

**地域保全対策情報の提供を目指した時空間
測量によるウイークポイントマッピング都
市空間における社会基盤の持続可能な開発
のためのプロダクトデータモデルの適用**

信州大学 工学部 土木工学科
准教授 大上 俊之

平成22年11月

助成研究者紹介

大上 俊之（おおかみ としゆき）

現職：信州大学工学部土木工学科准教授（工学博士）

主な著書・論文

- 1) T.OHKAMI, Y.ICHIKAWA, T.KAWAMOTO: A Boundary Element Method for Identifying Orthotropic Material Parameters; Int. J. Numer. Anal. Meths. in Geom., 15, 609-625, 1991.
- 2) Y.ICHIKAWA, T.OHKAMI: A Parameter Identification Procedure as a Dual Boundary Control Problem for Linear Elastic Materials ; Soils and Found., 32, 2, 35-44, 1992.
- 3) 土山茂希, 大上俊之, 市川康明:不連続性岩盤における損傷場の逆解析と地下空洞掘削時の変形予測;土木学会論文集,475/III-24,49-58,1993
- 4) T.OHKAMI, J.MURAI: Identification Procedure for Viscoelastic Materials Using Correspondence Principle; Comm. in Num. Meths.in Engrg., 14, 497-504, 1998.
- 5) T.OHKAMI, G.Swoboda : Parameter Identification of Viscoelastic Materials ; Comp. and Geotec., 24, 4, 279-295, 1999.
- 6) T.OHKAMI, J.NAGAO, S.KOYAMA: Identification of Elastic Materials Using Wavelet Transform; Comp. and Str., 84, 1866-1873, 2006.

共同研究者紹介

豊田 政史（とよた まさし）

現職：信州大学工学部土木工学科助教 博士（工学）

主な著書・論文

- 1) 寒川典昭, 富所五郎, 小池一臣, 豊田政史, 本間達志 : 千曲川における環境変化と流出率の関係, 自然災害科学, 21-3, 259-270, 2002.
- 2) Masashi Toyota, Goro Tomidokoro, Takeshi Yagi and Yuri Shimada : Unsteady 2-D simulation of the flood flow in the Chikuma basin, Monitoring, Prediction and Mitigation of Water-Related Disasters, 161-166, 2005.

- 3) 柳澤孔亮, 大塚達也, 岩佐隆広, 豊田政史, 富所五郎: 測量データを活用した洪水流解析の河川計画への適用の試み; 応用測量論文集, 18, 41-49, 2007. (論文奨励賞受賞)
- 4) 豊田政史, 宮原一道, 疋田真, 宮原裕一: 超音波ドップラー流速計を用いた湖内懸濁物質濃度分布の推定; 応用測量論文集, 19, 55-60, 2008.

宮澤 圭 (みやざわ けい)

現職: 株式会社長野技研技術部課長 博士 (工学)

主な著書・論文

- 1) 宮澤圭・吉澤孝和: 地すべり地の空中写真測量データの重みを考慮した三次元地下すべり面形状の推定, 写真測量とリモートセンシング, 37,(6), 14-27,1998.
- 2) 宮澤・吉澤・小野塚・久松: 時間差空中写真測量による地すべり解析システム, 写真測量とリモートセンシング,39,(1),39-47,2000.
- 3) Norikazu Yoshizawa & Kei Miyazawa: Landslide Analysis by Different Time Photogrammetry, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 32,(5),189-194,1998.
- 4) 宮澤圭・吉澤孝和: 各種三次元時間差測量データを用いた地すべり解析システム, 応用測量論文集, 10,(1),45-52,1999. (論文奨励賞受賞)
- 5) 宮澤圭・吉澤孝和: 地すべり地の地表変位測量データを利用した三次元すべり面形状の推定, 土木学会論文集, No.645/III-50,51-62,2000.

山下 伊千造 (やました いちぞう)

現職: 信州大学工学部技術部計測調査系技術長

主な著書・論文

- 1) 吉澤・中川・石川・山下: 携帯用GPS受信機による地理情報の収集に関する基礎的研究, 応用測量論文集 Vol.5,No.1,pp.103-111,1994. (論文奨励賞受賞)
- 2) 山下・中川・吉澤: デイファレンシャルGPSによる既製地形図の補完, 土木学会中部支部平成7年度研究発表会講演概要集, IV-46,pp.545-546.1996.
- 3) 新田・池田・山下・吉澤: 山岳雪崩調査におけるハンドヘルドGPSの有用性, 平成8年度日本自然災害科学会中部地区シンポジウム講演概要集, PP.41-42,1996.

- 4) 山下・日高・吉澤：災害調査に対するD G P S測量の利用性に関する研究，土木学会中部支部平成八年度研究発表会講演概要集，IV-95,pp.675-676.1997.
- 5) 吉澤・新田・山下・日高：環境および災害の現地調査における小型G P S受信機の利用に関する基礎的検討，応用測量論文集 Vol.8,No.1,pp.41-51,1997.（論文奨励賞受賞）

吉澤 孝和（よしざわ のりかず）

現職：信州大学名誉教授（工学博士）

主な著書・論文

- 1) 吉澤孝和・服部秀人：実用測量学，山海堂，1-214，1994.
- 2) 吉澤孝和：図解 測量学要論，日本測量協会，1-418，2005.
- 3) Norikazu Yoshizawa: Landslide Monitoring for Presumption of Under-ground Slide Surface, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 29,(7),478-485,1992.
- 4) 吉澤・中川・石川・山下：携帯用G P S受信機による地理情報の収集に関する基礎的研究，応用測量論文集,5,(1)，103-111，1994.（論文奨励賞受賞）
- 5) 吉澤孝和：地すべり解析のための三次元地表変位測量と考察，自然災害科学，14,(1)，189-194，1998.
- 6) 吉澤孝和：時空間測量による空間情報解析への事業展開，応用測量論文集，16，(1),5-20，2005.

目次

1. はじめに	1
2. 近年における都市内水災害と山地土砂災害の要因	2
3. 長野市街地における内水災害データと降水特性および 地形情報からみた内水災害危険区域の抽出	7
4. 地表変位データを用いた三次元すべり面形状の推定	17
5. おわりに	33
6. 研究発表	34

1. はじめに

最近の日本において、地方部は過疎化による耕作放棄で土地は荒廃し、都市部では過密化に起因する種々の災害の危険度が増しており、わが国はいま、国土の保全と国家予算の有効活用を真剣に考えなければならない時期にあるといえる。そのためには、住民参加型の地域防災と環境保全への取り組みが急務である。この運動を促すために、官民一体となって地域を取り巻く空間のウィークポイントへの注意を深め、その変動情報を共有して、先制的かつ予防的な対策への国民的な認識を高めることが必要である。

広域的地理空間の時間的変動（特に、地表面の形態、地上物体および表流水の流動条件等の変動）は、土砂災害や環境破壊の素因となるさまざまなウィークポイントを形成する。本研究では、このようなウィークポイントの分布とその拡大状況を、適当な時間差のある三次元測量で追跡する。その結果を、広域的なベースマップの上に視覚的な形で提供することにより、官民協力型の地域保全体制の実現を目指す。

本報告書では、数ある災害の中で、近年の降雨パターンの変化にともなって多発している「都市内水災害」と「山地土砂災害」に焦点をあてた。

「都市内水災害」に関しては、長野市街地を対象として、過去数年の内水災害データと被災時の降水量データおよび航空レーザー測量から得られる地形情報を用いて、地方都市における内水災害発生地点の特徴を明らかにしたのちに、その特徴に基づいて内水災害危険区域、いわゆるウイークエリアの抽出を行った結果を報告する。

「山地土砂災害」に関しては、その元凶となる斜面崩落を引き起こす前兆現象の発生地点の空間的分布形態、およびそれを取り巻く自然地形的要因と人工的な地形改変や各種構造物を総合的に観察して、斜面崩落誘因となるウィークポイントを抽出する。図上判読と現地調査によって抽出する手法は、かなり以前から構築が進められてきた。このような状況を踏まえて、今回の助成による研究では、斜面災害に対する時空間測量をさらに展開して、地すべり地の地表変位を解析して地下のすべり面の深さと形状を推定する理論をさらに高度な内容に組み立て、これを実際の現象に適用して検証する。

2. 近年における都市内水災害と山地土砂災害の要因とウイークポイントマッピングへの基本概念

2.1 内水災害

内水災害とは、河川の氾濫ではなく、堤内地側に降った雨・雪による湛水、すなわち内水によって建築物等が浸水する災害のことであり、土木工学ハンドブックによれば内水災害を増大させる要因として次のような諸要因が示されている。

- (1) 内水流域の土地利用変化や、内水流域内の河川・水路の改修等による流出量の増大
- (2) 本川流域の土地利用変化や河川改修等による本川流出量の増大と洪水到達時間の短縮
- (3) 本川の河床上昇
- (4) 内水被害の生ずる地域（内水地域）の地盤沈下
- (5) 本川の河口閉塞や内水地域内の河川・水路の流末(本川合流部)の閉塞
- (6) 内水地域の盛土等による遊水機能の減少および人口や資産の増大

近年になって、通称「ゲリラ豪雨による浸水災害」が各地の都市部を中心に報道されるようになった。直接的な原因は異常気象であろうが、近代化した都市の構造自体がこのような災害を起こしやすいものになったことが最大の原因である。この災害の特徴としては (1)局地的 (2)短時間 (3)常襲的の3つを挙げることができる。そして本川の水位とは関係なく発生する機会が多い。したがって本来の内水災害の定義とは若干異なるので、ここでは都市型内水災害と呼ぶことにする。

都市型内水災害の主な要因として次の3点が考えられる。

- (1) 舗装面積の激増と緑地面積の激減により、降水のほとんどが地中に浸透せずに流出する。
- (2) 道路・水路の拡幅と線形の直線化で、表流水の速度が上昇すると共に豪雨時には道路が水路化する。

(3) 下流側の暗渠・管路等の断面積不足や合流地点での水位上昇で背水状態が上流域に及ぶ。

これらの要因を踏まえて、本研究では研究対象とした長野市街地と市街地に隣接する緩傾斜地について、集中豪雨や豪雪による融雪水が表流水として流動する場合に影響を及ぼす土地利用環境の時空間的変動を総合的に分類整理し、表-2.1 に集約した。この表に示した項目に順じて各種の地形図による図上判読を行っていくと、内水災害の要因となる供給エリアや流下経路および被災エリアをある程度絞り込むことができる。しかしこれだけでは大まかな判断にとどまる。実際のウイークポイントがどこにあるかを判定するには現地踏査を実施する必要がある。

2.2 土砂災害

土砂災害とは、大量の土砂や岩石が、重力の作用で集団的に移動して発生する災害のことで、土砂災害防止法では、崖崩れ・地すべり・土石流に大別されている。

これらの現象に対して共通する根源的な現象は山腹斜面の崩落である。斜面崩落は地中において地山を構成する土石の力学的なバランスが保てなくなることによって発生する。地山の内部における滑動力と抵抗力のいずれが勝るかによってその斜面が安定か否かがきまる。すなわち(抵抗力) > (滑動力) ならば斜面は安定しており、(抵抗力) < (滑動力) ならば崩落する。

斜面崩壊の三大要因は、地山の強度低下、斜面脚部の支持力低下、斜面頭部の重量増加である。これらの要因は年月を経ながら次第に大きくなっていく。斜面の抵抗力が低下し、斜面の滑動力が増加して臨界状態となっている地点に、地震や火山爆発や長期間の集中豪雨、そして工事などの外部からの誘因が加わると、その斜面は崩壊する。

このように斜面崩壊の要因には地山自体に潜在する土質力学的・地質構造的な素因と、それに対して外部からの引き金となる誘因があり、これらが複雑に作用し合って斜面崩壊が発生する。

筆者らはこれまでに種々の斜面崩壊の現場を観察してきた。その中で得られ

た知見を集約したのが表-2.2である。地形的・地質的にほぼ同一の場所であっても斜面崩落の発生する場所としない場所がある。その原因を追及していくと、そこには斜面崩落を引き起こす誘因の蓄積がある。誘因の蓄積しやすい条件は、まず大縮尺の地形図を用いて地形判読を行い合水線の特徴をとらえると共に人工的な道路や造成事業による地形改変から問題点をとらえる。次に現地踏査によって地表変状や前兆現象の有無を確認していく。この場合、表-2.2に示した分類事項を総合的に理解した上で現場に出向くことが必要である。これによって斜面崩落に対するウイークポイントの検出を詳細に行うことができる。

参考文献

- 1) 吉澤孝和：災害に対するコンサルタントの役割，平成 22 年度災害復旧技術研修会テキスト，長野県北信測量設計事業協同組合，1-17，2010.

表-2.1 豪雨と融雪水の地表流動条件に影響する
土地利用環境の時空間的変動¹⁾

時空間的比較対象物	過去の状況	現在の状況	降雨の地表流動環境に対する影響の変化
市街地における宅地内の排水条件および宅地の保水能力の変化			
宅地内の降水の排水条件	不十分状態	良好な状態	宅地内降雨流出速度の急速化で流出時間は短縮された
宅地内の緑地占有面積	かなり広い	増築で減少	宅地の保水力は低下して宅地からの流出率は増大した
都市の広場や運動場および建築物の無い空地の利用状況の変化			
広場や運動場の表面状態	土砂が多い	舗装が多い	降雨の地下への浸透面積の減少分だけ流出率が増した
旧市街地の空き地の利用	水田や畑	宅地や施設	高流出率領域の面積が増加・遊水池的な機能低下
市街地における道路の平面形状と占有面積の変化			
道路の平面線形の形態	屈曲部多い	直線部多い	豪雨時の道路面の表流水の流路は短縮し流速は増加した
道路の幅員と平面形状	不規則変化	一律な幅員	旧道路形態の変動部分は路面表流水速度を減ずる抵抗部
道路の占有面積の変化	狭い面積	広い面積	道路占有面積の増加と全面舗装は局地的大量出水の水源
市街地の路面排水設備の変化			
排水用側溝の形態と整備	整備不完全	整備は良好	新旧の側溝の接合部で下流側が狭いと排水機能を減ずる
排水用開水路の形態と整備	自然順応型	画一的水路	新旧水路の接合部の不整合・排水能力の差で停滞水発生
灌漑水路の改修による排水設備の変化			
用水路の平面線形の形態	自然流動型	直線状改修	蛇行水路を直線状に改修して流下容量・流動速度増大
用水路の通水可能断面積	自然地形的	画一的断面	旧水路より上流側の改修水路断面積が大きいとネックに
平野部(氾濫原)の土地利用状態の変化			
平野部の土地利用の変化①	大部分水田	殆ど市街地	水田による貯水や遊水機能は激減 豪雨の流出率激増
平野部の土地利用の変化②	水路の沿道	水路も道路	水路にも蓋をした拡幅道路は豪雨で凶器化及びネック化
平野部の土地利用の変化③	水田と耕地	施設や工場	敷地が周辺より低いと遊水地 高いと豪雨出水発生源
平野部の土地利用の変化④	後背湿地帯	埋立団地化	遊水地機能は失われ 内水災害危険地化 豪雨出水源
平野部の土地利用の変化⑤	洪水常襲地	埋立用地化	内水災害を最も受けやく外水災害に対しても最大危険地
旧市街地に隣接する緩傾斜山腹斜面の土地利用状況の変化			
山腹部の土地利用の変化①	果樹園・畑	住宅団地化	降水の保水力が激減して流出率が急増
山腹部の土地利用の変化②	果樹園・畑	団地接続道	新設舗装道路と大型側溝は高流出率の団地降雨を激流化
山腹部の土地利用の変化③	山林地帯	新設舗装道	上部斜面の降水を道路が集水 他流域の降水まで集水
山腹部の土地利用の変化④	細い山道	拡幅舗装道	豪雨時に水路化しカーブや中だるみ部で下方斜面に放水
山腹部の土地利用の変化⑤	山腹斜面	各種舗装道	過疎化等で放置されると側溝機能低下を元に斜面災害源

表-2.2 斜面の崩壊に対する短期的・加速的誘因の分類¹⁾

	地震・火山作用	浸食・堆積作用	特殊気象作用	地中水作用	人為的作用	動植物作用
斜面滑動力増加誘因	一時的 作用力	地震や火山の爆発で発生する衝撃力及び地山にかわる震動	近くの斜面の崩壊による震動および衝撃力	落雷の衝撃力 豪雨浸透荷重	爆破の衝撃 人工的振動	
	反復性 作用力	火山活動による斜面の側方向への膨張圧		積雪氷結荷重 降雨浸透荷重	水の浸透圧 亀裂水凍結	交通による荷重 鉱石の集積搬出
	継続的 作用力	火山の噴出物の堆積 地震で崩落した土石や岩石などの堆積	崩壊運搬土石堆積 斜面の浸食による地中残留応力解放	長期間の降雨で地中に浸透した滞留水量の累積	湧水の浸透圧 亀裂中の水圧 水和作用による粘性土物質の膨張圧	各種の盛土 構造物の荷重 水利施設からの漏水 切土による応力解放
斜面の抵抗力を減少させる誘因	斜面の浸食等による地形の局所的な変化	地震の衝撃力による斜面下方部分の崩壊	溪流・河川・湖沼および海岸の沿岸浸食と下層部浸食 下方斜面浸食崩落	乾湿の反復や氷結および加熱の反復による斜面の表層部からの剥離または崩壊	各種の切土 採石・採鉱 運河の掘削	
	地中における構造的弱体化	衝撃力による地中の断層・亀裂等の発達 地中水脈経路の変化	浸食による下層の露出で塑性的な構成物質の絞り出し 崩落または堆積した土石の重量による地下水流の変動	風倒木の根による表土の掘り起こしと地中における亀裂の拡大	溶解性物質の流失による地下空洞化	樹木の根の発達による亀裂の増加 地中動物の活動
	斜面構成物質の強度の低下	熱水作用による斜面構成物質の変質 亀裂の増加による風化作用促進 振動による液状化と強度の低下	崩積土石の重量による地中間隙水圧の上昇 近接斜面の崩壊時の振動による液状化と強度の低下	氷結や熱膨張による岩石の分解 粘土の乾燥による亀裂の増加と浸透性の促進及び粘着力の低下 乾燥と細粒子化 異常降雨や異常融雪による地山の過飽和および間隙水圧の上昇 積雪荷重による間隙水圧の上昇 地表湧水部付近の凍結による地山の過飽和及び間隙水圧の上昇	水結や熱膨張による岩石の分解 間隙水圧の上昇による土砂の内部摩擦力の低下 吸水による粘土鉱物の膨潤と柔軟化 溶解による結合物質の除去又は溶脱 含水量の増加による粘土結合の破壊 亀裂に沿う深層風化の長年月の拡大 電位による風化前面への地下水移動	ダム貯水量の変動による表層浸食 ダム貯水量の変動による地中間隙水圧と含水量の不安定化 上載荷重による地中間隙水圧の増加 谷の埋め立てや軟弱地盤上の盛土の沈下による排水機能妨害 盛土による湧水閉塞 道路や水路の建設による集水域の拡大と局部的注水部の放置 開発域の浸透量増加 工事震動での液状化

3.長野市街地における内水災害データと降水特性および地形情報からみた内水災害危険区域の抽出

3.1 はじめに

近年、局地的な大雨にともなう内水災害が頻発しており、その対策は喫緊の課題である。そのため、過去の豪雨時を対象として、下水道管網や土地利用等の影響を考慮した精緻なモデルによる再現計算が数多く行われている^{1),2)}。また、航空レーザー測量などの測量技術の進歩にともなって、地形を詳しく把握することが可能となり、詳細な地形情報を組み込んだ氾濫解析³⁾もみられるようになってきた。さらに、これらのモデルを用いて、さまざまな降水パターンの詳細な数値実験を行い、行政にあたっての重要事項である「氾濫の危険度」を評価するような研究も行われている^{4),5)}。しかしながら、過去に発生した水害データから対象領域内のどのような場所で内水災害が発生しやすいかを細かく分析した研究は、著者の知る限りみられない。本研究では、地方都市における内水災害発生地点の特徴を明らかにするために、長野市街地を対象として、

- ・ 過去数年の内水災害データ
- ・ 被災時の降水量データ
- ・ 航空レーザー測量から得られる地形情報
- ・ 約 100 年前の地形図

を用いて、内水災害発生要因を分析する。また、それに基づいて内水災害危険区域の抽出を行う。

3.2 研究対象領域および対象とした水害の概要

研究対象領域は、図-3.1 の点線で示した長野盆地内の裾花川流域と浅川流域を含む面積約 55km² の長野市街地である。図-3.2 は、対象領域内の地形を視覚的にとらえやすいように、「数値地図 5m メッシュ (標高)」⁶⁾ で与えられる 5m 間隔の標高値 (分解能 : 0.1m) を内挿して、地形情報から段彩図形式で作成した標高コンターである。この図から、対象領域西側の標高は約 460m であるのに対し、千曲川に合流する対象領域東側では約 340m となっており、対象領域は、市街地としては標高差が大きい地域であることがわかる。また、長野

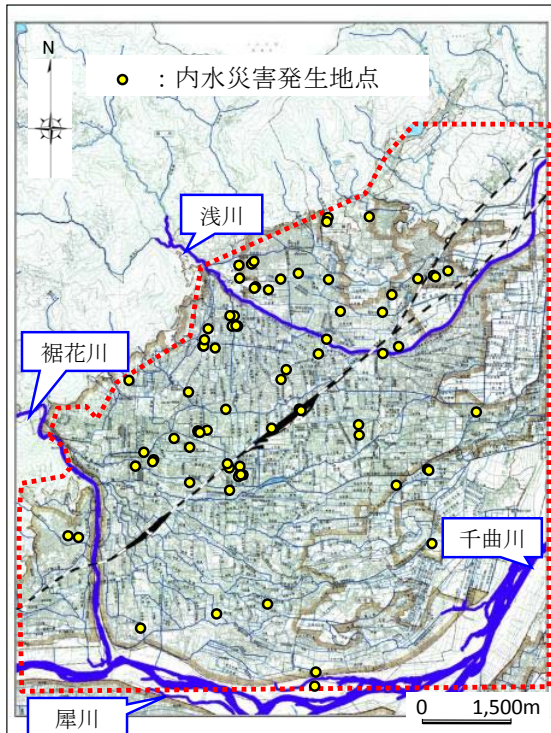


図-3.1 研究対象領域と内水災害発生地点

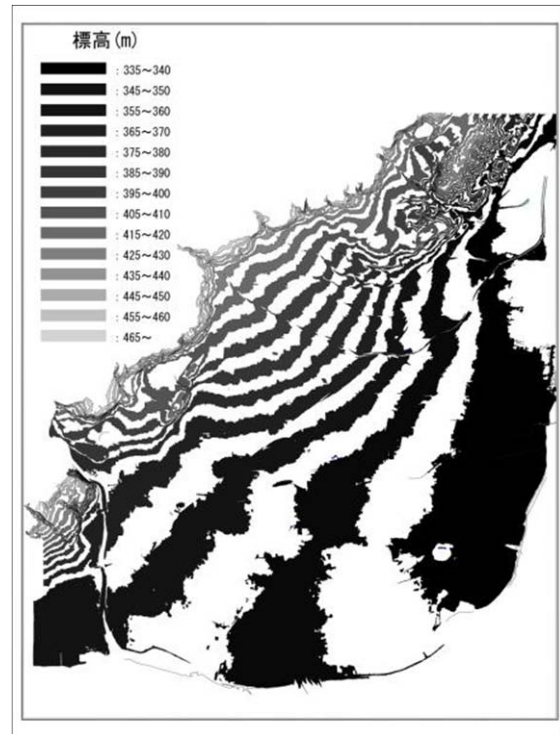


図-3.2 標高コンター

市の「豪雨災害資料」⁷⁾に記載されている 2006 年から 2009 年までの 4 年間に発生した内水災害のうちから、発生地点を特定できた 75 地点を図-3.1 中に○印で示す。

3.3 降水量と内水災害発生との関係

降水量と内水災害との関連を検討するにあたり、時間最大降水量を主に採用し、降水量と内水災害の分布について考察する。なお、本研究において、時間最大降水量は「毎正時降水量のうちの最大値」と定義した。本来、短時間の豪雨によって引き起こされる内水災害を検討するにあたっては、10 分間降水量をどう評価するかが重要となってきている⁸⁾。しかし、本研究対象領域では 10 分間降水量のデータがないため、ここでは 1 時間降水量から内水災害発生の特徴を考察する。

図-3.3 に 2008 年 8 月 19 日の降水量データを示す。図中には、災害発生地点と、各雨量観測所における時間最大降水量（枠内上段）と雨の降り始めから降り終わりまでの累計降水量（枠内下段）を示してある。この図をみると、若槻局や三才局周辺においては、時間最大降水量が 30mm 近くを観測しても災害が発生

していないことがわかる。それに対し、25mm 前後の降水量が近隣の観測所で観測された長野局の北側や、丸で囲んだ上松・浅川地域のように30mm に達していなくても災害が集中している地域が存在している。このような傾向は、他の災害発生時にもみられた。なお、若槻局や三才局周辺では、住居が他の地域より少ないことから、内水災害が発生したとしても報告されていないことが考えられるので、解釈には注意が必要である。長野市地域防災計画⁹⁾では、長野市の大雨注意報と大雨警報を出す1時間降水量の基準値はそれぞれ25mm、40mmと設定されている。本研究で対象とした内水災害が発生した日、および比較的大雨が降ったにもかかわらず内水災害が発生しなかった日それぞれの降水量データを整理した結果、1時間降水量(R1mm)と雨量観測所付近で発生する内水災害との間に次のような傾向がみられることが判明した。

0mm ≤ R1 < 20mm : 発生しにくいだが、この状態が数時間継続すると危険な場合がある。

20mm ≤ R1 < 25mm : 発生し始める。

25mm ≤ R1 < 40mm : 発生地点数が増加する。

40mm ≤ R1 : 25mm ≤ R1 < 40mm で発生していない地域でも発生する。

これは、おおむね長野市が発令する注意報・警報の基準値と同じ傾向となった。現在の上記発令基準は長野地方気象台における観測値のみに基づいている。しかしながら、上述したように長野市街地において、降水量の空間的な非一様性がみられるため、内水災害に関しては雨量観測所ごとの発令基準を持つことが適切であると考えられる。そのためには、今後も内水災害と降水量データを

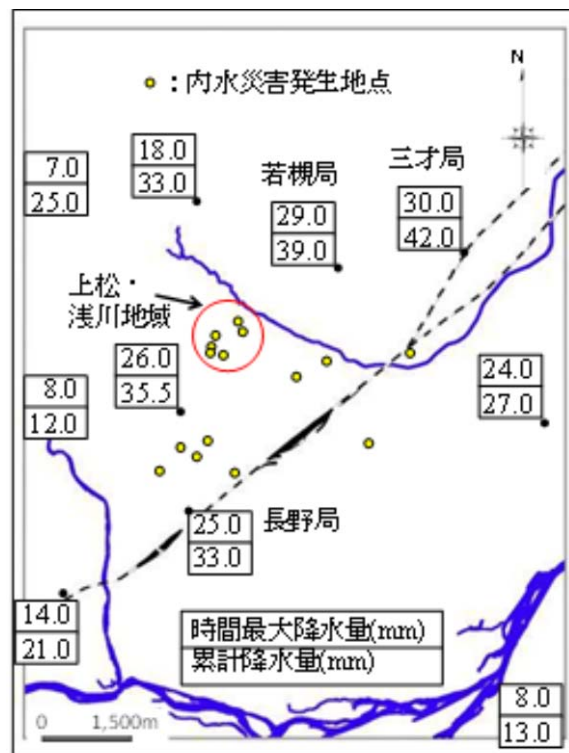


図-3.3 2008年8月19日の降水量データと内水災害発生地点

蓄積し、地域ごとの発令基準を定める必要がある。

3.4 地形と内水災害発生との関係

3.4.1 傾斜変換線と内水災害

本項では、急勾配から緩勾配に勾配が急に変化する境界線を「傾斜変換線」と定義し、傾斜変換線と内水災害発生との関連について検討する。傾斜変換線付近では、その地形条件から、水が停滞し、内水災害が発生しやすくなると予想される。ここでは、「数値地図 5m メッシュ（標高）」のデータをもとに作成した 1m 間隔の等高線図を用いて、等高線が密な地域と疎な地域との境界を「傾斜変換線」として特定した。図-3.4 に、傾斜変換線（薄い太線）と 2 章で述べた内水災害発生地点を示す。なお、この図には、黒の太線で河川をあわせて示してある。

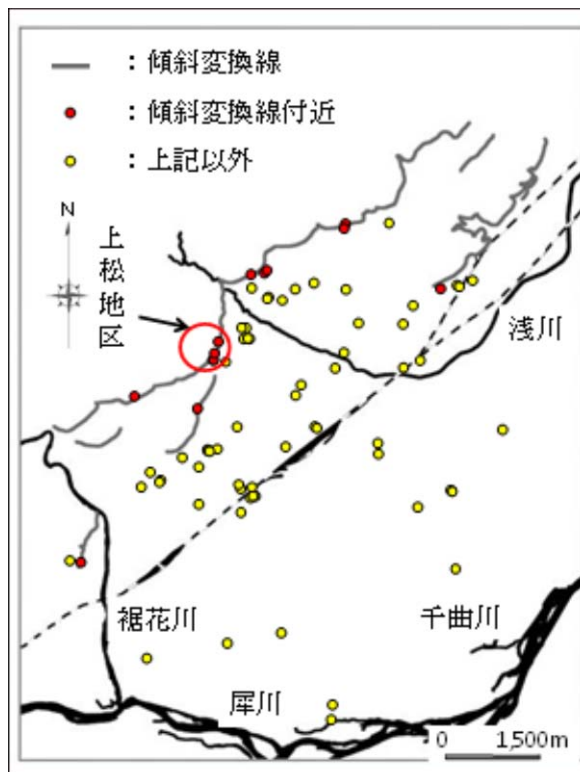


図-3.4 傾斜変換線と内水災害発生地点

内水災害は、傾斜変換線からその標高よりも低い方向に向かって水平距離 100m 以内の地域に集中して発生していることがわかった。以下では、この範囲を「傾斜変換線の下部」、傾斜変換線の標高よりも高い場所については「傾斜変換線の上部」と定義する。研究対象とした災害発生地点 75 地点のうち 13 地点が傾斜変換線の下部に存在していた。これらを見ると、傾斜変換線の下部において、内水災害が起きやすい場所と起きにくい場所があることがわかる。傾斜変換線の下部に内水災害が集中している上松地区（図-3.4 中に○で囲んだ範囲）についてみてみると、この地区の傾斜変換線の上部には、湯谷団地が立地していた。ここで、1912（大正元）年の土地利用（図-3.5）をみると、湯谷団地の立地している位置は桑畑であったことがわかる。しかしながら、現在ではその全域が宅地化されており、この宅地化が災害発生の要因と考えられる。

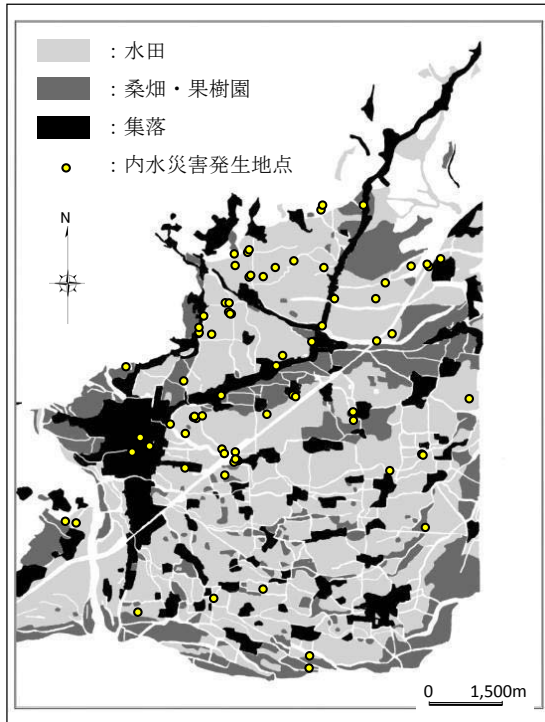


図-3.5 土地利用分布(1912年)と
内水災害発生地点

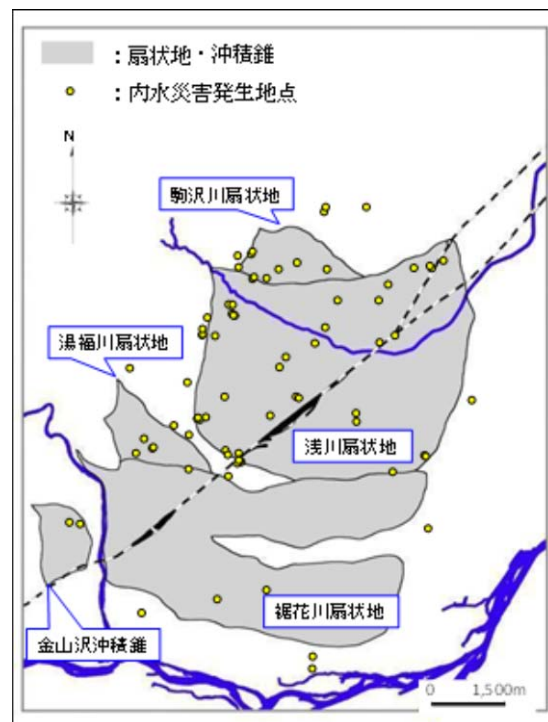


図-3.6 扇状地と内水災害発生地点

また、上記と同様に傾斜変換線の上部において大正元年以降に宅地化した場所は、上述した傾斜変換線の下部の災害発生地点全 13 地点のうち 10 地点と多くみられた。このことから、傾斜変換線の上部において宅地化がなされた地域では、その線の下部が内水災害の発生しやすい要注意地域であるといえる。

3.4.2 扇状地内の内水災害

図-3.6 に、扇状地・沖積錐と内水災害発生地点を示す。ここでは、扇面面積が大きい裾花川扇状地と浅川扇状地を比較する。内水災害発生数は、裾花川扇状地で 3 地点であるのに対し、浅川扇状地で 33 地点とかなり多かった。この理由として、長野市南部の降水量が少ないことが考えられたが、そのような傾向は特にみられなかった。扇状地の平均勾配に着目すると、浅川扇状地が 1.8%、裾花川扇状地が 0.7%となっており、浅川扇状地の平均勾配が裾花川扇状地の約 2.5 倍となっていた。また、他の扇状地の平均勾配と内水災害発生数をみて

も、平均勾配が大きくなると内水災害の発生件数は増加しており、平均勾配が内水災害の発生にある程度の影響力を持っていることが読み取れた。

次に、両扇状地内の 1912（大正元）年の地目（図-3.5）をみると、浅川扇状地内には集落があまり存在せず、ほとんどが水田であったことがわかる。そのため、もともとの地形が集水しやすい地形であったと考えられる。そこで、大正時代の水田の分布と内水災害との関連をみるために、地目別に内水災害の発生数を調べたところ、全 75 地点中 52 地

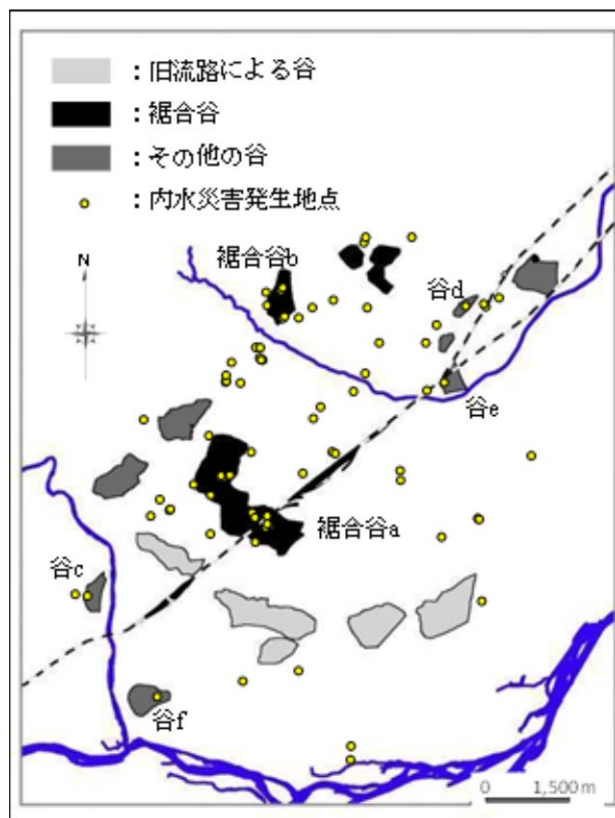


図-3.7 谷地形と内水災害発生地点

点が大正元年の水田内であった。対象領域内における大正時代の水田面積が全体の 60%程度で、その内部に全内水災害の 70%が集中していることを考えると、大正時代に水田であった地域において内水災害が発生する可能性が高いことが予想される。また、他の扇状地における大正時代の地目は、金山沢沖積錐上で集落と桑畑・果樹園が、湯福川扇状地上で集落が多くを占めている。裾花川扇状地上では、地形の凹凸が他の扇状地よりも大きいことから微高地も多く、そのような微高地に集落が多くできていたことがわかっている。そのため、水田の少なかったこれらの扇状地・沖積錐においては内水災害の発生も少ない。一方、駒沢川扇状地においては、水田が扇状地上のほぼ全域を占めており、この扇状地内の内水災害数をみると、扇状地の面積が小さいにもかかわらず、7地点と比較的多く発生していた。

3.4.3 谷地形と内水災害

図-3.7 に谷地形（旧流路による谷，裾合谷，その他の谷）と内水災害発生地

点を示す。谷地形で発生した内水災害は、全 75 地点中 23 地点と全体の 30% を占めていた。ここに、裾合谷とは、二つの扇状地が接することで作られた浅い谷¹⁰⁾ のことであり、裾合谷 a と b に、内水災害が合計 19 地点と集中して発生していた。これらの谷地形の面積は、谷 a が約 1.3km²、谷 b が約 0.2km² である。両谷地形の合計面積は対象領域全体（約 55km²）の 3% に満たないにもかかわらず、その中に全体の約 25% の内水災害発生地点が含まれており、裾合谷において内水災害発生確率がきわめて高いことがわかる。谷 c～e については、谷 f でみられるような大きめの堰や用水が谷の中にみられず、集水された表流水を流す水路のないことが災害発生の原因である可能性が高いと考えられる。

また、大正時代の地目（図-3.5）をみると、谷地形内における内水災害発生地点全 23 地点中 22 地点が、水田であった。よって、谷地形内においても、大正時代の地目が水田であった地域が、特に内水災害発生の可能性が高いということが確認できた。

3.5 内水災害発生要因の分類

次に、地形図から読み取れる長野市の地形と「豪雨災害資料」の記述内容に基づいて、内水災害発生要因の分類を試みた。なお、対象とした内水災害において、溢水したとされる水路の中には道路側溝など、河川と比べて規模が非常に小さいものもある。そのような小水路の流下能力を全て把握

表-3.1 内水災害の分類項目

分類項目	内容
都市構造的	学校や公園のグラウンドによる特殊地形
	マンホールの蓋が外れていたことによる負傷事故
	人為的に標高が低くされたことによる降雨の集水
地形的	地下道路の冠水
	傾斜変換線付近
	谷地形内 集水面積が大きい
水路構造的	水路合流部、屈曲部
	水路断面が小さくなる地点
	開渠から暗渠に変わる地点
	排水先の水路が満水に近くなることによる逆流
	ごみ詰まり 水門を閉じたことによる逆流
複合的	上記3項目の2つ以上に当てはまった地点
不明	上記3項目のどこにも当てはまらなかった地点

することは難しいため、本研究では水路の流下能力は考慮しないこととした。「豪雨災害資料」に記述されていた内水災害の原因と、長野市河川水路図(北部)¹¹⁾から読み取れる水路の形状、現在の地形図や等高線に基づき、表-3.1のような内水災害の分類項目を定めた。分類した結果を図-3.8に示す。「地形的」と分類されたものが23地点（全体

の約 30%) で最も多く、次いで「水路構造的」、「複合的」、「都市構造的」の順となった。また、分類した 4 項目に当てはまらない「不明」が 15 地点であり、これらの地点では、主に、本研究で考慮していない「水路の流下能力」が不足していたと予想される。

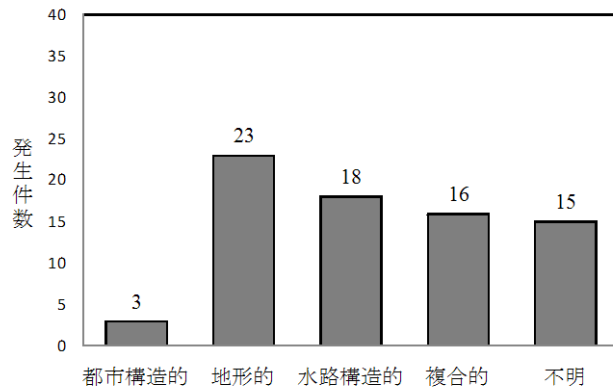


図-3.8 内水災害の要因別発生件数

水路の流下能力を無視した場合、内水災害が頻発する都市部の低平地では、一般的には「水路構造」や「都市構造」が内水災害の要因となることが多いと思われる。しかし、本研究の対象である長野市街地のような標高差の大きい場所では、地形が内水災害の大きな要因の一つであることがいえる。

3.6 地形からみた内水災害危険区域図の作成

最後に、4節の結果に基づいて、長野市街地における地形からみた内水災害危険区域の抽出を行った。その結果を、図-3.9に示す。危険区域の抽出条件は以下の2つとした。

- ・ 傾斜変換線付近：傾斜変換線の上部が大正元（1912）年以降に宅地化されたとみられる場合、同線の下部100m以内の地域。
- ・ 谷地形内：裾合谷あるいは大型の水路が整備されていない谷地形扇状地内において大正時代の地目が水田であった部分も危険区域に含めることが望ましいが、対象領域内において、水田の占める割合が大きく、その中からさらに危険な地域を限定しにくいため、本研究では危険区域に含めな

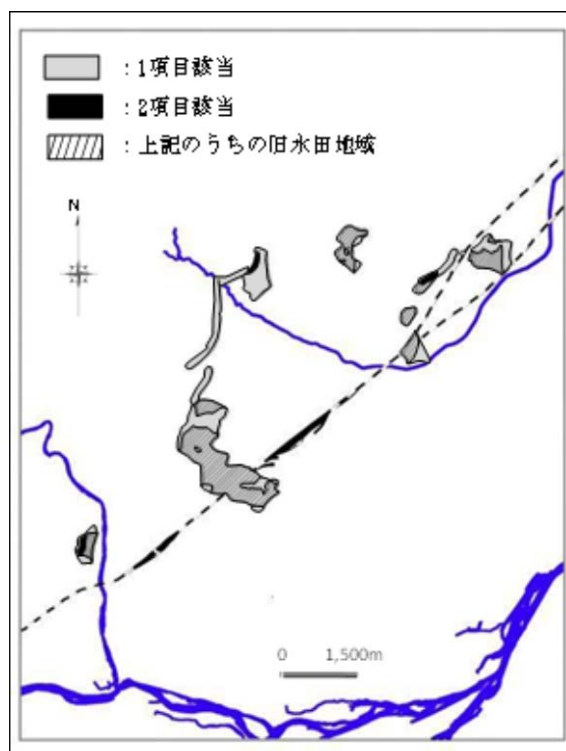


図-3.9 地形からみた内水災害危険区域図

かった。今後は、国土交通省が全国に先駆けて更新した千曲川流域の治水地形分類図¹²⁾に基づいた検討を加えていく予定である。

3.7 おわりに

本研究では、長野市が所有している「豪雨災害資料」（2006年～2009年）の内水災害データをもとに、被災時の降水量データ、航空レーザー測量結果に基づく地形特性および過去の地形図による土地利用変遷などを分析し、長野市街地における内水災害発生地点の特徴を明らかにした。また、それに基づいて、地形からみた内水災害危険区域図を作成した。得られた結果は以下の通りである。

- ・ 長野市街地における内水災害は、1時間降水量が20mmを超えると発生し始め、25mmを超えると増加する傾向にあった。また、市街地内において、降水量の空間的な非一様性がみられた。これらのことから、内水災害に関しては雨量観測所ごとの注意報・警報発令基準を持つことが適切であると考えられる。
- ・ 地形勾配が急変する「傾斜変換線」の上部において、桑畑・果樹園・水田を宅地に転換した場所においては、同線の直下100mで内水災害が多く発生していた。
- ・ 扇状地内における内水災害は、扇状地の平均勾配と大正時代における水田の分布に大きく関わっていた。
- ・ 裾合谷あるいは大型の水路が整備されていない谷地形において、内水災害が多く発生していた。
- ・ 長野市街地における内水災害の発生要因は、「地形的」、「水路構造的」、「都市構造的」、「複合的」の4つに分類され、その中で「地形的」要因が全体の30%に及んでいた。地方都市における内水災害では、「地形的」要因が大きな発生要因の1つであるという特徴が明らかになった。

長野市においては、地球温暖化にともなって100年確率日降水量の増大が見込まれている¹³⁾。また、長野市街地は、背後に千曲川のネックポイントである立ヶ花狭窄部を擁し、内水排除が難しい地域の一つである。そのため、さまざまな流出抑制施設が整備されており、その中でも雨水貯留施設助成実績は全

国でもトップクラス¹⁴⁾といわれている。今後は、千曲川との連携排水を視野に入れたさらなる内水対策を検討することが必要である。

参考文献

- 1) 川池健司ほか：低平地河川流域での豪雨による都市氾濫解析，土木学会論文集，No.761/Ⅱ-67，pp.57-68，2004.
- 2) 武田誠ほか：都市内水氾濫解析における複雑な下水道管網のモデル化に関する検討，河川技術論文集，第15巻，pp.393-398，2009.
- 3) 重枝未玲ほか：GISを用いた飯塚市街地の地形特性に基づく地表面流の挙動解析，水工学論文集，第52巻，pp.829-834，2008.
- 4) 大塚健太ほか：短時間降雨情報に基づく中小河川の洪水氾濫危険度予測法の提案と新潟県中小河川への適用，河川技術論文集，第14巻，pp.229-234，2008.
- 5) 尾崎平ほか：低平地住宅密集地域における内水氾濫の危険度評価に関する研究，水工学論文集，第53巻，pp.823-828，2009.
- 6) 国土地理院：数値地図5mメッシュ（標高）CD-ROM，2009.
- 7) 長野市河川課：豪雨災害資料，2006～2009.
- 8) 辻本哲郎：豪雨・洪水災害の減災にむけて ソフト対策とハード対策の一体化，技報堂出版，pp.93-112，2006.
- 9) 長野市防災会議：長野市地域防災計画・長野市水防計画【総合編】，pp.135-136，2007.
- 10) 長野市誌編さん委員会：長野市誌 第1巻 自然編，pp.14-74，1997.
- 11) 長野市河川課：長野市河川水路図（北部），1991.
- 12) 国土交通省北陸地方整備局千曲川河川事務所：第27回千曲塾「地図から見える治水と歴史」配付資料，2010.
- 13) 小林健一郎ほか：全球気候モデル出力を用いた日本域の100年確率日降水量の将来予測，水工学論文集，第54巻，pp.223-228，2010.
- 14) 山口卓也：平成21年度第3回時空間測量研究会資料，<http://www.eng.cs.shinshu-u.ac.jp/CIVIL/ARCH/TASS/tomilab/shiryou/21-3yamaguchi.pdf>，2010.

4. 地表変位データを用いた三次元すべり面形状の推定

地すべり地の地表変位の測定から、地下すべり面の形状を三次元的に推定する手法を提案する。すべり面の形状を推定する既往の主な方法には円弧すべり法³⁾、多角形法⁴⁾、二次元・三次元の多項式^{12),14)}法等があるが、ここで新たに提案するすべり面の推定手法は多角形法を三次元に応用したものである。本文では、これを「多面体法」と呼び、多面体法の解析手法の概説と、長野県内で発生した長野市新安地すべりおよび北安曇郡池田町相道寺地すべりの2件の地すべり地（図-4.1）について適用し、提案手法の有効性を検討するものである。

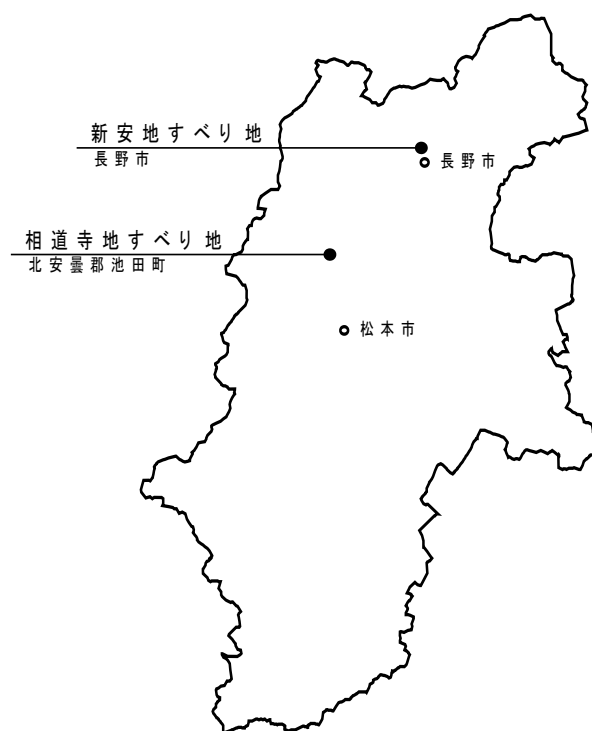


図-4.1 検討地すべり地位置図

4.1 すべり面推定の解析手法

4.1.1 解析上の仮定

地下すべり面の位置と形状を推定する解析手法は、地すべり面の形状が複数の空間上の三角形で構成された多面体であるものと考え、次の仮定のもとに構築されている。

仮定 1) 地すべり地内で相互の位置関係をほぼ一定に保ってすべり面上を移動する土塊の変化量は、グループの移動量に比べて十分に小さい。

仮定 2) 上記の仮定 1) のもとで、すべり面上を移動する土塊に設置した測点の移動ベクトルは、その鉛直下方のすべり面形状とほぼ平行なものとなる。

仮定 3) 地すべり地には、個々の移動ブロックを全体的に包括する主すべり面が存在する。

4.1.2 3点を通る平面方程式

直交座標系(X,Y,Z)内の平面は、次の方程式で表される。

$$z=l \cdot x+m \cdot y+n \quad \dots\dots\dots(1)$$

この平面が3点 $a(x_a, y_a, z_a)$, $b(x_b, y_b, z_b)$, $c(x_c, y_c, z_c)$ を通る場合、上式のパラメータ l , m , n を行列式で表すと

$$\left. \begin{aligned} l &= \begin{bmatrix} \frac{-(y_c - y_b)}{E} & \frac{-(y_a - y_c)}{E} & \frac{-(y_b - y_a)}{E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_a \\ z_b \\ z_c \end{bmatrix} \\ m &= \begin{bmatrix} \frac{(x_c - x_b)}{E} & \frac{(x_a - x_c)}{E} & \frac{(x_b - x_a)}{E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_a \\ z_b \\ z_c \end{bmatrix} \\ n &= \begin{bmatrix} \frac{(y_c - y_b)x_a - (x_c - x_b)y_a + E}{E} & \frac{(y_a - y_c)x_a - (x_a - x_c)y_a}{E} & \frac{(y_b - y_a)x_a - (x_b - x_a)y_a}{E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_a \\ z_b \\ z_c \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

ここに

$$E = (x_c - x_b)y_a + (x_a - x_c)y_b + (x_b - x_a)y_c \quad \dots\dots\dots(3)$$

座標系(X,Y,Z)と鉛直軸を共有する直交座標系(P,Q,H)には、次式の関係がある。

$$\left. \begin{aligned} x &= p \cos \theta - q \sin \theta \\ y &= p \sin \theta + q \cos \theta \\ z &= h \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 θ はX軸とP軸のなす水平角である。

(1)式に(4)式を代入して、平面方程式を次のように(P,Q,H)座標系に変換する。

$$h = (l \cos \theta + m \sin \theta) p + (-l \sin \theta + m \cos \theta) q + n \quad \dots\dots\dots(5)$$

この平面方程式の P - H 平面内での勾配 s は, (5) 式を p で偏微分することにより求められる.

$$s = \frac{\partial h}{\partial p} = l \cos \theta + m \sin \theta \quad \dots\dots\dots (6)$$

(6) 式に (2) 式を代入すると,

$$s = \left[\frac{(x_c - x_b) \sin \theta - (y_c - y_b) \cos \theta}{E} \quad \frac{(x_a - x_c) \sin \theta - (y_a - y_c) \cos \theta}{E} \quad \frac{(x_b - x_a) \sin \theta - (y_b - y_a) \cos \theta}{E} \right] \begin{bmatrix} z_a \\ z_b \\ z_c \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (7)$$

4.1.3 最小二乗法を用いた多面体頂点の高さの算出

地すべり地において, 位置の時間的変化を検出するために設けた測点を変位追跡点と呼ぶ. 変位追跡点 $a'b'c'$ を頂点とする三角形の地表面 $[i]$ ($i=1, 2, \dots, m$; m は地表面数) の変位方向 D_i の水平面上の方向を P^i 軸 (上付き添字は座標系番号を示す) にとり, X 軸と P^i 軸のなす水平角を θ_i とする. 変位方向 D_i は地表面 $[i]$ を構成する変位追跡点 $a'b'c'$ の変位方向の平均を取るものとする. D_i を変位方向だけの平均としているのは, D_i を変位の大きさを含む変位ベクトルの平均とすると, 変位追跡点の観測時点数や期間が異なる場合に正確な地すべり形状を表現しないことになるためである. ただし, 三角形 $(abc)_i$ に地すべり境界点 (滑落崖などのすべり面が地表に現れた点) が含まれている場合, 変位方向 D_i は地すべり境界点を除いた変位追跡点の平均変位方向とし, 地すべり境界点が滑落崖の場合には, 地すべり境界点が滑落崖の場合には, 滑落崖の勾配を変位方向として, 変位方向 D_i の計算に加えることとする. 滑落崖の勾配を解析に加えるのは, 新しい試みであるが, これは既往の手法にも容易に適用できるものである.

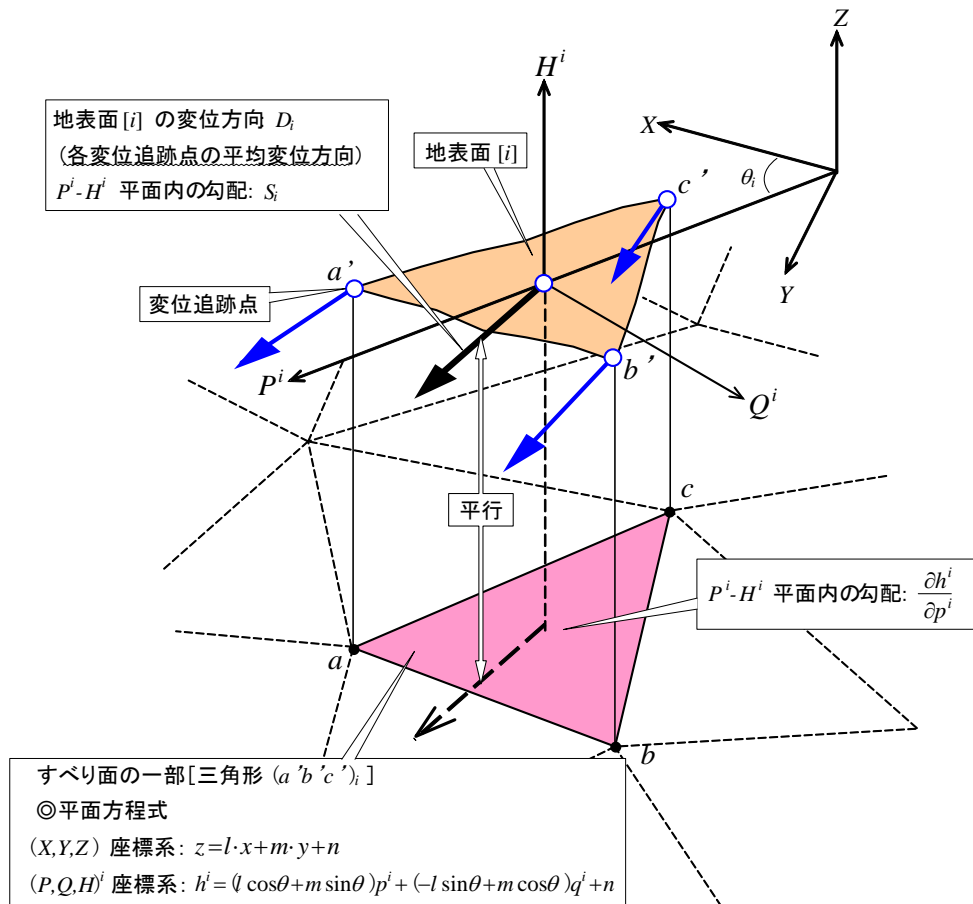
移動ベクトルの P^i - H^i 平面内の勾配を S_i , 地表面 $[i]$ の直下にあるすべり面を構成するひとつの三角形を $(abc)_i$ (各頂点の座標値: $a(x_a, y_a, z_a)$, $b(x_b, y_b, z_b)$, $c(x_c, y_c, z_c)$; X, Y 座標値は既知) とすると, 解析上の仮定より, P^i - H^i 平面内において S_i と三角形 $(abc)_i$ の勾配が等しいとして, (7) 式を用いることにより変位追跡点とすべり面の条件式が次のように得られる.

$$S_i = \begin{bmatrix} \frac{(x_c - x_b) \sin \theta_i - (y_c - y_b) \cos \theta_i}{E_i} & \frac{(x_a - x_c) \sin \theta_i - (y_a - y_c) \cos \theta_i}{E_i} & \frac{(x_b - x_a) \sin \theta_i - (y_b - y_a) \cos \theta_i}{E_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_a \\ z_b \\ z_c \end{bmatrix} \quad \dots \dots \dots (8)$$

一方、すべり面を構成する三角形 $(abc)_k$ の頂点 $a_k(x_{ak}, y_{ak}, z_{ak})$ が、地すべり境界点 $[j](x_{ak}, y_{ak}, z_j)$ $(j=1, 2, \dots, n : n$ は境界点数)であるすると、すべり面と境界点の高さが等しいことから、次の条件式が成り立つ。

$$z_j = z_{ak} \quad \dots \dots \dots (9)$$

変位追跡点とすべり面の関係の概念を図-4.2に示す。



条件式(8), (9)をそれぞれ m 個, n 個作成し、これを解くことにより、未知量である多面体の頂点の Z 座標 $\{z_1, z_2, \dots, z_l : l$ は変位追跡点数 $\}$ を求めることが可能

となる。しかしながら一般には、条件式の数($m+n$)と未知量の数(l)は必ずしも一致しないこと、また変位追跡点と境界点の座標値、および解析上の仮定に起因する誤差を処理する必要があるため、最小二乗法を用いて未知数を求める。

式(8), (9)に生じる残差 v は、次のとおりである。

$$v_i = \left[\frac{(x_{ci}-x_{bi})\sin\theta_i-(y_{ci}-y_{bi})\cos\theta_i}{E_i} \quad \frac{(x_{ai}-x_{ci})\sin\theta_i-(y_{ai}-y_{ci})\cos\theta_i}{E_i} \quad \frac{(x_{bi}-x_{ai})\sin\theta_i-(y_{bi}-y_{ai})\cos\theta_i}{E_i} \right] \begin{bmatrix} z_{ai} \\ z_{bi} \\ z_{ci} \end{bmatrix} - S_i \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$v_j = z_{ak} - z_j \quad \dots\dots\dots(11)$$

すべての残差式は次の行列式にまとめることができる。

$$V = P \cdot Z - S \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここに、 V は残差、 P と S は定数項、 Z は未知量である。最小二乗法の正規方程式は、 P, Z, S および重み W （対角行列）を用いて次のようになる。

$$P^T \cdot W(P \cdot Z - S) = 0 \quad \dots\dots\dots(13)$$

ここに P^T は P の転置行列を示す。(13)式を解くことによって多面体頂点の深さである未知量ベクトル Z を求めることができる。

以上により、多面体（推定すべり面）の頂点の三次元座標が得られるため、任意位置の断面図や、推定すべり面を等高線で表すことを容易に行うことができる。

4.2 新安地すべり地への適用

4.2.1 新安地すべり概要

新安地区は、長野盆地の西縁の地附山地すべりの北西約2kmの南浅川沿いの山中に位置する。高府層（新第三紀鮮新世）の分布域にあたり、当地区には泥岩が分布する。高府層は北西－南東走向で分布しており、地すべり斜面の傾斜もこれに一致している（走向すべり）。

この地すべりは平成17年3月（融雪期）に変状が現れ始め、平成18年7月の梅雨期に活動が顕在化した。地すべりの規模は、幅・延長とも約70m、すべり面深度は最大で15m程度である。

4.2.2 すべり面推定

解析に当たって、まず、周囲の変位追跡点との関係から土塊の大きさを設定する。仮定1)を満足するならば同じ土塊上の変位追跡点は同じような変位になるということを利用し、近傍の観測点とかけ離れた変位データを持つ観測点を解析に用いる変位追跡点から除外することとした。新安地すべり地での変位観測点は65点であり、この中からここでは34点を推定に用いる変位追跡点とし、地すべりの境界点を19点と設定した。

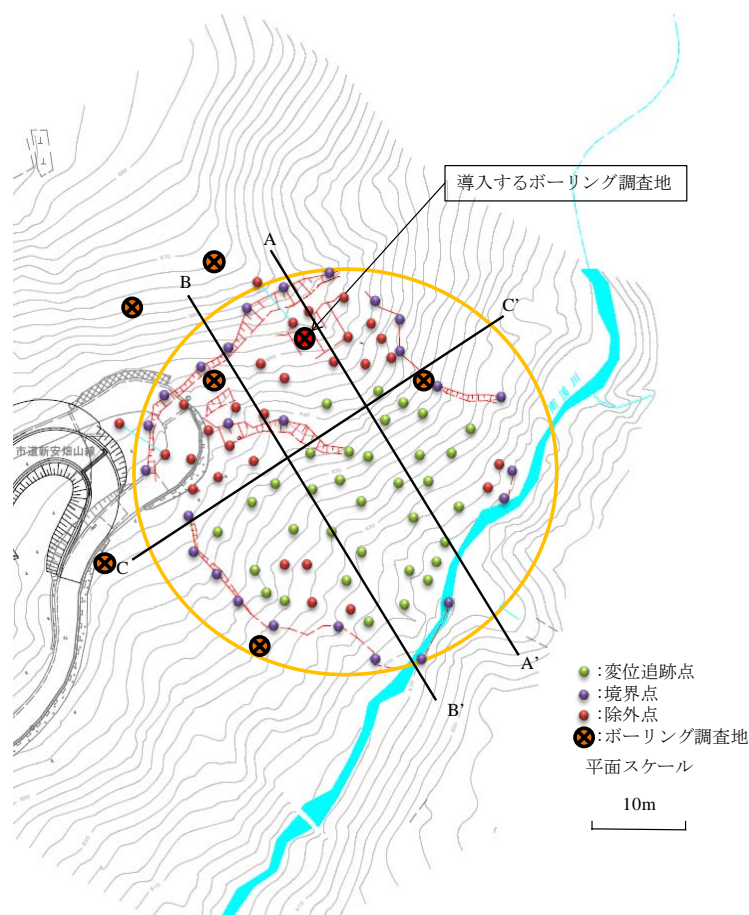


図-4.3 新安地すべり地区平面図

図-4.3 および現場の状況から境界点付近において滑落の状況が見られたため、境界点の変位として滑落崖ベクトルを解析に導入し、すべり面の推定を行った。図-4.3 中の A-A'断面のすべり面について2次元的に解析した県の資料結果¹⁸⁾との比較を図-4.4に示す。図-4.4より明らかなように、本手法による推定結果と県資料の結果とは良く一致していることが分かる。県資料の結果は7本のボ

ーリングに加え、そのほかの地質情報等を総合的に考慮して求めた推定面であるのに対し、本手法による結果は1本のボーリング調査結果と地表面の変位の時間的変動状況だけから求めたものである。

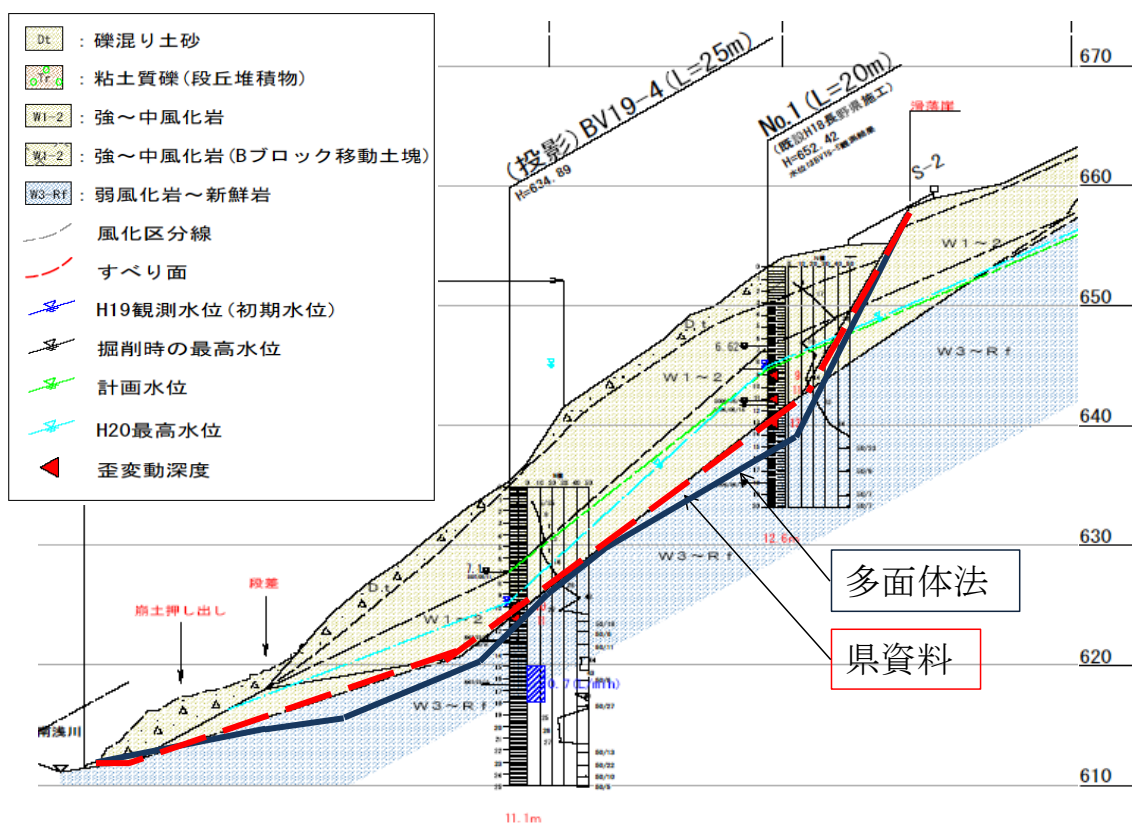


図-4.4 A-A'断面のすべり面推定結果

4.3 相道寺地すべり地への適用

4.3.1 相道寺地すべり概要

相道寺地すべりは（図-4.5），長野県北西部の北安曇郡池田町相道寺地区の住宅地背後の斜面で本年4月に発生した。4月21日に町道舗装の隆起や擁壁のクラック傾倒等を確認，その後の調査で上方の斜面に亀裂等が確認された。応急対策工事（脚部の横孔ボーリング）が行われたが，5月23・24日の降雨により大きく移動した。これに伴う追加の応急対策として地すべり地脚部の押え盛土，上部の土砂の排除，頭部滑落崖上方での縦排水工が行われた（図-4.6参照）。

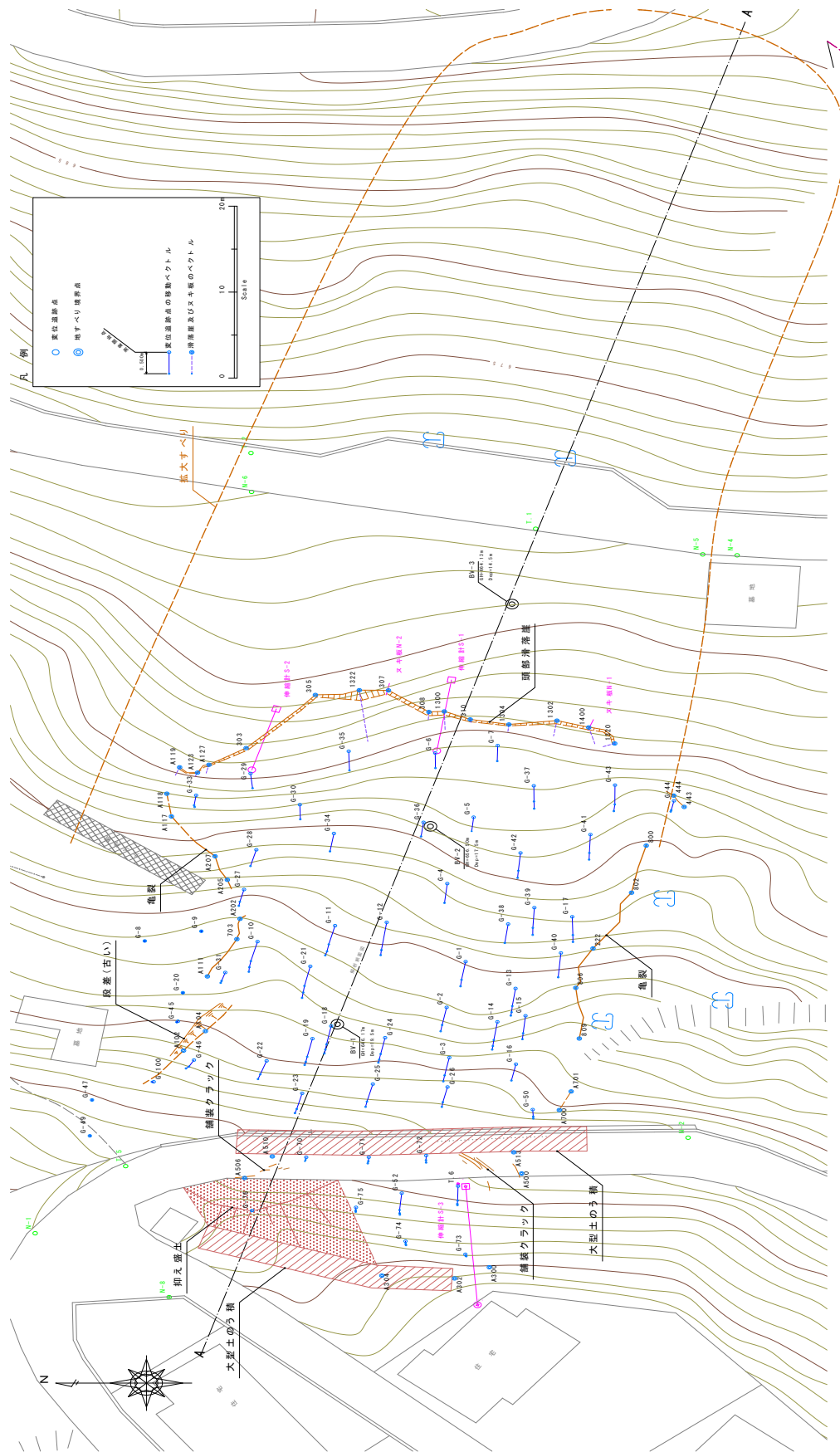


図-4.5 相道寺地すべり平面図

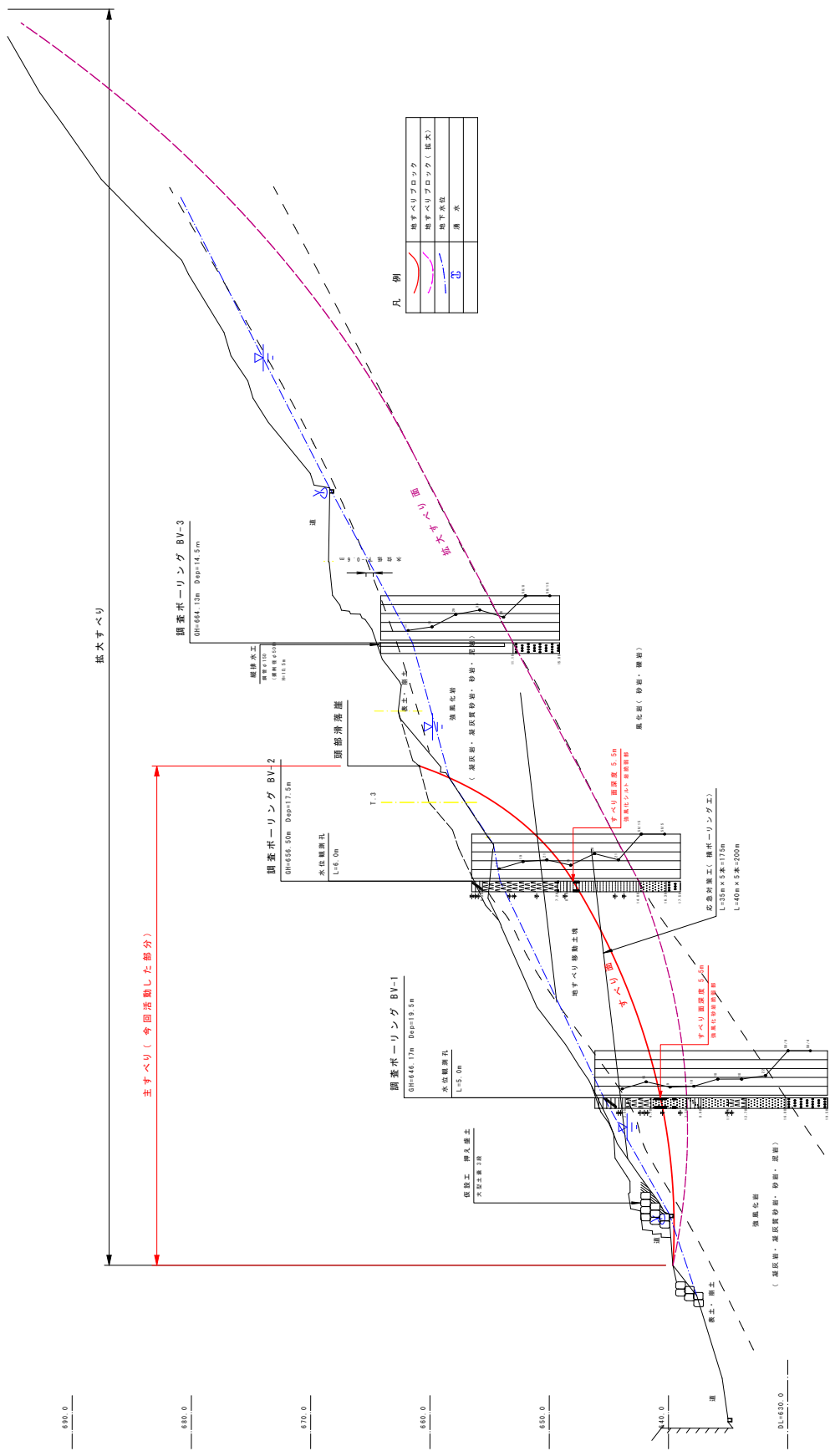


図-4.6 相道寺地すべり断面図 (図-4.5 A-A)

これによって現在は活動がほぼ停止している状態になっており、対策本工事が行われている。この地すべりは、中山断層の西側の凝灰岩を主体とした地質の中にあり、旧地すべりの下部が再活動したものと見られる。現地は上下部に町道があり、斜面の起伏が少なく見通しが良いため、前記の新安地すべりより測量作業を行いやすい場所である。

4.3.2 変位追跡点の測量

実施した変位追跡点の測量は、5月17日・28日、6月1日・17日の合計4回である。測点（変位追跡点）として木杭・測量ピンの他、既存測点・伸縮計可動端や伐採木の切株を設定した。今回の地すべりで活動した範囲内で行われたボーリング調査はBV-1、BV-2の2箇所であった（図-4.5参照）。ボーリング調査で確認したすべり面の深さを解析に取り入れやすいように、G-18、G-36はボーリング点（それぞれBV-1、BV-2）の近隣に設置している。

測量の結果、最終的に変位している測点49点のデータを得ることができた。5月23日以降の大きな移動による対策工事で測点が消失したため、測点を追加している。5月17日に設置した測点は5月28日の測量で、50cm前後の大きな変位量を得ることができた。移動量が少ない測点は5月28日以降に設置したものである。北側に設置したG-8、G-9、G-20、G-45、G-47、G-49は頭部滑落崖がカゴ枠積の背後までに発生していることから、カゴ枠積下の土地の変位を確認するために設置したものであるが、変位していないことを確認した。

4.3.3 変位追跡点以外の測量

地すべり境界点となる滑落崖や亀裂の三次元位置を測量している。頭部滑落崖については、崖面の勾配を得るため、崖面が露出している箇所で、その上下を測った。南側の側方亀裂は5月17日の段階で確認できたが、北側の側方亀裂は大きな移動が起こった5月28日以降に明瞭に現れた。その他、道路舗装面に発生した亀裂や、道路白線が屈曲している位置などを測量している。脚部については地表面の状況や樹木の傾きから判断してその位置を測ったが、押え盛土の設置後の計測となったため狭い範囲のみしか確認できなかった。

4.3.4 すべり面の推定

変位していることを確認した変位追跡点(49点)及び地すべり境界点(41点このうち滑落崖ベクトルをもつ点10点)の測量成果から、図-4.7のように三角形要素に区切った。このモデルを用いて、ボーリング調査結果を用いながら次の4つの条件で解析を行った。

解析条件①：ボーリング調査結果を用いずすべり面を推定

解析条件②：BV-2のボーリング調査結果を用いてすべり面を推定

解析条件③：BV-1のボーリング調査結果を用いてすべり面を推定

解析条件④：BV-1、BV-2のボーリング調査結果を用いてすべり面を推定

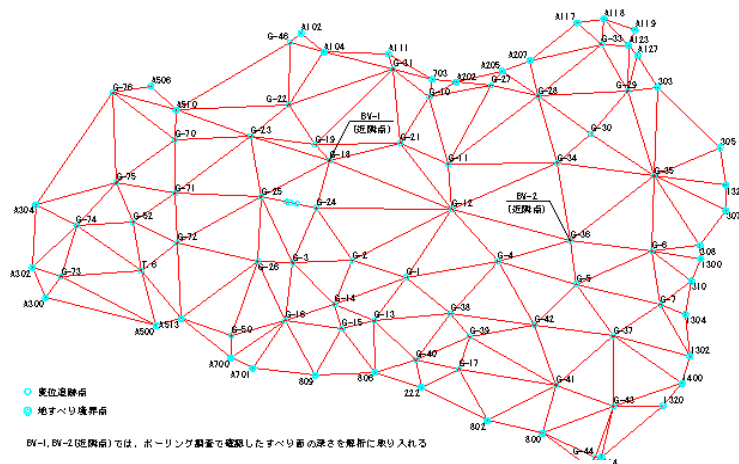


図-4.7 解析モデル (三角形要素)

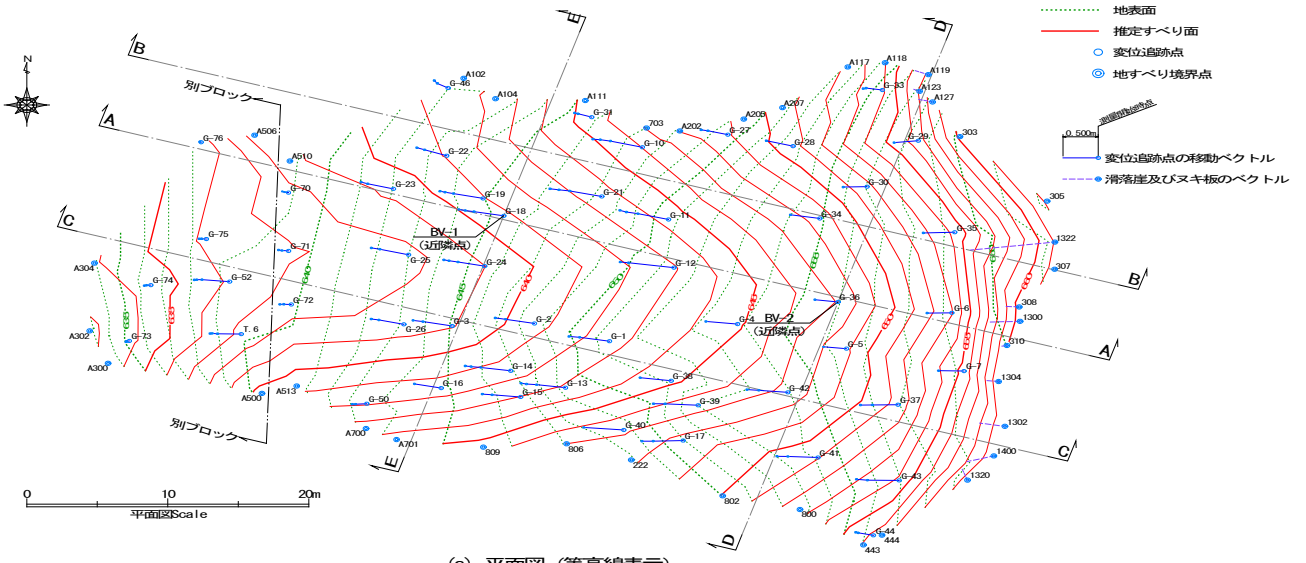
解析条件①の推定結果を図-4.8に示す。各解析条件の共通した結果として、道路から下側 (G-70, G-71, G-72より西側) は、すべり面の勾配が上方より若干急になることから、道路付近を脚部末端とする地すべり本体によって押し出された別のブロックであると判断する。

A-A断面は、図-4.5と同位置の断面図である。図-4.5の「地質調査結果から経験的に推定されたすべり面」を図-4.8に転写する。これと本手法によるA-A断面の本体ブロックの推定結果と比較すると、頭部及び脚部の形状は類似した結果となった。G-36下 (BV-2) では0.1mしか差がない。しかし中間部ではやや誤差があり、最大1.0m、G-18下 (BV-1) で0.9m程度の誤差がある。

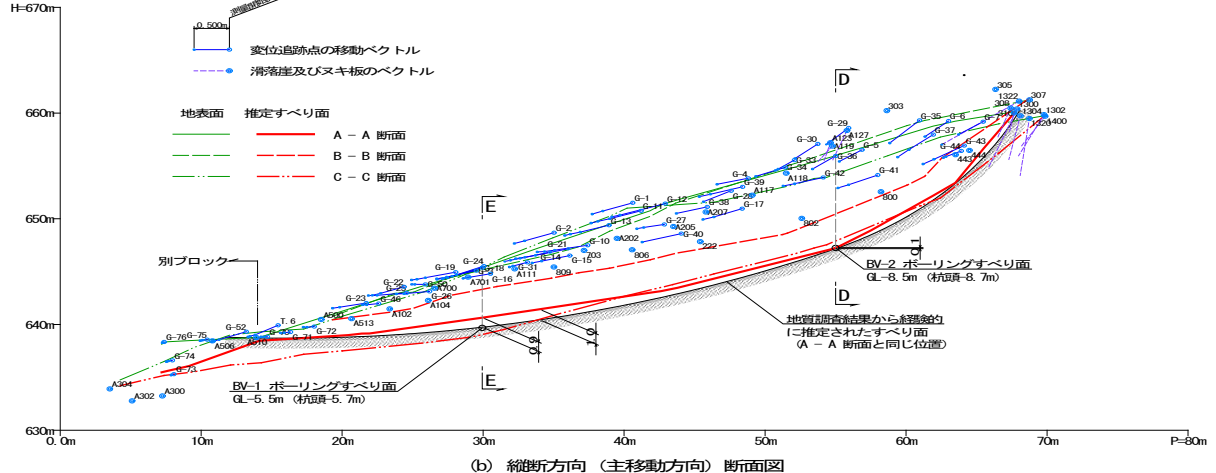
解析条件②は、解析結果①に類似した結果となったため、図示を省略する。これは解析条件①の推定結果が、BV-2のすべり面とほぼ一致するためである。

解析条件③の推定結果を図-4.9に示す。推定すべり面は「地質調査結果から経験的に推定されたすべり面」とほぼ一致した結果なり、誤差は最大でも0.2mと大変小さくなった。

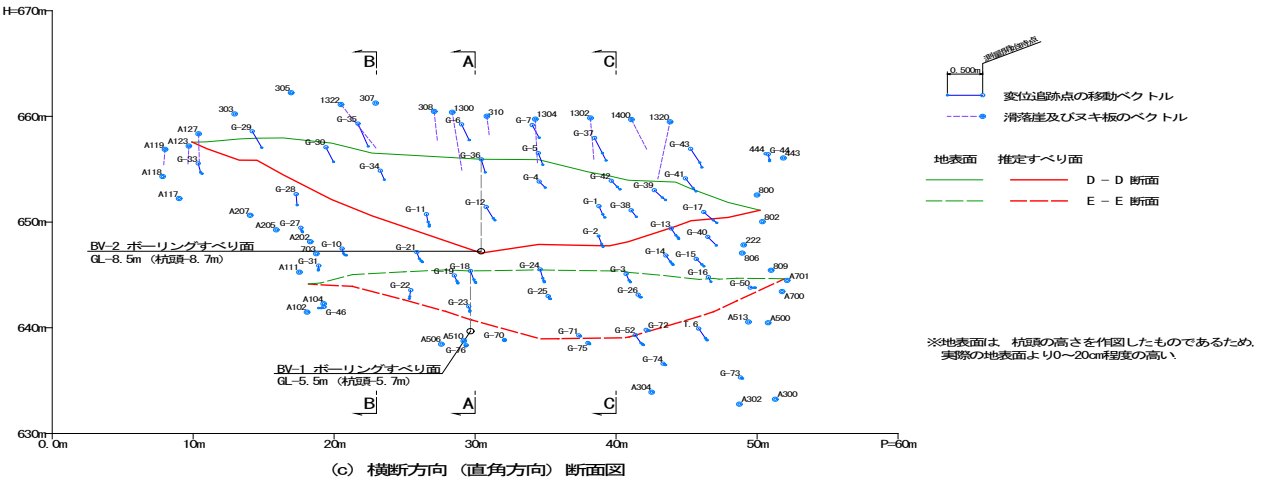
解析条件④は、解析条件③と類似したものとなったため省略する。相道寺地すべりでは、ボーリングデータを使用しなくても（解析条件①）かなり精度の高いすべり面が推定できた。またBV-2のボーリング調査結果を用いれば（解析条件③）、地質調査結果から経験的に推定されたすべり面とほぼ一致したすべり面を推定することができた。1本のボーリングデータを解析に用いることで、精度を向上させることができることは確認されたが、ただし、解析条件②のように、ボーリングデータを使用しても推定精度が向上しない場合もある。



(a) 平面図 (等高線表示)

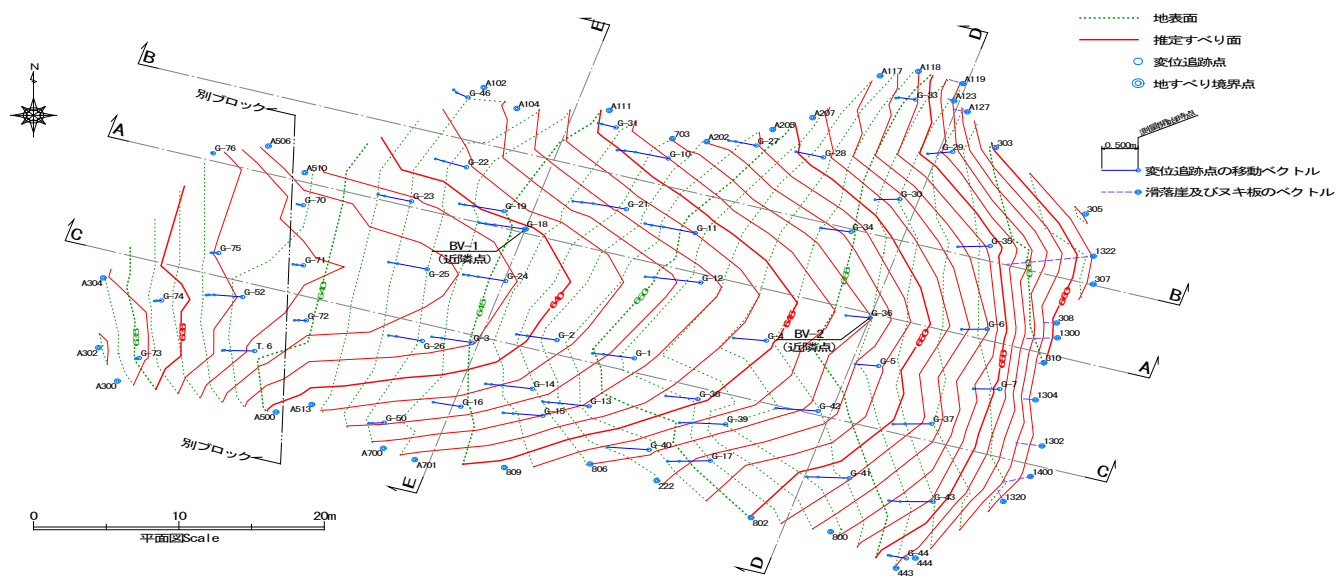


(b) 縦断方向 (主移動方向) 断面図

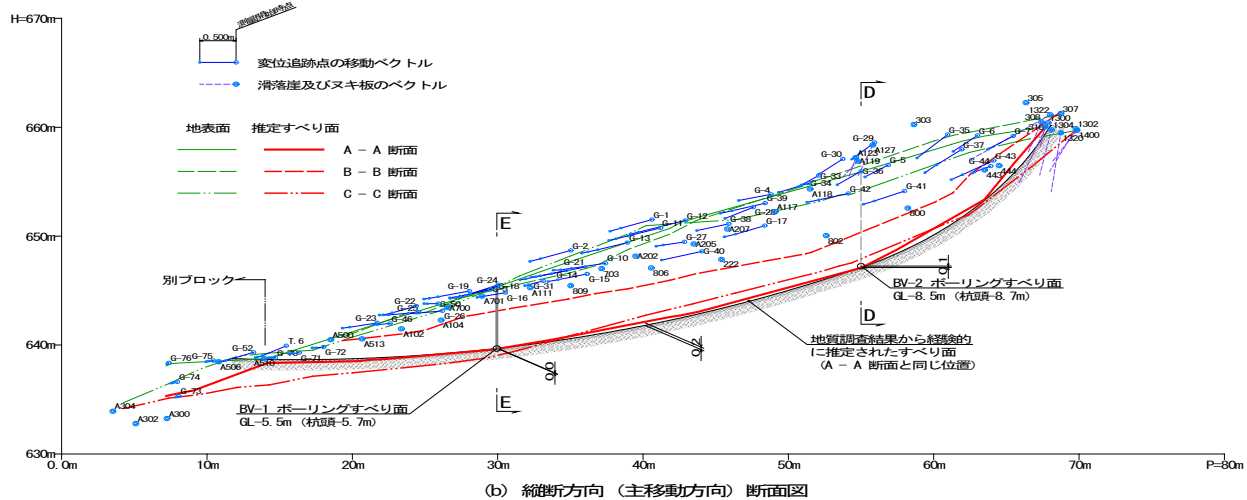


(c) 横断方向 (直角方向) 断面図

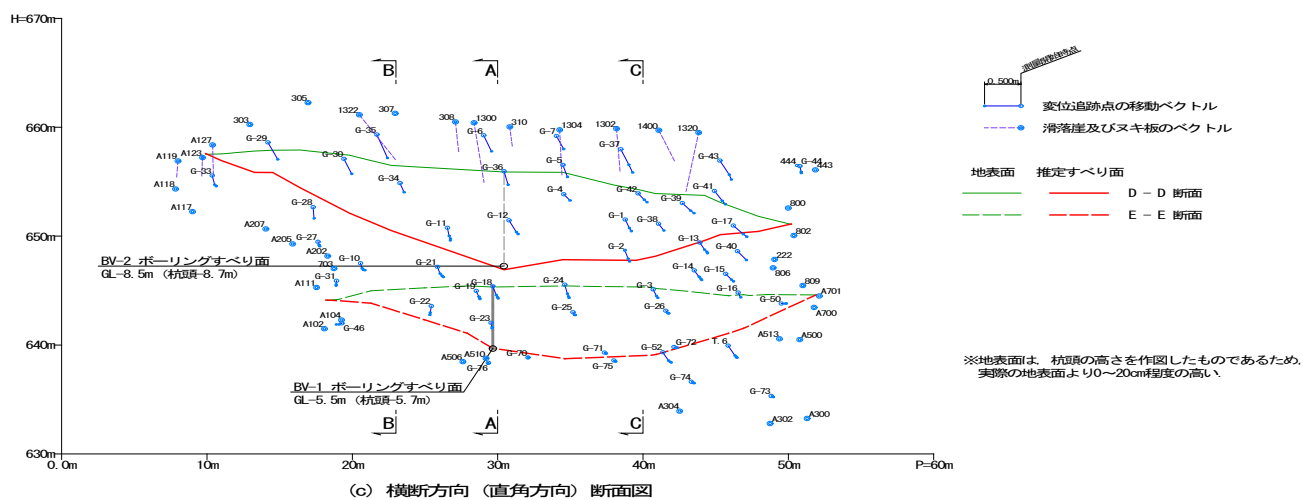
図-4.8 解析条件①：ボーリングデータ不使用



(a) 平面図 (等高線表示)



(b) 縦断方向 (主移動方向) 断面図



(c) 横断方向 (直角方向) 断面図

図-4.9 解析条件③：ボーリングデータ BV-1 を用いた推定結果

4.4 まとめ

複雑なすべり面の三次元形状推定する手法として、これまでに「三次元複合多項式法^{12),14)}」を提案したが、この方法は変位追跡点をいくつかのグループ(ブロック)に分割して、グループ毎にすべり面を求めた後に、それらを連結するという手順を必要とする。一方、提案する多面体法では、対象領域全体について一括して解析するために極めて簡便に推定ができる。

推定すべり面の精度を向上させ、形状をより滑らかにするためには、多数の変位追跡点の測量結果が必要である。現在の主流であるトータルステーションを使用した測量では、新安地すべり地のような起伏が多く見通しが悪い現場では適用が難しい。多くの測点の位置を容易に計測できる機器・手法が望まれる⁵⁾⁷⁾¹¹⁾¹⁴⁾。

本手法はボーリング調査の本数を極力少なくして経済的にすべり面の形状を推定することを目的のひとつとしている。相道寺地すべりのように、1本のボーリングデータを使用しても、不使用の場合と比較して、精度が向上しない(変化がない)場合もあるため、本手法と1本のボーリングデータからすべり面を推定する場合は、ボーリングの位置をよく検討する必要があると思われる。

解析では、三角形要素や地すべり境界点に重みを付けることができる((13)式)が、今回はこれを用いなかった。測量精度や観測回数、境界点の精度(信頼性)などに基づいて重みを設定できると考えられるが⁶⁾¹⁰⁾¹²⁾¹⁵⁾、これらについては今後の検討とする。

参考文献

- 1) 波田野誠一他：中央道岩殿山地すべりについて，日本地理学会予稿集，6，pp.134-135,1974.
- 2) M.Carter and S.P.Bentley：The Geometry of Slip Surface beneath Landslides：Predictions from Surface Measurements, CAN. GEOTECH. J. 22, pp.234-238, 1985.
- 3) 吉澤孝和，細川容宏：地すべり地における地表変位測量データを用いた円弧すべりの解析，地すべり，23-4,pp.13-23 ,1987.
- 4) 吉澤孝和：多角形法による地下すべり面の推定（地すべり地における四次

- 元測量の利用法) , 地すべり, 25-2, pp.9-17,1988.
- 5) 吉澤孝和他:地すべりの挙動解析における写真測量の応用,写真測量とリモートセンシング, 30-5, pp.8-20, 1991.
 - 6) 吉澤孝和, 宮澤圭:地下すべり面推定における三次元移動軌跡法の改良,地すべり,28-4, pp.6-14, 1992.
 - 7) 吉澤孝和他:空中写真による地下すべり面形状解析システム,写真測量とリモートセンシング, 33-3, pp.17-32, 1994.
 - 8) 吉澤孝和:地すべり解析のための三次元地表変位測量と考察,自然災害科学, 14-1, pp.13-29, 1995.
 - 9) 近藤仁志他:GPSによる地表変位モニタリングシステムの開発,土木学会論文集, No.546, VI-32, pp.157-168, 1996.
 - 10) 宮澤圭・吉澤孝和:地下すべり面推定に用いる地表変位測量データの重みに関する考察,応用測量論文集, 9, pp.47-54, 1998
 - 11) 岡本修他:RTK-GPSの地すべり計測への適用に関する実験的研究,応用測量論文集,9, pp.55-62,1998.
 - 12) 宮澤圭・吉澤孝和:地すべり地の空中写真測量データの重みを考慮した三次元地下すべり面形状の推定,写真測量とリモートセンシング, 37-6, pp.14-27, 1998.
 - 13) 宮澤圭・吉澤孝和:各種三次元時間差測量データを用いた地すべり解析システム,応用測量論文集, 10, pp.45-51,1999.
 - 14) 宮澤圭・吉澤孝和:すべり地の地表変位測量データを利用した地下すべり面の三次元形状の推定,土木学会論文集No.645/III-50, pp.51-62,2000.3.
 - 15) 宮澤圭他:時間差空中写真測量による地すべり解析システム—八幡平澄川地すべり地の変位計測データを利用した地下すべり面の推定—,写真測量とリモートセンシング,39-1, pp.39-47, 2000.
 - 16) 吉澤孝和:図解 測量学測量学要論,(社)日本測量協会, pp.392-409,2005.
 - 17) 吉澤孝和:図解 測量学測量学要論,(社)日本測量協会, pp.392-409,2005.
 - 18) 長野県長野地方事務所:平成20年度地すべり防止事業 第8工事(調査等業務委託)報告書(長野市字新安地内), 2009.

5. おわりに

本研究は、地表面の形態や表流水の流動条件等の時間的変動を観察することによって、それらがどのような災害（地すべり、水害、土石流、岩盤崩落等）の要因に結びつくかを調べ、その結果を、広域的なベースマップの上に視覚的な形で提供することにより、官民協力型の地域保全体制の実現を目指すものである。

本研究では、災害の中で、近年の降雨パターンの変化にともなって多発している「都市内水災害」と「山地土砂災害」に焦点をあて、その検討を行った。

「都市内水災害」に関しては、地方都市における内水災害発生地点の特徴を明らかにするために、長野市街地を対象として、

- ・長野市が所有している「豪雨災害資料」(2006年～2009年)の内水災害データ
- ・被災時の降水量データ
- ・航空レーザー測量結果に基づく地形特性
- ・過去の地形図による土地利用変遷

などを分析し、長野市街地における内水災害発生地点の特徴、特に地方都市における内水災害では「地形的」要因が大きな発生要因の1つであるということを示した。また、それに基づいて、地形からみた内水災害危険区域図すなわちウィークポイントの分布図を作成した。

「山地土砂災害」に関しては、地すべり地帯の地表変位を時空間測量によってその時間的変動を観測することにより、地表変位の観測データだけから地すべり面を三次元的に推定する方法の開発を行った。提案手法はボーリング調査の本数を極力少なくして経済的にすべり面の形状を推定しようとするものである。長野市浅川地区と長野県池田町相道寺地区に発生した地すべりに対して実施した現地での地表変位追跡測量と、そのデータを用いた地下すべり面の推定解析結果は、現地のボーリングで得られたすべり面とかなり良く整合した。特に今回開発した多面体法による地下すべり面の三次元形状の推定は、広域にわたる斜面防災のウィークエリアを特定できるという利点があり、将来的に地域防災対策に対して有効に活用できるものと考えられる。現在、長野県中条村において時空間測量による地表変位の動態観測を行って、従前より地表面の変状が見

られ、地すべりの危険性が心配されている箇所の地下すべり面形状の推定を試みている。

今後は、得られた成果をもとに、ウィークポイントの分布等の情報をどのようにして一般市民に理解しやすい形で具体的に表現するかを検討し、住民参加型の地域防災、官民一体となった保全体制の実現を図るべき研究を進める予定である。

6. 研究発表

1. 吉澤孝和：災害に対するコンサルタントの役割，平成 22 年度災害復旧技術研修会テキスト，長野県北信測量設計事業協同組合，2010.
2. 豊田政史：豪雨災害の歴史と現状～長野市を中心に～，平成 22 年度災害復旧技術研修会テキスト，長野県北信測量設計事業協同組合，2010.
3. 村林信鷹，豊田政史，大上俊之，鶴飼尚弘，吉澤孝和：長野市街地における内水災害データと降水特性および地形情報からみた内水災害危険区域の抽出，土木学会安全問題研究論文集（投稿中）
4. 宮澤圭，谷口淳，大上俊之，豊田政史，竹内均，吉澤孝和：地表変位データを用いた三次元すべり面形状の推定，地すべり（投稿準備中）

WEAK POINT MAPPING AIMING AT THE CONSTRUCTION OF A SYSTEM TO OFFER THE REGIONAL DISASTER PREVENATION INFORMATION BY MEANS OF SURVEYING IN TIME AND SPACE

Ohkami,T.¹ Toyota.M.¹ Miyazawa.K.² Yamashita,I.¹ Yoshizawa,N.¹
¹Shinshu University ²Naganogiken Co.Ltd.

Many different types of disasters (e.g., flood, earthquake, and landslide) have damaged people all over the world frequently in recent years. In Japan, each municipality becomes to announce to residents the prediction maps and evacuation information in case disaster occurs, however, these works are in progress.

With these point as background, we perform the weak point mapping by means of surveying in time and space as to the inside water inundation disasters in the city area and the landslide disasters in the mountainous region that are often caused by the variation of the rainfall pattern. The results are described below.

1) Inside water inundation disaster

It is examined the actual results of inside water inundation disasters in Nagano city recorded from 2006 to 2009 from the viewpoint of the rainfall characteristics and land information. Results show that inside water inundation disasters are prone to occur as the following conditions and places: 1) The intensity of hourly rainfall reaches 20-25mm, 2) Housing sites where used to be mulberry fields, orchards and paddy fields inside the bed slope changing area, 3) Valley between the alluvial fans.

It is grouped the factors of inside water inundation disasters in Nagano city into four classes (topography, channel structure, urban frame and combined). As a result, the topographic factor, which is rarely seen in the city area, is occupied nearly 30%.

2) Landslide disaster

We present a presumption method of three-dimensional underground slide shape by analyzing displacement vectors of surface points on the sliding mass (tracking points). The displacement vectors are obtained from positional data of tracking points surveyed at different time. The proposed method is based on assumptions that 1) the deformation of a sliding mass is very small compared with the displacement of the mass, 2) ground points move parallel to the slide surface, 3) a main landslide surface exists in the landslide area that includes movement groups according to the characteristics of tracking points. The landslide area is divided into several triangular elements whose nodes consist of tracking points, and the underground slide shape is obtained by applying the least square method between the landslide depth of each tracking point and the observed positional data. In order to examine the validity of the method, the proposed method is applied to actual landslide areas, Shin-yasu area in Nagano city and Sodo-ji area in Nagano prefecture. The shapes of slide surface using this procedure are in good agreement with the curves of slide surface by empirical data such as field boring in both areas. The method does not require so many field boring data. This confirms that the method is effective and applicable for disaster-prevention measures against landslide disaster.

KEYWORDS: *weak point mapping, inside water inundation disasters, landslide disasters*

研 究 成 果 の 要 約

助成番号	助成研究名	研究者・所属
第2008-3号	地域保全対策情報の提供を目指した時空間測量によるウィークポイントマッピング	大上俊之・信州大学工学部
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 48%;"> <p>最近の日本において、地方部は過疎化による耕作放棄で土地は荒廃し、都市部では過密化に起因する種々の災害の危険度が増しており、わが国はいま、国土の保全と国家予算の有効活用を真剣に考えなければならない時期にあるといえる。そのためには、住民参加型の地域防災と環境保全への取り組みが急務である。この運動を促すために、官民一体となって地域を取り巻く空間のウィークポイントへの注意を深め、その変動情報を共有して、先制的かつ予防的な対策への国民的な認識を高めることが必要である。</p> <p>広域的地理空間の時間的変動（特に、地表面の形態、地上物体および表流水の流動条件等の変動）は、土砂災害や環境破壊の素因となるさまざまなウィークポイントを形成する。そこで本研究では、このようなウィークポイントの分布とその拡大状況を、適当な時間差のある三次元測量で追跡した。ここでは、数ある災害の中で、近年の降雨パターンの変化にともなって多発している「都市内水災害」と「山地土砂災害」に焦点をあて、その検討を行った。</p> <p>「都市内水災害」に関しては、地方都市における内水災害発生地点の特徴を明らかにするために、長野市街地を対象として、</p> <ul style="list-style-type: none"> ・長野市が所有している「豪雨災害資料」(2006年～2009年)の内水災害データ ・被災時の降水量データ ・航空レーザー測量結果に基づく地形特性 ・過去の地形図による土地利用変遷 <p>などを分析し、長野市街地における内水災害発生地点の特徴、特に地方都市における内水災害では「地形的」要因が大きな発生要因の1つであるということを明らかにした。また、それに基づいて、地形からみた内水災害危険区域図すなわちウィークポイントの分布図を作成した。</p> </div> <div style="width: 48%;"> <p>「山地土砂災害」に関しては、地すべり地帯の地表変位を時空間測量によってその時間的変動を観測することにより、地表変位の観測データだけから地すべり面を三次元的に推定する方法の開発を行った。提案手法はボーリング調査の本数を極力少なくして経済的にすべり面の形状を推定しようとするものである。長野市浅川地区と長野県池田町相道寺地区に発生した地すべりに対して実施した現地の地表変位追跡測量と、そのデータを用いた地下すべり面の推定解析結果は、現地のボーリングで得られたすべり面とかなり良く整合した。特に今回開発した多面体法による地下すべり面の三次元形状の推定は、広域にわたる斜面防災のウィークエリアを特定できるという利点があり、将来的に地域防災対策に対して有効に活用できるものと考えられる。現在、長野県中条村において時空間測量による地表変位の動態観測を行って、従前より地表面の変状が見られ、地すべりの危険性が心配されている箇所地下すべり面形状の推定を試みている。</p> <p>今後は、得られた成果をもとに、ウィークポイントの分布等の情報をどのようにして一般市民に理解しやすい形で具体的に表現するかを検討し、住民参加型の地域防災、官民一体となった保全体制の実現を図るべき研究を進める予定である。</p> </div> </div>		