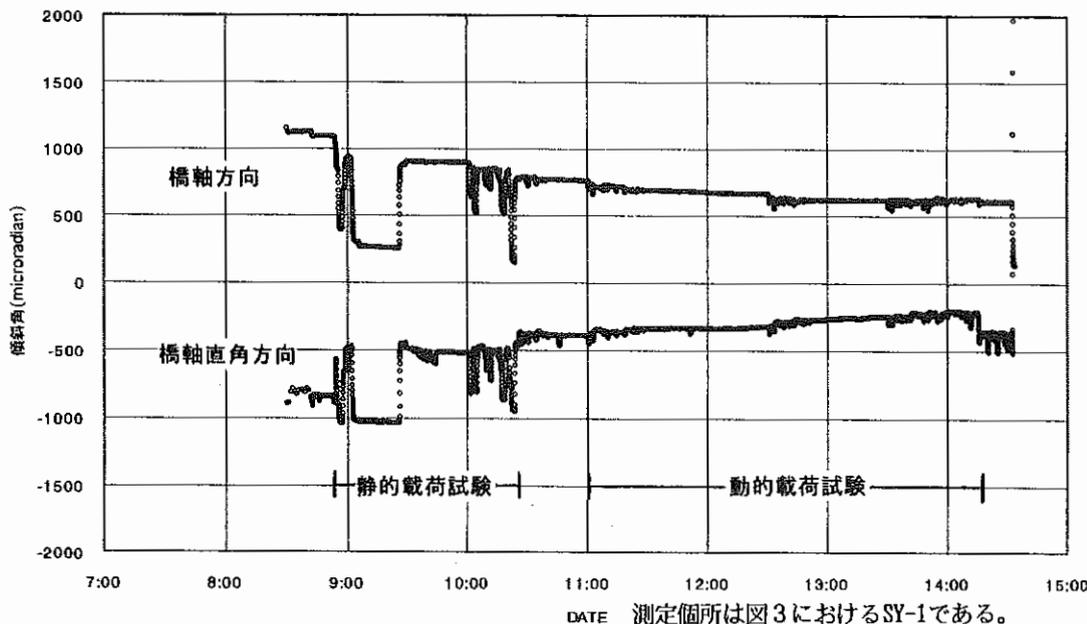


図5 正徳橋における高精度傾斜計による計測結果例

次に矢崎橋の計測結果に基づく載荷時の主桁挙動イメージ例を図6に示す。載荷時には橋軸方向だけでなく、橋軸直角方向にも傾斜変化量が計測され、載荷時には単純にたわむのではなく、ねじれも伴っていることが解る。この傾向は、今回実橋載荷試験を実施した4橋すべてに共通する結果である。なお、本図において、橋軸直角方向の挙動の中心を床板と主桁の接地部を中心とした倒れ角として表現したが、橋軸直角方向の挙動は、主桁の局所的なねじれを示している可能性も十分ある。矢崎橋における主桁挙動は以下の通りである。なお、その他の計測結果は、紙面量の都合により掲載できなかった。社団法人岩手県土木技術センターの共同研究報告書<sup>1),2)</sup>を参考にして頂きたい。

- a. 橋軸方向のたわみ角は、橋端部付近で最も大きい。すなわち、橋端付近でもっともたわんだ主桁挙動と予想される。
- b. 同じ支点-中央支間において、橋軸直角方向の傾斜方向がすべて同じ外側方向を向いている。この傾向は有根橋で確認されており、4本主桁橋梁の特徴の可能性がある。

c. 両橋端の橋軸直角方向の傾斜方向が逆を向いている。したがって、中央支間付近を中心として、左右で橋軸直角方向は逆方向に傾斜していると予想される。これは、矢崎橋が斜角を伴う橋梁のためであると考えられる。その他の橋梁においても橋端部の橋軸直角方向の傾斜方向は、耳桁と中桁で同方向や逆方向となっており、橋梁によって挙動が変化しており、橋端部は複雑な挙動をする場所であることが予想される。

また、西鉛橋では対称になるように傾斜計を配置したが、橋軸方向の傾斜変化量は対称位置で同じ値を示さず、非対称な形を示し、弓形を描くような主桁挙動を示しているわけではない。すなわち、ねじれてたわんだ複雑な主桁挙動をしていると考えられる。これは、西鉛橋が短長であることや剛性が小さいための可能性がある。今回の傾斜計によるたわみ角の計測によって、橋梁種による主桁挙動の変化の違いが確認されている。

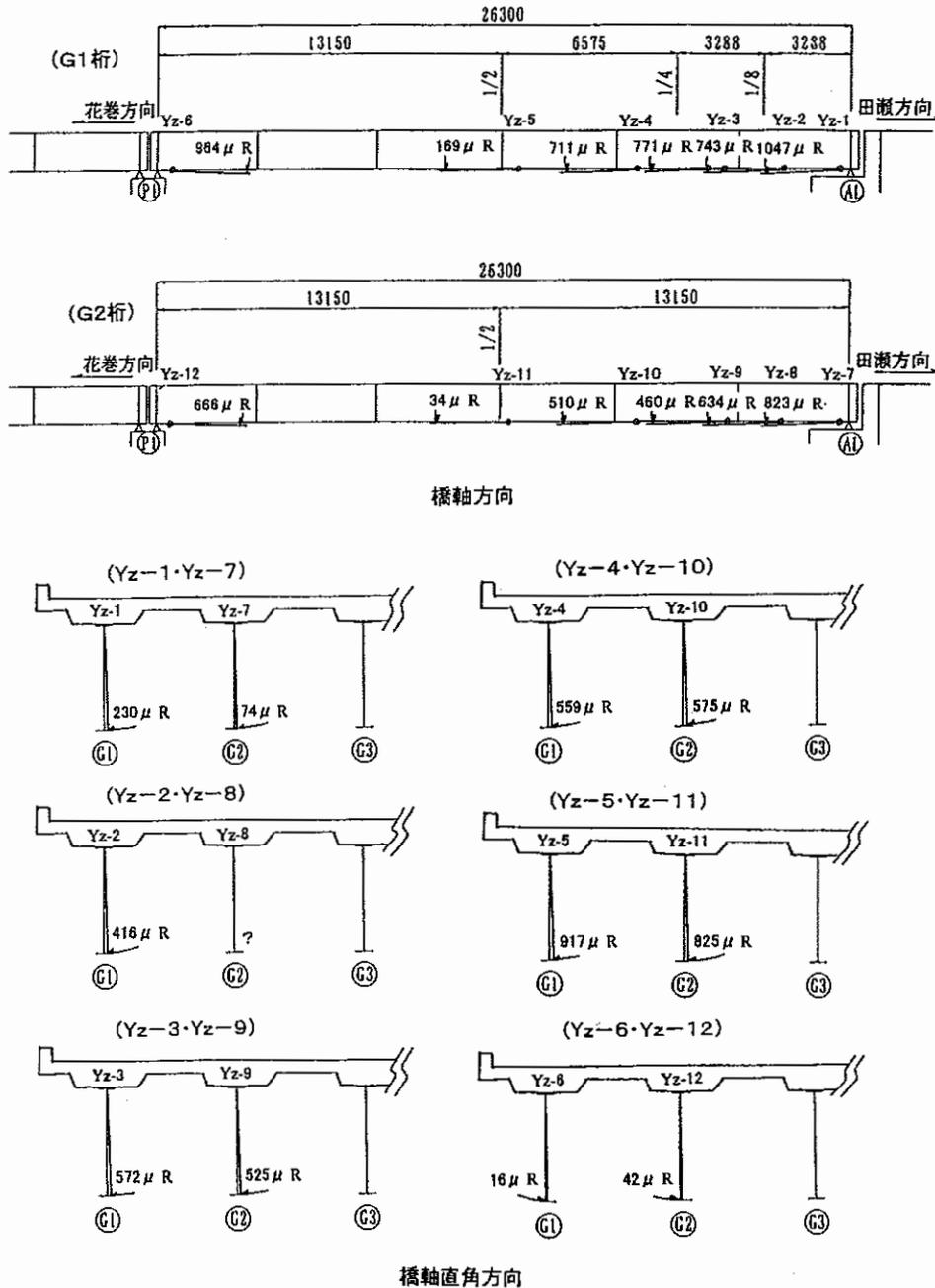


図6 矢崎橋における主桁挙動のイメージ (20+25t: 2台を直列に並べて耳桁に載荷した場合)  
G1桁=耳桁、G2桁=中桁、Yz-1~12は傾斜計設置位置を示す。

### 5. たわみ角からの垂直変位算出結果

各静的載荷試験時の橋軸方向のたわみ角計測結果から、以下の式に基づいて、各傾斜計の測定位置においた垂直変位を算出した。

①最も橋端に近い測定点の場合

$$\text{垂直変位} = a \times \tan \theta$$

a : 橋端から傾斜計設置位置までの平面距離

$\theta$  : 測定点において測定された橋軸方向のたわみ角

②①以外の橋端からn番目の測定点の場合

$$\text{垂直変位} = c + b \times \{(\cos \theta_{n-1} - \cos \theta_n) / (\sin \theta_{n-1} - \sin \theta_n)\}$$

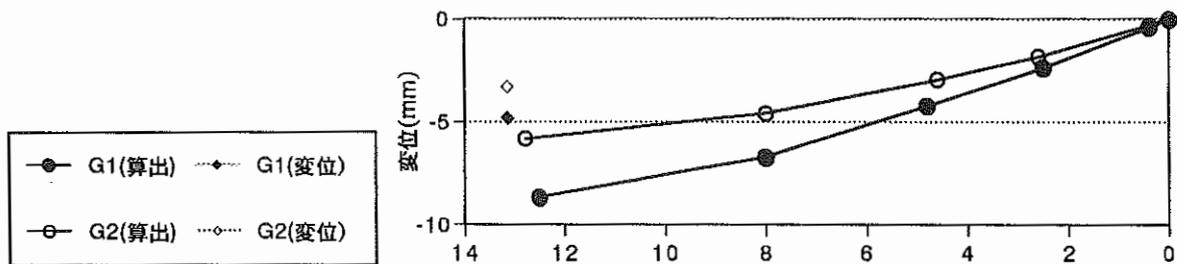
b : n番目とn-1番目の測定点間の平面距離

c : n-1番目までの垂直変位

$\theta_n$  : n番目の測定点においた測定された橋軸方向のたわみ角

$\theta_{n-1}$  : n-1番目の測定点においた測定された橋軸方向のたわみ角

図6で示した計測結果を用いた、垂直変位算出結果を図7に示す。矢崎橋においては、傾斜変化量から算出した計算値が変位計による実測値より大きくなった。一方、正徳橋と有根橋の場合は逆に小さくなる結果が得られており、これは橋端部の傾斜計測定位置による影響(設置場所と橋端間との距離関係)が大きいためと考えている。



G1桁=耳桁、G2桁=中桁 算出：たわみ角を用いて算出した垂直変位量 変位：変位計による測定値

図7 矢崎橋におけるたわみ角による垂直変位算出結果と変位計の実測値  
(載荷状況は図6と同じ)

### 6. たわみ角の計測値と理論値の比較

正徳橋において、可動支承摩擦力で拘束を受けた場合に計算した、橋軸方向のたわみ角の理論値との比較を行った(表3)。本理論値は、兼子ほか<sup>9)</sup>に基づくもので、水平反力の推定式から得た諸元をもとにモールの定理による弾性荷重法により求めた。この結果、主桁中央部のたわみ角の相対誤差が大きいが、全体的には計算値と計測値の整合性が良いものと判断できた。

表3 たわみ角の理論値と測定値の比較

測定箇所	SY-6	SY-7	SY-8	SY-9	SY-10	
①理論値	195.9	230.9	208.3	136.5	35.3	単位 $\mu R$
②計測値	191.6	228.0	226.2	159.9	52.1	単位 $\mu R$
③ 差	4.3	2.9	-17.9	-23.4	-16.8	①-②
④誤差(%)	2.2	1.3	-7.9	-14.6	-32.2	③/②

SY-6~10は正徳橋における傾斜計設置位置を示す。

## 7. 支承部の回転機能の点検への適用

徳田・岩崎<sup>4)</sup>は、載荷時における支承の変位・回転の考察を行っている。今回の載荷試験においても、支承変位の計測や支承近傍での詳細なひずみ計測を行い、支承付近に圧縮ひずみが生じていることや支承の移動・回転が生じている可能性が考察された。徳田・岩崎<sup>4)</sup>は、橋梁の回転性能に関する解析手法として、支承回転角と主桁支間中央のひずみの関係を検討しており、支承回転角を支間中央の変位計による計測変位値と支間中央の橋梁長によって算出している。今回の計測により判明した主桁挙動は橋端付近で最も良かったわみ、弓形を示す可能性があることから考えると、単純な三角形の挙動として推定する方法では、支承回転角の誤差が大きい可能性がある。それに対して、支承付近の回転角を直接測定できる高精度傾斜計による計測は、より精度高く活荷重に対する支承の回転性能の評価ができると考えられる。矢崎橋における傾斜計によって計測した支承回転角と載荷試験で計測したひずみの関係図を図8に示す。G1桁における支承回転角とひずみの関係の回帰直線は、相関が比較的良く相関係数は0.97程度である。このことは荷重増加に対して回転機能も十分に発揮していることを示していると考えられる。

傾斜計による測定は、支承付近の回転角を直接測定できる手法であり、既設橋梁の支承部回転機能の点検を十分に行える可能性が考えられる。このような支承付近の挙動・ひずみに関する解析・考察を行うことは、橋梁の耐荷力を推定する上でも重要と考えられる。

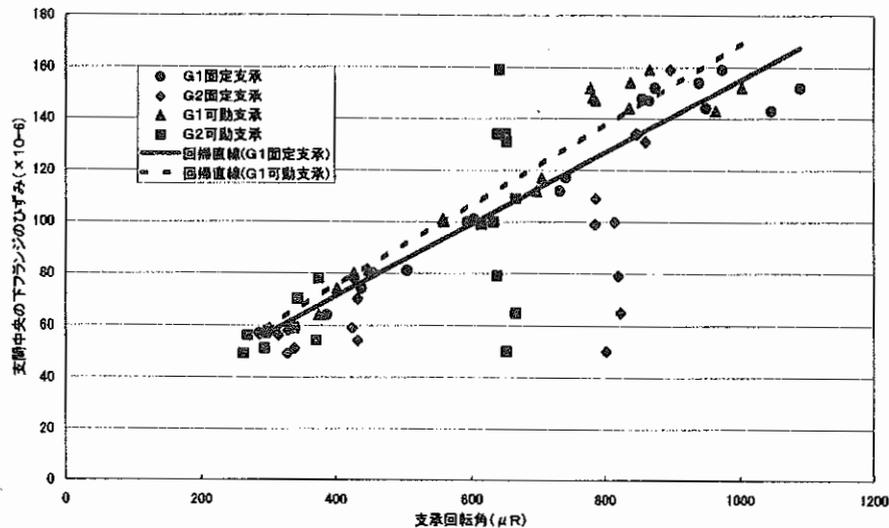


図8 矢崎橋における支承反転角とひずみの関係

## 8. まとめ

今回、新しい試みとして実施した高精度傾斜計を用いたたわみ角計測は、再現性があり、実用性のある測定技術であることが判明した。従来は実橋載荷試験時における橋梁のたわみは変位計による変位計測が行われていたが、今回の手法により、橋梁の主桁挙動を把握しやすいように傾斜計の最適な設置位置を検討すれば、複数の測定個所における橋軸方向とその直角方向のたわみ角の測定と実橋載荷試験時のたわみに伴うねじれの評価ができることが判明した。すなわち、本計測によって実橋載荷試験時の橋梁のねじれ等に伴う主桁挙動を計測し、橋梁に損傷が生じる可能性や桁のねじれによる剛性の変化、支承回転機能の点検等を解析・評価する上で有効かつ重要なデータを取得できたと言える。

しかしながら、今回の実橋載荷試験中ではその他の計測技術でたわみ角を計測しておらず、実測データの比較ができなかった。また、たわみ角からの変位量算出結果も変位計による実測値と若干の

差異が生じている。これらは、傾斜計の配置による影響や、算出上の誤差と考えられ、今後さらに実橋載荷試験による計測を行い、解決していく必要がある。これらの点が解決されれば、従来の変位計による計測に変わる計測技術になると考えられる。

従来の変位計による計測の場合は、河床等から足場を組んで変位計を設置する必要があり、多点における計測や高架橋梁に対しては不向きであると共に、設置に時間を要していた。それに対して、本計測技術は下記の点において優位と考えられる。

- ①本傾斜計は吊り足場のみで設置可能であり、高架橋梁に対しても簡単に設置できる利点がある。
- ②本傾斜計は自動レベリング機能を有するため、設置時に傾斜計の水平をとらなくて良い。傾斜計の設置及び回収は非常に簡単で、設置に要する時間は20分程度と短い。
- ③アダプタは瞬間接着剤による固定方法であるため、構造物にネジ止めの穴を開けずに済み、構造物の強度を低下させずに済む。

### 謝辞

本論文における高精度傾斜計を用いたたわみ角測定は、社団法人岩手県土木技術センターによる共同研究会が実施している実橋載荷試験中に計測した。共同研究会の会員の方々には、日頃から有益なご意見頂いている。日本大学五郎丸英博教授及び地熱エンジニアリング株式会社の探査部諸氏には日頃から有益なご意見を頂いていると共に、データ解析等をご協力して頂いた。ここに記して感謝の意を称します。

### 【参考文献】

- 1)社団法人岩手県土木技術センター：道路橋設計荷重の変更による既設橋梁上部工に及ぼす影響，第1回共同研究報告書，1999.6.
- 2)社団法人岩手県土木技術センター：道路橋設計荷重の変更による既設橋梁上部工に及ぼす影響，第2回共同研究報告書，2000.6.
- 3)兼子清・山口和広・山村浩一・平洋文・岩崎正二：既設鋼橋の静的載荷試験結果に及ぼす支承反力の影響に関する一考察，社団法人土木学会東北支部平成11年度東北支部技術研究発表会講演概要，pp.4-5，2000.3.
- 4)徳田浩一・岩崎雅紀：支承の活荷重挙動に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.41A，pp.935-944，1995.3.