■変位解析法に基づくすべり層変位の定量解析

ーモデル実験による変位解析法の検証ー

The quantitative analysis of sliding layer displacement based on the displacement analysis method

ーVerification of the displacement analysis method by model experimentー

新潟大学農学部 早川嘉一

Niigata University Kaichi HAYAKAWA

(株)本間組 相田忠明

Honmagumi Co., Ltd Tadaaki AIDA

新潟県農地部 佐々木友和

Niigata Prefecture Tomokazu SASAKI

キーワード：変位，ひずみ，変形

Key words : Displacement, Strain, Deformation

1. はじめに

地すべりの動態機構の解明にあたっては，地中土塊の挙動を的確に把握する必要がある。特に，すべり変位を定量的，経時的に捉えることが極めて重要である。1960年代から地すべりの動態観測手法の研究開発が活発に進められ種々の方法が開発されている¹⁾。その中でも，パイプひずみ計は湊元・山口らによって約50年前に開発²⁾されて以来，測定感度が高いことや観測作業の簡便さから広く使われてきている。今日では観測の自動化や耐久性の向上が計られ，信頼性の高い観測法の一つとなっている。

パイプひずみ計は，観測ひずみ量の累積からすべり面(層)の判定は可能である。しかし，変形ひずみ量と変位量とは線形関係が成りたないことから，パイプの変位量を直接的に算定することはできない。山口³⁾は，すでに30年前に「観測で得られたひずみ量とパイプの変形や地中土塊の移動量との関係が分からなければ，土塊の移動機構について定量的論議やすべり面の深さは解析できない」と指摘しているが，いまだ解決するまでには至っていない。このことに関してこれまでに幾つかの研究がなされている。例えば，たわみ曲線の微分方程式を基本式として，中村ら(1969)³⁾は，境界条件として下端の不動点でたわみ角 = 0，たわみ = 0 と仮定してパイプの変位を求めている。山口(1972)⁴⁾は，各ひずみゲージ間のパイプ(単位パイプ)のひずみは一樣とし，境界条件として各単位パイプ間に変位及び勾配が連続していると仮定してパイプの変位を求めている。小島ら(1992)⁵⁾は，境界条件としてたわみ，たわみ角，モーメント，せん断力，外力が単位パイプ間で連続すると仮定して伝達マトリックス法で解析している。パイプの変形をたわみ曲線の微分方程式から解析する場合，境界条件及び外力をど

のように扱うかが大きな課題となる。島ら(1973)⁶⁾は，挿入式ひずみゲージセンサーを開発し，ここでの観測ひずみの累積値とたわみとが比例関係にあるとしているが，限られた範囲内での関係と推察する。

本変位解析法は，使用する硬質塩化ビニールパイプの曲げ剛性が小さいことから，パイプの変形は土塊の変形に追従しているものとみて，パイプの変形ひずみからパイプの変形解析を行うものである。

本研究は，地中に埋設したパイプの変形ひずみからパイプの変形形状を再現し，すべりの変位動態を明らかにすることを目標として進めている^{7), 8), 9)}。

2. 変位解析

地中に埋設したパイプが，地すべり活動に伴って生ずる地中土塊のせん断変形に追従して変形すると仮定する。鉛直方向に埋設したパイプの任意の区間における変形模式図を図-1に示す。隣り合うひずみゲージの中間点をそれぞれ J_n ， J_{n+1} とする。この区間を単区間(区間距離 L)とし，この点を以後は接点と呼ぶことにする。単区間におけるパイプの水平方向の変位 d_n は接点 J'_{n+1} が J_{n+1} に移動したときの水平距離である。

ここで，区間距離が小さい場合，次の3つの条件が成り立つものと仮定する。

- ①単区間内でのパイプのひずみは一定(曲率半径が一定)
- ②変形時においてパイプの弧長と弦長が等しい
- ③接点で接続する両単区間のパイプは共通の接線で連続する

この3つの条件から以下の変位解析を試みる。

図-1に示すようにパイプが変形した場合，任意の単区間($J_n - J_{n+1}$)における水平方向の変位 d_n は接点 J'_{n+1} と J_{n+1} の水平距離となる。

図-1 パイプの変形模式図

但し、 d_n ：水平変位 d_{zn} ：回転変位 d_{sn} ：ひずみ変位
 θ_n ：交角 R_n ：曲率半径 Z_n ：接点回転角
 L ：パイプの単区間距離 G_n ：ひずみゲージ

変位 d_n は上述の仮定から接点の回転によって生ずる変位 d_{sn} （以後は回転変位と呼ぶ）とパイプのたわみ変形によって生ずる変位 d_{sn} （以後はひずみ変位と呼ぶ）に分けて考えることができる。変位 d_n は(1)式となる。

$$d_n = d_{zn} + d_{sn} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、回転変位 d_m とひずみ変位 d_{sn} は(2)式, (3)式から求まる。

$$d_{zn} = L \sin Z_n \dots\dots\dots(2)$$

$$d_{sn} = 2L \sin(\theta_n/4) \cos(Z_n + \theta_n/4) \dots\dots\dots(3)$$

よって、(1)式は(2)式と(3)式から(4)式に整理できる。

$$\begin{aligned} d_n &= d_{zn} + d_{sn} = L \sin Z_n + 2L \sin(\theta_n/4) \cos(Z_n + \theta_n/4) \\ &\dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

また、接点回転角 Z_n は(5)式より求まる。

$$Z_n = Z_{n-1} + \theta_{n-1} \dots\dots\dots (5)$$

次に、パイプの外縁に生ずる変形ひずみ ε と交角 θ との関係を求める。図-2に示すように直線パイプの単区間 $a-b$ が下図のように曲げ変形したとき、パイプの単区間距離 L とパイプ外縁部の区間距離 L' は次式のとおりであり、

$$L = R\theta, \quad L' = (R + r)\theta$$

図-2 パイプの曲げ変形

但し、 ε :パイプ外縁部のひずみ θ :交角
 R :パイプ中立軸の曲率半径 r :パイプの外半径
 L :区間距離

よって、伸び ΔL は(6)式となる。

$$\Delta L = L' - L = r\theta \dots\dots\dots(6)$$

ひずみ ε は(7)式であり,

$$\varepsilon = \Delta L / L = r\theta / L \dots\dots\dots(7)$$

よって、交角 θ とひずみ ε の関係は(8)式となる。

$$\theta = L\varepsilon/r \dots\dots\dots(8)$$

単区間の変位 d_n は(4)式と(8)式から(9)式のように整理できる。

$$\begin{aligned} d_n &= L \sin Z_n + 2L \sin(\varepsilon_n L / (4r)) \cos(Z_n + \varepsilon_n L / (4r)) \\ &\dots\dots\dots(9) \end{aligned}$$

なお、(9)式における接点回転角 Z_n は(10)式である。

$$Z_n = Z_{n-1} + \theta_{n-1} = Z_{n-1} + L\varepsilon_{n-1}/r \quad \dots\dots\dots(10)$$

よって、単区間の変位 d_n は、(9)式の単区間距離 L 及びパイプの外半径 r が既定値であることから、変形ひずみ ε の観測値によって解析できる。

以上が変位解析の基本式となる。次に、隣り合う単区間の接点での変形の緩和を考慮し、接点の近傍の変形は隣り合う両区間のひずみに関係するものとし(9)式を整理する。図-3に示すように単区間を3つの区間に分けて解析する。

図-3 変形区間の分割

接点 J_n から接点 a 及び接点 b から接点 J_{n+1} の区間を緩和区間(区間距離 $L/4$)とし、この区間の変形ひずみは隣り合う区間の測定ひずみの平均値に近似させる。区間の中央部 $L/2$ の区間($a-b$)の変形ひずみはこの単区間の測定ひずみに近似させて解析する。区間(J_n-a)の交角を θ_{n1} 、区間($a-b$)の交角を θ_{n2} 、区間($b-J_{n+1}$)の交角を θ_{n3} とすれば、(4)式から、図-3の水平変位 d_{n1} 、 d_{n2} 、 d_{n3} は(11)式、(12)式、(13)式となる。

$$d_{n1} = L \sin Z_n/4 + L \sin(\theta_{n1}/4) \cos(Z_n + \theta_{n1}/4)/2 \cdots \cdots (11)$$

$$d_{n2} = L \sin Z_{na}/2 + L \sin(\theta_{n2}/4) \cos(Z_{na} + \theta_{n2}/4) \cdots \cdots (12)$$

$$d_{n3} = L \sin Z_{n3}/4 + L \sin(\theta_{n3}/4) \cos(Z_{nb} + \theta_{n3}/4)/2 \cdots \cdots (13)$$

ここで、交角 θ_{n1} 、 θ_{n2} 、 θ_{n3} は(14)式、(15)式、(16)式である。

$$\theta_{n1} = L(\varepsilon_{n-1} + \varepsilon_n)/(8r) \cdots \cdots (14)$$

$$\theta_{n2} = L\varepsilon_n/(2r) \cdots \cdots (15)$$

$$\theta_{n3} = L(\varepsilon_n + \varepsilon_{n+1})/(8r) \cdots \cdots (16)$$

接点 a 及び b の接点回転角 Z_{na} 、 Z_{nb} は(17)式、(18)式である。

$$Z_{na} = Z_n + \theta_{n1} = Z_n + L(\varepsilon_{n-1} + \varepsilon_n)/(8r) \cdots \cdots (17)$$

$$Z_{nb} = Z_{na} + \theta_{n2} = Z_{na} + L\varepsilon_n/(2r) \cdots \cdots (18)$$

よって、単区間の変位 d_n は(19)式から求まる。

$$d_n = d_{n1} + d_{n2} + d_{n3} \cdots \cdots (19)$$

任意の接点 n における変位 D_n は下位からの単区間変位の累積であり(20)式となる。

$$D_n = \sum_{n=1}^n d_n \cdots \cdots (20)$$

また、任意の接点 n における単区間のすべり変位 D_{un} (以後はすべり層変位と呼ぶ)は(21)式から求められる。

$$D_{un} = D_{n+1} - D_n \cdots \cdots (21)$$

ここで求める変位はひずみゲージの方向(NS方向, EW方向)と同方向の変位である。また、ひずみゲージをNS方向とEW方向の2方向に設けることによって、最大変位とその変位方向が求められる。NS方向のひずみデータから求めたNS方向の変位を D_{NSn} 、EW方向のひずみデータから求めたEW方向の変位を D_{EWn} とすれば、最大変位 D_{maxn} は(22)式で求まる。NSひずみゲージ方向に対する最大変位方向(以後は変位方向と呼ぶ)角 α_n は(23)式となる。

$$D_{maxn} = \sqrt{D_{NSn}^2 + D_{EWn}^2} \cdots \cdots (22)$$

$$\alpha_n = \tan^{-1}(D_{NSn}/D_{EWn}) \cdots \cdots (23)$$

よって、本変位解析法は、地すべり活動によって生ずるパイプの変形形状をパイプの変形ひずみデータから再現し、すべりの変位動態を定量的に捉えることを可能とする。以下に変位解析法の適合性についてモデル実験によって検証を行う。

3. 検証実験

予備実験でひずみゲージ間隔25cm, 50cm, 100cmの実験を行い、その適合性の検討を行った。ゲージ間隔100cmは大変形するとき変位誤差が大きくなった。ゲージ間隔25cmと50cmでは精度の良い結果が得られている。本実験ではゲージ間隔を精度及び実用面から考慮し50cmとした。また、中村ら¹⁰⁾はパイプの曲げ剛性と地盤反力係数との関係から硬質塩化ビニールパイプのゲージ間隔を約70cm以下とすることを提言している。このことからゲージ間隔50cmは妥当であると考えられる。

3.1 実験装置

実験装置は、地すべりの主要な動態形態である不動層、すべり層、移動層をモデル化し作製した。なお、ここでのすべり層は地すべりのせん断変形ゾーンを想定している。実験装置の概要を写真-1及び図-4に示す。

使用パイプは硬質塩化ビニール製で、形状寸法は外半径48.0mm, 内半径40.8mm, 長さ8mである。このパイプにひずみゲージを50cm間隔に直交するNS方向とEW方向に接着した。使用したひずみゲージのゲージ率は2.18である。

このパイプをパイプホルダーにセットする。パイプホルダーは変形時に曲げ拘束がないように回転可能になっている。パイプホルダーはロッドを介し水平移動する。

パイプ下部の1.57mの区間を不動層としてパイプホルダーNo1, No2, No3を固定した。ホルダーNo4から上

部の移動層のホルダーを動かすことによって後述のすべり変形をつくり、パイプに生ずる変形ひずみを測定した。

3.2 実験方法

実験は、本変位解析法の適合性を確認することを目的としていることから、以下の変形形状と変位方向の組み

图-5 变位方向

合わせで行った。

(1) 變位方向

変位方向は図-5に示す3種類である。

- ①実験R0：変位方向とNS ひずみゲージ軸方向が同じ
- ②実験R20：変位方向に対してNS ひずみゲージ軸を
20° 回転
- ②実験R40：変位方向に対してNS ひずみゲージ軸を
40° 回転

(2) 變形形狀

パイプの変形形状は不動層、すべり層、移動層を想定した図-6と図-7に示す実験Aと実験Bの2種類とした。なお、実験Bのすべり層の変形形状は、現地地すべりでは見られない挙動であるが本変位解析法の適合性を確認するために試みた。

- (1) 実験A：ホルダーNo 3～No 4の1mの区間をすべり層と仮定し、その上部のホルダーNo 4～No 9の5m区間（移動層）を平行移動する。なお、移動距離（変位量） d は10cm～60cmの範囲で10cm毎移動し観測を行った。
- (2) 実験B：ホルダーNo 4を55cmで固定（ $d'=55\text{cm}$ ）し、その上部のホルダーNo 5～No 9の区間を逆方向に5cm毎平行移動する。

3.3 実験の種類

実験の種類は、変位方向、変形形状、変位量の組み合わせで表-1に示すとおりである

観測については、ひずみ測定は自動ひずみ測定器で、パイプの変位量はスケールで手動測定をした。

変位解析は、前述の変位解析式をプログラム化し観測データを入力し解析を実行した。

4. 変位解析の結果と考察

4.1 变位解析图

各実験における、測定ひずみ及び変位・すべり層変位の解析値と実測値の結果の一部を図-8～図-10に示す。変位図はパイプの変形形状を示している。すべり層変位は単区間(50cm)のすべり変位(せん断変位)を示している。この変位解析図からも解析値と実測値とが良く整合していることが分かる。

また、本変位解析図からすべり動態を容易に把握することができる。

4.2 変位解析結果の評価

変位解析結果の整合性の評価は変位の実測値との比較

図-6 実験Aの変形図

図-7 実験Bの変形図

で検討する。

パイプの変形の再現性評価は変位の平均相対誤差を求め検討を行った。変位の平均相対誤差は、次式に示すように各測点の実測変位と解析変位の誤差累計の実測変位累計に対する百分率で示す。

変位の平均相対誤差 (%)

$$\frac{\sum |(\text{実測変位} - \text{解析変位})|}{\sum \text{実測変位}} \times 100$$

すべり変位の相対誤差は、次式に示すように解析すべり変位誤差の実測すべり変位に対する百分率である。なお、ここでのすべり変位は図-6のすべり層区間の変位である。

すべり変位の相対誤差 (%)

$$\frac{|\text{実測すべり変位} - \text{解析すべり変位}|}{\text{実測すべり変位}} \times 100$$

変位方向角については実測値との誤差から検討を行った。

実験は最大ひずみ $5000\mu \sim 30000\mu$ の範囲で行った。最大ひずみはすべり層の上下面に近接しているひずみゲージNo.2及びNo.5に生じている。

(1) 実験R0

本実験は変位方向とNSひずみゲージ方向が同一の変位方向角 0° の実験である。変位、すべり変位、変位方向角の解析値と実測値との誤差を表-2に示す。

変位の平均相対誤差は、変形ひずみ 22000μ までは5%、 27000μ ひずみで7%内であり、このひずみ範囲では高い精度でパイプの変形を再現している。ひずみが 27000μ より大きくなるとひずみの増加と共に誤差もやや大きくなる傾向がみられる。すべり変位の相対誤差は 25000μ ひずみまでは10%以内の高い整合性を示している。 25000μ ひずみ以上になるとひずみの増大とともに誤差も大きくなっている。変位方向角の誤差は全ての実験で 3° 以内に納まっている。

(2) 実験R20

変位方向角が 20° の実験の解析値と実測値との誤差を表-3に示す。なお、実験R20及び実験R40ではパイプの移動方向とひずみゲージ方向が同一でないため、測定ひずみはパイプの最大ひずみを示していない。よって、ここでは実験R0の測定ひずみを最大ひずみの近似値として検討する。

変位の平均相対誤差は、全ての実験において(最大変形ひずみ 25000μ) 6%以内であり、パイプの変形を高い精度で再現している。すべり変位の相対誤差は 19000μ

表-1 実験の種類

変位 方向	変形 形状	実験名	変位量 d cm	変位量 d' cm	変位方向角 °
R0	A	R0-A1	10	—	0
		R0-A2	20	—	0
		R0-A3	30	—	0
		R0-A4	40	—	0
		R0-A5	50	—	0
		R0-A6	60	—	0
	B	R0-B1	50	55	0
		R0-B2	45	55	0
		R0-B3	40	55	0
		R0-B4	35	55	0
		R0-B5	30	55	0
		R0-B6	25	55	0
		R0-B7	20	55	0
R20	A	R20-A1	10	—	20
		R20-A2	20	—	20
		R20-A3	30	—	20
		R20-A4	40	—	20
		R20-A5	50	—	20
		R20-A6	60	—	20
	B	R20-B1	50	55	20
		R20-B2	45	55	20
		R20-B3	40	55	20
R40	A	R40-A1	10	—	40
		R40-A2	20	—	40
		R40-A3	30	—	40
		R40-A4	40	—	40
		R40-A5	50	—	40
		R40-A6	60	—	40
	B	R40-B1	50	55	40
		R40-B2	45	55	40
		R40-B3	40	55	40

ひずみ以下では13%以内である。19000 μ ひずみ以上になるとやや誤差も大きくなっている。変位方向角の誤差は2°以内で高い精度で算定している。

(3) 実験R40

変位方向角が40°の実験の解析値と実測値との誤差を表-4に示す。

変位の平均相対誤差は23000 μ ひずみまでは5%以内となっており、パイプの変形を良く再現している。すべり層変位の相対誤差は、変形ひずみ19000 μ までは12%以内であり、実測すべり変位と良く整合している。変位方向角の誤差は3°以内で高い精度を示している。

5. まとめ

(1) パイプの変形形状の再現性

本変位解析法のパイプの変形形状の再現性は、変位方向とひずみゲージ方向角が20°以内（実験R0, 実験R20）の場合で変形ひずみ25000 μ 以下では変位の平均相対誤

図-8 変位解析図(実験R0)

差7%以内の高い精度で変位が求められた。

(2) 最大変位と変位方向

本変位解析法は、直交したNS方向, EW方向の2方向のひずみ観測を行うことによって最大変位とその変位方向を求めることが可能となった。最大変位方向角(すべり変位方向角)の解析結果は全ての実験で3°以内の方向角誤差に納まっている。

(3) すべり層変位

地すべりの動態解析にあたっては、すべり層のせん断変位(すべり層変位)を定量的かつ経時的に捉えることが重要である。本変位解析法はパイプの変形形状を再現できることから、すべり層変位を求めることが可能とな

実験 R20-A2

実験 R40-A2

実験 R20-A6

実験 R40-A6

実験 R20-B3

実験 R40-B3

図-9 変位解析図 (実験R20)

図-10 変位解析図 (実験R40)

る。本実験で検証したすべり層変位の解析精度は、変位方向とひずみゲージ方向が同一の場合(実験R0)で変形ひずみ 25000μ 以下ではすべり層変位の相対誤差が10%以内に納まっている。ひずみゲージ方向と変位方向とが異なっている場合(実験R20, 実験R40)で変形ひずみ 19000μ 以下ではすべり層変位の相対誤差が13%以内の精度で算定できた。

(4) ひずみゲージの間隔

ひずみゲージ間隔は50cm間隔でパイプの変形形状を的確に再現できることが確認できた。

(5) パイプの変形ひずみ限界

現地観測への適応にあたってはパイプの変形限界を明

らかにすることが重要である。変形ひずみ約 25000μ まではパイプ断面形状に大きな変状が生じないことを確認した。変形ひずみの解析限界値は、解析結果の信頼度等を考慮すれば、①変位方向とひずみゲージ方向角が 20° 以内の場合では 25000μ ひずみ、②変位方向とひずみゲージ方向角が 40° の場合で 19000μ ひずみ程度が目安となるものとする。

以上の結果より、本変位解析法によってパイプの変形ひずみデータからパイプの変形形状を精度良く再現できることが確認できた。これにより、すべり層変位及びすべり変位方向角を定量的に求めることが可能となった。

本変位解析法による観測システムの構築は、すべり層

表－２ 解析値と実測値との誤差（実験R0）

実験名	変位量 d cm	測定最大 ひずみ μ	変位の誤差			すべり変位の誤差			変位方向 の誤差*
			誤差累計	実測値累計	相対誤差%	誤差	実測値	相対誤差%	
R0-A1	10	5200	50	1091	5	7	103	7	2
R0-A2	20	9200	133	2189	6	12	202	6	3
R0-A3	30	13500	149	3258	5	13	295	4	3
R0-A4	40	16700	210	4296	5	18	382	5	3
R0-A5	50	19300	220	5363	4	27	462	6	2
R0-A6	60	21700	264	6402	4	36	537	7	2
平均			—	—	4.8	—	—	5.8	2.7
R0-B1	50	22300	283	5476	5	41	503	8	2
R0-B2	45	23900	371	5057	7	41	502	8	2
R0-B3	40	25400	340	4633	7	48	503	10	3
平均			—	—	6.3	—	—	8.7	2.3
R0-B4	35	26500	232	4221	6	63	503	13	2
R0-B5	30	27700	327	4549	7	94	515	18	2
R0-B6	25	28500	453	4145	11	114	516	22	1
R0-B7	20	30300	535	3739	14	129	520	25	1
平均			—	—	9.5	—	—	19.5	1.5

表－３ 解析値と実測値との誤差（実験R20）

実験名	変位量 d cm	実験 R0 の測 定ひずみ μ	測定最大 ひずみ μ	変位の誤差			すべり変位の誤差			変位方向 の誤差*
				誤差累計	実測値累計	相対誤差%	誤差	実測値	相対誤差%	
R20-A1	10	5200	4600	73	1162	6	1	99	1	1
R20-A2	20	9200	8700	120	2129	6	15	207	7	1
R20-A3	30	13500	12200	149	3183	5	28	302	9	1
R20-A4	40	16700	15100	150	4217	4	44	386	11	1
R20-A5	50	19300	18100	143	5235	3	61	467	13	1
R20-A6	60	21700	20900	265	6279	4	85	545	16	2
平均				—	—	4.7	—	—	9.5	1.2
R20-B1	50	22300	21100	187	5363	3	65	496	13	2
R20-B2	45	23900	22900	224	4941	5	89	512	17	2
R20-B3	40	25400	24500	264	4535	6	100	515	19	2
平均				—	—	4.7	—	—	16.3	2.0

表－４ 解析値と実測値との誤差（実験R40）

実験名	変位量 d cm	実験 R0 の測 定ひずみ μ	測定最大 ひずみ μ	変位の誤差			すべり変位の誤差			変位方向 の誤差*
				誤差累計	実測値累計	相対誤差%	誤差	実測値	相対誤差%	
R40-A1	10	5200	3800	45	1100	4	8	103	8	3
R40-A2	20	9200	7200	103	2163	5	21	204	10	2
R40-A3	30	13500	10400	157	3239	5	34	305	11	1
R40-A4	40	16700	13500	263	4301	6	32	398	8	2
R40-A5	50	19300	16000	233	5338	4	56	483	12	3
R40-A6	60	21700	18400	282	6374	4	92	568	16	4
平均				—	—	4.7	—	—	10.8	2.5
R40-B1	50	22300	18500	197	5442	4	78	528	15	2
R40-B2	45	23900	19900	223	5016	4	87	524	17	3
R40-B3	40	25400	21100	801	4600	17	148	529	28	4
平均				—	—	8.3	—	—	20.0	3.0

変位（せん断変位）の定量的・経時的観測を可能にし、地中のすべり動態をより詳細に明らかにできるものと考ええる。また、本変位解析法の現地への適応性の検証を行うために現地観測を実施しているところである。^{11), 12)}。

最後に、実験の一部は卒論生の二野宮陽子君、勝山靖子君、佐藤恵君、新保幹君に負うた。また、実験の準備にあたり株式会社測商技研にご協力を頂いた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 山口真一編 (1971): 地すべり調査と対策講座Ⅱ, 地すべり面の性格とその調査法, 全国地すべり対策協議会
- 2) 湊元光春 (1963): 第三紀層型地すべりの地下内部構造と変形の様相について(1), 新砂防, No. 48, pp. 21-27.
- 3) 中村浩之・近藤政司・白石一夫 (1969): 地中歪計による地すべりすべり面判定の一考察, 地すべり, Vol. 6, No. 1, pp. 1-9.
- 4) 山口真一 (1972): パイプひずみ計により地すべり土塊の変形の姿を求める方法について, 地すべり, Vol. 8, No. 4, pp. 8-11.
- 5) 小島義孝・葭谷武司・山田壽政・速水博秀・館中隆志 (1992): パイプひずみ計による地すべり挙動の解析法, 地すべり学会研究発表講演集, pp. 209-212.
- 6) 島通保・竹内篤雄 (1973): 地中内部歪の測定方法について, 地すべり, Vol. 10, No. 2, pp. 6-17.
- 7) 早川嘉一・相田忠明・福本安正・真島寿 (1997): パイプひずみ計による水平移動量の推定(1), 地すべり学会研究発表講演集, pp. 353-356.
- 8) 早川嘉一・相田忠明 (1998): パイプひずみ計による水平移動量の推定(2), 地すべり学会研究発表講演集, pp. 303-306.
- 9) 早川嘉一・佐藤恵・佐々木友和 (2000): ひずみ変位計の適応ひずみ限界の検証, 地すべり学会研究発表講演集, pp. 131-134.
- 10) 中村浩之・板垣治 (1976): ストレンゲージパイプによるゲージ間隔に関する考察, 地すべり, Vol. 13, No. 2, pp. 21-26.
- 11) 早川嘉一・宮澤一宏 (1999): パイプひずみ計による水平移動量の推定(3)-寛平地すべりでの適応性の検証-, 地すべり学会研究発表講演集, pp. 189-192.
- 12) 早川嘉一 (2001): ひずみ変位計を用いたすべり層変位の解析事例, 地すべり学会研究発表講演集, pp. 315-318.

(原稿受付2001年9月27日, 原稿受理2002年3月7日)