

【建設工学研究所論文報告集第 59 号〔報告〕2017 年 11 月】

兵庫県内の新生代第三紀堆積岩類における地形・地質学的特徴と リアルタイム表層崩壊予測モデルへの適応と限界について

Geomorphological and geological features of Cenozoic Tertiary sedimentary rock in Hyogo Prefecture, Japan -Application and its limitations of real-time hazard system-

沖村 孝
Takashi Okimura

中川 渉
Wataru Nakagawa

中尾 直美
Naomi Nakao

伊藤 正美
Masami Ito

嵯峨 根 朋子
Tomoko Sagane

1. はじめに

兵庫県では市町と共同でリアルタイム表層崩壊予測モデル（「以下予測モデル」と呼ぶ）を段階的に進めている（沖村ら 2011¹⁾）。現在、神戸市や豊岡市、丹波市、篠山市、三田市、西宮市、上郡町、朝来市でそれぞれの予測モデルを用いた箇所別土砂災害危険度予測システム（以下予測システム）を運用している。

これらのシステムでは、再現計算の結果として各地域における捕捉率を 80%以上に保つことを目標に実施してきており、事例代表である六甲花崗岩類などでは最大 85%までを予測し得る状況となっている。しかしながら、兵庫県下における新生代第三紀の神戸層群、北但層群、大阪層群等の堆積岩類においては、地層別に捕捉率をみると各々 37.8%（昭和 42 年 7 月災害）、84.7%（平成 16 年 10 月災害）、30.2%（昭和 42 年 7 月災害）と地質によって大きな差がある。これら捕捉率に差が生じる原因としては、実際の崩壊メカニズムと予測モデルのモデル化が地形・地層の特性により異なってきたことが考えられる。

本報告では、兵庫県下における地層新生代第三紀堆積岩類の地形特性、地質特性を DEM に基づいて整理し、崩壊地の地形特性を把握したうえで、各地層の崩壊メカニズムを考える。そして予測モデルへの適応に当たり、留意点ならびに改良点について提案したい。

2. システム概要

本システムでは、レーザ計測 DEM を用いて、10m 格子間隔で標高をメッシュモデル化し、①10m メッシュ毎に表土層厚を設定し、②降雨の浸透～地下水の形成過程は、飽和横流れ浸透流解析を用いてメッシュ毎の地下水位を計算し、③無限長斜面安定解析式を用いて、各メッシュで時間ごとに安全率を計算する²⁾。表土層厚は地形地質区分ごとに傾斜と表土層厚の関係をモデル化し、広域への展開を可能としている。飽和横流れ浸透流解析では、降雨に伴う表土層内の地下水位の上昇を浸透流解析によって求めるものである（図-2. 1 参照）。水収支の連続の条件として各セルの X 方向の水の増分、Y 方向の水の増分、さらにメッシュ内に降ってきた雨の増分を評価する手法であり、地表面から地下水面までの不飽和浸透を考えない条件でダルシー則により解析する。無限長斜面安定解析では、地下水位の上昇に伴う単位体

積重量の増加、間隙水圧の上昇（有効応力の低下）を求め、各メッシュの安全率の変化を算定するものである（図-2.2参照）。本システムでは、表層崩壊を対象とし、崩壊面積が1メッシュより小さい100m²未満の崩壊や、すべり面が基盤岩内部に位置する地すべり、深層崩壊はシステムの対象外としている。

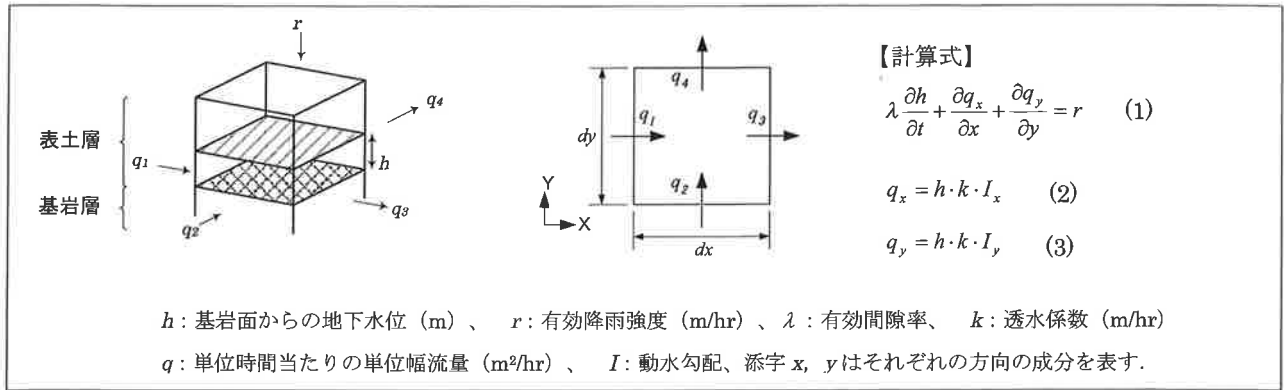


図-2.1 地下水算定モデルの概要

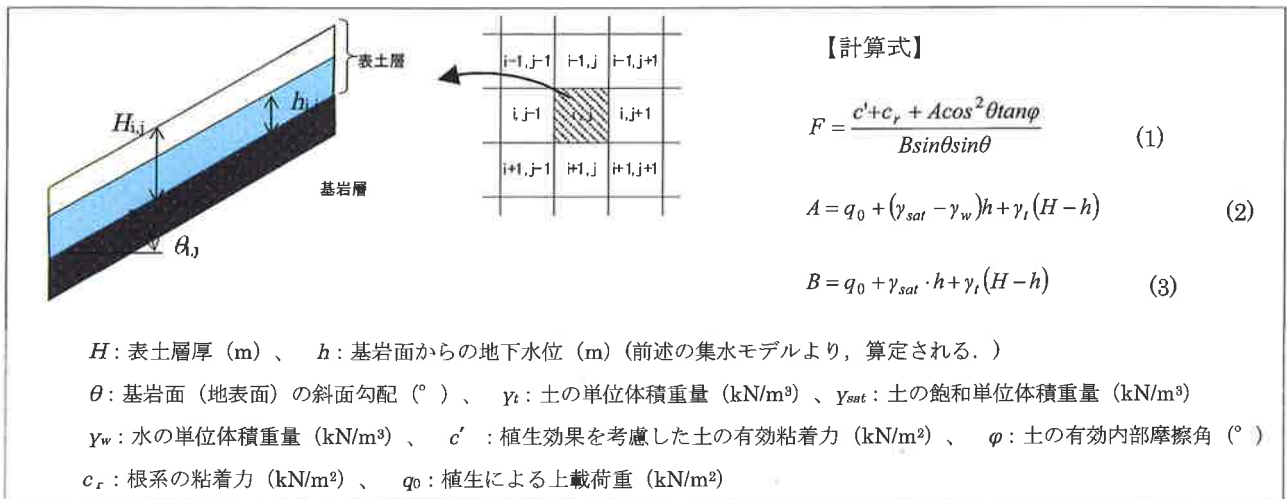


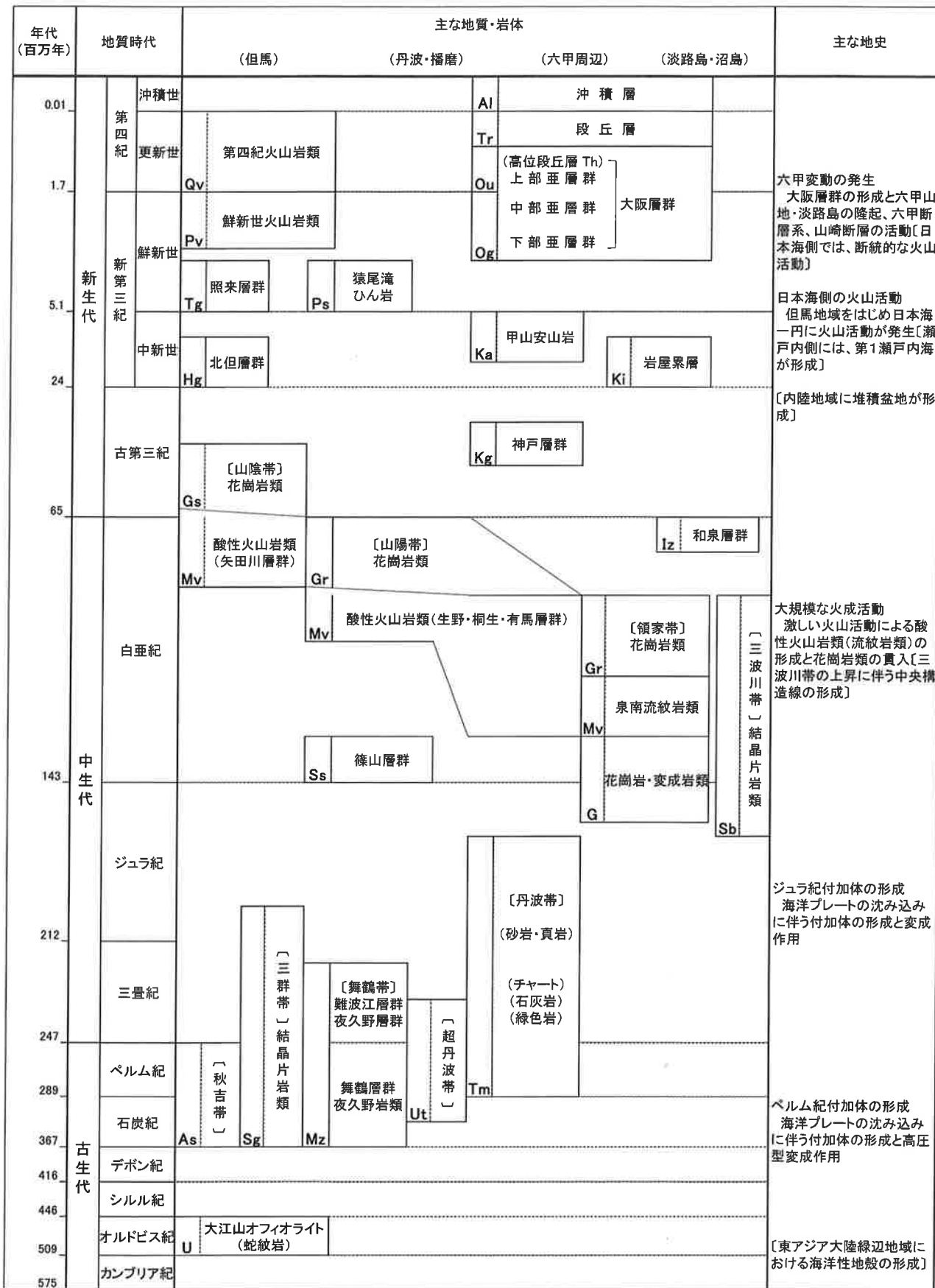
図-2.2 斜面安定解析モデルの概要

3. 兵庫県下の新生代第三紀堆積岩類

兵庫県下には古生代の夜久野コンプレックスから第四紀までの幅広い年代の地層が分布している。これらの層序を表-3.1に示した。

兵庫県下における新生代第三紀堆積岩類には、兵庫県南部を中心に分布している古第三紀始新世から漸新世の堆積岩類である神戸層群、兵庫県北部の浜坂～豊岡市域を中心に分布する北但層群、また淡路島に分布する岩屋累層、そして北但層群を被覆する照来層群、そして第三紀の中で最も新しい神戸～大阪、京都、滋賀広範囲に分布する大阪層群がある。本文では神戸層群、北但層群、照来層群、大阪層群を対象として地形、地質を比較する。

表-3.1 兵庫県下の地質層序³⁾



3. 1 神戸層群

神戸層群とは明石海峡付近に発達する第三紀層に対して 1938 年に鹿間時夫が与えた名称である。1955 年以降藤田・笠間の指導の下、大阪市立大学の卒業論文・修士論文にまとめられ、神戸市西部の西神地域と三田地域を中心とする北神地域に分けて整理されてきている。両地区は帝釈山地によって分離されているが、藤田・笠間 (1983)⁴⁾ は白川地域を下位より多井畑累層、白川累層、藍那累層に 3 区分し、同様に三田盆地を下位より有野累層、吉川累層、淡河累層に 3 区分した (図-3. 1)。これらの堆積岩類は、白川地域の多井畑累層中の「多井畑貝化石層」に中期中新世を示す海性貝化石を含んでいることから、同時代の堆積岩であると考えられた。一方尾崎・松浦 (1988)⁵⁾ は、三田地域において岩相・堆積サイクルを基準として下位より三田累層、吉川累層、細川累層に再区分した。これらの地層区分と対比を表-3. 2 に示した。特に神戸層群中には連続性の良い 9 層の凝灰岩類が分布し鍵層となるとした。またこれらの凝灰岩層よりジルコンを使ったフィッシュオントラック年代で、 $33.3 \pm 2.6\text{Ma}$, $32.8 \pm 2.1\text{Ma}$ の年代が得られ、また凝灰岩中の黒雲母より K-Ar 年代測定法により $36.9 \pm 0.8\text{Ma}$ および $36.7 \pm 0.8\text{Ma}$, $36.2 \pm 0.8\text{Ma}$, $35.8 \pm 0.7\text{Ma}$ で両方法の測定で始新世末期から漸新世前期の値を示した。

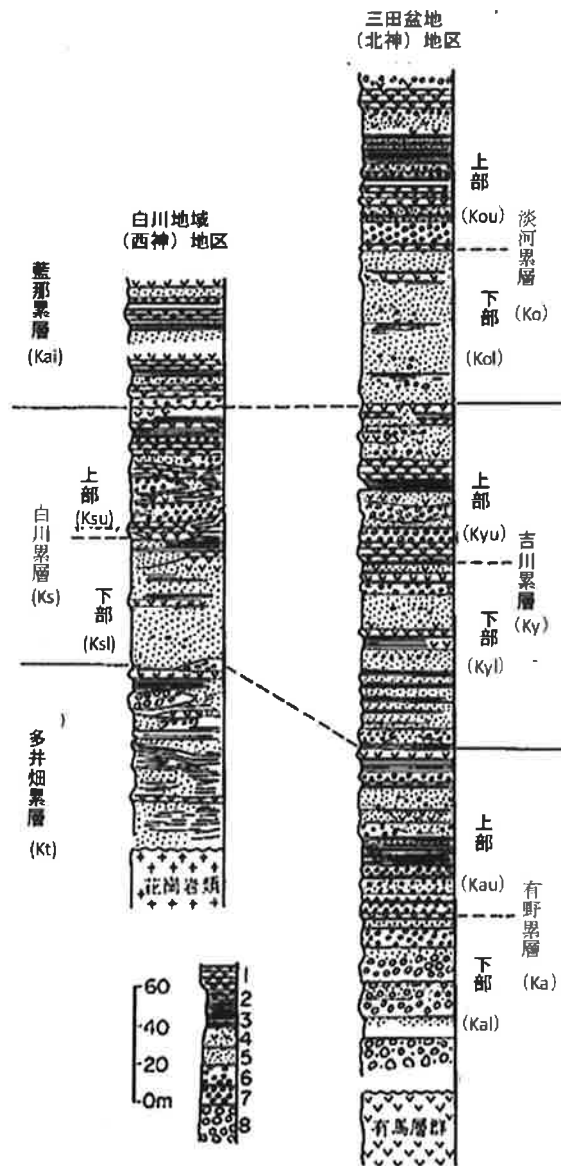


図-3. 1 神戸層群の層序 (藤田・笠間 (1983)⁴⁾)

表-3. 2 神戸層群の層序区分の変遷⁵⁾

		神戸市西部及び淡路島北部				三 田 盆 地			
中 新 世	多井畑貝化石層 (15) 断層	藍那累層 (70)	藍那累層 (70+)		三津田累層 (60+) 上部 下部				
	白川層 (200) 断層	白川累層 (90)	白川累層 (120+)	上 下	淡河累層 (110+) 上部 下部	淡河累層 (190+) 上部 下部			
	多井畑層 (150) 丸山層 (140) ?	多井畑累層 (70) 明石海峡	多井畑累層 (90+)	岩屋累層	吉川累層 (160+) 上部 下部	吉川累層 (180±) 上部 下部			
	岩屋層 (110)	岩屋累層 (50+)			有野累層 (175+) 上部 下部	有野累層 (175+) 上部 下部			
漸 新 世 後 期 ・ 始 新 世 最 末 期						石上山凝灰岩層	細川累層	原坂泥岩部層	
						北畑凝灰岩層 上久米凝灰岩層	吉川累層	吉安砂岩泥岩礫岩部層	
						東条湖凝灰岩層	三田累層	長尾砂岩泥岩部層	
								下非沢泥岩部層	
								新田礫岩部層	
								紙石川泥岩砂岩部層	
	鹿間(1938)	池辺編(1961)	藤田・笠町(1971-1983) Huzita et al.(1971)		池辺編(1961)	藤田・笠町(1971-1983) Huzita et al.(1971)		本報告(尾崎・松浦,1988)	

[層 厚 : m]

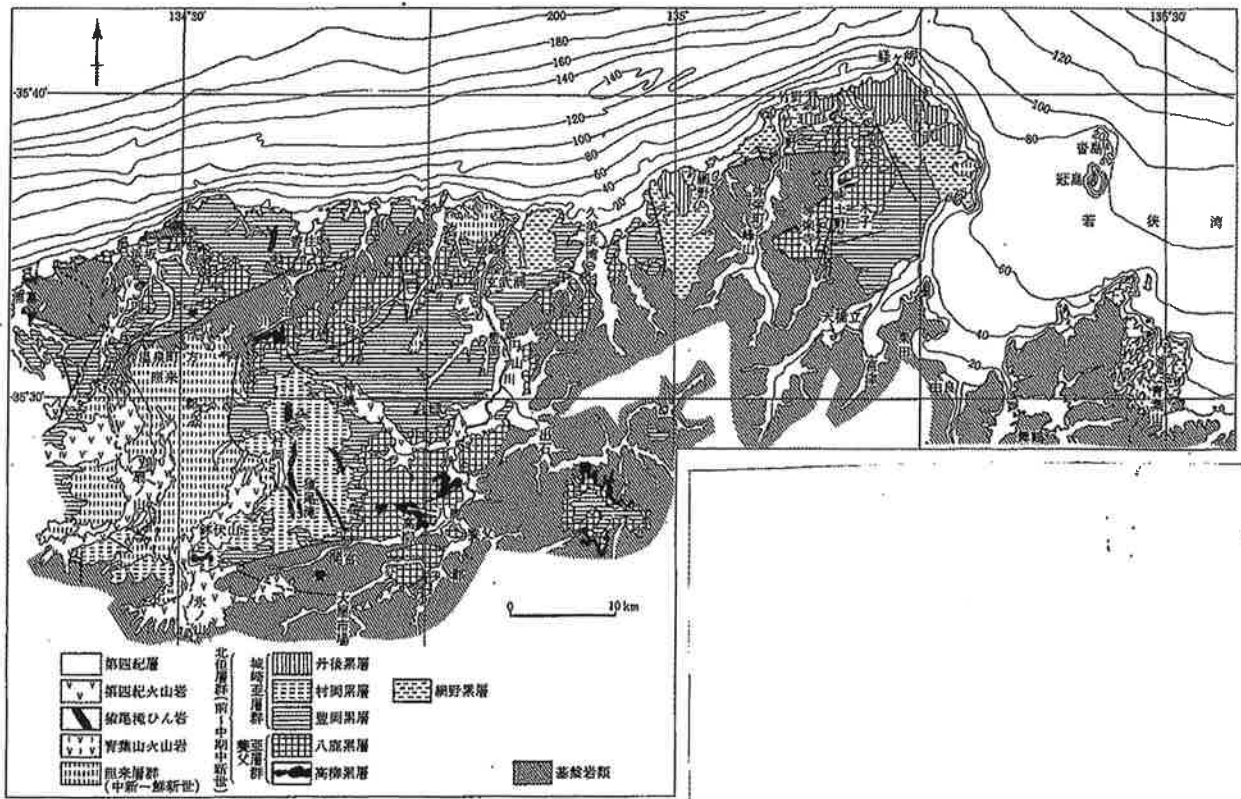


図-3. 2 近畿地方の山陰北陸区の新第三系(中沢ほか(1992)⁶⁾)

3. 2 北但層群

近畿地方の山陰北陸区の新第三系の地質図を図-3.2に示す。兵庫県北部の但馬地域に分布する中新統を弘原海・松本(1958)⁷⁾は北但層群と命名した。北但層群は、下位から養父亜層群、城崎亜層群に区分される。養父亜層群は下位から高柳累層、八鹿累層に、城崎亜層群は豊岡累層、村岡累層、網野累層および丹後累層に区分される(弘原海ほか1966)⁸⁾。

これまで業務の実施対象としている豊岡市域周辺では豊岡累層が広く分布している。豊岡累層は礫岩・砂岩と酸性の火山岩・凝灰岩を主とし、丹後半島南東部や美方郡付近では、基盤岩を広く多い分布する。

北但層群の堆積年代は、高柳累層においてフィッシュントラック法で23Ma、八鹿累層においてK-Ar法において17.2±4.9Maの年代が得られている(弘原海,1984)⁹⁾。これらの年代は、北但層群が漸新世から中新世にかけての堆積物であることを示唆している。

3. 3 照来層群

照来層群は、近畿地方の山陰北陸区の西端部、兵庫県香美町・新温泉町にまとまって分布し、一部が豊岡市に分布している。本層群は、火山岩類と陸水成層とから構成され、北但層群に不整合に重なる中新世～鮮新世の堆積物である。

照来層群は、高山累層、春来累層、小代累層に3分される。高山累層のフィッシュントラック年代は6.6±1.3Ma、春木累層は5.0±0.9Ma(弘原海,1984)⁹⁾と後期中新世の堆積物と考えられている。

3. 4 大阪層群

大阪層群は、神戸層群を不整合に覆う地層で、六甲山麓地域、北摂山地、三田平野ならびに六甲山地南側の神戸市街地区と西神地区の高塚山撓曲の西側、六甲山地の東部を中心とした西宮周辺域に広く分布する。主に砂・砂礫層より構成されるが、海成粘土層、火山灰層を挟在し、これらは重要な鍵層となっている。これらの主となる層序を表-3.3に示した。

藤田・笠間(1983)⁴⁾は、大阪層群をマッピングユニットとして、上部亜層群、中部亜層群、下部亜層群に分けた。上部亜層群と中部亜層群の境界には海性粘土層Ma5とMa6の間においた。中部亜層群と下部亜層群の境界は、Ma0を目安に考えたが、Ma0が存在しないところでは、Ma1あるいは火山灰層(ピンク、イエロー火山灰)、ないしは植物遺体に着目して不整合に留意しながらの分類としている(以下本文では上位、中位、下位と略称)。

表-3.3 大阪層群に関する層序区分・年代・化石・地殻変動及び海水準変動の総括表³⁾

地質時代	地層区分	年代(万年)	内湾性粘土	火山灰層	F.T.年代(100万年)	古地磁気編年	化石	海水面変動	地殻変動	[地層]地 形				
第 四 紀	沖積層	0						気候性海水面変動	断層地塊運動	沖積平野 低位段丘 中位段丘 [西八木層] 高位段丘				
		上部洪積層	Ma12 Ma11 Ma10			Blake	ナウマン象							
	中期更新世	大阪層群 上部	50	Ma9 Ma8	カスリ	0.37±0.04 0.38±0.03	ブリュン正磁極期	アデタ マチカネワニ	第二次平均海水準上昇	満池谷不整合	[明美累層] (山地上昇)			
			Ma7 Ma6	サクラ		Biwa I Biwa II Biwa III	ラリックス							
			Ma5 Ma4	八丁池										
			Ma3	アズキ	0.87±0.07		(フナ帯)	メタセコイア 上限						
			Ma2	覚明池 ピンク	1.1±0.1	(ハラミロ イベント)								
			Ma1	イエロー グレー	1.2±0.2									
			Ma0					松山逆磁極期						
	前期更新世	大阪層群 中部 亜層群	100						第一次平均海水準上昇	基盤褶曲運動(東西圧縮)	丘陵背面 [大地形枠組 完成]			
	鮮新世	大阪層群 下部 亜層群	150							芝の不整合	六甲準平原			
新第三紀		200							換曲運動(南北圧縮)	中国準平原				
		250		島熊山	2.4±0.3		正磁極期							

4. 地形特性

神戸市地域に分布する神戸層群の特性を、10mメッシュにおいて整理した。対象地域において、神戸層群は、空間分布として北神地域と、西神地域に分けることができる。これらの分布を5°区分別にその頻度(メッシュ数)として図-4.1に示した。いずれも5°以下の低角のものにおいて徐々に角度が大きくなるほど数が増え北神地域では20°~25°をピークに増加し、25°~30°において減少し、その後は急激に数が減る。西神地区では、25°~30°をピークとして、30°~35°においてやや減少し、その後急激に数が減る傾向がある。北神地区と西神地区を比較すると、全体に西神地区のほうが急傾斜である傾向が認められる。

北神地区では、神戸層群においてケスタ地形が指摘される中、その傾向は認められていない。

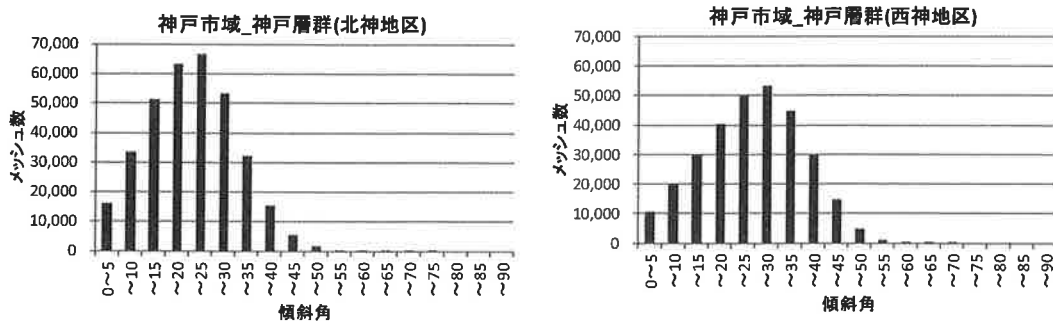


図-4.1 神戸層群分布地域における傾斜角の頻度分布図

神戸地域に分布する大阪層群の地形的特性を神戸層群と同様にまとめた。大阪層群は層序に従い下部、中部、上部の3つに分けることとした。それらを図-4.2に示した。下部では、5°以下の低角のものが分布するほか、15°~25°にかけて分布が急に多くなる。そして30°~35°の分布が最も多くなり、その後急激に高角度の分布は減少する。中部でも5°以下のものが分布し、20°~25°にピークがあり、その後減少する。

上部では、中下部同様5°以下の低角のものが分布し、20°~25°にピークがあり25°~30°でやや低減し、その後減少する。

下部層では35°以上の地形が急激に減少するのに対し、上位の中部層、上部層では30°以上の地形が徐々に減少する傾向を示している。

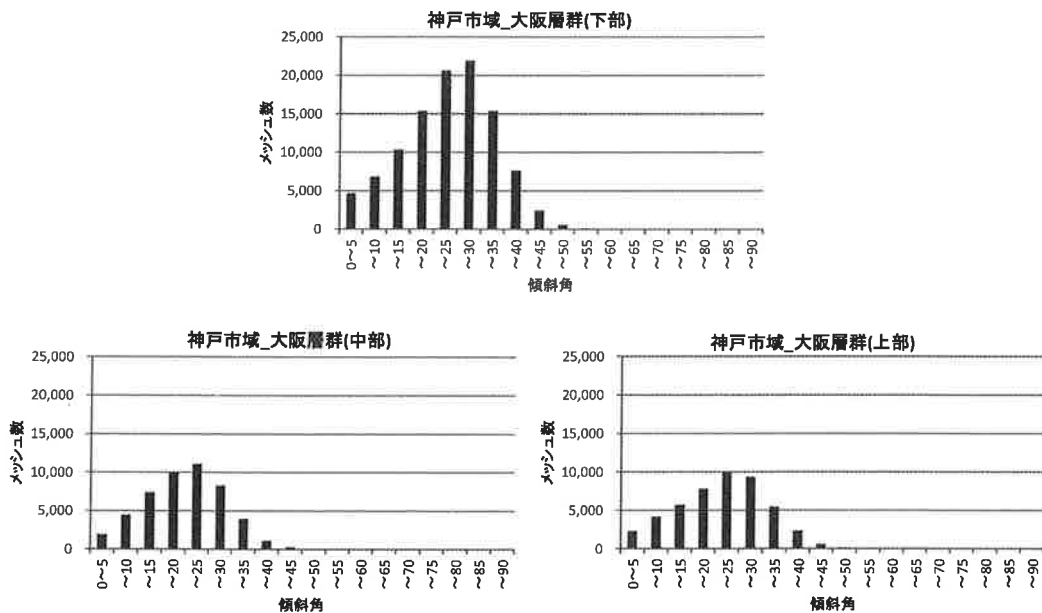


図-4.2 大阪層群分布地域における傾斜角の頻度分布図(10mメッシュ)

豊岡市域のシステム構築にあたって、市内に分布する北但層群を平成16年10月台風23号災害時の土砂災害が集中的に発生している「集中地域」と、それ以外の「集中箇所外」に区別している(図-4.3)。これら北但層群の2分類について、傾斜角の頻度分布図を図-4.4に示す。10°未満勾配の地形も認められ、20°以上になると急激に頻度が増加し、35°~40°においてピークを示す。その後45°以上の地形勾配は急激に分布頻度が減少する。両者はやや分布頻度の傾向が異なっている。特に集中箇所は、地形勾配が角度に伴い15°以上において低勾配で増加する傾向を示す。

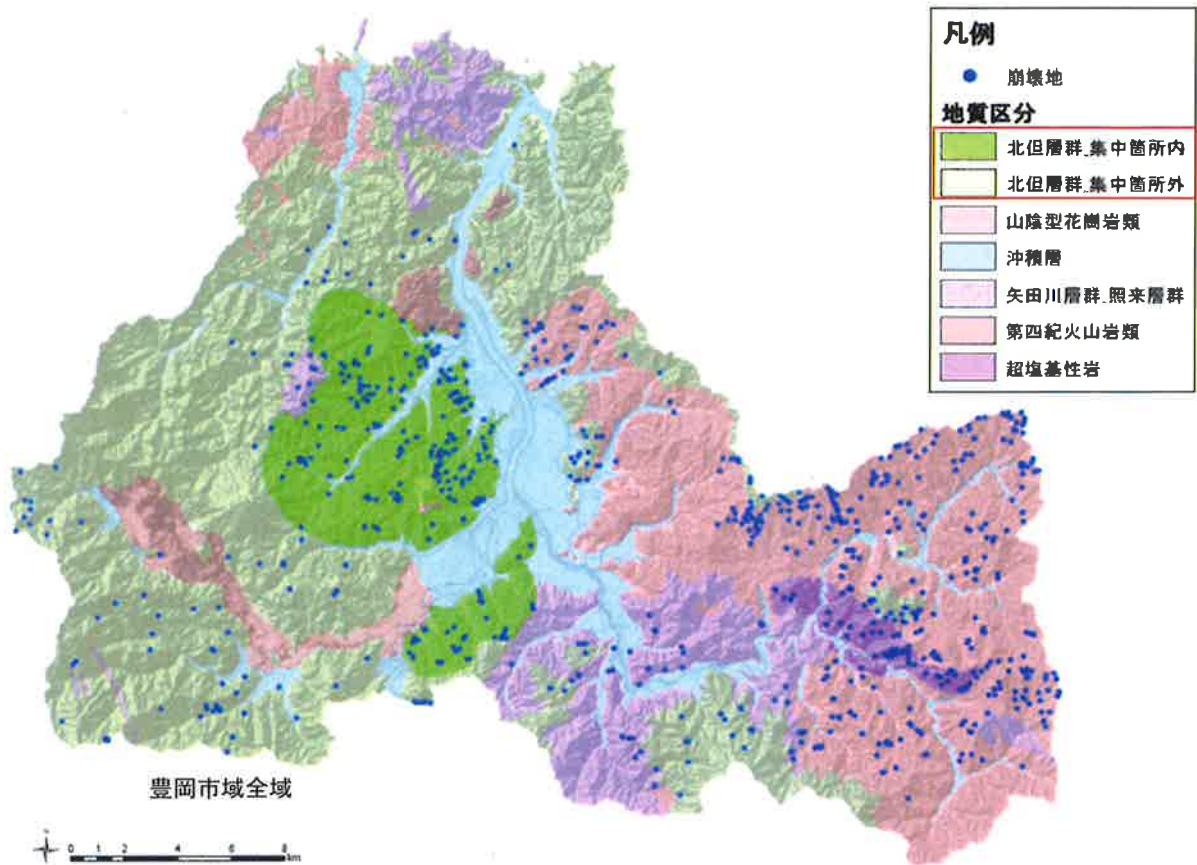


図-4.3 豊岡市域における地質区分図と平成16年災害時の崩壊地分布状況

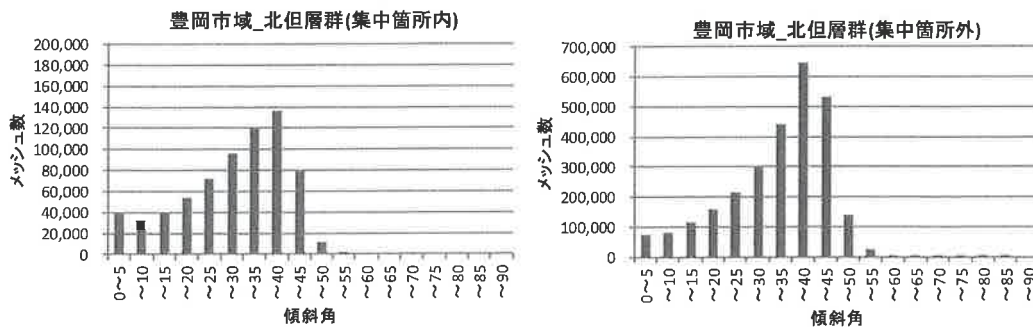


図-4.4 北但層群(豊岡地域)における傾斜角の頻度分布図(10mメッシュ)

図-4.5には、豊岡市に分布する照来層群について、DEMによる10mメッシュの地形勾配の分布頻度を示した。その傾向は、北但層群の傾向に類似し、30°~40°の頻度が多い傾向を示す。傾斜角が15°以上に漸増し、35°~45°にピークがあり、45°~50°において激減する。

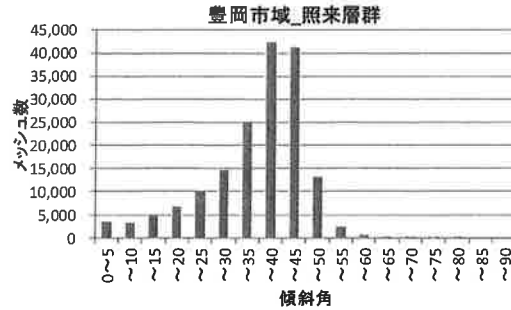


図-4. 5 豊岡市における照来層群分布地域の傾斜角の頻度分布図 (10mメッシュ)

5. 崩壊地の特性

5. 1 神戸層群の崩壊地特性

神戸層群の崩壊については、昭和42年7月豪雨による神戸市域において崩壊が多く発生したことから、これらの崩壊を対象としてその特性を整理した。予測モデルの精度検証計算においては、メッシュサイズより面積の小さい100m²未満の崩壊地については、検証の対象外としているが、本検討では崩壊地の特性の把握を目的とするため、面積が100m²未満の崩壊地についても検討の対象とした。

神戸層群における北神地区および西神地区の崩壊地の分布状況を図-5. 1に示す。神戸市域全体では、花崗岩分布エリアで集中的に崩壊が発生しているが、神戸層群においても低密度に崩壊が発生している。

北神地区および西神地区の崩壊面積を図-5. 2に示す。崩壊面積は北神地区で137.7m²、西神地区で101.8m²となっており、両地区とも100m²を若干超える程度の比較的小さい崩壊規模となっている。

傾斜角別のメッシュ数の関係として北神・西神地区別に図-5. 3に示した。まず北神地区では、15°~20°の傾斜にはじまり、25~30°をピークとして50°~55°の範囲にまで分布する。一方西神地域は、同じく15°~20°に始まり、30°~35°をピークとして急激に減少する。西神地域の方が急傾斜地において崩壊する傾向がある。

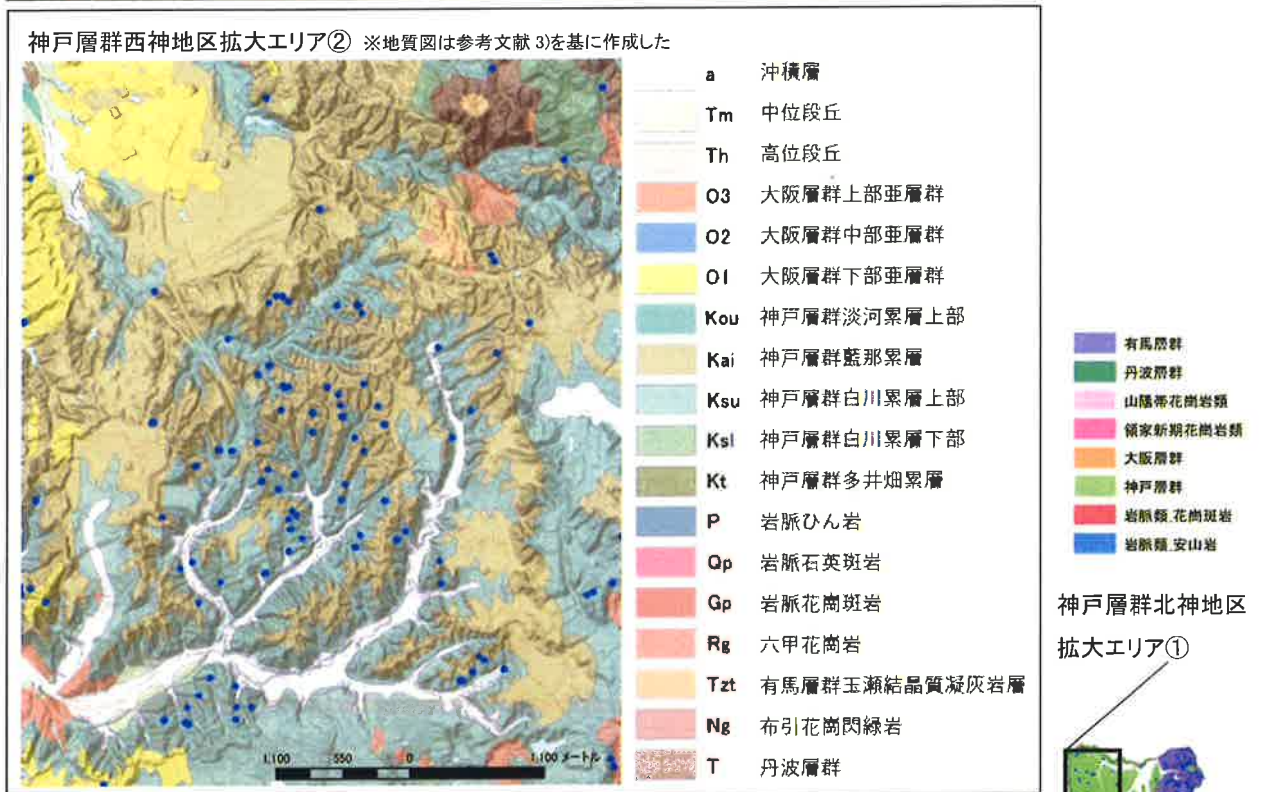
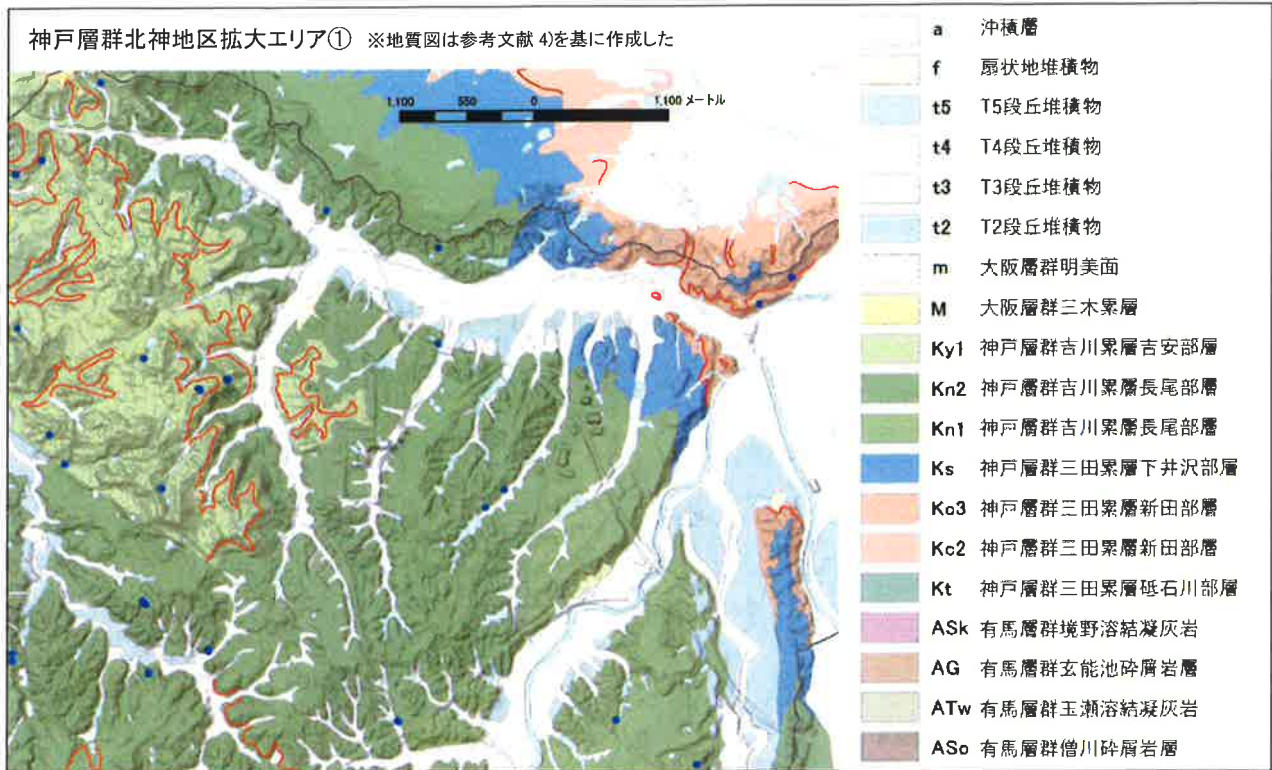
一方平面的な分布をみると、東側斜面に集中していることが明らかである。図-5. 4には地域別に見た、斜面に対する崩壊の方向について分類した。斜面方位は、10mメッシュより算出し、崩壊地の中心地点における方位とした。斜面崩壊方位は、北神地区において南東~南~南西への傾向があり、西神地区においても同様に南東~南~南西への崩壊傾向がある。これはこれまで既往文献で言われてきた傾向とは少し異なった現象傾向となっている。

図-5. 5には神戸層群の崩壊地傾斜角別崩壊密度を示した。傾斜角度が大きくなるほど頻度が大きくなる傾向が認められる。北神地区では50°~55°、西神地区では55°~60°の傾斜において崩壊密度が高くなっている。

次に崩壊地の集水面積を求め、図-5. 6に示した。これは10mメッシュによる崩壊地の中心地点の集水メッシュ数から、集水面積を算出した。北神地区、西神地区ともに、9割以上が集水面積500m²未満の斜面上部で発生している。

なお、神戸層群での崩壊パターンは、崩壊する位置により3つのタイプに分類することが可能性である。Aタイプ：遷急線タイプ、B、背後凹地タイプ C、斜面中下部タイプの3タイプである(表-5. 1)。

モデルの精度検証計算結果より、既往の崩壊地の計算結果による捕捉状況を図-5. 7に示す。捕捉状況は、図-5. 1の北神地区および西神地区の拡大範囲を代表エリアとして、拡大範囲内に発生している崩壊地の崩壊パターンを分類し、予測モデルの捕捉状況を整理した。北神地区のAタイプでは崩壊全体6箇所のうち捕捉できたのは0箇所(0%)、Bタイプは崩壊全体6箇所のうち捕捉できたのは1箇所(16.7%)、Cタイプは崩壊全体8箇所のうち捕捉できたのは0箇所(0%)となっており、非常に低い捕捉状況である。西神地区のAタイプは崩壊全体の崩壊全体36箇所のうち捕捉できたのは13箇所(36.1%)、Bタイプは崩壊全体34箇所のうち捕捉できたのは8箇所(38.1%)、Cタイプは崩壊全体11箇所のうち捕捉できたのは5箇所(45.5%)であり、北神地区より高いものの、3~4割程度に留まっている。



神戸層群西神地区拡大エリア②

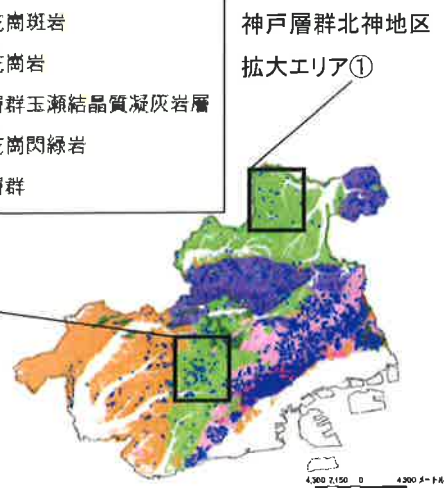


図-5. 1 昭和42年災害における神戸層群分布域の崩壊発生状況

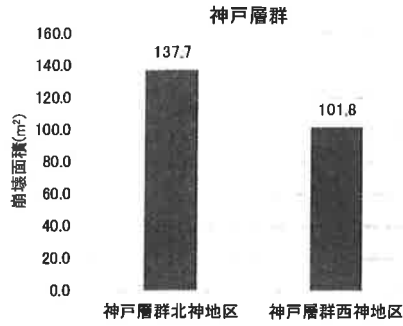


図-5.2 神戸層群における崩壊地の平均面積

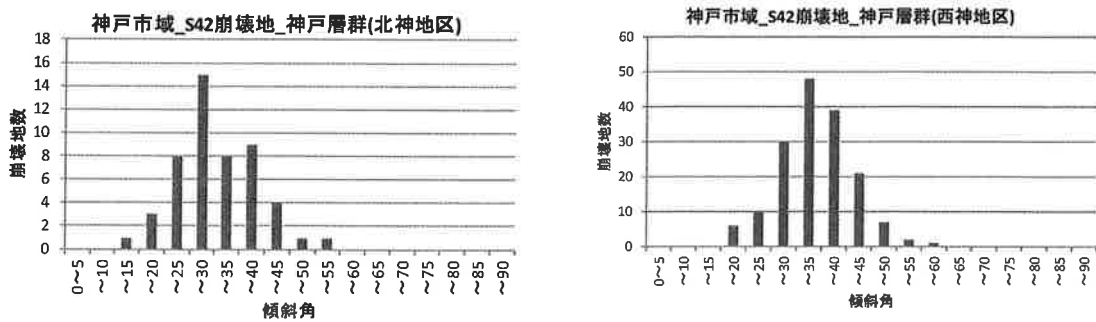


図-5.3 神戸層群の崩壊地の傾斜角とその頻度

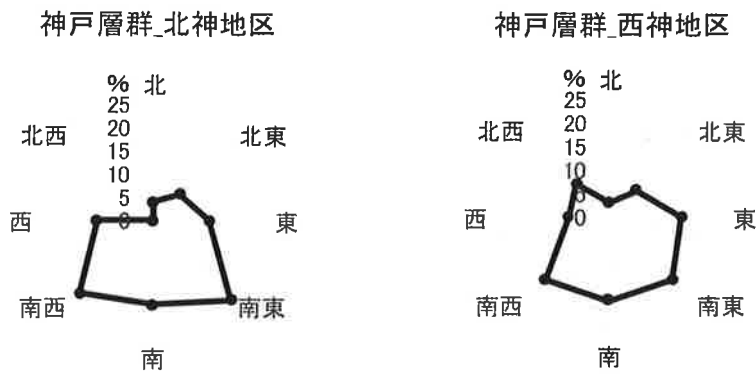


図-5.4 神戸層群における崩壊の向き

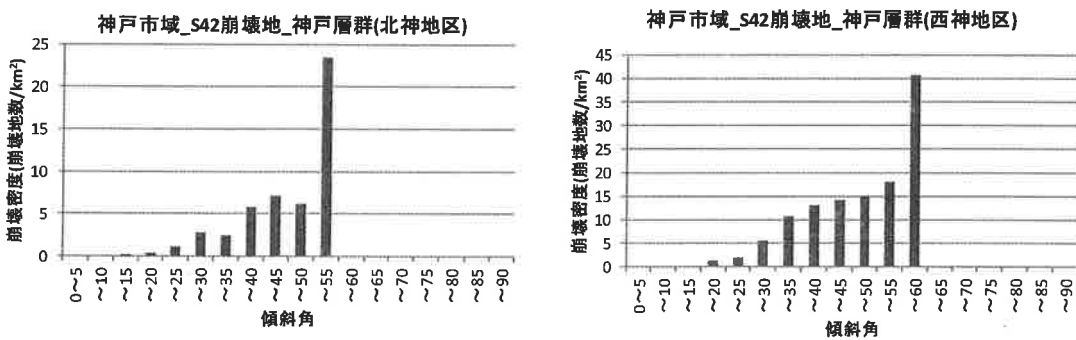


図-5.5 神戸層群の崩壊地の傾斜角別の崩壊密度

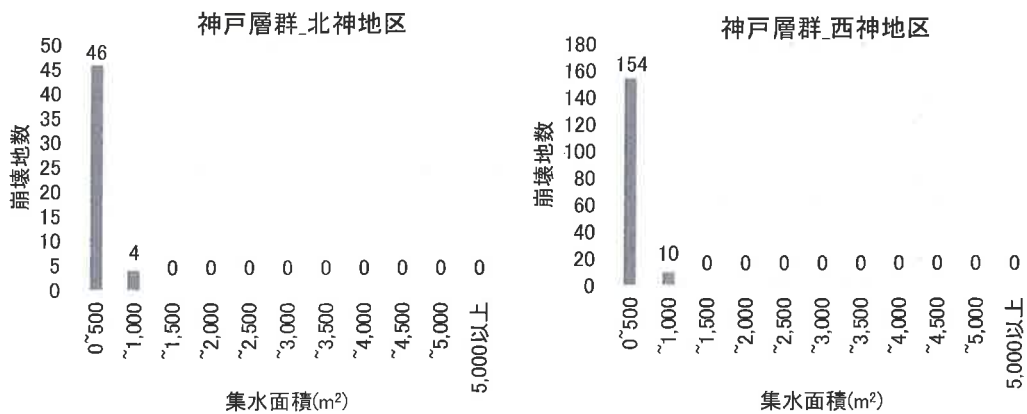


図-5.6 神戸層群の崩壊地の集水面積

表-5.1 神戸層群の崩壊タイプ

【Aタイプ】遷急線部崩壊型	【Bタイプ】背後凹地型	【Cタイプ】斜面中・下部崩壊型

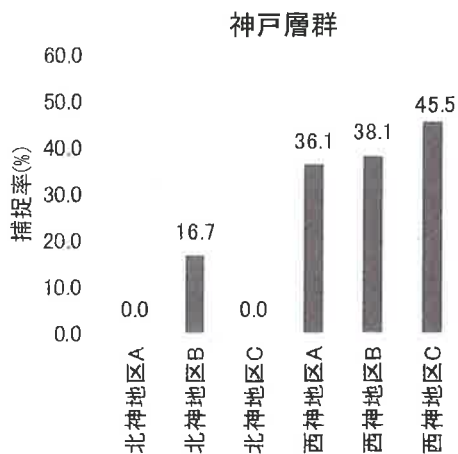


図-5.7 神戸層群の崩壊タイプごとの捕捉率

5. 2 大阪層群の崩壊特性

大阪層群の崩壊については、神戸層群と同じく昭和42年7月豪雨による神戸市域において崩壊が多く発生したことから、これらの崩壊を対象としてその特性を整理した。大坂層群においても神戸層群と同様に、予測モデルの精度検証計算においては、メッシュサイズより面積の小さい100m²未満の崩壊地については、検証の対象外としているが、本検討では崩壊地の特性の把握を目的とするため、面積が100m²未満の崩壊地についても検討の対象とした。大阪層群の崩壊特性は、下部亜層群ならびに中部・上部亜層群に分けて示した。

大阪層群の崩壊特性は、下部亜層群ならびに中部・上部亜層群崩壊地の分布状況を図-5.8に示す。花崗岩分布エリアと比較すると、低密度に崩壊が発生している。

崩壊地の平均面積を図-5.9に示す。崩壊面積は下部亜層群で94.2m²、中部・上部亜層群で83.9m²となっており、両地区とも100m²未満の比較的小さい崩壊規模となっている。

崩壊地の傾斜角の頻度分布を図-5.10に示す。下部亜層群は、30°～45°の傾斜角に崩壊が集中している一方、中部・上部亜層群は、30～40°に集中している。また15°～25°の低角度の崩壊も認められる。

図-5.11には地域別に見た、斜面に対する崩壊の方向について分類した。下部亜層群において斜面崩壊方位は、北東から東への傾向があるが、中部・上部亜層群では東への崩壊傾向がある。

図-5.12には大阪層群の崩壊地傾斜角別崩壊密度を示した。傾斜角度が大きくなるほど頻度が大きくなる傾向が認められる。下部亜層群では35°～40°、中部・上部亜層群では30°～35°の傾斜において崩壊確率が高くなっている。

次に、崩壊地の集水面積をみると(図-5.13)、下部亜層群、中部・上部亜層群ともに、9割程度が集水面積500m²未満の斜面上部で発生している。

なお崩壊パターンは、崩壊する位置により2つのタイプが認められる(表-5.2)。タイプA：遷急線タイプ、タイプB：斜面中・下部崩壊タイプの2タイプであり、神戸層群のような背後凹型はみられない。これは、大阪層群の方が神戸層群と比較し、起伏量が小さく斜面規模が小さいため、斜面の背後に凹型地形の発達がみられないためと思われる。

モデルの精度検証計算結果より、既往の崩壊地の計算結果による捕捉状況を図-5.14に示す。捕捉状況は、図-5.8の下部および中部・上部亜層群の拡大範囲を代表エリアとして、拡大範囲内に発生している崩壊地の崩壊パターンを分類し、予測モデルの捕捉状況を整理した。中部・上部亜層群のAタイプでは崩壊全体13箇所のうち捕捉できたのは0箇所(0%)、Bタイプは崩壊全体6箇所のうち捕捉できたのは0箇所(0%)、非常に低い捕捉状況である。下部亜層群のAタイプは崩壊全体34箇所のうち捕捉できたのは6箇所(17.6%)、Bタイプは崩壊全体12箇所のうち捕捉できたのは2箇所(16.7%)である。

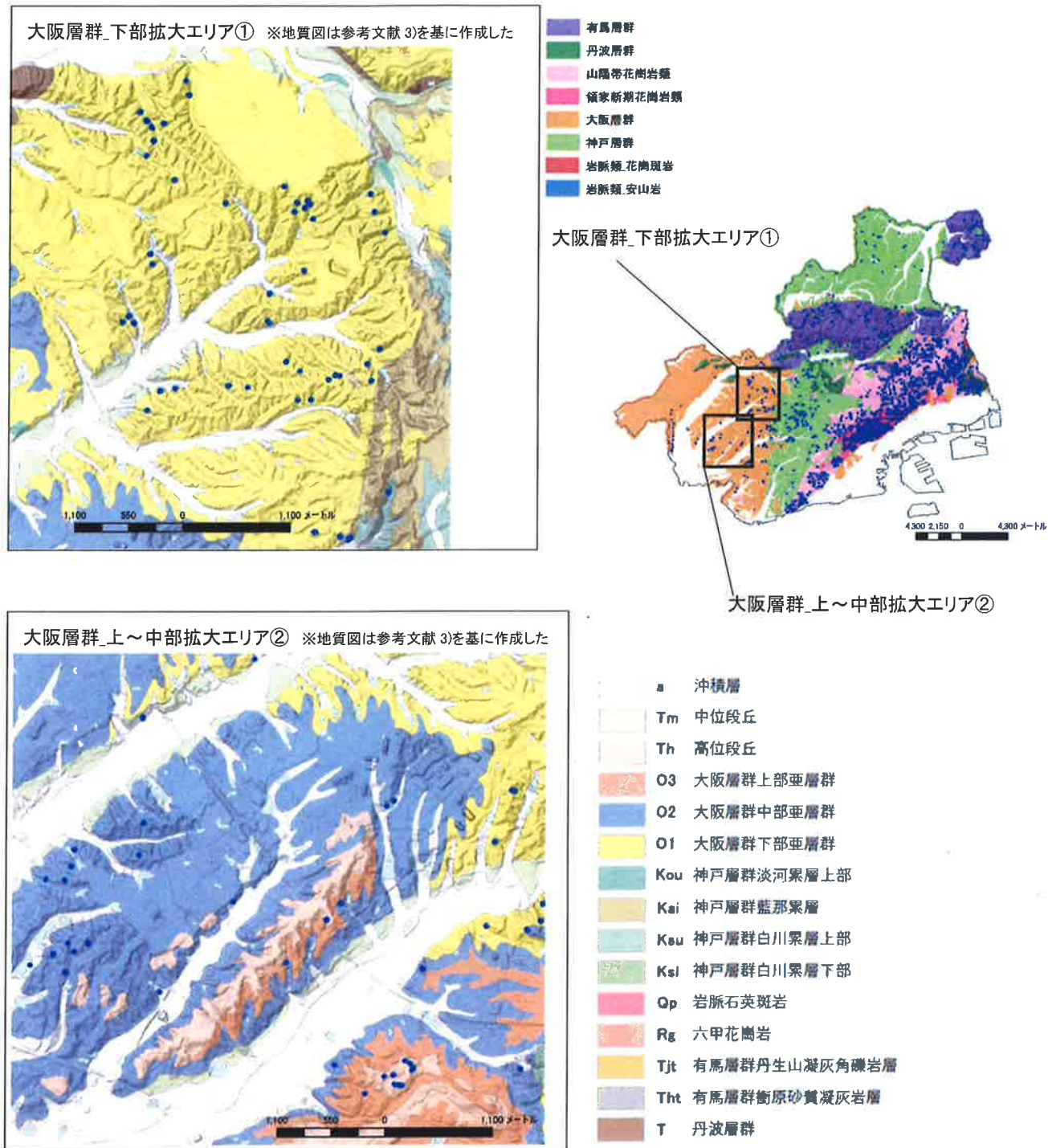


図-5. 8 昭和42年災害における大阪層群分布域の崩壊発生状況

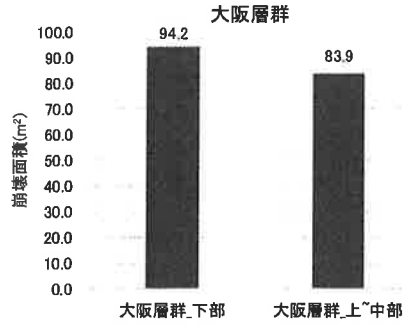


図-5. 9 昭和42年災害における大阪層群の崩壊地面積

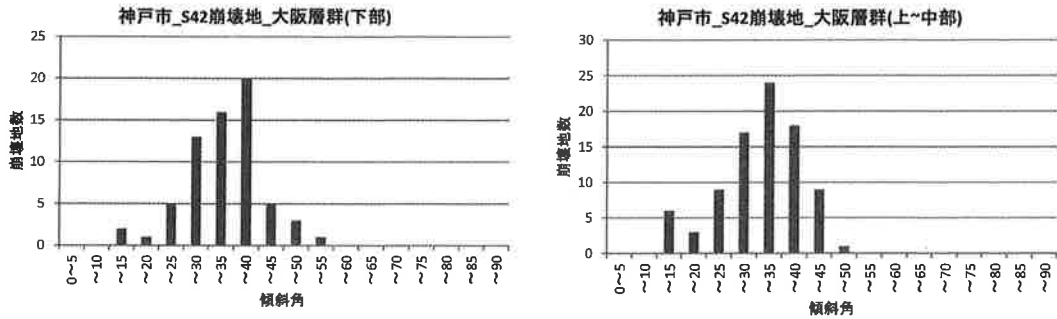


図-5. 10 大阪層群分布地域の崩壊傾斜角と頻度分布

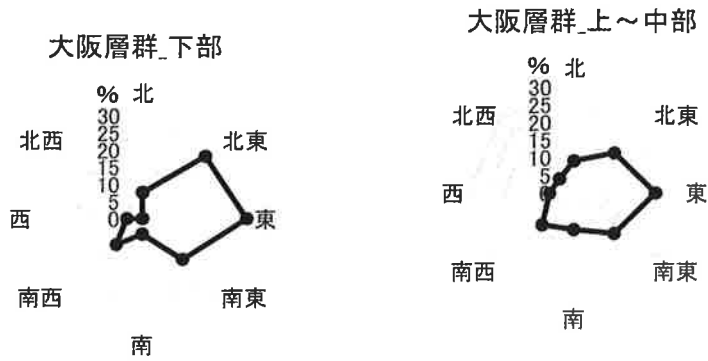


図-5. 11 昭和42年災害における崩壊の向き(大阪層群)

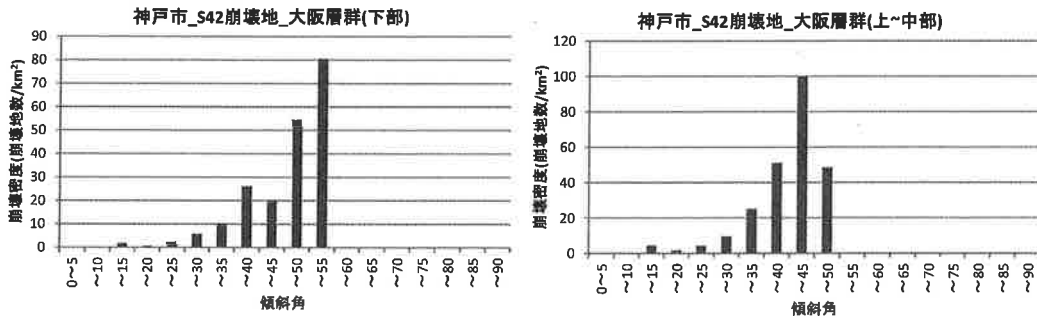


図-5. 12 大阪層群の崩壊地の傾斜角別の崩壊密度

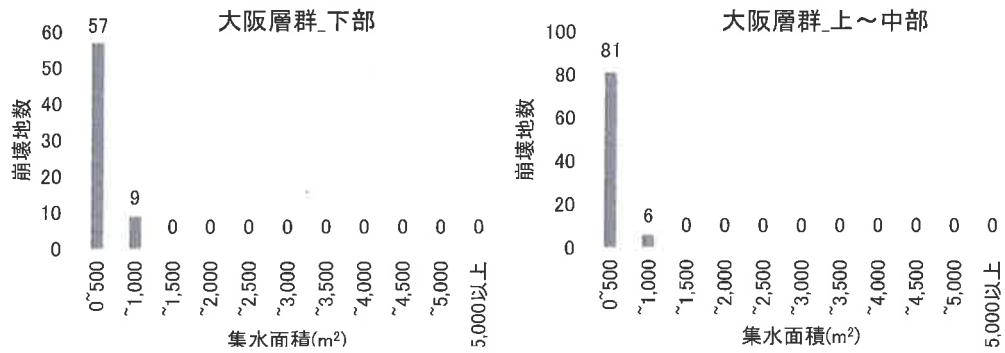
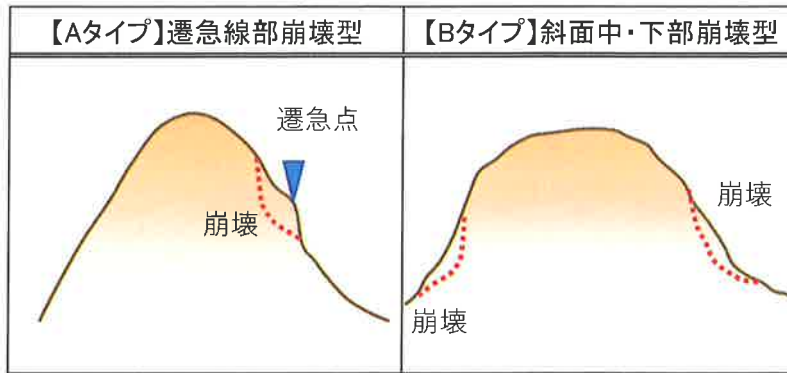


図-5. 13 大阪層群の崩壊地の集水面積

表-5. 2 大阪層群の崩壊タイプ



大阪層群

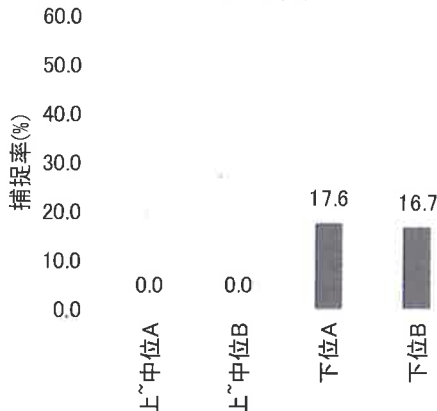


図-5. 14 大阪層群の崩壊タイプごとの捕捉率

5. 3 北但層群の崩壊特性

北但層群の崩壊については、平成16年10月台風10号による神戸市域において崩壊が多く発生したことから、これらの崩壊を対象としてその特性を整理した。北但層群では、豊岡累層に崩壊が集中し、上下に位置する村岡累層、八鹿累層では崩壊が分散している傾向がある。

崩壊地の平均面積を図-5. 15に示す。崩壊面積は集中箇所内で1407.3m²、集中箇所外で1678.1m²となっており、1000m²を超える比較的大きな崩壊規模となっている。

豊岡市域における北但層群の崩壊地の傾斜角分布を図-5. 16に示した。傾斜角は35°~45°に卓越していることが明らかである。これは一般的な地形の勾配が35°~40°にピークがありこの頻度とほぼ傾向と一致している。崩壊集中箇所外と箇所内を比較しても傾向に差はないことが明らかである。

図-5. 17には地域別に見た、斜面に対する崩壊の方向について分類した。集中箇所内において斜面崩壊方位は、顕著な傾向はみられないが、集中箇所外では南東から南への崩壊傾向がある。

図-5. 18には北但層群の崩壊地傾斜角別崩壊密度を示した。角度の増加とともに崩壊地の密度が大きくなる傾向がある。特に45°～55°の範囲において崩壊が顕著であることが明らかである。

次に、崩壊地の集水面積をみると(図-5. 19)、集中箇所内・外ともに、半数程度が集水面積 500m²未満の斜面上部で発生しているが、1000m²以上で発生している崩壊も存在している。

モデルの精度検証計算結果より、既往の崩壊地の計算結果による捕捉状況を見ると(図-5. 20)、集中箇所内91.3%は、集中箇所外は73.8%となっており、前述の神戸層群や大阪層群と比較して、高い捕捉状況となっている。このような高い捕捉状況となっている理由としては、北但層群の方が、傾斜が急であり、斜面規模も大きく、集水面積が大きい斜面の中部から下部で崩壊が発生しており、予測モデル上も地下水位が上昇しやすく、安全率が小さくなりやすいことが挙げられる。また、北但層群の集中箇所内では、北但層群の各層序のうち、地下水を通しにくい豊岡累層の泥岩および細粒凝灰岩からなる難透水層が分布している。この難透水層の分布域周辺において崩壊地が分布していることから、難透水層によって地下水が導水され、崩壊の誘因になっていると考えられた。そのため文献資料などから凝灰岩・凝灰岩質泥岩の分布や物性値を調査し、難透水層の分布エリアの透水係数を標準値より低減させた(図-5. 21)。また既存の地下水位算定モデルでは、各セルの地下水位は水が流れ込む方向、流れ出る方向とも一律の透水係数を適用するモデルであった。そのため、難透水層に該当するセルから隣接するセルに地下水が流れ出る方向のみ透水係数を低減させるモデルに改良した。上記の2点から、捕捉状況が高くなったと考察される。

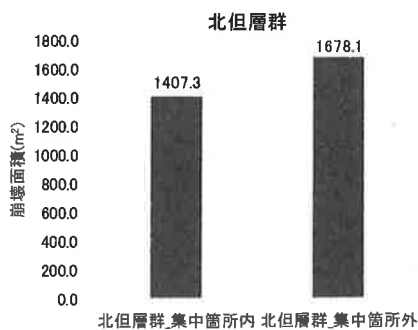


図-5. 15 平成16年災害における北但層群の崩壊地の平均面積

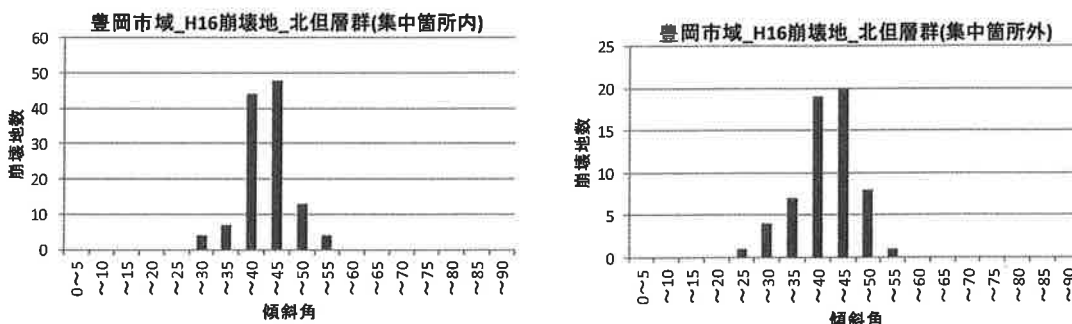


図-5. 16 北但層群分布地域(豊岡市)における崩壊地の傾斜角別頻度分布

北但層群_集中箇所内 北但層群_集中箇所外

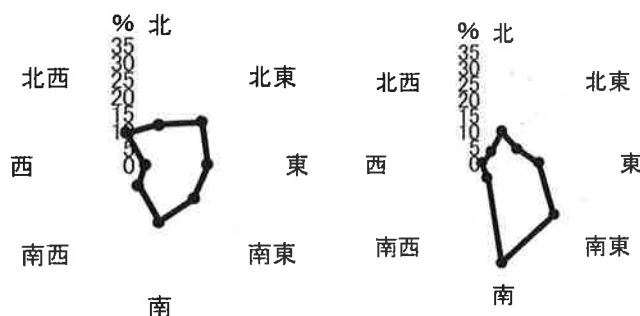


図-5. 17 昭和42年災害における崩壊の向き(北但層群)

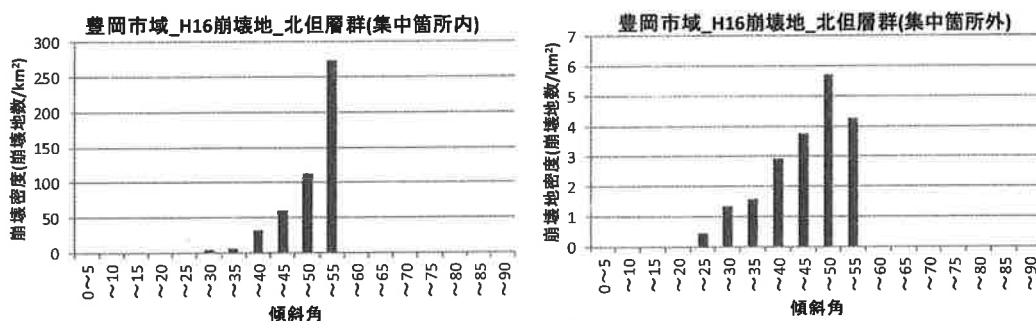


図-5. 18 北但層群分布地域における崩壊地の密度

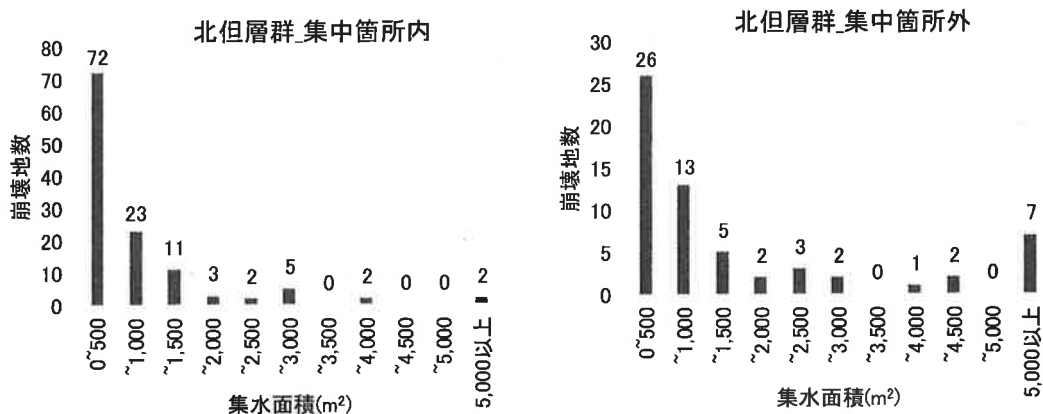


図-5. 19 北但層群の崩壊地の集水面積

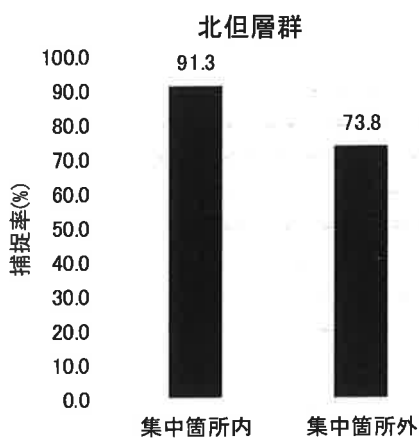


図-5. 20 北但層群の崩壊タイプごとの捕捉率

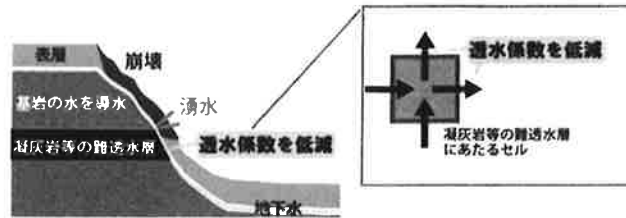


図-5.21 難透水層に起因する崩壊と透水係数を変更する難透水層のイメージ

6. 地層別の崩壊特性とその原因

6.1 神戸層群

神戸層群の崩壊は、発生位置と背後の地形的な特徴から3つのタイプ（遷急線崩壊型、背後凹地型、斜面中下部崩壊型）に区別された。

遷急線崩壊型は断面形態の遷急点を含めた背後が崩壊するタイプであり浸食前線に位置する箇所が崩壊するタイプである。神戸層群の地層の受け盤地域で発生が多く、固結した凝灰岩・礫岩の岩塊と土砂状の砂・粘土が混在した堆積物となる。これは後退する浸食前線の進行に伴い緩みが背後におよび強度低下していることが素因として考えられる。

次に背後地形凹地型は、レベルバンク同様背後からの地下水の供給が予想され、浸透してくる地下水が遷急線型に比べて多く、間隙水圧の上昇が大きいことが予想される。崩壊位置のレベルが背後地形のレベルに等しいことが大きな特徴である。

斜面中下部崩壊型は、降雨浸透型の崩壊であり風化～強風化した地盤が地下水の浸透により、崩壊を生じる。傾向として、凝灰質粘土を主とした流動型地すべり状の崩壊を示すことがある。

6.2 大阪層群

大阪層群の崩壊は、神戸層群同様発生位置より2つのタイプ（遷急線崩壊型、斜面中下部崩壊型）に分けられる。大阪層群は地形が、台地状、尾根状地形を示し、崩壊はその両翼で発生することが多い。遷急線崩壊タイプは、遷急線を含めた上方で発生する。斜面中下部崩壊型は、最も降雨が浸透し、地下水の上昇しやすい中下腹部において、強度の低下した地盤が崩壊する。

7. システムの判定状況との差異とモデル改良方法の検討

地質ごとの崩壊特性とシステムにおける判定状況について、表-7.1に整理した。神戸層群、大阪層群と北但層群を比較すると、神戸層群、大阪層群では、崩壊規模が小さく、傾斜が緩やかで、集水面積が小さい傾向がある。傾斜が緩やかであると、斜面安定解析による安全率が高くなり、また集水面積が小さいと地下水位が上昇しないため、結果として安全率が高くなり、モデル精度検証計算による過去の崩壊地のシステムの捕捉率が低くなる。

前述の通り、神戸層群は砂岩、礫岩、泥岩と複数の凝灰岩層からなっており、大阪層群は砂層、礫層に海成粘土層や火山灰層を挟んでいる。これら層状の地質構造を起因とした局所的な強度低下や異なる透水性により崩壊が発生していると考えられる。システムの予測精度の向上を目的として、これらの特性をモデルへの組み込みを試行した。

モデル改良方法は以下の3案である。

①難透水層の設定

局所的に分布している泥岩や粘土層によって地下水位が上昇し、崩壊が発生する機構を想定し、モデルに難透水層を設定した。比較的傾斜が急である砂岩や礫岩とやや緩やかな泥岩の境界で透水性の違いから地下水が上昇していると仮

表-7.1 崩壊特性とシステムの判定状況

地質		神戸層群・ 大阪層群	北但層群
崩壊特性	崩壊規模	小	大
	傾斜	緩	急
	集水面積	小	大
システムの判定状況		低捕捉率	高捕捉率

定し、遷緩線上のメッシュの透水係数を低減させた。既往の難透水層の検討から、透水係数は基準値の1/4とした。

②有効粘着力 c の低下

ゆるみが発生し、地盤の強度低下が生じて、崩壊が発生する機構を想定し、モデルの有効粘着力 c を基準値から低減させた。既往の検討から、有効粘着力 c の基準値から1低減させた。ゆるみの発生領域については、発生領域の特定が困難であるため、神戸層群と大阪層群全域を対象とし、モデルの有効粘着力 c を基準値から低減させた。

③表土層厚

風化が進行し、表土層厚が厚くなり、崩壊が発生する機構を想定し、モデルの層厚式を変更した。現地調査結果より、最大で現況の層厚式より0.5m厚く設定した(図-7.1)。層厚式の変更の対象は、神戸層群と大阪層群全域とした。

以上の3案の試算を行い、その判定結果の抜粋を図-7.2、7.3に示す。

現況のモデルにおける判定状況と比較すると、北神地区では、いずれの改良案でも崩壊地周辺で崩壊判定が出ている。西神地区においても現況モデルでは捕捉できていなかった崩壊地周辺で、改良案では判定が出るようになってきている。ただし、西神地区では改良案については空振り判定も多くなっており、特に粘着力 c を低減させたケースにおいてその傾向が顕著である。

神戸層群や大阪層群において昭和42年に発生した崩壊地の平面図や縦断図を確認すると、多くが遷急線付近で発生していることから、崩壊タイプは遷急線部崩壊型および背後地形凹地型が多いものと思われる。ただし、検討に用いた地形データは崩壊発生後40年以上経過した後を取得されたものであり、崩壊前や崩壊直後の地形は明らかでないため、断定は出来ない。遷急線タイプであれば、相生層群や有馬層群において設定してきた遷急線に沿って粘着力 c を低減させる方法が検討されてきた。この方法は今回の試行②と同様のものであるが、神戸層群や大阪層群では斜面の規模が相対的に小さく、遷急線上では集水面積が少ないため、解析上の地下水位の上昇量が小さく、崩壊判定が出にくい状況となっている。これらの捕捉率を上げるためには、さらに強度を小さくする、あるいは下流側の透水係数を下げる等、さらなる設定の検討が必要である。

また、斜面中部・下部崩壊型では、モデル上の集水面積が小さいながらも、実際には崩壊していることから、難透水層が起因となっている可能性もある。難透水層の設定については、現場透水試験など実際の現地計測結果と照らし合わせて検討する必要がある。

以上の試算結果から、改良案については一定の効果が確認された一方、空振り判定の増加も懸念される。また、図-7.2では、改良案によって崩壊判定が出る位置が若干異なっていた。これら改良案は暫定的な設定方法であるため、実際にモデルへ適応する際には、さらに検討を進めてその特性に応じた設定にする必要がある。

最後に、神戸層群や大阪層群では、起伏量が小さく、10mDEMでは再現できない規模の微地形が要因となって崩壊が発生するケースも考えられる。これについては、メッシュサイズを現行の10mよりも詳細な5m、2m、1mに細分化することによって対応できる可能性がある。メッシュの細分化については、現在神戸市の市街地における土砂災害警戒区域内の判定適正化の検討にて実施しているところであるため、ここでの検討は行わないこととする。

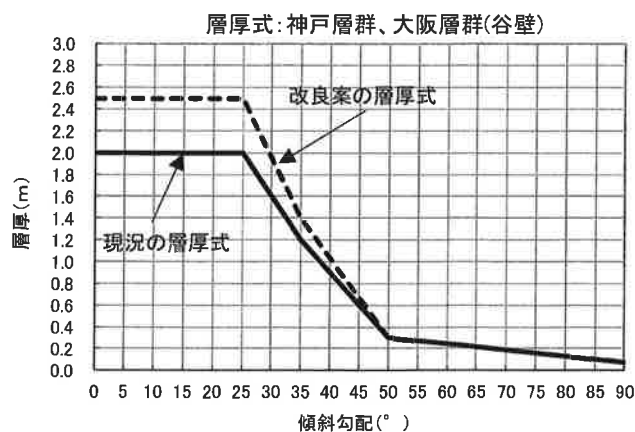
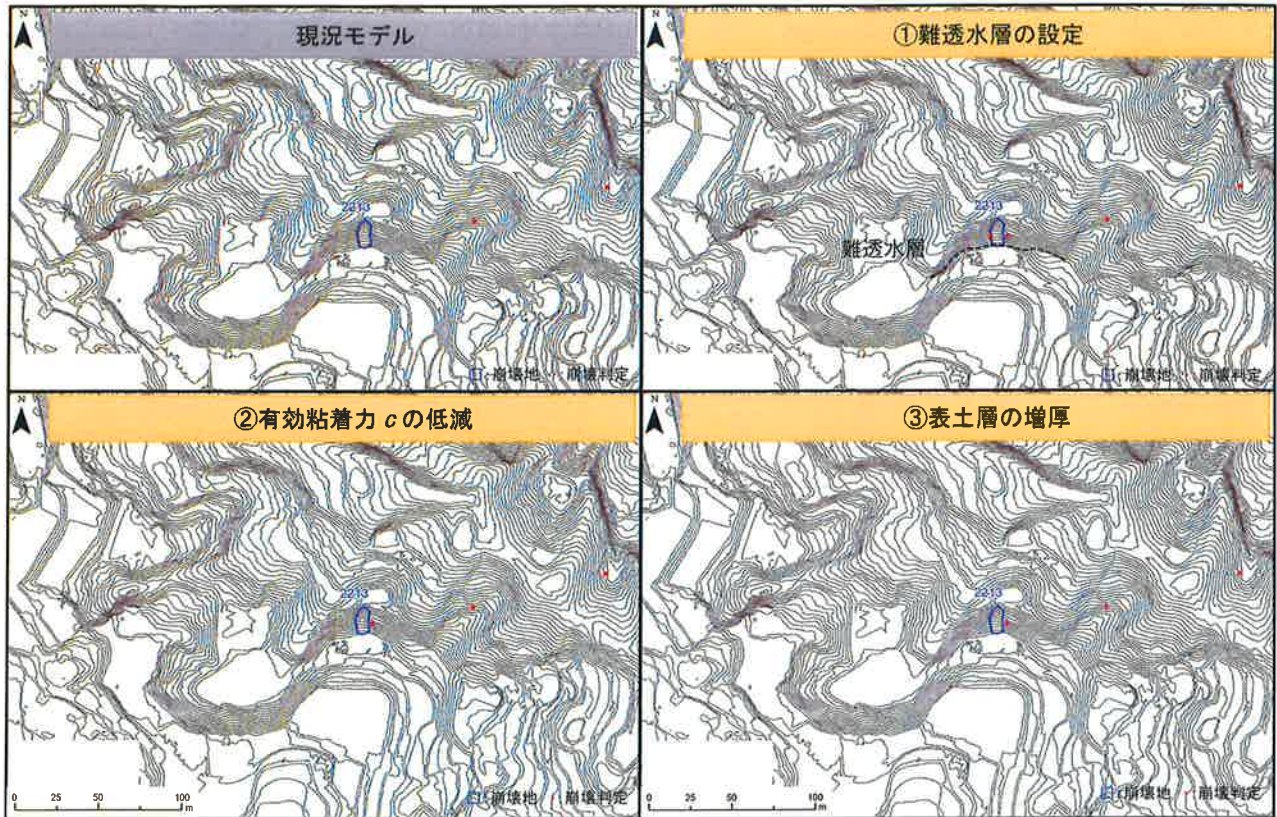
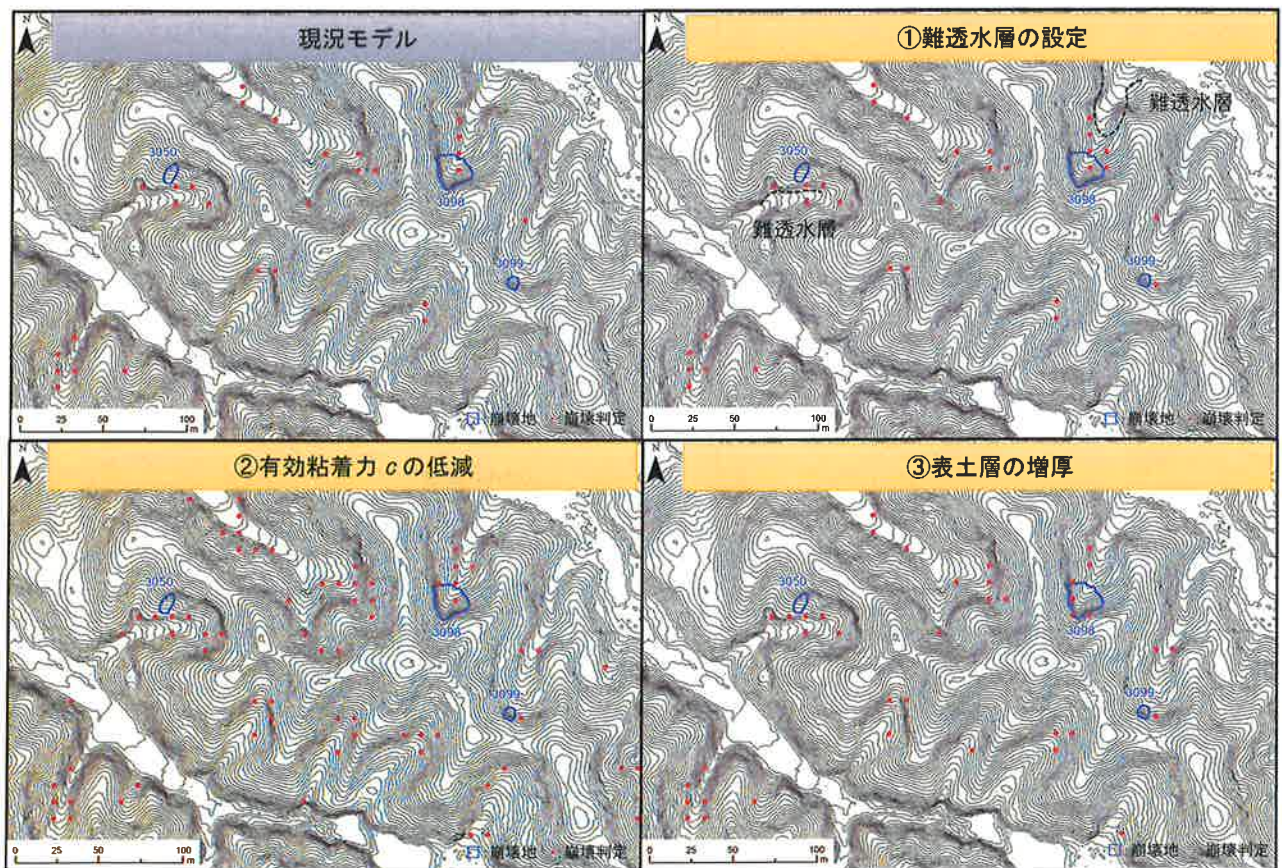


図-7.1 現況モデルと改良案の層厚式



図ー 7. 2 現況モデルと改良案の判定状況(神戸層群北神地区)



図ー 7. 3 現況モデルと改良案の判定状況(神戸層群西神地区)

8. 今後について

本報文では、リアルタイム表層崩壊モデルにおいて、捕捉率が目標に至らない兵庫県下の第三紀堆積岩類について、地形・地質的な特徴をとりまとめ、崩壊特性について示した。第三紀堆積岩類は個々に地形・地質的な特徴を示したが、モデルに利用した降雨パターンは、降雨災害中の1ケースにすぎず、降雨特性の異なる崩壊事例については、今後の課題となる。またモデルを崩壊特性にあてはめる検討では、難透水層の設定、有効粘着力の低減および表土層厚の増厚の試行を行ったが、メッシュのサイズ、難透水層の設定、強度の設定、土砂の層厚も他ケースを検討する必要があり今後の課題としたい。

参 考 文 献

- 1) 沖村孝, 鳥居宣之, 尾崎幸忠, 南部光広, 原口勝則: 豪雨による土砂災害を対象としたリアルタイムハザードシステムの構築, 新砂防, Vol. 63, No. 6, pp4-2, 2011
- 2) 沖村孝, 市川龍平: 数値地形モデルを用いた表層崩壊危険度の予測法, 土木学会論文報告集, 358, pp. 69-75, 1985.
- 3) 兵庫県土木地質図編纂委員会: 兵庫の地質, 兵庫県地質図副説明書・地質編, 236p, 1996
- 4) 藤田和夫, 笠間太郎: 神戸地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1図幅), 地質調査所, 115p, 1983
- 5) 尾崎正紀, 松浦浩久: 三田地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1図幅), 地質調査所, 93 p, 1988
- 6) 中沢圭二, 市川浩一郎, 市原 実: 日本の地質「近畿地方」, 297p, 1987
- 7) 弘原海 清, 松本隆: 北但馬地域の新生界層序: 近畿西北部の新生界の研究(その1), 地質学雑誌, Vol. 64, No. 759, pp625-637, 1958
- 8) 弘原海 清, 池辺展生, 松本 隆, 近畿北部の新第三系の対比—近畿北部の新生界の研究その3—, 松下進教授記念論文集, pp105-116, 1966
- 9) 弘原海 清: 西南日本の基盤構造の発展, 藤田和夫(編著) アジアの変動帯, 海文堂, 東京, pp257-275, 1984

著 者

- 沖村 孝 所員, 理学博士, 地盤工学
 中川 渉 客員研究員, 応用地質株式会社, 博士(工学), 地盤工学
 中尾 直美 応用地質株式会社, 技術士(応用理学部門), 地質学
 伊藤 正美 応用地質株式会社, 技術士(建設部門), 森林水文学
 嵯峨根 朋子 応用地質株式会社, 技術士(建設部門), 地方計画学