

II-9 地すべり災害時における応急計測技術に関する調査

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 12～平 14

担当チーム：地すべりチーム

研究担当者：平 12 網木 亮介、石井 靖雄、浅野 広樹

平 13 網木 亮介、小山内 信智、浅野 広樹

平 14 小山内 信智、浅野 広樹

【要旨】

地すべり災害時の計測には危険な箇所への立ち入りが制限されることから、遠隔からの地表面移動量観測が望まれている。本調査では3Dスキャナによる計測手法及びデジタル写真測量の計測手法を用いて地すべりの地表面計測の適用性の検討を試みたものである。

その結果、3Dスキャナ及びデジタル写真測量の計測手法は、容易に地形図や移動ベクトル図の作製が可能であった。また、得られた成果の誤差の評価を行ったところ、3Dスキャナは移動量の大きな場合には地すべり計測の適用性が高いことがわかった。また、デジタル写真測量の今回行った手法では地形図の作製は可能であったが計測誤差は大きかったことから、移動量把握の信頼性は高くないという結果であった。

キーワード：地すべり、災害、計測、3Dスキャナ、デジタル写真計測

1. はじめに

地すべり災害発生時においては、地すべりの今後の移動予測を的確に行い、迅速に警戒避難、応急対策を行う必要がある。そのため、地すべり発生直後においては、地すべりの移動状況を把握するため、地盤伸縮計、移動杭等による移動量計測が行われる。しかしながら、地すべりの移動が大きい場合には、計器の設置作業に危険が伴うことから、移動量の計測ができない場合もある。そのため、地すべり発生直後の移動量計測手法として、地すべりを遠隔から安全に計測する手法が求められるところである。

これまでの事例として、3Dスキャナの斜面の計測データを用いてデジタルマッピングを行い、調査・対策検討の基図として使用された事例¹⁾などが報告されている。また、デジタル写真測量はトンネルの内空変位の計測やのり面の動態観測に適用した例²⁾等もある。

3Dスキャナや画像計測は（1）迅速に安全な計測が可能で、（2）面的なデータの取得が容易なことから、地すべり滑動中や災害直後の斜面の動きの把握に活用できると期待される。しかしながら、一般的に地すべりは崩壊と比べて規模が大きく、変位量が小さいため、3Dスキャナやデジタル画像による移動量の計測は容易ではないと予想される。そこで、3Dスキャナやデジタル画像を用いてどの程度の誤差範囲で地すべりの移動量の計測が可能か検証を行ったものである。

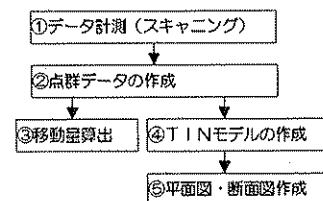
2. 調査方法

2.1 3Dスキャナに関する調査

表-1に、計測に用いた3Dスキャナの仕様を示す。3Dスキャナの計測原理は、汎用的な光波測距儀等と同様に、器械から発射したレーザーが対象物に当たり、反射して戻ってくる時間差を解析して距離を計測するものである。また、距離の計測と同時に反射強度データを取得する機能を有している。3Dスキャナは、機械内部のミラーを回転させることによってレーザーの向きを変え高速でスキャニングできる。また、計測対象地に反射物を設置しなくても計測が可能であるとい

表-1 3Dスキャナの仕様

計測範囲	2～50m（反射率80%以上の自然物）
スキャニング角/速度	上下方向：60°（スキャン範囲） / 20 スキャン/秒 左右方向：340°（スキャン範囲） / 5°/秒
レーザーの広がり角	3mrad（100mの距離で30cmのビーム径幅）
レーザー照査方向に対して直交する方向の精度	3mrad × 計測距離 × 1/2（理論上の最大誤差）
レーザー照射方向の精度	±2.5cm ± 20ppm × 計測距離
本体質量	13kg
サイズ	435 × φ210mm（高さ×直径）
電源	11～15VDC（max3A）
動作環境	-10～60° C 雨天、霧、降雪不可



注）図中の TIN とは点群データの各点を頂点とする三角形平面を作製し立体的に表現する手法

図-1 計測データの解析の手順

う特徴を有している。3D スキャナによる計測データの解析の手順を図-1に示す通りであり、実際の地すべり地にターゲットを設置し、3Dスキャナの計測及び解析を行い、移動量の算出や図化を行った。そして、トータルステーションの測量結果と比較することにより、3Dスキャナによる地形変動量抽出の誤差の大きさについて検討するとともに、良好な結果を得るための計測条件等について検討を行った。なお、計測地は下記の通りである。

- 1) 地すべり実験地
- 2) 怒田地すべり
- 3) 露峰地区地すべり

2. 2 デジタル写真測量に関する調査

デジタル写真測量は、一般に市販されているデジタルカメラにより対象物をデジタル画像として撮影し、写真測量技術により撮影画像に写っている対象物の物理量を測定する手法で、被写体の三次元座標は、任意の複数方向からの画像上で標定した二次元座標より求められる。

デジタル写真測量による移動量計測の流れは図-2に示す通りであり、移動量は、地すべりの移動前後で撮影した画像から求められる三次元座標値の比較により計測される。これまでの計測手法と比べて、計測機器の準備、現地での作業が比較的容易な点で優れている。

ソフトメーカーの公表している計測精度の値は、面積誤差は0.43%、長さ誤差は平均0.013mとなっている。なお、デジタル写真測量の計測地は下記の通りである。

- 1) 基礎実験
- 2) 地すべり実験地

3. 地すべり実験地における3Dスキャナの計測

3. 1 計測箇所及び計測方法

計測対象斜面は、斜面の末端を切土し、頭部に盛土を行い強制的に変位を生じさせる載荷移動実験³⁾が行われた箇所であり、地すべりの規模は、幅約50m、長さ約60mである。図-3に示すとおり地すべり斜面の対岸からの見通しが良い位置を選定し、そこに3Dスキャナを据え付け、水平方向で85°の範囲、垂直方向では上下40°の範囲（水平距離15~100mの範囲）を計測した。

写真-1に今回測定した3Dスキャナによる反射強度の計測画像を示す。地すべり地には、13本の移動杭を設置し、遠隔地から測距と測角を同時に行うト-

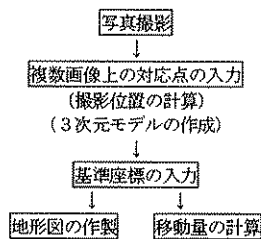


図-2 デジタル写真測量の解析の手順

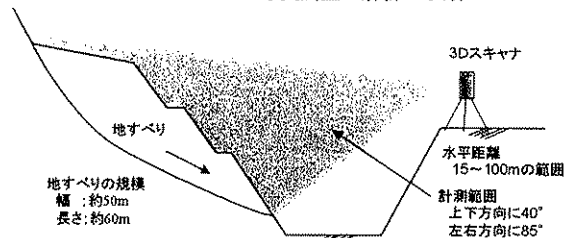


図-3 計測のイメージ

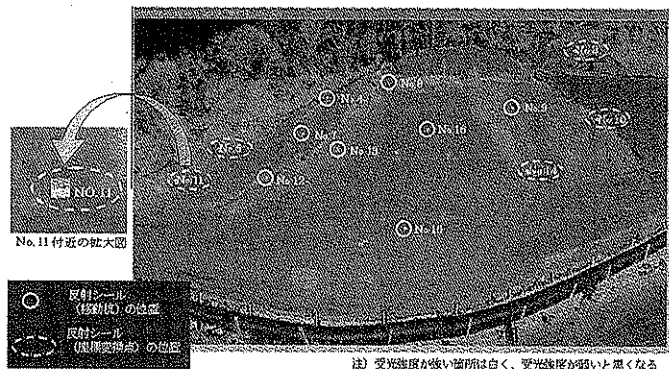


写真-1 3Dスキャナによる計測画像（反射強度）

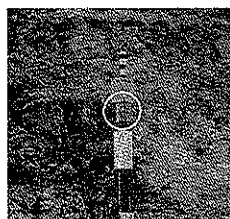


写真-2 反射シール貼付状況

タルステーションによる計測をほぼ同時期に行っている。トータルステーションによる計測値（以下、実測値という）を正値とみなし、

3Dスキャナによる計測結果との比較を行い、計測誤差の検証を行った。

双方の計測結果を比較するためには、計測画像（写真-1）上で移動杭の位置を特定する必要があり、計測画像上に何らかの目印となるものが必要となった。使用した3Dスキャナは反射して戻ってきたレーザーの強さである反射強度の違いを識別するセンサーが付いていることから、写真-2のように移動杭の頭部に5cm四方の反射シール（ソキア製RSシリーズ）を貼付し、移動杭設置位置のレーザーの反射強度を高め、位置の特定が容易になるようにした。写真-1のNo. 11付近の拡大図の様に1つの反射シールに対して4つの異なった反射強度が見られる。これは、使用した器械のレーザーが3mrad（100m先で30cmの拡がり）で拡幅

すること、レーザーの計測角度は 0.07° 間隔で計測していることから、1つの反射シールに複数のレーザー照射がオーバーラップしたために、このような画像になったと考えられる。

3Dスキャナ及びトータルステーションによる移動杭の計測は、地すべりの滑動前後の2時期（1回目の計測の8日後に2回目の計測を行った）に同一地点から行い、この期間の移動量を求めている。また、3Dスキャナの計測データを解析（平面・断面図等の作成）するために、パソコン上で実測値を与え公共座標系への変換を行った。

まず、既知点として不動点の3点（No. 3, 6, 11）に実測値を与え座標変換したところ、変換点はデータ上の一部の領域に偏っていたことから変換点から離れた位置では計測した斜面と著しく異なる結果となった。そこで、3点の不動点に加え、新たな既知点を1点及び2点増やし座標変換を行ったところ、3Dスキャナの計測値と実測値の差は10cm以下でいずれも大きな差が見られなくなった。したがって、地すべりを取り囲む様な、5地点（No. 3, No. 6, No. 10, No. 11, No. 14）の実測値を3Dスキャナの計測データに与えて公共座標系に変換することにした。

計測画像上の5地点の座標変換点の選定手法は、最大級の反射強度を示す位置を抽出し、その点に実測の座標値を与えることとした。

3. 2 計測結果及び考察

3. 2. 1 移動ベクトル

移動前の3Dスキャナの計測結果より作成した平面図上に、3Dスキャナと実測値から求めた移動ベクトルを重ね合わせたものを図-4に示す。移動ベクトルは移動杭設置位置におけるの2時期の計測結果より得られた座標値の差（水平方向）を示している。3Dスキャナによる計測結果は、移動量が大きかった地点（移動量10~20cmの箇所）では、実測値と概ね同じ移動方向を示しているものの、不動点（No.3,6,11）においても、移動量が計測されている。不動点での移動方向はレーザーの照射方向と概ね直交する方向となっている。また、全体的にみても移動ベクトルの終点と実測値の終点にズレが生じている方向は、レーザーの照射方向と概ね直交する方向である。このことから、3Dスキャナはレーザーの照射方向の計測誤差と比較して、照射方向に直交する方向の計測誤差が大きくなる特性をもっていると考えられる。なお、No.6とNo.11は移動方向が異なっているが、これはレーザーの拡幅する性質とレーザーの計測方向がスキャニング毎に微

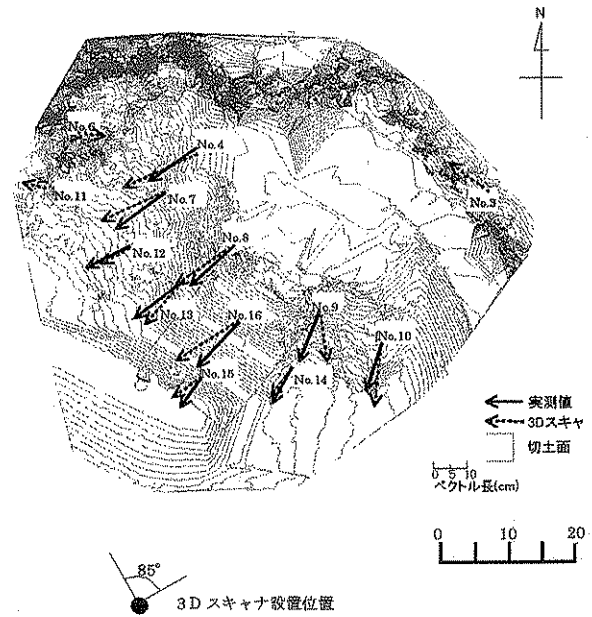


図-4 移動ベクトル図

妙に異なる等の器械的な特性や、座標変換に伴って生じる座標値のずれ等、複合的な要因で誤差が生じるためと考えられる。

3. 2. 2 3Dスキャナの計測誤差

3Dスキャナの計測誤差を明らかにするため、3Dスキャナの計測結果から求めた移動杭の座標値を実測値と比較し、計測誤差の検証を行った。ここでは、2時期（地すべりの移動前後）に計測した13地点の計26データを用いて、移動杭設置位置の誤差を求めた。

図-5に、各移動杭における計測誤差を示す。図は20cm以上の計測誤差を省いているが、最大の計測誤差を示した箇所はNo.4で、移動前の計測誤差は100.8cm、移動後の値は101.8cmであった。No.4の位置は、平坦

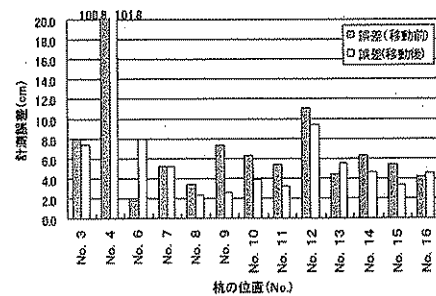


図-5 各測点における計測誤差

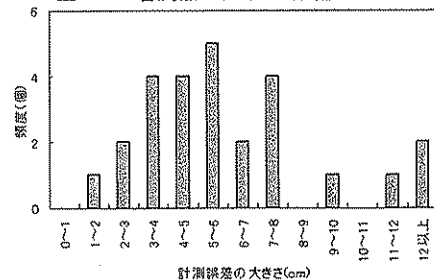


図-6 計測誤差の頻度分布

な地形が原因して（詳細は次章で述べる）、他と比べて極めて大きな計測誤差となったと考えられる。

なお、他の移動杭での計測結果は 12cm 未満の誤差であった。（図-6）。全体の計測誤差の平均値は 12.7cm（標準偏差 26.2）で、No.4 のデータを除いて計測誤差の平均値を求めると 5.4cm（標準偏差 2.3）であった。

各移動杭の計測距離と計測誤差の関係を図-7に示す。図-7は No.4 で計測された 1m を上回る計測誤差のデータを除いて作成した。また、図中の直線は、レーザーが平面状の物に垂直に当たった場合の理論上の最大誤差（レーザーの照射範囲である円の半径）で、 $3\text{mrad} \times \text{計測距離} \times 1/2$ で求められる。

各計測距離において誤差はばらついているが、多くは理論上の最大誤差値より下回っている。一方、今回理論上の最大誤差より大きな値を示した箇所は、26 データ中 4 データ（No.4 と No.12 の位置）であった。理論上の最大誤差は前述の通り、レーザーが垂直な面に当たった場合の円の半径を想定しているが、No.4 と No.12 の付近の斜面の方向は概ねレーザーの照射方向と直交する方向となっており、レーザーの照射方向に沿った地表面の勾配は緩くなっている。このように傾斜のゆるい地点を計測する場合には、レーザーの照射面は扁平な楕円状となり、レーザーの照射面積が広がることによって理論上の最大誤差を更に上回る誤差が生じたと考えられる。

3. 2. 3 移動量の算出誤差

前節では、3Dスキャナによる計測誤差について述べたが、3Dスキャナの計測データを用いて算出した移動量の差を検証した。3Dスキャナの計測データを基に移動量を算出した結果と、実測値から移動量を求めた結果を比較（図-8）し、両者の差を算出誤差として頻度分布を示した（図-9）。

図-6 と図-9 の頻度分布を比較すると移動量算出誤差は小さくなる傾向が認められた。図-6 は 5~6cm の頻度が最も多く、図-9 では 1~2cm の頻度が最も多くなっている。

測点の計測誤差の平均値は 12.7cm（標準偏差 26.2）、移動量算出誤差の平均値は 4.4cm（標準偏差 3.8）となっており誤差の平均値も移動量の算出誤差の方が小さくなっている。測点の計測誤差が突出して大きな No.4 の移動前後の値（図-5）を除いた測点の計測誤差の平均値は 5.4cm（標準偏差 2.3）で、この値も移動量算出誤差の平均値の方が小さな値となった。No.4 の様に 3Dスキャナの計測データは個々の測点における誤差

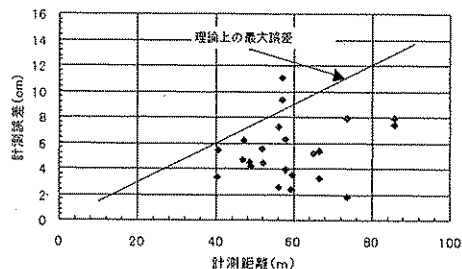


図-7 計測距離と誤差の関係

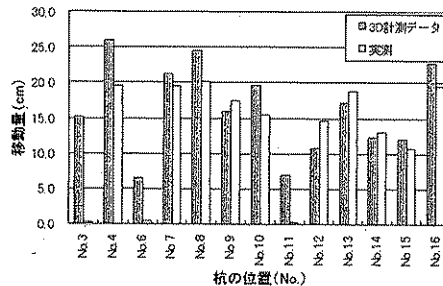


図-8 移動量の計測結果

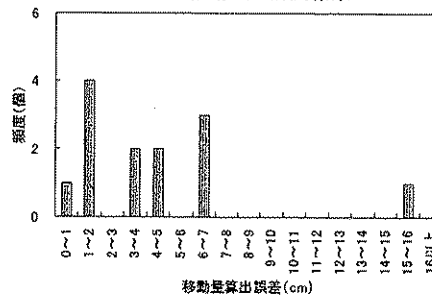


図-9 移動量算出誤差の頻度分布

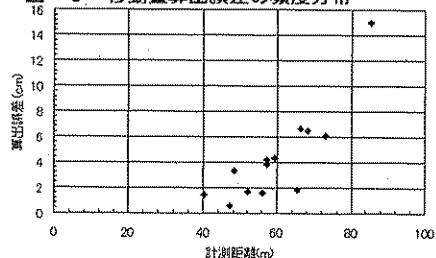


図-10 計測距離と移動量算出誤差の関係

が 100cm と大きな場合であっても移動量算出誤差は 6.5cm と小さくなるものもあった。

今回の計測結果は、全般としては各座標値の計測誤差は大きいですが、大きな変位を計測する場合には 2 時期のデータを比較し移動量を求めることで移動の傾向を捉えられる可能性があることが示された。

しかし、No.3 では、移動前後の 3Dスキャナの計測誤差は図-5 に示した通り 8cm 以下であったが、移動量の算出誤差は 15cm となり、計測誤差が大きくなる場合もあった。

図-10 に測定位置から各測点までの距離と移動量算出誤差の関係を示す。移動量算出誤差は計測距離に比例して大きくなる傾向が認められ、計測距離が約 60m までの範囲は概ね 5cm 以下の誤差、計測距離が約 80m までの範囲は概ね 7cm 以下の誤差となっている。

3. 2. 4 2 時期の図面の比較

地すべりの面的な移動状況を把握するため、3Dスキャナの計測データより作成した2時期の平面図を重ねあわせた。図-11は地すべり末端部切土斜面の部分を示したものであり、2時期のコンターがずれている箇所が、移動した場所であることを示している。No. 16付近のコンターのズレは大きくなっているが、No. 15より下方はコンターのズレは小さくなっている。コンターのズレの大小の比較により地すべりの移動範囲の把握ができる。

また、末端切土面の移動状況を把握するため、今回得られたデータを用いてNo. 15, No. 16を通る断面図を作成したものを図-12に示す。移動量は2時期の同一標高地点の座標値の差を用いて求めているため、移動方向は全て水平方向になっている。しかしながら移動量の分布を見ると、No. 15より上部に移動量の大きい範囲が認められた。

なお、この部分は現地調査の結果によれば粘土層が分布している部分であり、移動に伴う押し出しが特に顕著な部分であった。3Dスキャナの計測結果を用いて断面図を作成することにより、移動量の特に大きな部分を判読することができた。

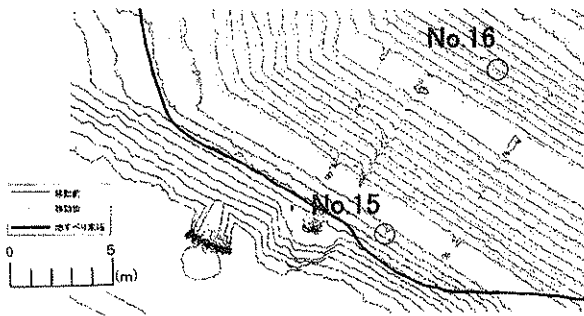


図-11 切土面付近拡大図

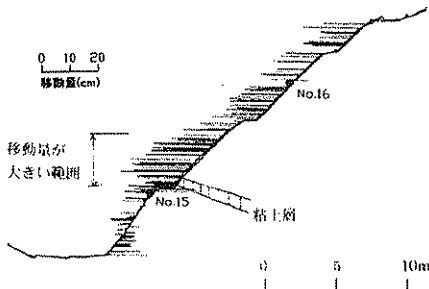


図-12 断面図 (No. 15~No. 16) と移動量

4. 怒田地すべりにおける3Dスキャナの計測

4. 1 計測箇所及び計測方法

3Dスキャナで計測を行った高知県にある怒田地すべりは、400ha以上の大規模な地すべりであり、そ

の内の1つの移動ブロック(幅約300m、長さ約200m)全体を水平距離で120m~350m程度離れた箇所から計測した。3Dスキャナによる計測結果について計測誤差の検証を行うために、3Dスキャナの計測とほぼ同時期にトータルステーションによる移動杭測量を行った。

移動杭は地すべり斜面に92地点設置した。また、3Dスキャナの計測データ上で移動杭の位置を識別するため、移動杭に正方形の反射シールを貼付した。

移動杭の位置には大きさの異なる反射シール(3cm、5cm、9cm四方のいずれか)を設置し、①反射シールの大きさによる反射強度の違い、②反射シールの大きさによる誤差の違いの検証を行った。

4. 2 計測結果及び考察

4. 2. 1 計測距離について

計測地点から移動杭までの距離と計測誤差の関係について、全ての移動杭の計測結果をグラフにまとめたものを図-13に示す。図-14の計測誤差は移動杭測量の値を正值とし、3Dスキャナの計測結果との差を計測誤差としている。

図-13は、各測定距離においてばらつきが見られるが、概ね計測誤差は50cm以下にデータが集まっている(誤差の最小値は0.02m)。ここでは理論上の最大誤差より大きな誤差が生じている地点が複数ある。

図-13には1m以上の計測誤差を示していないが、実際の誤差の最大値は4.54m(測定距離193m地点)であり、計4地点で1m以上の計測誤差(測定距離-計測誤差を順に示すと、157m-1.85m、177m-1.01m、185m-2.22m)が生じている。

また、3Dスキャナのデータ上における移動杭の位置は、反射強度の違いから判別しているが、移動杭の周辺に反射率の高い物質が点在していたり、周辺のデータと比べて反射強度の違いが少なかったりしている場合には杭の位置の特定は難しい。今回、92点中9点では3Dスキャナのデータ上で移動杭の位置の特定は出来なかった。なお、1m以上の誤差のデータを含めると、誤差の平均は0.3m(標準偏差0.58)であった。

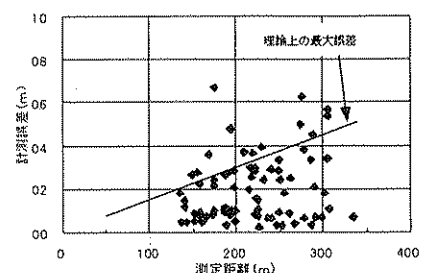


図-13 距離と誤差の関係

4. 2. 2 反射シールの大きさが与える影響

図-14に示す通り、計測した地すべりの一部の範囲に、大きさの異なる3種類の反射シール(3、5、9cm四方を並列に約5m間隔)を縦断的に設置し、反射シールの大きさによる反射強度や誤差に及ぼす影響について検討した。

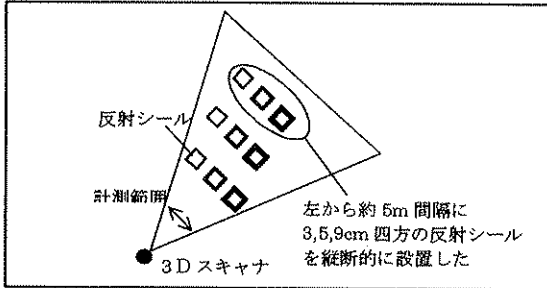


図-14 反射シール設置状況の概念図

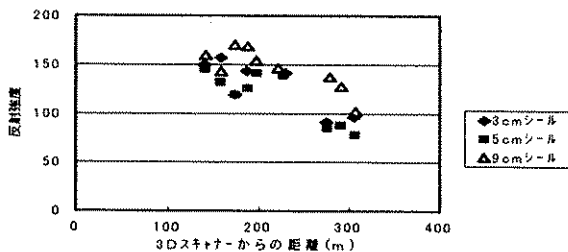


図-15 受光強度と距離の関係

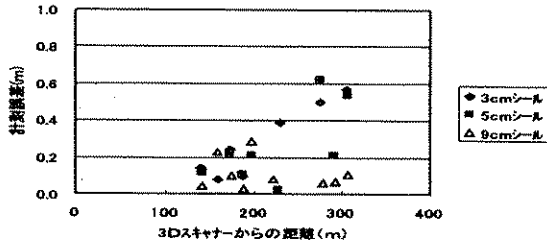


図-16 反射シールと誤差の関係

反射シールの違いによる反射強度と距離の関係を図-15に示す。発射したレーザー光が対象物に当たり、跳ね返ってレーザーセンサーで受光した反射信号の強度の情報で、計測値は0~255の範囲となっている。図-16では3Dスキャナからの距離が遠くなるに従って、反射強度が低下する傾向にある。計測距離200m付近までは反射シールの大きさに関係なく反射強度が100を上回っているが、計測距離200m以上は9cmシール以外の反射シールは反射強度が100を下回った。経験的に反射強度が100より低い場合には画像上で反射シールの位置を認識出来なくなる可能性が高くなることから、今回の計測結果からは、計測距離が200m以上の位置に関しては9cm四方以上の反射シールが望ましいと考えられる。

反射シールの大きさと誤差の関係を図-16に示す。9cmシール以外は距離に応じて誤差が大きくなる傾向

にある。また、計測距離200m付近までは、反射シールの大きさと計測誤差の関係は認められない。しかし、計測距離200m以上は3、5cm四方の反射シールに比べて9cm四方の反射シールの計測誤差は小さくなった。なお、図-16には計測誤差1m以上は示していないが、実際の計測結果は計測距離150m付近に1.85mの誤差(シールの大きさは5cm四方)を生じた箇所があった。

4. 2. 3 大きな誤差が生じた箇所の検証

4. 2. 1でも述べた通り、今回の計測では4箇所において1m以上の大きさの誤差が生じた。図-17の黒丸となっている箇所は誤差が特に大きかった(50cm以上の誤差)位置を示している(黒丸のNo.4は4.54m、No.16は0.67m、No.26は1.01m、No.35は2.22m、No.51は1.85mの誤差)。No.16、26、35は、共通して背後地に平坦面のある箇所であった。また、No.4の背後地は計測方向と平行してコンター線が延びており、No.51は階段式護岸の天端付近に位置している。

使用した3Dスキャナのレーザーは3mradの拡がり、距離に比例して拡幅する性質を持つため、距離に比例してレーザーの照射範囲が広がる。例えば、建物の壁の様にレーザーが垂直に当たる場合に比べ、緩い傾斜や平地の場合にはレーザーの照射範囲が広がることから大きな誤差が生じ易く考えられる。

したがって、反射シールを設置して、それを基準点とする場合には、反射シールの設置場所周辺の地形について特に注意が必要である。

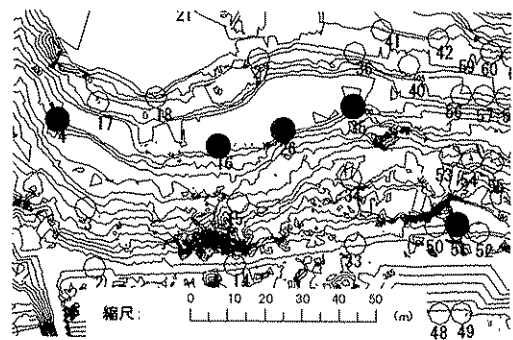


図-17 特に大きな誤差が生じた箇所

5. 露峰地区における3Dスキャナの計測

5. 1 計測方法

計測箇所の地すべりは仁淀川水系の面河川右支川久万川右支川二名川が大きく蛇行する左岸(南向き斜面)の尾根部末端を道路改良に伴って約20年前に切土施工し、昨年になって地すべりが発生した箇所である。

計測地の全景を写真-3に示す。写真-3の法枠工の右上部付近は地すべりの移動により手前に大きく押し出され、モルタル吹き付けが剥がれ落ちる等の

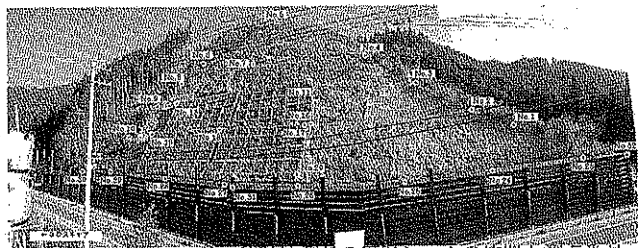


写真-3 調査地全景 (2002年4月4日撮影)

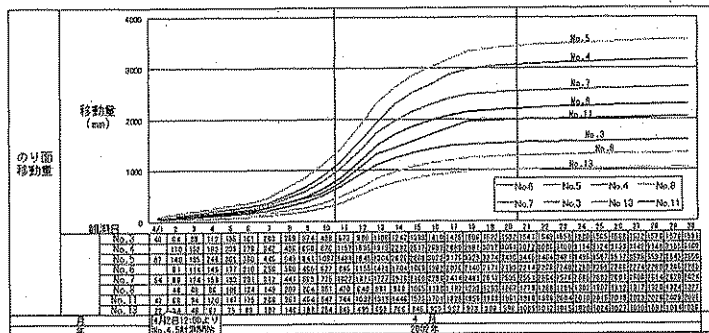


図-18 移動杭測量結果(自動追尾型トータルステーション)

被害が出た。3D スキャナで計測を行った切土法面部は幅約 70m、長さ約 40m の規模で、よく見通せる箇所から水平距離で 25m~90m 程度の範囲を計測した。3D スキャナの計測とほぼ同時期にトータルステーションにより反射シールを視準して移動杭測量を行っている。

3D スキャナの計測誤差は、移動杭測量の座標値の比較により算出した。反射シールは 5~9cm 四方の正方形のものが貼付されており、27 地点を計測した。3D スキャナの計測データ上では反射シールの位置は特に反射強度が高いことから、反射強度データを確認することにより、3D スキャナの計測データ上で移動杭の位置の特定が可能である。3D スキャナの測定日は 4 月 4 日、4 月 26 日である。

図-18 に自動追尾型のトータルステーションによる移動杭測量の結果を示す。移動量計測結果は、切土法面上部付近の移動量は大きく、下部付近の移動量は小さいものであり、トップリング型の移動形態を示している。図-18 の計測結果から斜面西側に比べ斜面東側の変位が大きいたことが示されている。なお、自動追尾型の反射プリズムは反射シールの位置とは若干異なっている。

5. 2 計測結果及び考察

5. 2. 1 最大反射強度を示す点を移動杭 (反射シール) の位置とした方法

トータルステーションによる移動杭の座標値を正值とし 3D スキャナの移動杭の座標値との差を誤差として、4 月 4 日に計測した 3D スキャナデータの誤差

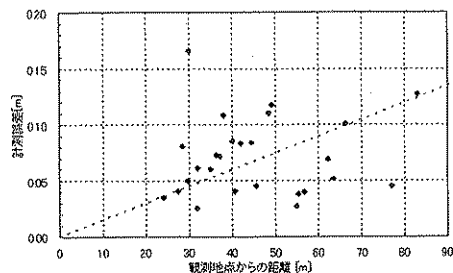


図-19 距離と誤差の関係 (最大反射強度)

の検証を行った。3D スキャナのデータ上における全ての移動杭 (27 点) の計測距離と誤差の関係をグラフにまとめたものを図-19 に示す。

図-19 からは、計測距離と誤差の相関性が小さい結果となった。移動杭の全 27 点のうち、11 点が理論上の最大誤差以内に収まり、誤差の大きさが理論上の最大誤差を上回る点は半数以上の 15 点あった。誤差の平均値は 0.145 m (標準偏差 0.39) であった。図-19 は、3D スキャナデータ上の反射強度が最大級の点を各測点の移動杭の位置として解析を行ったものである。レーザーが 3mrad の角度で拡幅するためにレーザーの間隔を密にするとレーザーの照射範囲がオーバーラップすることから、3D スキャナデータ上の反射シールの位置は、複数の点で反射強度が高い状態となる。これまでの計測では最大級の反射強度を示す点をそのまま移動杭 (反射シール) の位置としていたが、特に問題となることはなかった。しかしながら、今回のデータは明らかに反射強度の大きな点が広範囲に分布しており、反射強度が同程度の点同士でもスキャナからの計測距離が大きく異なる場合が認められた。なお、このデータを使用した断面図や平面図による面的な移動状況については問題なく把握できた。

5. 2. 2 大きな誤差が生じた原因

大きな誤差が生じた移動杭の設置状況を調べると、誤差が生じた原因と考えられる事項として以下の状況が見受けられた。

- ①測定地点から対象法面までの距離が比較的近いにも関わらず、サイズの大きなシールが張られている。
- ②反射シールに隣接して自動追跡用のミラーやシール面から突出した物体(トタンによる庇)が存在している。
- ③草が繁茂しているすぐ脇に設置されている。
- ④落石防止のネットがかぶせられている。
- ⑤測定地点との間にフェンスがある。

これらのことから、反射シールを設置する際、少なくとも次のような点に配慮する必要があると考えられる。① 測定地点から 60m 以内の区域では、反射シールの大きさを 5cm 四方以下にする。② 反射シールは、

地形面から突出した草木やミラー等からできるだけ離して設置する。③ 反射シールの設置場所は、できるだけビームに対して垂直となる方向に広い面を形成する地形面の中心付近とする。

5. 2. 3 反射強度画像の目視による移動杭（反射シール）の抽出方法

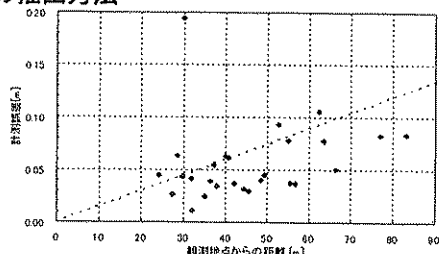


図-20 距離と誤差の関係（目視による抽出）

ここでは、今回取得された3Dスキャナのデータから、精度良くターゲット座標に近い点を抽出することを目的に、反射強度の分布とスキャナからの計測距離の分布を目視で確認することにより反射シールの位置を判断し、反射シールの位置の抽出作業を行った。また、3Dスキャナのデータ上における全ての移動杭の計測距離と誤差の関係をグラフにまとめたものを図-20に示す。その結果、反射強度の最大級の位置をそのまま反射シールの位置として抽出した座標値は理論上の最大誤差よりも大きいものが多かったことに対し、今回の目視によるターゲットの抽出では理論上の最大誤差を若干上回るものが数例認められたものの、ほぼ理論上の最大誤差の範囲内に収まることがわかった。

図-19の誤差の平均値は0.057m（標準偏差0.04）であった。理論上の最大誤差を若干上回るものがあることに対しては、スキャナからの距離に対して反射シールの大きさが大きいこと、距離が近い場合レーザースポットの照射範囲（3 mradで拡幅）の外側でもレーザーの減衰が小さく高い反射強度が得られると考えられること等から、多数の点で反射強度が大きく、かつ計測される距離が同程度であったことから正しい点の抽出が困難となった結果と考えられる。

5. 2. 4 立面図による地すべり移動特性の把握

3Dスキャナの2時期（4月4日と4月26日）のデータから図-21に示すとおり同一コンター間のズレ範囲を塗色する立面図を作成し、地すべりの移動特性の可視化を検討した。塗色したコンター間の幅は立面上での見掛け変位（立面に対して法線方向の変位）の大・小を示し、コンターが上方に移動している場合には手前方向への変位があることを示している。

図-21から、のり面の全体にせり出しが大きく、のり面上部の図中（A）では60cm～120cm程度コンタ

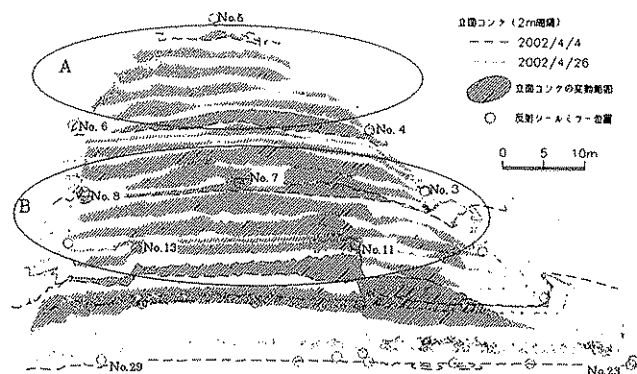


図-21 立面図（No. 23とNo. 29を通る鉛直面を基点とした、2mコンター）が上方に、のり面中段の図中（B）では、（A）の動きと若干異なり手前へ最大3m程度、移動している。また、のり面中段では移動量の大きい範囲がのり面の右側に偏っているように見える。

実際の変位は、図-18の計測値に示したとおり、切土法面上段部付近の変位が最も大きいものとなっており、立面上の変位を用いたとしてもトップリング傾向を面的に把握することが難しい。ただし、（A）、（B）との境界部はコンターの移動が相対的に小さく、のり面上段部と中段部では異なるブロック運動をしていることが伺える。今後、3Dスキャン計測データの3次元比較により、3次元上での定量的かつ可視的な把握を試みていくことが必要であると考えられる。

6. デジタル写真測量基礎実験

6. 1 移動量計測事例

基礎実験結果を基に、地すべり計測へのデジタル写真測量の適用性を検討した。

写真の解析の手順は、図-2に示すとおりである。実験は、20cm四方の黒色の塩化ビニール板に直径10cmの白丸を描いたターゲットを野外に設置し（写真-4）、ターゲットの移動前後で2方向から撮影した画像を用いて移動量を求めた。ターゲットの配置及び撮影位置は図-22に示すとおりで、No.1～No.5（移動点）をカメラに平行、または垂直方向に3～100mm移動させ、ターゲットNo.3より30m、50m、100mの位置からそれぞれデジタルカメラにより画像の撮影を行った。なお、撮影には334万画素の分解能を有するデジタルカメラ（レンズの焦点距離は8～24mm（35mm判換算は38～115mm）、画像は1/4に圧縮されて保存）を使用した。また、座標系は図-22のように前後方向がZ軸・横方向がX軸となっている。

3次元座標値の算出には、市販のソフトウェアを使用した。画像上でのターゲットの標定作業の精度が計測結果に影響すると考えられるが、今回は、使用したソフトウェアに予め備わっているターゲット円中心位

置の自動計算機能を使用してプロットを行った。

撮影画像を基に、移動量の解析を行った結果、撮影距離 30m、ターゲットの移動量 50mm 以上のケースで良好な計測結果を得た。ターゲットを横方向に 50mm 移動させた時 (図-23) の三次元移動量の計測誤差の平均値は 2.0mm (標準偏差 20.9) であったものの、手前方向に 50mm 移動させた時 (図-24) の計測誤差の平均値は 13.9mm (標準偏差 378.7) と横方向に移動させた場合に比べて精度が劣る結果となった。撮影した画像の分解能は、撮影距離 30m で 13.0mm/1 画素であることから、計測誤差は X 方向移動時で分解能の 15% 程度、Z 方向ではほぼ分解能程度となっている。固定点の計測誤差は、X 方向に移動させた時と比べて、Z 方向に移動させた時に大きくなっている。また、Z 方向に移動させた時には、X 方向の計測誤差と比べて、Y



写真-4 ターゲット設置状況

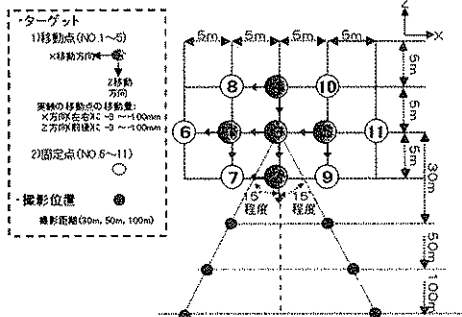


図-22 ターゲットの配置及び撮影位置

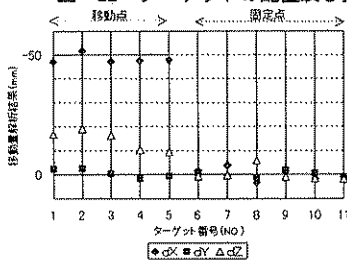


図-23 計測結果 (X方向に-50mm移動)

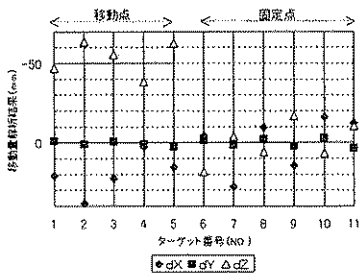


図-24 計測結果 (Z方向に-50mm移動)

(垂直) 方向の計測結果は 0mm 付近に安定し計測誤差が少なくなっている。このような結果は、三次元座標の計算 (収束計算) の過程で生じるもので、標定点の点数、画像上に均等に標定点が分布していないことが原因の一つと考えられる。

今回の実験結果では、30m より遠い位置からの撮影では良好な結果は得られなかった。計測精度は画像の分解能、基線長 (撮影位置間の距離)、三次元座標値を計算する際の標定点数、撮影画像上の標定点の分布状況等に左右されるものと考えられる。

7. 地すべり実験地におけるデジタル写真測量

7.1 計測方法

前章と同様の手法で、画像上の任意点の 3 次元座標を求めるソフトウェアを用いて地すべり実験地において地すべりの移動量の解析を行った。ソフトウェアは、三角測量を解析の基本原理としている。撮影に用いたデジタルカメラは前章と同じ機種で撮影した。計測地は 3 章の 3 D スキャナで計測した箇所と同じである。撮影地点から地すべりまでの距離は約 40m~100m であった。地すべり地全体は 1 枚の画像として撮影することはできなかった。そのため、地すべりを左右の 2 つの領域にわけて、3 地点から 4 枚の写真を撮影し、解析後に両者をつなぎ合わせ地すべり全体の移動量を計測することとした。

基準座標の入力は写真上の座標系を地上座標系に変換するために入力するもので、写真上の既知点 (2 点以上) の座標値の入力、写真上の鉛直面及び長さの入力、カメラから対応点までの距離の入力、カメラ間の距離の入力、のいずれかにより可能である。

画像解析による移動量の計測誤差は、実測値との比較によって評価することにした。

7.2 計測結果

地すべりの移動前後 (平成 12 年 11 月 15 日と 11 月 24 日) の 2 時期に撮影した画像を解析して、作成した平面図に移動ベクトルを重ねたものを図-25 に示す。

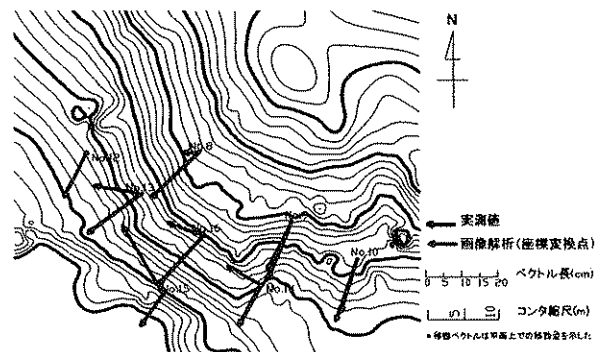


図-25 デジタル画像による移動量計測結果

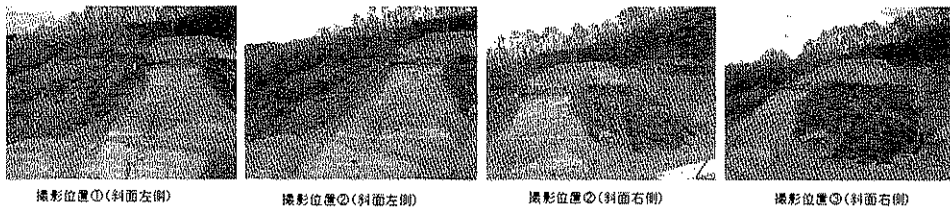


写真-5 解析に用いた写真

また、解析に使用した写真（11月15日）を写真-5に示す。

図-25には実測値から求めた移動ベクトルも図示している。図面の下部方向に向かって地すべりによる移動が生じたことが実測値の移動ベクトルによって示されている。図面の右側は画像解析による移動ベクトルの結果も移動方向については概ね同様な傾向を示しているものの、図面の左側の移動ベクトルは実測値と比べ大きく異なっていたベクトルを示している。

実測値を正值とした場合の、デジタル画像を用いて求めた移動量の誤差（3次元ベクトル量）は図-27に示すとおりであり、概ね0.1~0.2mの誤差の範囲となっている。計測結果は各測点で大きくばらつきが生じている。誤差が生じた要因としては、①移動前後の撮影位置は厳密に同一箇所でないため、画像上の基準点との位置関係が異なり測定誤差が生じたことが考えられる。また、②計測地全体を1枚の画像に納めることが出来なかったため、2方向のデータをつなぎ合わせて解析した結果、通常より誤差が大きくなった。③カメラのレンズの歪みを予め補正してあるものの、市販のデジタルカメラを使用していることからレンズの歪みの影響を完全に排除することは困難であったこと、等が考えられる。

今回行ったデジタル画像を用いた移動量の計測誤差からは、地すべりの移動量の適正な評価は難しいと言えた。このような計測手法を用いて地すべりの簡易な移動量計測を行う場合には、解析に用いる画像によっては計測誤差が大きく、移動方向が大きく異なる場合もあることに留意をする必要がある。しかしながら、容易に迅速に地形図（平面図、縦断図）の作成は可能であり、地すべり移動の概略的な傾向の把握に活用することは可能であると考えられる。

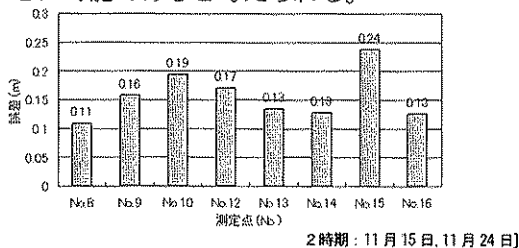


図-27 デジタル画像による移動量計測結果

8. まとめ

本調査では、3Dスキャナによる計測手法及びデジタル写真測量の計測手法を用いて地すべりの地表面計測の適用性の検討を試みたものである。

その結果、3Dスキャナについては以下のことがわかった。

- 1) 3Dスキャナのレーザー照射方向に沿うような緩斜面となっている場所では大きな誤差を生じやすいので、ターゲットの設置位置に注意することが必要である。
- 2) 1) で述べた誤差の大きなデータを対象から除いて計測誤差を評価すると、概ね計測距離に応じて理論上生じる誤差の範囲内であった。
- 3) 反射シールの大きさは計測距離によって誤差に影響を与えることから、適切な反射シールの大きさも事前に考慮する必要がある。
- 4) 2時期の3Dスキャナの計測から平面図や断面図の作製が容易であり、移動傾向の把握ができたことから、災害時の応急計測への活用が期待できる。

また、デジタル写真計測については以下のことがわかった。

- 1) 計測距離や移動方向によっては、計測誤差が大きくなる。
- 2) 平面図や断面図の作製が容易であるが、今回の結果から判断すると計測精度の信頼性に乏しい。

今後は3Dスキャナや写真計測技術を用いた計測の技術レベルの向上を進めていくと共に、実際の災害現場における安全な計測手順の確立をはかることが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 小野尚哉、他：「ノンプリズム型3Dスキャン式光波測距儀(明日可)による地すべり3次元モニタリング適用例」、第39回地すべり学会研究発表講演集、pp.47-50、2000.8
- 2) 大西有三：「デジタルカメラによる精密写真測量システムの開発」、土木施工、Vol.42 No.5、pp.67-72、2001.4
- 3) 石井靖雄、綱木亮介、浅野広樹、杉本宏之：「現地載荷実験における地すべり安全率の変化」、地すべり、Vol.38.No3、pp.84-87、2001.12