光ファイバと弾性体（天然ゴム）を用いた地山変位計測システムの開発

B-OTDR　弾性体　地山変位計測

(財)地域地盤環境研究所　国際会員　橋本　正　正会員　○水原　勝由
ｴﾇ･ﾃｨ･ﾃｨ･ｲﾝﾌﾗﾈｯﾄ(株)　正会員　奥野　正富　正会員　鳥越　寿彦
(株)高速道路総合技術研究所　正会員　城間　博通　正会員　下田　哲史
ﾌﾞﾘﾁﾞｽﾄﾝ･ｹｰ･ﾋﾞｰ･ｼﾞｰ(株)　清水　潔

１．はじめに

現在の B-OTDR 方式（Brillouin Optical Time Domain Reflectmeter）で開発適用された光ファイバ計測システムには，地表面や構造物表面等に生じるひずみや変位を線的（連続）に計測するものがある．また，光ファイバを用いた地山内の鉛直・水平変位等の計測には，FBG 方式（Fiber Bragg Grating）を用いた各種計測器等が開発適用されている．しかし，FBG 方式による計測器は，従来型計測器（電気式）と同様，点計測の域を脱したものではない．B-OTDR 方式は，光ファイバ線自体がひずみセンサであることから，線的且つ，広域計測が可能という特徴を有する．そこで筆者らは，B-OTDR 方式による地山変位を線的かつ広域に計測できるシステムとして光ファイバゴムセンサ（以下，ゴムセンサという．）を開発した．ゴムセンサは，光ファイバ線を敷設した弾性体ゴム棒を地山に埋設し，地山と一体化させることで，地山変位に追従する弾性体の連続したひずみを計測するものである．本稿は，開発時の設計検討および室内，現位置試験結果に基づき，地山変位計測への実用化検討を行った結果について報告するのものである．

２．ゴムセンサの概要

ゴムセンサの開発では，計測性能として，①センサ自体が地山挙動に追従して変位すること，②追従した地山に対して深さ方向または奥行き方向のひずみ変化を連続的（最小 10cm ピッチ）に計測できること，③センサ断面方向（X,Y）と軸方向(Z)の 3 成分の地山ひずみを同一位置で同時に計測できる計測システムとして開発検討を行った．また，長期計測に必要なセンサの④耐久性能，⑤センサ設置時の施工性についても設計段階で検討を行っている．

（１）ひずみ計測方法[1)]

ゴムセンサのひずみ計測方法は，連続したひずみが計測できる光ファイバ計測（B-OTDR 方式）によるものである．光ファイバ線に光を通すと，散乱光と呼ばれる微弱な光が戻ってくる性質がある．その中の１つであるブリルアン散乱光は，光ファイバ線にひずみが生じると，そのひずみ量に比例してピーク周波数が変化する性質がある．B-OTDR 方式は，この性質を利用し，周波数分布を測定・解析することにより光ファイバ線の長さ方向の連続ひずみ（光ファイバ線の伸縮）が計測できるとともに，入力から光が戻ってくるまでの時間を計測することで，ひずみの発生位置が計測できる．

（２）ゴムセンサの構造

光ファイバ線自体は，引張強度=20N/mm^2 以上，2%の伸び率を有する素材であるが，非常に細いガラス線（125μm）であるため，それ自体を単体で地山と一体になるように敷設することは困難である．そこで，弾性体であるゴム棒に光ファイバ線が一体となるよう４方向に敷設（**図-1**，**写真-1** 参照）し，地山に埋設することで地山とゴム棒を一体化させ，地山に追従して変位するゴム棒の連続した鉛直方向(軸ひずみ)と水平方向(曲げひずみ)のひずみを同時に計測するシステムを考案した．ゴムセンサの断面および構造等については，**表-1** の検討項目に基づき決定している．1 本のゴムセンサの基本長は，3m としているが，これは，現場運搬および将来の製作ライン化を想定したものであり，現場計測に必要な長さ

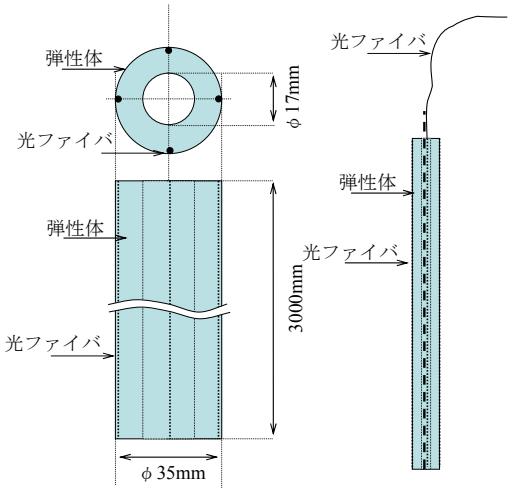


図-1 ゴムセンサの基本構造

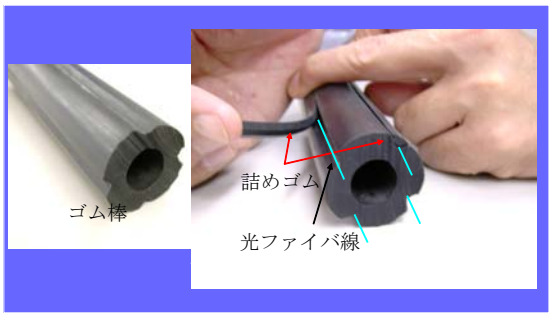


写真-1 ゴムセンサ

表-1　ゴムセンサの構造検討

検討項目	検討内容	構造
光ﾌｧｲﾊﾞ敷設	・全方向のひずみ計測が可能であること	４方向
断面形状	・光ファイバの敷設条件より ・地山内に設置（ボーリング掘削孔径φ66～86mm）	円形 φ35mm
地山内設置	・地山内挿入方法（挿入ロッド等の使用可） ・設置後の孔内充填方法（注入ホースとして使用可）	中空
センサ長	・現場搬入（ワゴン車程度で輸送可能な長さ） ・真直ぐに伸ばした状態で輸送	3m

Development of ground deformation measurement system using Optical Fiber Sensor and Elasticity Object. ; Tadashi HASHIMOTO, Katsuyoshi MIZUHARA (Geo-Research Institute), Masafumi OKUNO, Toshihiko TORIGOE (NTT infrastructure Network Corporation), Hiromichi SHIROMA, Akifumi SHIMODA (Nippon Expressway Research Institute Company Limited), Kiyoshi SHIMIZU (BRIDGESTONE KBG CO.,LTD)

は，複数のゴムセンサを直列に連結接続することで，現状技術として，全長 30m程度までの計測が可能と考えている．

３．ゴム棒材料

（１）ゴム棒材料の選定

ゴムセンサに用いるゴム棒材料は，弾性体と地山が一体となって変形すること，地山変位計測に必要な引張・圧縮強さなどの物理的性質を有すること，酸・アルカリなどの水中環境下で長期的に安定した材料であることが基本条件となる．材料素材選定は，**表-2** 中の天然ゴム（NR）を含め計 7 種類のゴム材料について，①物理特性，②耐アルカリ，③耐液性，④線膨張係数，⑤温度による弾性率変化，⑥反発係数，⑦材料単価について比較検討を行った．結果，総合評価得点に基づき，最も得点の高い天然ゴムを選定した．天然ゴムは，物理的性質および初期性能の維持に必要な圧縮永久歪・反発弾性特性が最も良好であり，通常気温内におけるヤング係数変化が最も少なく，生成段階で地山と同程度の強度を持つ弾性体材料に調整製作が可能であるという有利特性を持っている．さらに，様々な環境下で長期耐久性に優れていることは，タイヤやケーブル被服等のような一般的利用状況からも明らかであると言える．

表-2 ゴム棒材料選定に係る比較検討

ゴムの種類		天然ゴム	スチレンゴム	ニトリルゴム	クロロプレンゴム	ブチルゴム	ｴﾁﾚﾝﾌﾟﾛﾋﾟﾚﾝｺﾞﾑ	シリコンゴム
		NR	SBR	NBR	CR	IIR	EPDM	Si
耐液性	1) 耐寒性　最低使用温度	◎ -40℃	◎ -40℃	○ -20℃	○ -20℃	◎ -40℃	◎ -40℃	◎ -80℃
	2) ガス不透過性	△	△	○	○	◎	×	×
	3) 耐水性	○	△	○	△	◎	○	◎
	4) 耐油，ガソリン性	×	×	◎	○	×	×	○
	5) 耐動食物油性	○	○	◎	○	◎	○	○
	6) 耐溶剤性　脂肪族系	×	×	◎	○	×	×	△
	7) 耐溶剤性　芳香族系	×	×	△	×	×	×	×
	8) 耐溶剤性　ケトン，エステル	△	△	×	×	○	○	×
	9) 耐酸性　弱酸	○	○	○	○	◎	◎	◎
	10) 耐酸性　強酸	△	△	△	○	◎	◎	◎
	11) 耐アルカリ性	○	○	○	○	○	○	△
	12) 膨潤性　海水	○ 2%	△ 7%	○ 3%	△ 5%	◎ 0.5%	○ 2%	◎ 0.5%
物理的性質	1) 可能硬さ（JISA）	○40 ～ 75	△ 50 ～ 70	△ 50 ～ 70	△ 50 ～ 70	△ 50 ～ 70	○40 ～ 80	◎20 ～ 80
	2) 引張強さ	◎	○	○	○	△	○	×
	3) 伸び	◎	○	○	◎	○	○	△
	4) 引き裂き強さ	◎	◎	○	○	○	△	×
	5) 耐反発性	◎	○	○	○	△	○	◎
	6) 圧縮永久ひずみ	◎	○	△	○	△	△	△
	7) 線膨張係数（10^{-4}/℃）	○ 2.0～2.3	○ 2.0～2.3	○ 2.0～2.3	○ 2.0～2.3	○ 2.0～2.3	△ 2.2～2.4	△ 2.5～4.0
価格比		◎ 1		△ 2	△ 2	× 2.5	○ 1.5	× 3.5
総合評価得点		12	0	10	6	7	5	-1

評価得点　◎良好：＋２　○問題なし：＋１　△：やや問題あり－１　×大いに問題：－２

（２）ゴム棒材料の強度特性

光ファイバ線を敷設する天然ゴム（ゴム棒）については，強度特性を把握するための一軸圧縮試験を実施した．試験は，天然ゴム硬度 30～70（JISA 規格）の範囲で 5 種類，φ30mm，高さ 50mm の円柱試験体について実施した．**図-2** に一軸圧縮試験結果を，また参考データとして大阪の沖積撹乱粘土試料で実施した一軸圧縮試験結果を同図中に示す．一軸圧縮試験結果からは，ゴム硬度が高くなる程，硬くなり，弾性係数が大きくなる傾向を示し，大阪の沖積撹乱粘土試料と比較すると，硬度 70 の天然ゴムが弾性範囲内で良く合致した応力～ひずみ関係を示すことが分かった．また，作業性（取り扱いやすさ）からは，より硬い材料の方が有利であることは明らかである．よって，ゴム棒材料は，沖積粘土相当の比較的軟らかい地山～硬い地山（硬岩）までの変形に追従できる天然ゴムの硬度 NR70 を用いることとした．

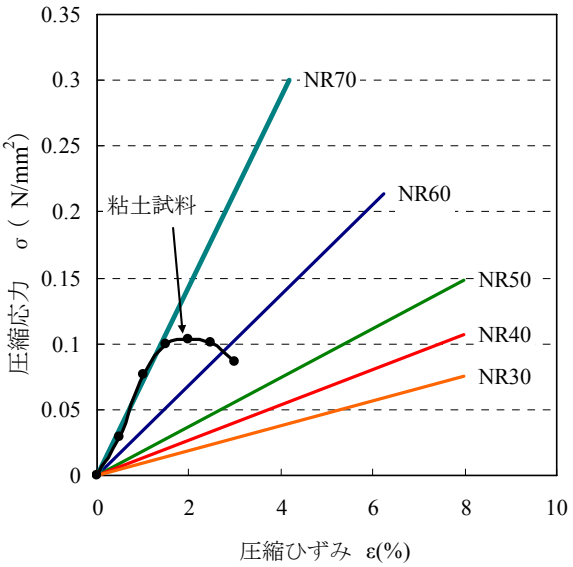


図-2 天然ゴムの一軸圧縮試験結果

４．ゴムセンサの性能試験（室内試験）

（１）基礎試験

基礎試験は，ひずみ計測の基本性能として，光ファイバ線をゴム棒に敷設することによる光の損失量（光の通り悪さ）の変化や鉛直吊下げ時（設置時を想定）の自重によるゴム棒の伸び量が，B-OTDT 計測として支障とならないことを確認するため，ゴムセンサ製作後に確認計測を実施した．結果，光ファイバ線のゴム棒敷設時の敷設精度（直線性）や敷設方法，自重による伸び量が基本的な計測に影響を与えないことを確認した．

表-3 天然ゴムの材料定数

項　　目	特性
密度　ρ	1.2 g/cm^3
ヤング係数（NR70）	7.2N/mm^2

（２）一軸引張試験

ゴム棒の軸方向ひずみに対し，敷設した光ファイバ線がゴム棒と一体となって伸縮し，ゴム棒全長間の連続した軸ひずみが計測できることを確認するための一軸引張試験を実施した．試験は，**図-4** の試験装置模式図に示すように，ゴムセンサを上端部固定で吊下げ，ゴム棒周面の摩擦抵抗を無くした状態で，ゴムセンサ下端部に 10N から 85N までの荷重で段階的に載荷と除荷を繰返し与え，変位計によるゴムセンサの伸縮量と B-OTDR 計測による光ファイバ線のひずみ分布計測を行ったものである．一軸引張試験による段階的な荷重の載荷，除荷に伴うゴムセンサ①のひずみ分布変化を**図-5** に示す．図中の横軸はゴムセンサに敷設した光ファイバ線 4 方向の平均ひずみ変化量，縦軸はゴムセンサ上端（0m）から下端部（4m）間のひずみ計測位置（10cm 毎）を示す．**図-5** より，引張試験による発生ひずみは，ゴムセンサ全長間でほぼ均等で，荷重変化に伴って一様に変化していることがわかる．ゴムセンサの上下端部付近でひずみが大きくなる傾向が見られるが，これはゴムセンサを吊り下げるための上端固定部，荷重をゴムセンサに伝達するための下端接続部で若干の応力集中があったためと考えられる．**図-6** は一軸引張試験におけるゴムセンサの平均軸ひずみ（4 方向）とゴム棒の伸縮量の関係を示したものである．図中の理論値は，L=4000mm のゴム棒の伸縮量（⊿L）からひずみ量を算定 ε =⊿L／L）した値である．**図-6** に示すように，計測した軸ひずみは，ゴム棒の実測変位量に対して直線による比例関係を示し，理論値に対して最大 7%程度の誤差であった．

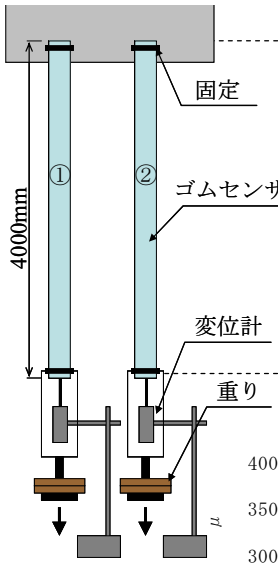


図-4 一軸引張試験装置の模式図

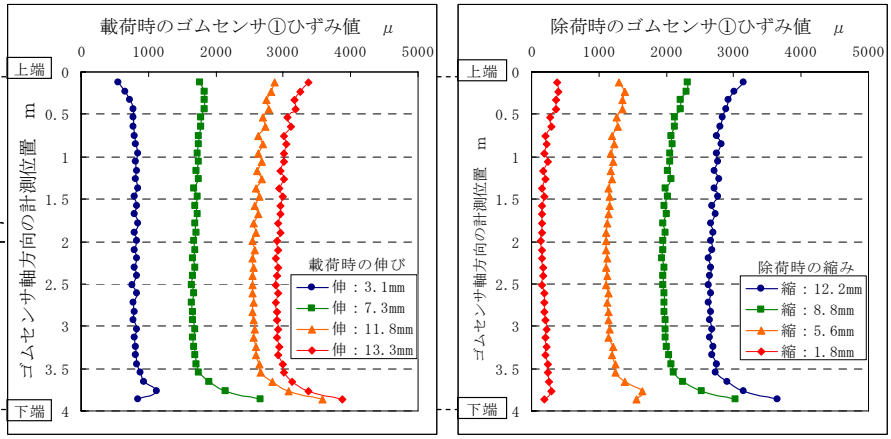


図-5 一軸引張試験によるゴムセンサ①のひずみ分布

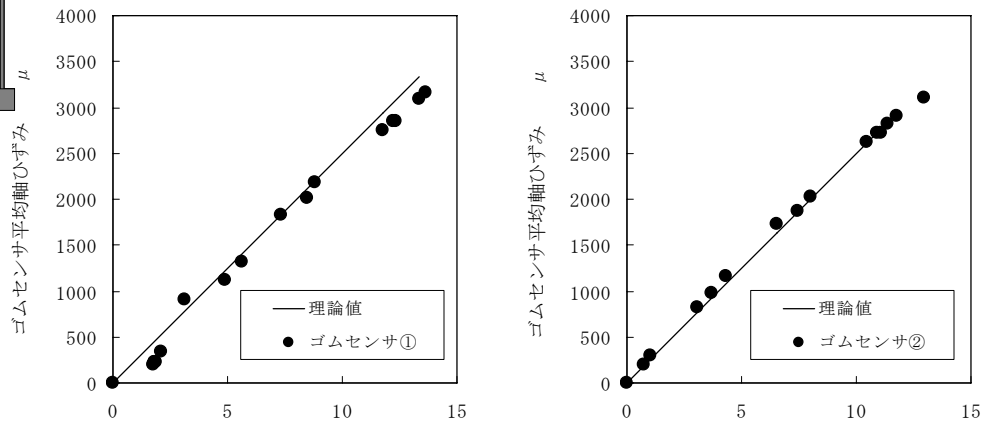


図-6 一軸引張試験によるゴムセンサの軸ひずみと伸縮量の関係

以上，一軸引張試験結果より，ゴム棒に敷設した光ファイバ線は，ゴム棒と一体となって伸縮し，ゴム棒全長間の連続した軸ひずみを計測できることを確認した．

（３）せん断試験

図-7 のイメージ図に示すような地すべりが生じた場合，地山中のゴムセンサは，図に示すような滑り面付近を境としたせん断的な変位が生じると考えられる．このような地山のせん断変位に伴うゴム棒の曲げひずみが計測できることを確認するためのせん断試験を実施した．せん断試験は，**表-3** に示すように，光ファイバ線を敷設した 2 方向軸に対して，直角方向と 45 度回転させた場合の 2 ケース，せん断変位を与える区間（幅）を 20cm～70cm まで変化させた 4 ケース，計 8 ケース（2×4 ケー

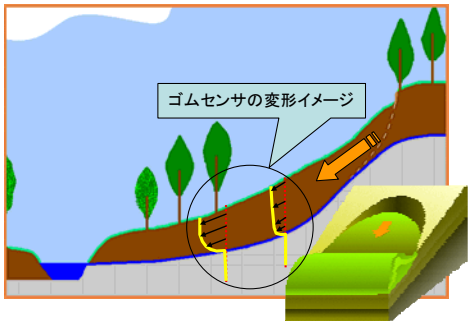


図-7 地すべり変位のイメージ

ス）で段階的にせん断変位を増減させ，その時のひずみ変化から，せん断発生位置，方向，変位量が検出および計測できることを確認したものである．せん断試験装置を**写真-2** に示す．試験装置は，せん断変位を与える区間以外（せん断変位を挟む 2 区間）が軸方向およびせん断方向に変位しないよう L 型鋼で拘束し，その状態でゴム棒全体が水平になるよう一方の拘束区間を可動台に固定している．せん断変位は，ゴム棒に対して可動台を直角方向にスライドさせることで定量のせん断変位を与えることができる構造となっている．

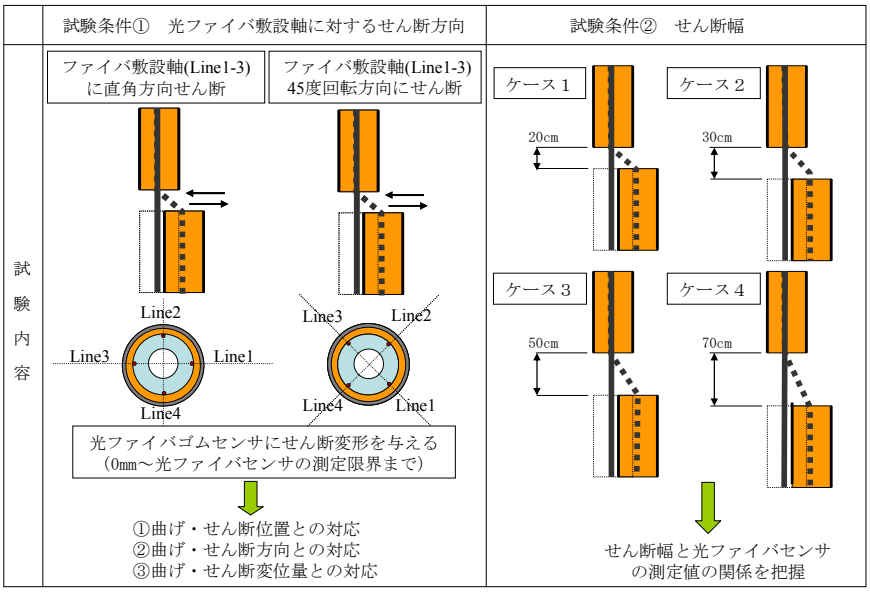
せん断変位に伴うゴムセンサのひずみ分布形状は，ゴム棒断面に与えるせん断変位の方向によって異なり，大きく分けると**図-8** の模式図に示すような引張・圧縮と引張のみが混在するひずみ分布，引張・圧縮が主体となるひずみ分布になることが考えられる．

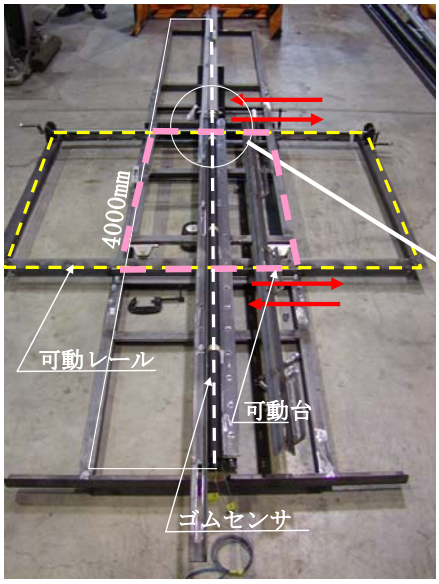
図-9 (a) は Line1-3 軸に対して直角方向に 70cm 幅（ケース 4）でせん断変位を与えた時の実測ひずみ分布，**図-9 (b)** は Line1-3 軸を 45 度回転した方向に 70cm 幅（ケース 4）でせん断変位を与えた時の実測ひずみ分布を示したものである．図中の横軸はゴムセンサのひずみ計測位置，縦軸がゴムセンサのひずみ変化量である．

図-9 より，せん断変位に伴うひずみ変化は，せん断位置および与えたせん断変位の方向に対して，**図-8** のひずみ模式図と同様な形状のひずみ分布を示すことがわかる．また，せん断変位量の増加に伴って発生ひずみ量が大きくなることが分かる．この結果より，ゴムセンサでせん断位置および方向が検出できることが確認できた．なお，**図-9 (b) の** 45 度回転したケースにおいて，せん断変位量が 50mm を越えてからのゴムセンサ距離 3m～4m 間の全方向（Line1～4）で引張ひずみが増加している．これは L 型鋼で拘束したゴム棒の拘束状態が不完全であったため，ゴムセンサ距離 3m～4m の拘束区間がせん断変位の増加に伴ってせん断位置方向に引っ張られ，軸方向伸びが発生したためと考えられる．

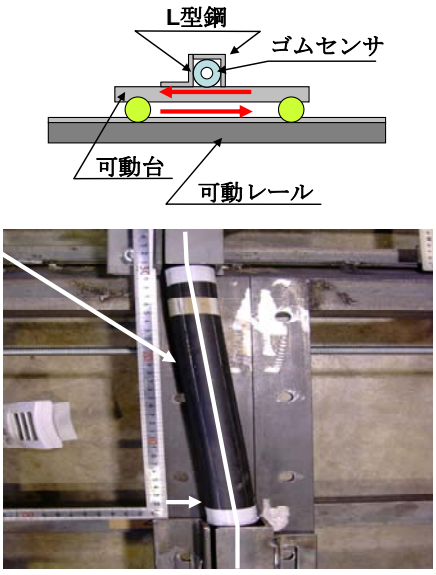
せん断変位量と計測ひずみ量から算定[2)] したゴム棒のたわみ角およびせん断変位の関係を**図-10** に示す．ひずみ量からの変位量算定は，同じ位置での二組の対角上ひずみからそれぞれ 10cm 間隔の曲げひずみ ε^{M}

表-3 せん断試験の試験条件



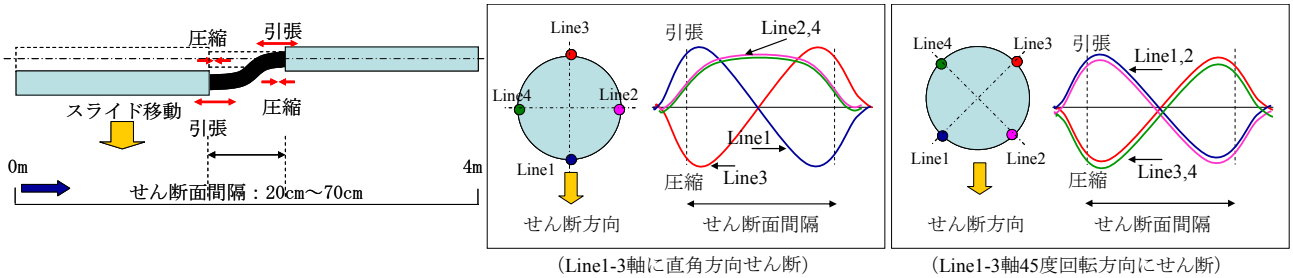


（せん断試験装置の全景）



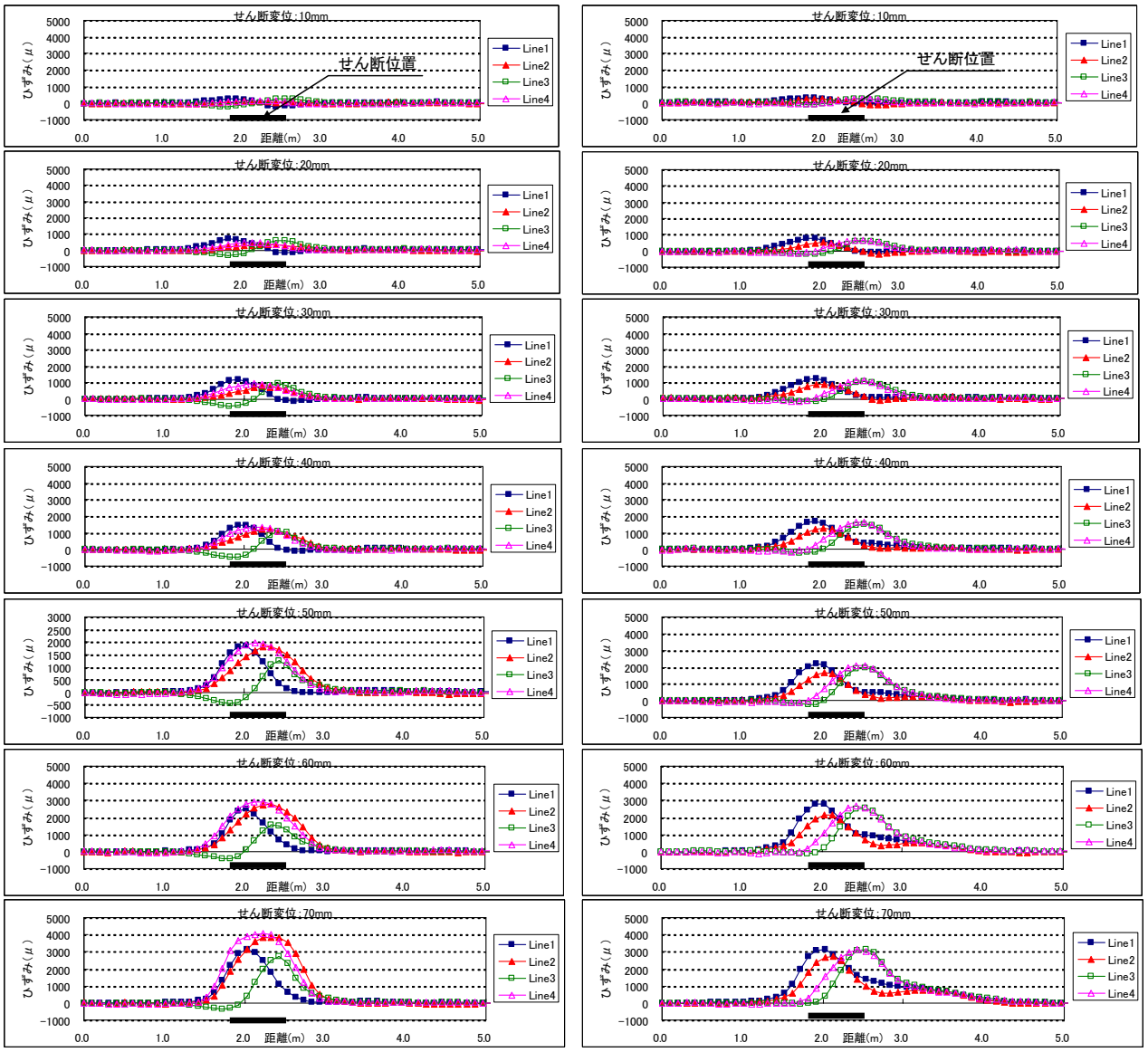
（せん断変位の状況）

写真-2 せん断試験装置



（Line1-3軸に直角方向せん断）　（Line1-3軸45度回転方向にせん断）

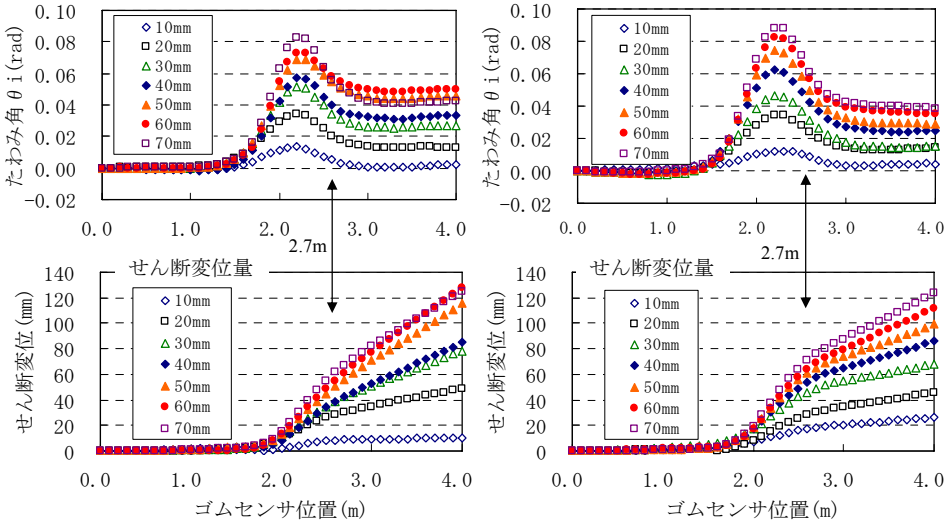
図-8 せん断部に発生するひずみ模式図



(a) Line1-3 軸に直角方向せん断：ケース 4　　(b) Line1-3 軸 45 度回転方向にせん断：ケース 4

図-9 せん断試験によるひずみ分布

を求め，次に曲げひずみ 10cm 間隔のたわみ角 θi（＝割線傾斜角），たわみ量，変位量を順次求め，最後に 2 方向の変位を合成し，全体変位量 δ を算出したものである．**図-10** に示すように，実際のせん断変位量に対して，計測ひずみから算出した変位量は，計測位置 0m から 2.7m付近までは，比較的実際の変形量あった値が得られているが，2.7m以後の変位量が一定の傾きで直線的に増加する結果となっている．また，せん断変位量が大きくなる程せん断変位量と算定変位量の差が大きくなっている．一方，たわみ角を見ると，ゴム棒の 2.7m以降が L 型鋼で拘束されているにも関わらず，たわみ角 θ が零（0）に収束せず，せん断



(a) Line1-3軸に直角方向せん断:ケース4　　(b) Line1-3軸45度回転方向にせん断:ケース4

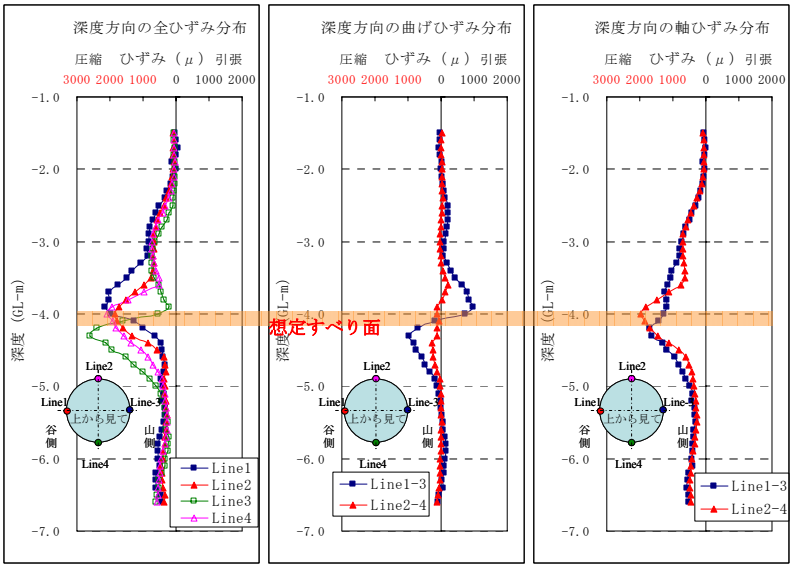
図-10　ゴムセンサ実測値から算定した たわみ角とせん断変位

変位量が大きくなるに従って，2.7m以後で収束するたわみ角の量が大きくなっていることがわかる．これらはせん断試験による曲げひずみが，**図-8** の模式図で示すようなせん断位置中央部を境とした左右対称になっていないためであり，せん断変位の増加に伴い，せん断区間以外で軸方向伸びが発生していることが要因として考えられる．また，もう一つの要因として，B-OTDR 方式によるひずみ計測値が，1m 間の平均ひずみを 10cm 間隔での移動平均値としているものであり，せん断変位位置前後の 1m 間はその影響をうける．そのため，せん断変位が大きくなる程，その影響を大きく受けたと考えられる．せん断試験より，せん断変位に対する方向，せん断位置の検出およびひずみ変化計測については，試験目的を十分に満足する性能を有することが確認できた．しかし，変位量に算定については，室内試験方法，B-OTDR 計測方法を含めた今後の再検討が必要と考える．

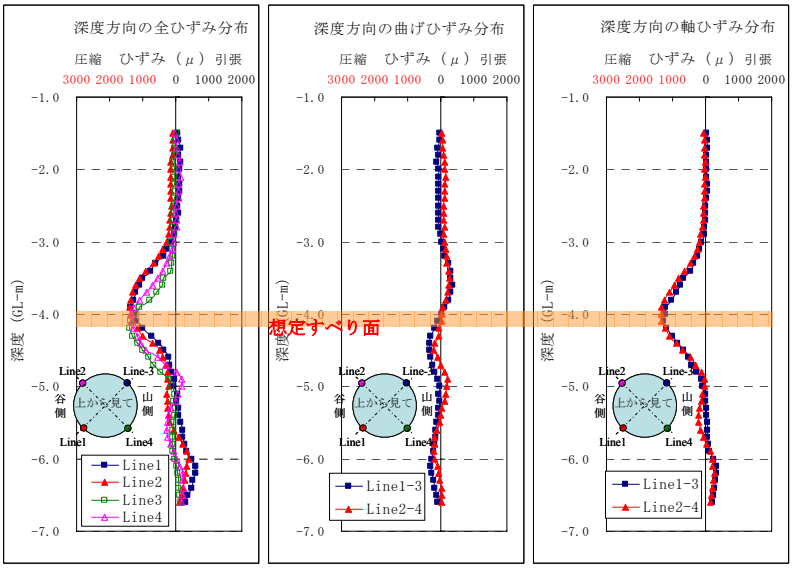
５．現場実証試験

現場実証試験は，地すべり斜面の左右 3 m離れた 2 地点において，事前調査で確認されたすべり面をほぼ中央に挟むようゴムセンサを設置し，約 2 ヶ月間計測したものである．2 地点の一方は，想定すべり方向に対してゴムセンサの Line2-4 が直角方向に，もう一方は 45 度回転させた方向で計測している．ゴムセンサは，輝緑凝灰層（D～CL 級岩盤）を，φ86mm，深さ 7m までボーリング削孔した後，ゴムセンサを G.L-1.5m～-6.5m 間に設置している．ゴムセンサ設置後，ボーリング孔内をセメント・ベントナイト（C.B）で充填することで，ゴムセンサと地山を一体化させている．

図-11 は，ゴムセンサで計測した地山の約 2 ヶ月間のひずみ変化量を深度方向分布（全，曲げ，軸ひずみ）で示したものである．**図-11** からは，想定すべり方向に対して，光ファイバ敷設軸の方向を変えた 2 地点のゴムセンサが共に想定すべり面近傍の水平変位と鉛直変位に伴うひずみ変化を同様な挙動として捉えることできている．また，今回の試験からは，斜面すべりの地山挙動として鉛直ひずみ（軸ひずみ）が先行し，鉛直ひずみの増加に伴ってすべり面近傍の曲げひすみが発生することが計測できるなど，これまでにない三次元的な地山挙動を詳細に捉えることができ，本計測システムの有意性を改めて検証することができたと考えられる．



(a) 想定すべり方向に対し Line2-4 軸を直角方向に設置



(b) 想定すべり方向に対して Line1-3 軸を 45 度回転して設置

図-11 現場実証試験結果

６．まとめ

開発した計測システムは，センサ断面方向（X,Y）と軸方向(Z)の 3 成分の地山ひずみを連続した線状に計測できるものである．適用については，①トンネル施工時の地盤変位，②山岳トンネルにおける切羽近傍法線方向の変位やインバート部の変位，③斜面や堤体，護岸等の長期モニタリング，④構造物の変位など，幅広い適用が考えられる．特に，広域斜面防災に対する長期モニタリングシステムとして有効な手段になると考えられる．計測ひずみから算定する変位量の精度は，センサ設置条件やひずみ測定そのものの空間分解能，精度，位置同定精度など計測法に依存する要因，測定ひずみから変位への換算手法など多くの要因に影響される．今後，試験方法を見直した室内再試験や現場試験を実施し，よりひずみ計測精度を高めるための計測方法や解析処理手法等について研究開発を進めたいと考えている．

参考文献

1）野口常雄，倉島利雄，立田光廣：ブリルアン分光による光ファイバのひずみ分布測定，電子情報通信学会論文誌，B－I,Vol.J73－B－I，No2，pp．144－152，1990 年 2 月

2）川野勝，有本弘孝：光パイプひずみ計による地すべり水平移動量の算定，新技術･新工法部門 Ⅱ，No.19 1-4，国土交通省近畿地方整備局，2005,8