

# 地盤力学の理論から実践へー進化する災害に直面してー

三 浦 清 一

(北海道大学大学院 教授/土木学会 副会長)

## 1. はじめに

2011年3月11日14時46分頃、東北を中心とする東日本に未曾有の被害を誘発した大地震が発生した。2011年東北地方太平洋沖地震(M=9.0, 東日本大震災)である。本震の規模も凄まじいものであったが、引続く余震の規模・頻度・期間も今までの地震を遙かに上回るものである。津波被害とともに、地盤の崩壊・劣化に伴う地すべり・建造物の破壊などについて、未だ被災の規模・範囲等が定量化に至らない状況であり、本稿を準備中の現在も被害は進行中である。関東地区の大規模液状化被害のみならず、地盤崩壊の巨大化とともに、地盤工学分野においても新たな破壊形式が具現化している様子を窺い知ることが出来る。

降雨、地震・津波、凍上・凍結などの様々な自然外力により大規模化・多様化してくる地盤災害を地盤力学理論の範疇でどの程度解釈できてきたのか、また実践で活用する際に今後必要とされる研究について、以下概観したいと思います。

## 2. 地盤力学の発展史

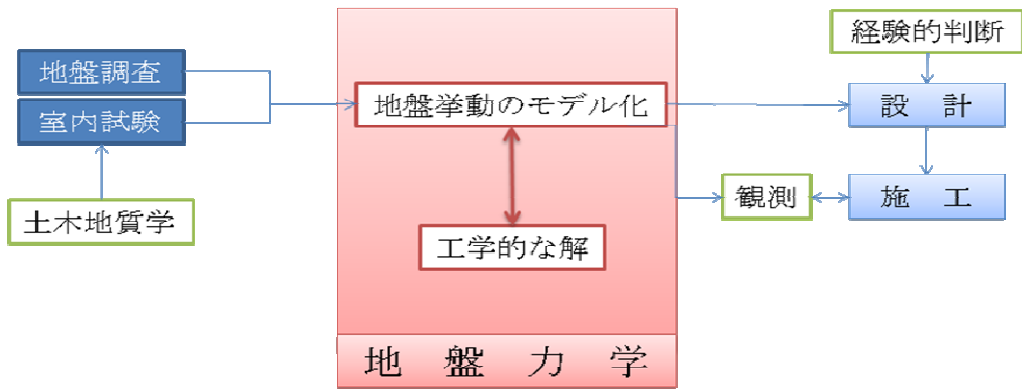
### 2.1 古典地盤力学

地盤力学は、従来から土木工学における重要な基礎科目と見なされているが、一般に馴染み難い分野とされている。これは、土の性質が複雑な上、地盤の性状が場所的に均一ではない場合が多いためである。単一な法則のみでは、多様な荷重下の挙動を十分に説明しがたく、経験的な知見や情報に頼る面が少なくないという事情も反映している。

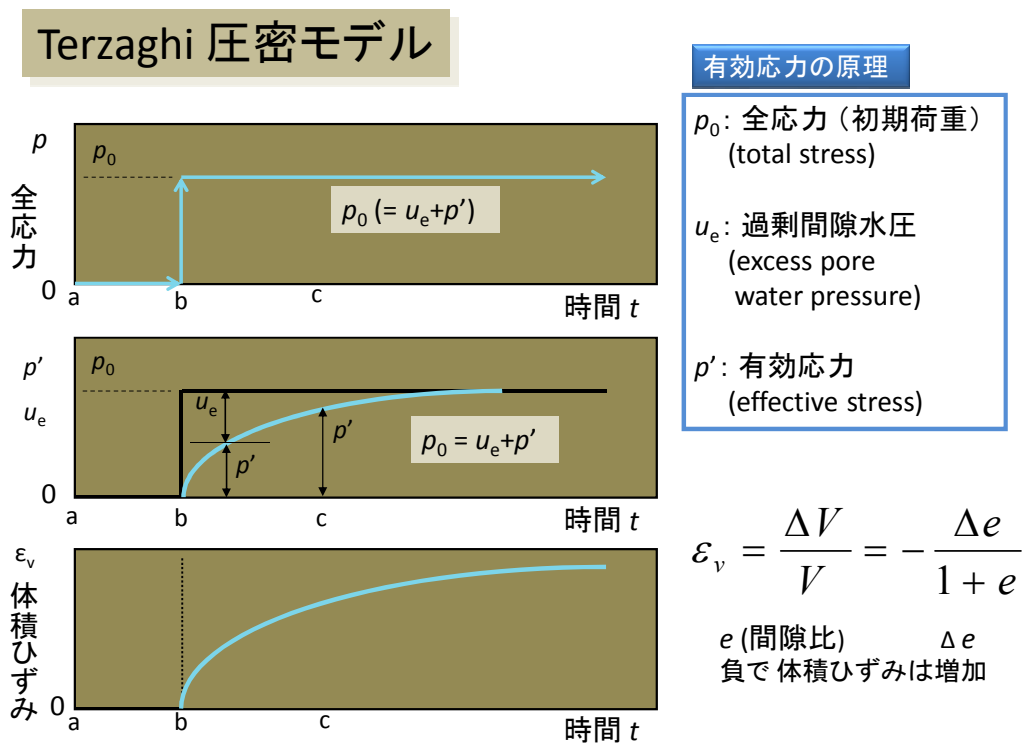
古典的な土の力学の源流は、Coulombの摩擦則によるせん断強度式とRankineの塑性平衡条件下における応力解析法にある。土圧、斜面、基礎等の解析・設計において、各手法に種々の工夫が施されながら、現在も実務で活用されているのは周知の通りである。地下水流動に関しては、Darcy原理に基づく透水解析法が地盤中の水の浸透問題を解く際の基本的な方策とされている。さらに、Proctorが見出した「締固めの原理」(最大の締固め密度を生むような含水状態が存在すること(最適含水比の存在))は、理論的な裏付けを得るには未だ至っていないが、堤防、盛土、高フィルダム等の土建造物の設計・施工に必須の基本情報となっている。ここで古典的と称している地盤力学は、Darcy法則やProctor原理等を取り込みながら、土が保有する粒子論的な意味での基本的物性を吟味し、実務に貢献することを念頭に発達してきたと言えよう。図-1の地盤工学の実務におけるフローに示すように、調査解析を基本に設計・施工へ繋ぐ役割を充分意識していたことが伺える。

### 2.2 地盤力学の父 K. Terzaghi による有効応力

地盤力学が近代的科学の一分野として認知されるようになったのは、1925年にKarl Terzaghi先生により発刊された「Erdbaumechanik」によるものとされている。世界の土木技術者を始め関係者に強い影響を与えたとされる。筆者は、この原著を精読した経験はないが、1943年に出版された「Theoretical Soil Mechanics」によって、学生時代の講義・ゼミを通じ、Terzaghi先生の世界に浸った。学部の専門講義の中でも、体系化されて20年ほどしかたっていない、土木工学の中では極めて若い、地盤力学理論に触れることができた。しかし、



図一 地盤工学・基礎工学における実務フロー



図二 Terzaghi の有効応力と圧密モデル

その力学構成は、土材料や地盤の応力-変形-強度特性を、提唱された「有効応力の原理」により一貫して論じている点に、当時強い関心と違和感を抱いて学生時代を過ごしたことが思い出される。

Terzaghi 先生の発想の原点は有効応力よりみた土の工学的性質の解明にあり、引続き力学構成の理論的構築を目指していた。土のような粒状体は、その構成粒子の大小によらず、外的作用応力  $p_0$  をその粒子間力 (有効応力)  $p'$  と間隙圧の2つが支えるというアイデアである。もし、間隙が完全に満たされている飽和状態であれば、後者は間隙水圧  $u_e$  となり、中立応力として存在することになるというものである。

$$p_0 = u_e + p' \cdot \cdot \cdot \quad (1)$$

载荷がなされている間、上記の関係は、たとえば図二のような応力-変形挙動を支配することになる。

このような考えのもと、Terzaghi 先生は Darcy 法則を採用して、地盤の圧密変形に関する次のような方程式 (2次元) の導出に成功した。

$$\frac{\partial u_e}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \quad \dots \quad (2)$$

ここに、 $C_v$ : 圧密係数,  $t$ : 載荷時間,  $z$ : 深さ

一方、地盤強度に関しては、Coulomb の破壊規準を尊重し、次のような有効応力表示式を提示している。

$$\frac{\sigma'_{1f} - \sigma'_{3f}}{2} = c' \cos \phi' + \frac{\sigma'_{1f} + \sigma'_{3f}}{2} \sin \phi' \quad \dots \quad (3)$$

ここに、 $\sigma'_{1f}$ ,  $\sigma'_{3f}$ : 破壊時の有効最大主応力, 破壊時の有効最小主応力,  $c'$ : 有効応力による粘着力,  $\phi'$ : 有効応力による内部摩擦角

一方、Terzaghi 先生の発刊約 40 年前になるが、土材料がせん断を受けると、せん断の進行に伴ってみられる体積変化現象が無視できないことを、Reynolds は Dilatancy (ダイレイタンス) 現象として初めて見出していた。同じ土材料が同じせん断を受ける場合でも、体積が減少したり (初期にゆるい状態)、増加する (初期に密な状態) 場合があり、その詰まり具合によってはせん断特性が「多面的に変化する」ことが示されていくことになる。いわゆる連続体に対するアプローチでは理解できない、土のような粒状体特有のせん断挙動である。

このような典型的な不連続体 (粒子集合体) の力学特性を、客観的に精確に把握するための室内試験装置の高度化研究が進んだ。特に Skempton や Bishop, Henkel などを中心とする英国 Imperial College グループによる三軸試験機の開発研究は、この分野のパイオニア研究として注目を浴びた。その後、土要素の応力や変形の測定ばかりではなく、試験中の間隙圧や体積変化を精確に自動測定可能な平面ひずみ試験機、三主応力制御型試験機、中空ねじりせん断試験機、単純せん断試験機等が次々と開発され、「有効応力の原理」による土の多様なせん断特性の記述が地盤力学にとって不動の地位を築いていくことになる。

応力-ひずみ-強度-体積変化現象解明のためのこれらの広範な実験的研究とともに、その定式化研究へと進んで行った (構成式研究の展開)。Hvorslev らの正規・過圧密粘土を対象とした研究や Schofield らの粘土や砂のような材料についての構成式化を目指した研究を中心に、一般的な土材料の圧密・せん断による変形-強度特性を合理的に説明する構成方程式の開発研究が国際的にも盛んになっていった。我が国でも、多数の研究論文が競って発表され、特に若い多くの研究者が学会で激しい議論をしていたことが思い出される。たとえば、1970 年代ころから、土木学会年次学術講演会第Ⅲ部門の発表でも、せん断や圧縮、動的性質などのセッションにおいて構成式がらみの発表が主体的となり、地盤工学の研究発表会場とはとても感じられない雰囲気醸し出していたものである。

そのような状況から、多様なせん断条件下にある多種の土材料の優れた構成式が次々と提案されてきた。地盤材料に関する構成式の発展は、当然のように数値解析手法の高度化を強く促し、技術者・研究者にとって地盤の変形や破壊挙動予測をするうえで、欠かせないツールとなっていることは周知の通りである。

ところで、筆者の学生の頃、有効応力式に違和感をおぼえていたと上述したが、それはこの量が「概念量」であって、直接計測・観測されるものではなく、間隙圧と全応力を知って初めて求まるいわゆる「間接量」であることによるものであった。特に不飽和状態にある地盤では間隙空気圧も併存するため議論が極めて複雑・混乱化したためである。近年は、当研究室においても、種々の不飽和土の間隙空気圧も間隙水圧とほぼ同じような精度で計測できるようになり<sup>1)2)</sup>、遅ればせながら、若い頃の疑問がひとつ消えたことに安堵している。

Terzaghi 型地盤力学は、今日多くの地盤工学問題に活用されているが、実務におけるその一般的な役割は、図-1 のように位置づけられる。すなわち、地盤調査・室内試験などの結果を (土木) 地質学の情報をも踏まえて取り纏め、そこから地盤の性質をモデル化し、工学的な解を導くことである。引続き、設計・施工へと進ん

表－1 1964年新潟地震以降の我が国の大規模地震と地盤被災

近年の地震記録例（顕著な液状化・土砂災害等、日本）

日時	地震名	M	日時	地震名	M
1964.06.16	新潟	7.5	2000.10.06	鳥取県西部	7.3
1968.05.16	十勝沖	7.9	2001.03.24	芸予	6.7
1973.06.17	根室半島沖	7.4	2003.05.26	三陸南	7.1
1978.01.14	伊豆大島近海	7.0	2003.07.26	宮城県北部	6.4
1978.06.12	宮城県沖	7.4	2003.09.26	2003十勝沖	8.0
1983.05.26	日本海中部	7.7	2004.10.23	新潟県中越	6.8
1993.01.15	釧路沖	7.8	2005.03.20	福岡県西方沖	7.0
1993.07.12	北海道南西沖	7.8	2007.03.25	能登半島	6.9
1994.10.04	北海道東方沖	8.2	2007.07.16	新潟県中越沖	6.8
1994.12.28	三陸はるか沖	7.6	2008.06.14	岩手・宮城内陸	7.2
1995.01.17	兵庫県南部	7.3	2011.03.11	東北地方太平洋沖	9.0

1964 新潟地震以降  
東北域で45%の出現（10/22）  
北海道域で27%の出現（6/22）

でいくのであるが、モデル化（単純化）過程で実際の土挙動を反映できない可能性も多く孕んでいる。最近は、「観測」による修正を施しながら、また経験豊富な技術者による判断を交えて、実際の問題解決を図っていくという手法が妥当であるとされている。実務レベルでは、このプロセスが極めて重要な地位を占めているのが現状であり、現在の地盤力学理論の枠組みだけでは説明に至らない事象が多いことを、以下、我が国のいくつかの被災事例で述べたい。

### 3. 地震・豪雨・洪水等による最近の地盤災害

#### 3.1 地震による地盤被害

表－1は、我が国の近年の大規模な地震被害、特に地盤液状化や斜面崩壊等を誘発した大地震をとりまとめたものである。ここでは、1964年の新潟地震からリストアップしているが、その理由は近代的な地盤力学アプローチで調査・解析が行われたのがこの地震からであるとの認識に基づいている。当然のように、1923年関東大震災や1948年福井地震などでも顕著な液状化や地盤流動破壊などが誘発されたとされているが、このような形式での調査・分析が行われてなかったとの理由である。

新潟地震については、我が国の地盤動力学研究者・技術者や海外の研究者の研究活動が活発になされている。特に米国 California 大学 Seed 教授を中心とする研究グループの卓越した研究は注目される。動態時の地盤挙動を再現する極めて簡単な試験法である繰返し三軸試験法を開発し、見事に液状化現象を再現したものである。動的繰返し载荷による間隙水圧の上昇すなわち有効応力の低減による砂地盤の軟化、さらに液状化発生条件は有効応力の消滅によって定義できることを、「有効応力の基本原理」に従って明快に説明している。同年に発生したアラスカ地震でもたらされた地盤崩壊の再現とともに彼らの研究手法は高く評価される。

表に示された地震ではそれぞれの発生機構に違いはあるが、日本列島を襲う地震の発生頻度は近年極めて高く、特に東日本域では新潟地震以降70%を超える割合になっていることが注目される。最終的なデータの総括は出来ていないが、今回の東北地方太平洋沖地震において関東地方でみられる極めて広範な液状化の被害、また2008年岩手・宮城地震の大規模土砂崩壊など、破壊の巨大化・多様化が進んでおり、地盤の災害問題は確実に進化・深刻化していることを物語っている。

なお、地震動による地盤の有効応力低下現象は、せん断応力が卓越するよりは主応力の回転が支配的になる波浪場のような条件でも同様に発生する<sup>3)4)5)</sup>など、繰返し荷重をうける沿岸域地盤等の安定問題において考慮すべき新たな事項になっている。

### 3.2 降雨等による被災と地盤の特徴

最近、低気圧や台風がもたらす豪雨や洪水も、大規模な地盤崩壊を導いている。世界でも有数の造山帯にある日本列島では、特に、脆弱な地質と急峻な地形に起因する豪雨災害が頻発しやすい。たとえば、2009年7月山口県防府地区を中心に、豪雨による大規模な土砂災害が発生し、17名に及ぶ死者を誘発するなど過去に例を見ない人的被害の他、住家・社会基盤施設被害をもたらしたことは記憶に新しい。土石流が特別養護老人ホームを埋め尽くし、7名の死者を出す大惨事になったことで、報道も大きく取り上げた。同年8月にも類似の被災が発生している。発達した熱帯低気圧が台風9号となり、九州地方から東北地方の広い範囲で大雨となった。特に兵庫県佐用郡佐用町佐用では、1時間89.0ミリを観測するなど猛烈な降雨となった。このゲリラ豪雨により、洪水災害、斜面崩壊・土石流・がけ崩れなどの土砂災害が発生し、人、住家、公共施設等々に多大の被害がもたらされた。

2009年7月の豪雨で特に甚大な被災を誘発した地盤は、主に広島型花崗岩類からなっており、比較的深層部まで風化によりまさ化して分布し、粘性が乏しくかつ水により流動しやすい、いわゆる「まさ土」と称される代表的な日本の特殊な土（風化残積土）である。ほぼ10年前の1999年広島豪雨災害でも大規模な斜面崩壊を群発させたことが知られている。

風化残積土としての花崗岩分布域は北海道から九州まで広範囲に亘っているが、この地域を含む西日本地方は、特にまさ土の多い地域として知られている。地盤工学会災害緊急調査団の地盤災害発生機構の考察<sup>6)</sup>によれば、粒径区分上は砂や礫に分類される細粒分10~20%を含むまさ土が土砂災害の広域化をもたらしたこと、さらにこのような崩壊はまさ土が保有する力学的・工学的特異性に起因することが最近の研究により明らかにされてきている。

まさ土以外にも、日本各地では、後述のような地域に特有の地盤が形成されている。それらは各種災害の誘発要因になったり、崩壊規模拡大の元凶になっている。地域特有の土の多くは難解なパフォーマンスを示し、力学的な解釈や評価が通常の土と同じ範疇（Terzaghi型地盤力学）では議論できない場合がある。そのため従来地盤工学分野では、教科書的な地盤力学の手法では実務の設計や施工が困難なこのような土を特殊土と呼び、普通ではない土、あるいは問題のある土との意味合いで使われてきている。英訳としては“problematic soil”あるいは“unusual soil”，“special soil”などが慣用されてきている。

日本地盤工学会における特殊土の範疇は、地質学や土壌学上で採用される物差しよりもはるかに広く、地域や地名、粒子の色調、さらには形態名を用いるなど、様々な俗称が使われてきている。これらの分布や起源には強い地域的特殊性があるため、このような土を抱える地域では、実務において頻繁に遭遇する土でそれぞれ独自の対応を求められているところも少なくない。従って、それらの地域では、地盤工学的研究や設計・施工事例の蓄積も多く、特殊な土というよりは、むしろ当該地域では普通の土との認識が強いように考えられる。

一方、最近の大規模地震やゲリラ的異常降雨など、地盤や土材料にとっては教科書的ではない極めて特殊な荷重条件下に置かれていることも、特殊土を議論する場合、無視できないように思われる。つまり、外力条件や地形条件、あるいは堆積条件によっては、通常の砂や粘土のような挙動をする土が特殊な力学材料としての考察を必要とするようなケースも増えてきている。さらに、社会が要求する性能レベルが高度化・緻密化し、極めて厳しい遮水性の要求や積雪寒冷地のような凍結融解履歴による劣化阻止に係わる耐久性を求められる場面もある。通常の土や材料土であっても、特殊な考察や特殊な評価が必要になるケースも散見されるのである。この意味で、各地域に存在する従来型の特殊な土に加え、上記のような特殊な条件下にあるとみなした材料（いわゆる特殊土）についてさらなる研究を展開することが求められてきているといえよう。

以下では、日本各地に広く存在する特殊土、とくに火山灰質土や高有機質土について、被った土砂災害との関連で紹介し、特殊土の実態を概観する。

## 4. 日本の特殊土地盤と被災事例

### 4.1 火山灰質地盤の力学特性

日本は世界有数の火山国・地震国である。特に環太平洋火山帯に属する日本列島には第四紀火山による爆発的な噴火によって、火山噴出物が大量に放出され、各地の地域土を形成している<sup>7)</sup>。ここで、火山噴出物とはテフラ＝火砕物を指し、具体的には火山灰、軽石、スコリアなどの一次および二次堆積物である。これのうち風化などにより形成された細粒分含有率が50%以下のものを火山灰質粗粒土と呼び、火山灰質細粒土と区分して、火山灰土にかかわる試験法が解説されている<sup>8)</sup>。火山灰土は日本に広く堆積していることから、特殊土というよりも汎用的な地盤土としての認識が必要であるといわれてきている。

粗粒あるいは細粒な火山灰質土の工学的性質は、その構成粒子の破碎性や、非塑性細粒分の取扱いなどで通常の砂質土や粘性土とは明らかに異なる評価軸をもとめられていることは、最近の一連の研究からも示されている<sup>9)</sup>。

たとえば北海道では、60%にもおよぶ地域で様々な力学性状を有する火山灰質地盤がみられる。その代表的な噴出源域を図-3に示す。各堆積層の代表的な地層から採取した試料について室内三軸試験を行った結果の一部を図-4～6に示す。これらの結果から、砂のような砂質系粒状体と比較して、火山灰質粗粒土のいくつかの力学的特異性を指摘できる<sup>10)11)12)</sup>。

(1) 応力-ひずみ関係は、噴出源により著しく異なるものの、基本的には砂のような粒状体の枠組みとなる。しかし、破碎性の卓越する火山灰土（たとえば摩周降下火砕堆積物、NAKASHIBETSU M）では、応力-ひずみ-強度特性の有効拘束圧依存性は極めて顕著であり、それは無視できないせん断抵抗角の低減を導く（図-5参照）。明らかにCoulomb型破壊規準では説明できない現象になっている。また表-2に示すように、せん断に伴う変形の発生特性にも、噴出源の違いによる顕著な差が認められる。

(2) 排水・非排水条件の違いによらず、また載荷応力条件の違いによらず、せん断中有効平均主応力が増加する試験では、駒ヶ岳降下火砕堆積物（MORI）を除いて、構成粒子の破碎が顕著となる。もたらされる粒子の破碎は細粒分の増加量によって評価できる（図-6(a), (b)参照）。

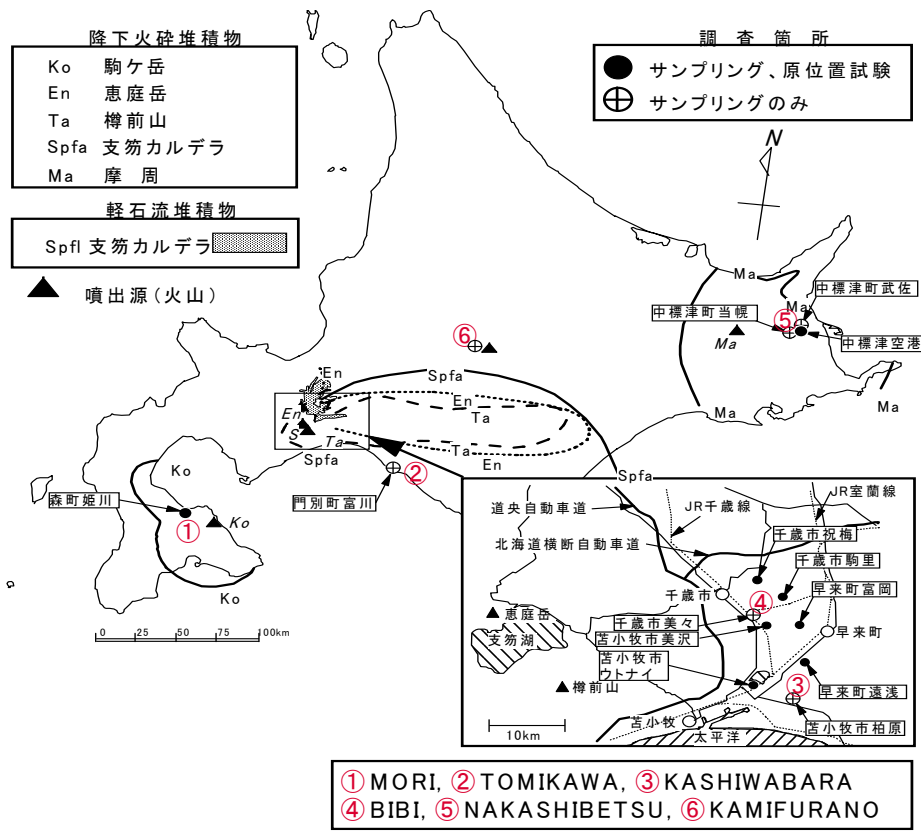
その他図示は省略しているが、次のような通常の土とは異なる力学挙動がみられる。

(3) 破碎の顕著な火山灰土では、特異なダイレイタンシー特性を示す。たとえば、脆弱な粒子からなる火山灰土では、排水条件下でのせん断において極めて激しい体積収縮傾向を示すが、非排水条件下での有効応力経路はせん断の進行とともに破壊線に沿って着実に有効応力が減少するという、非常に緩い砂のそれに似た挙動を示す。

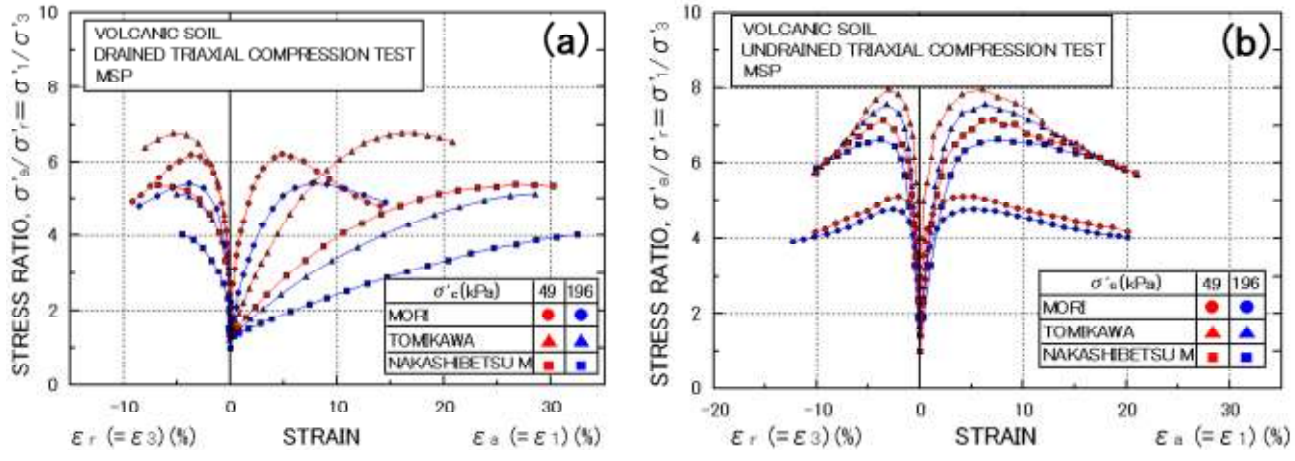
(4) 不攪乱供試体と再構成供試体の強度差は、通常自然堆積砂地盤でみられるものよりはるかに大きい。このことは降下火山灰土の力学特性における粒子間接点での溶結作用ならびにセメンテーション効果の評価が非常に重要であることを示唆している。

(5) 降下生成物で構成されている火山灰地盤の力学特性には、構成粒子の破碎の有無や応力系の相違に関わらず著しい異方性がみられる。またこの異方性の特徴は、基本的に自然堆積砂地盤で認められているものと一致することから、力学特性の異方性は堆積時にもたらされる構成粒子の配列構造の異方性（生得的異方性）に基づくものであるとされている。

火山灰土における粒子破碎は無視できない内部摩擦角の低減を導いているのであるから、原位置試験とし



図一三 北海道に分布する代表的火山灰地盤



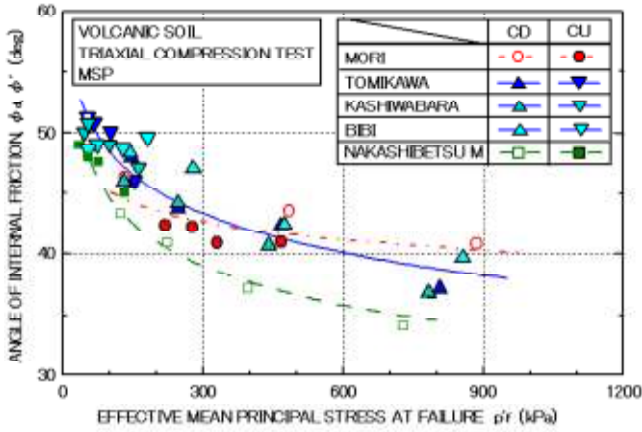
図一四 火山灰土の応力—ひずみ挙動  
 (a) 圧密排水三軸試験 (b) 圧密非排水三軸試験

て頻繁に用いられる動的貫入を伴う標準貫入試験においても、試験時に誘発される粒子破砕が標準貫入試験 N 値に無視できない影響を及ぼすものと推察される。以下に、ほぼ同じ地点で実施された標準貫入試験 (SPT) やコーン貫入試験 (CPT) 結果に基づいて、その一例を示す。

図一七 (a), (b) は、モールの応力円 (等方圧密圧力  $\sigma'_c = 49 \sim 392 \text{ kPa}$ ) によって求めた不攪乱火山灰土の排水 (CD), 非排水 (CU) せん断抵抗角  $\phi_d, \phi'$  と N 値との関係を、降下火砕堆積物 (二次堆積を含む) および軽石流堆積物に分け、砂質土やしらすにおいて提案されている関係と比較してみたものである。駒ヶ岳

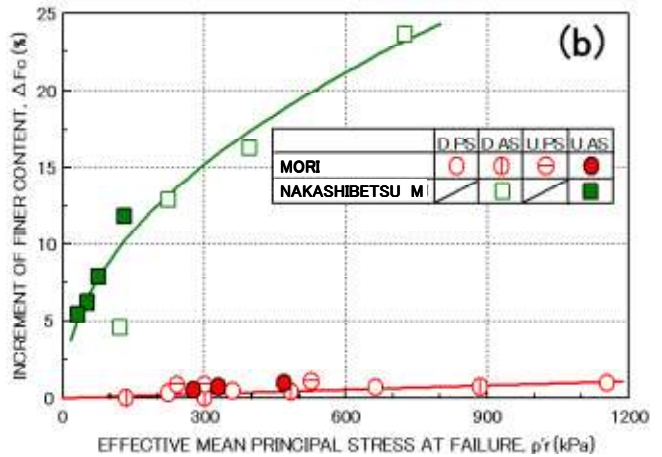
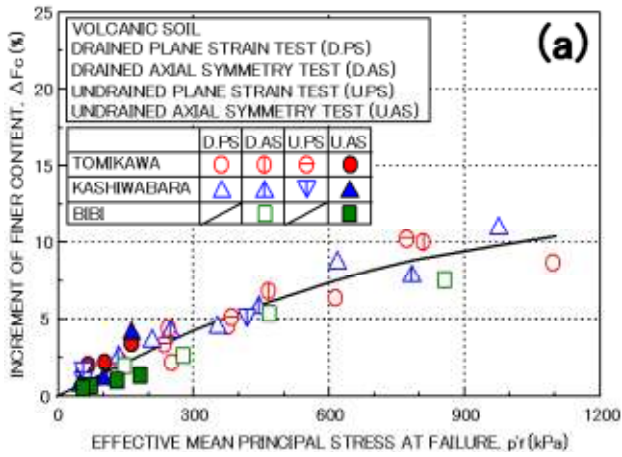


表一 三軸圧縮条件におけるひずみの発生挙動比較



SAMPLE NAME	破壊時の主ひずみ比 $(-\epsilon_a/\epsilon_r)_r$			
	$\sigma'_c$ (kPa)			
	49	98	196	392
①MORI	0.68	0.45	0.47	0.41
②TOMIKAWA	0.30	0.25	0.17	0.14
③KASHIWABARA	0.27	0.22	0.17	—
④BIBI	0.36	0.29	0.24	0.19
⑤NAKASHIBETSU M	0.22	0.15	0.14	0.10

図一 火山灰土におけるせん断抵抗角の有効応力依存性



図一 圧密・せん断に伴う構成粒子の破砕：(a) 支笏・樽前系火山灰土 (b) 駒ヶ岳、摩周系火山灰土

の  $Ko-d$  を除けば降下火砕堆積物と砂質土の  $\phi_d$ 、 $\phi'$  -  $N$  関係が良く一致することは興味深い。これは、破砕性火山灰土では大変形時にせん断強度に及ぼすセメンテーションの影響が小さくなることや、静的せん断試験と動的貫入試験の両方で粒子破砕の影響が現れた結果、非破砕性粒状体と同様の関係になったものと判断される。また  $Ko-d$  のみにおいて  $N$  値が低くなっているのは、静的せん断では現れない粒子破砕が動的貫入時にもたらされるためであろうと推察している。

一方、軽石流堆積物(図一 7 (b)の支笏系の  $Spf1$ )では、 $N$  値に対応する  $\phi$  の値が降下火砕堆積物や砂地盤の場合よりも高く、また  $N$  値の増加に伴うせん断抵抗角の変化は小さくなっている。これは軽石流堆積物が高熱状態で流下堆積する際に熔結作用を受け、強いセメンテーションが与えられたためである。

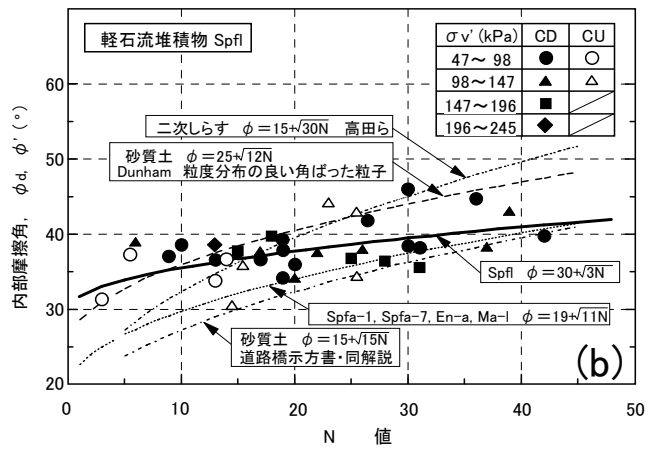
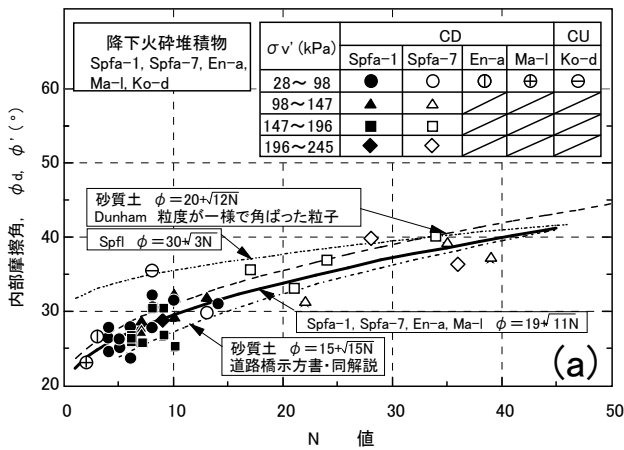
降下火砕堆積物と軽石流堆積物の  $\phi_d$ 、 $\phi'$  と  $N$  値との関係は、それぞれ式 (4) と式 (5) によって表すことができる<sup>13)</sup>。

$$\text{(降下火砕堆積物)} \quad \phi_d, \phi' = 19 + \sqrt{11N} \dots (4)$$

$$\text{(軽石流堆積物)} \quad \phi_d, \phi' = 30 + \sqrt{3N} \dots (5)$$

このように、粒子破砕やセメンテーションの影響を受ける火山灰地盤の  $\phi$  -  $N$  関係は明らかに砂質土とは





図一七 火山灰地盤の内部摩擦角と標準貫入試験 N 値の関係

(a) 降下火砕堆積物 (b) 軽石流堆積物

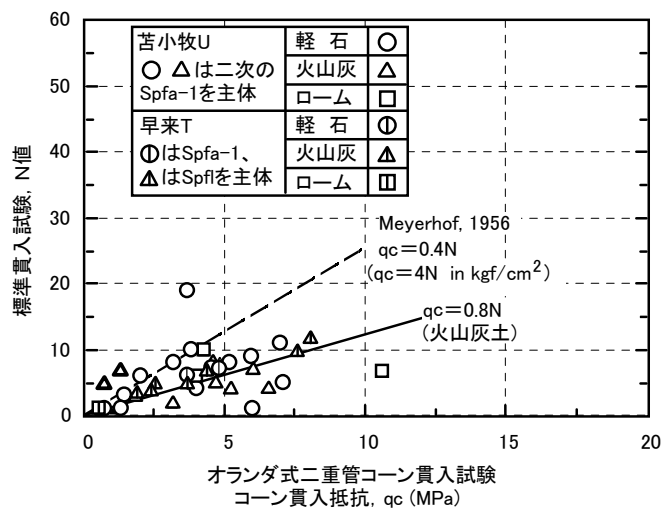
異なることに、設計上の注意が必要である。

図一八は、N 値と静的試験であるオランダ式二重管コーン貫入試験によるコーン貫入抵抗  $q_c$  との関係である。対象は支笈降下火砕堆積物や支笈軽石流堆積物が主体となる苦小牧、早来地区である。二次堆積層で、データのばらつきがあるが、両者の正の相関に注目し、火山灰地盤の  $q_c$  と N 値との平均的な関係を求めると次式が与えられる<sup>13)</sup>。

$$q_c = 0.8 N \text{ (in MPa)} \quad \dots \quad (6)$$

図中には、比較として、現在も実務で利用されている Meyerhof の砂質土の  $q_c$  と N 値関係も示した。Meyerhof による静的・動的貫入抵抗比  $q_c/N$  は 0.4 であるが、大半の火山灰地盤の  $q_c/N$  はこの値よりもはるかに高く、N 値が粒子破碎によって過小に評価されるという事実が明確に現れている。この傾向は、電気式コーン貫入試験による先端抵抗  $q_t$  との関係においても同様<sup>13)</sup>に認められており、標準貫入試験の打撃回数が増えるほど N 値が過小に評価されることを確認することができている。

以上のように、構成粒子の破碎が主因とみられる影響が、火山灰質土の設計・施工において無視できない問題を生んでいる。従来の土力学モデルによる設計の手法に考慮が必要である。



図一八 標準貫入試験 N 値と静的貫入試験  $q_c$  値

## 4.2 火山灰質地盤の地震被害事例

ここでは、火山灰質土にかかわる代表的な地震被害事例<sup>14)</sup>を紹介する。

図一九は、日本の第四期テフラの分布図に表一三に示す 1968 年えびの地震以降の巨大地震において発生した火山灰質土の自然斜面・人工盛土の崩壊および液状化被害の事例位置を加筆したものである。表一三では、海外における火山灰地盤被害の代表例として、約 2 万数千人の死者を出した 1970 年ペルー地震、約千名の死者を出した 2001 年エルサルバドル地震も含めてまとめている。日本以外の火山国でも、被害は広範囲でもたらされていることの事例である。

図一九から、山陰地方および関東平野東部地域を除くすべての火山灰質地盤において、地震による災害が誘発されていることを知ることができる。関東平野や山陰地域でこのタイプの地盤被害が少ないのは、火山灰質



図-9 地震による我が国の火山灰地盤の崩壊事例

表-3 我が国の火山灰地盤を襲った地震

年	月日	地震名	M	図中番号	被害発生箇所	震央距離	震度	被害形態	火山灰質土の起源	被害箇所
1968	2.21	えびの地震	6.1	①	宮崎県えびの町	約35km	IV	斜面崩壊 液状化	加久藤火砕流	自然斜面 水田
1968	5.16	十勝沖地震	7.9	②	青森県三戸町	約200km	V	斜面崩壊	十和田・八甲田軽石流	道路盛土
				③	青森県五戸町	約200km	V	斜面崩壊		自然斜面
				④	北海道札幌市清田	約310km	IV	液状化		宅地
				⑤	北海道札幌市南	約310km	IV	液状化		宅地
1970	5.31	ペルー地震	7.8	-	ペルー ワスカラン山	約130km	-	斜面崩壊	未確認	自然斜面
1978	1.14	伊豆大島近海地震	7.0	⑤	静岡県河津町見高入谷	約20km	V	斜面崩壊	火山砕屑物	自然斜面
1978	6.12	宮城県沖地震	7.4	⑥	宮城県白石市寿山	約140km	IV	斜面崩壊	浮石質火砕流	宅地用埋め盛土
1984	9.14	長野県西部地震	6.8	⑦	長野県王滝村(御岳山)	約5km	VI	斜面崩壊	千本松軽石層	自然斜面
				⑧	長野県王滝村(松越地区)	約1km	VI	斜面崩壊	御岳第3軽石層	河岸段丘
1993	1.15	釧路沖地震	7.8	⑧	北海道標茶町	約40km	不明	斜面崩壊	軽石流	宅地用埋め盛土
				⑨	北海道釧路市緑ヶ岡	約15km	VI	斜面崩壊	屈斜路軽石流	宅地用盛土
1993	7.12	北海道南西沖地震	7.8	⑩	北海道森町	約145km	不明	液状化	駒ヶ岳火砕流	宅地 埠頭 岸壁
1994	10.4	北海道東方沖地震	8.2	⑪	北海道標茶町	約250km	V	斜面崩壊	軽石流	宅地用盛土
				⑫	北海道中標津町	約220km	V	液状化	摩周降下軽石	自然堆積地盤
1994	12.28	三陸はるか沖地震	7.6	⑬	青森県新郷村	約230km	VI	斜面崩壊	十和田・八甲田軽石流	沢(谷)埋め盛土
1997	3.26	鹿児島県北西部地震	6.2	⑭	鹿児島県入来町	約30km	IV	斜面崩壊	入戸火砕流	宅地盛土
2001	1.13	エルサルバドル地震	7.6	-	エルサルバドル ラスコリナス	不明	-	斜面崩壊	軽石、凝灰岩質土	自然斜面
2003	5.26	三陸南地震	7.1	⑮	宮城県築館町館下	約35km	V	斜面崩壊	鬼首火砕流	農地用埋め盛土
2003	9.26	十勝沖地震	8.0	⑯	北海道端野町協和	約230km	V	斜面崩壊	屈斜路軽石流	農地用埋め盛土
				⑰	北海道札幌市美しが丘	約255km	IV	液状化	支笏軽石流	宅地盛土
2008	6.14	岩手・宮城内陸地震	7.2	⑱	宮城県栗原市(冷沢上流)	約15km	VI	斜面崩壊	栗駒火砕流・降下軽石	沢 谷
				⑲	宮城県栗原市築館町館下	約35km	VI	斜面崩壊	鬼首火砕流	農地用埋め盛土
2011	3.11	東北地方太平洋沖地震	9.0	-	---	---	---	斜面崩壊	---	道路盛土
				-	---	---	(VII)	液状化	---	宅地盛土

土としては関東ロームのような火山灰質細粒土が主体になっていることと無縁ではないのかもしれない。また、2000年に発生した鳥取県西部地震では、河川敷（沖積砂）や埋立て地盤（海底からの浚渫土）の液状化は報告されているが、火山灰質土そのものの液状化は報告されていない。なお関東地方では、1964年以降今回の2011年東北地方太平洋沖地震までは、大きな地震におそわれていないため、図には記載していない。

液状化の被害が集中しているのはほとんどが粗粒の火山灰土で構成される地盤である。また礫分をかなり含

む火山灰質土でも明確な液状化が誘発されている。特に北海道地域を襲った地震による火山灰地盤災害にその典型を見ることができる。

以下、2003年十勝沖地震（9月26日午前4時50分、M8.0）による地盤被害の実態を詳述する（14）<sup>15）</sup>。

### 4.3 2003年十勝沖地震による火山灰質地盤の被害

本地震では道路、河川堤防、港湾・漁港、農地・農業施設およびライフラインに、道央、十勝、道東地域の沿岸部や内陸部で地盤の液状化に起因する被害や影響が多発した。これら海岸砂地盤や河川堆積物地盤の液状化被害に加え、道央の札幌市清田区、道東の北見市広郷や端野町などで埋立て・盛土された火山灰地盤で液状化が発生し、住宅や農地に大きな被害が生じた<sup>15）</sup>。

図-10に示すように、札幌市（清田区）は震央距離約255km、北見市（端野町）は震央距離約230kmに位置する。札幌市清田区には、図-3で概説したように札幌市～千歳市～早来町に広く分布する支笏軽石流堆積物（特に先述したSpfl、噴出源：支笏カルデラ、噴出年代：4～4.5万年前）が表層に厚く堆積している。詳細を表層（2m深度）の地盤情報として示すと図-11のようである。また、北見市端野町で液状化が認められた火山灰は屈斜路軽石流堆積物（Kpfl-4、噴出源：屈斜路（クッチャロ）、噴出年代11.5～12万年前）である。この火山灰の分布域は屈斜路湖を中心として半径約70kmに及び、その層厚は20mを超えることも珍しくはない。

先述のように、軽石流堆積物は北海道各地に分布している。軽石流堆積物は、火山から高熱状態で流下堆積した際の溶結作用によって自然堆積状態ではやや固結した様相を呈し、N値は30以上になることが多い。ただし、掘削等によって乱すとその固結効果はほとんど失われ非～低塑性の地盤材料となる。地盤を構成する粒子の細粒分含有率は概ね15～60%の範疇にあるが、多孔質な粒子を含むために土粒子の密度が小さく、乱すと降雨等によって流動しやすいという性質を有している。これらの軽石流堆積物は、一般的な土工事では扱いやすい地盤材料との認識のもとで、盛土にもよく利用されている。

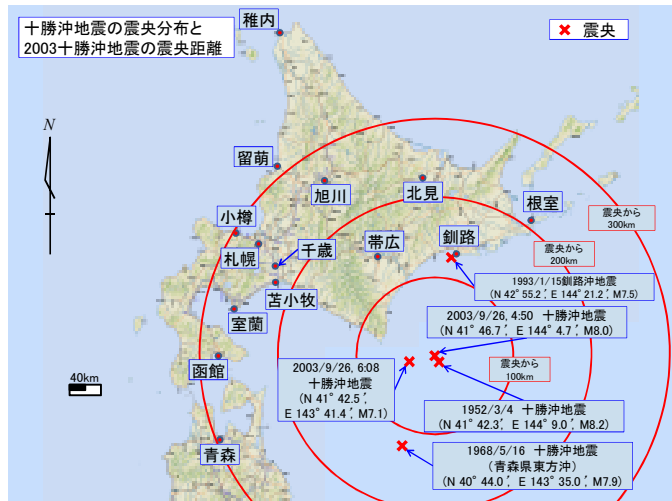


図-10 十勝沖地震の震央分布と震央距離

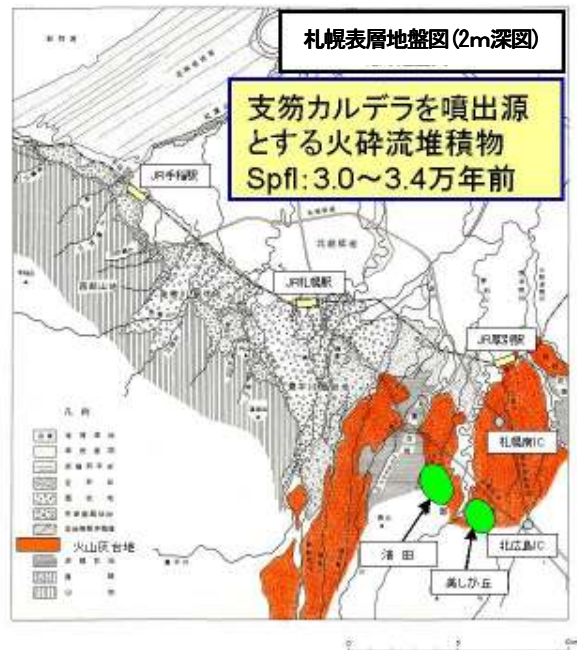


図-11 札幌市清田地区の表層地盤図



図-12 住宅地の被災状況





写真－1 火山灰地盤の液状化

(a) 出現した噴砂現象 (b) 地表に吹き出し市道を覆った泥流化火山灰

### (1) 札幌市の液状化被害状況

札幌市の南東部に位置する清田区で、地震によって約16地点で家屋の損壊、道路の沈下・亀裂・段差（14地点）、斜面崩壊（1地点）、マンホールの浮上り（1地点）、水道管の抜け出し（1地点）などの地震被害が生じた。札幌市消防局清田消防署での計測震度は4.6（震度5弱）である。これらの被災箇所のうち、火山灰盛土の液状化による被害と考えられる箇所は清田区内の清田団地と美しが丘に限定されていた。

図－12に本地区における被災家屋の状況を示す。清田地区では基礎が沈下・傾斜した家屋の周辺が地震で約1.0m沈下し、建物壁に大きな亀裂が生じた事例が多くあった。ほとんどの家屋の周辺では、盛土に用いられた火山灰の噴出が認められたことから、これらの被害は火山灰の液状化によるものと推測された。当然のように周辺の道路でも顕著な沈下や亀裂が発生している。

美しが丘地区では約17軒の家屋が被災し、4箇所の道路で沈下や亀裂が生じた。写真－1は、空地で生じた支笏軽石流堆積物の噴出跡である。この空地の市道を挟んだ向かい側にある家屋では基礎が著しく沈下・傾斜し、居住に全く耐えない状況になった。また市道でも泥流化した火山灰が噴出し（写真－1(b)）、最大で40cm程度の沈下が生じた。地震時に大量の水と火山灰が噴出した状況について、本震約1時間後の余震の際に注視していた住民の次のような証言がある。

- ①道路舗装面で2度の波打つような変状が認められた、
- ②空地では、約1.5～2.0mの高さまで火山灰が大量噴出した、
- ③このような現象と同時に道路の沈下や家屋の傾斜が進んだ。

これらは噴砂現象や流動現象を伴う火山灰地盤の液状化によるものであることを示すとともに、マグニチュードの大きい余震（M7.1）が被害をさらに拡大させたことがよく理解できる。

盛土に用いられた支笏軽石流堆積物は細粒分を多く含んでいるが、粒径レベルではシルト分が卓越する。含水比の範囲は約40～76%、液性限界は約41～70%にあったことから、ある程度の粘性が期待されたが、地盤力学上この火山灰は非塑性もしくは低塑性に分類されるべきであった。火山灰質土に含まれる細粒分は基本的に非塑性であるため長年の堆積経過でも固結が進まず、繰返しせん断に対する抵抗が発揮されづらくなっている。また粒子の多孔質性に起因して保水性が極めて高く、空隙の大きい緩い骨格構造を形成しやすいことも注意を要する点であった。このように軽石を含む火山灰の粒子は内部空隙を保有するため、粒径が大きくなるほど土粒子の密度は小さくなる。同様な傾向は他の火山灰でも一般的に認められている。

### (2) 1968年十勝沖地震時の被災との比較

2003年十勝沖地震は再来が懸念されていた海溝型の大地震であり、規模・位置的にも、1952年十勝沖地震の

再現になった。しかし本近傍では、図-10にも示したように、1968年に大地震が発生している。1968年十勝沖地震（5月16日午前9時48分、M7.9）である。この地震は北海道と東北に甚大な被害をもたらしたが、震度4を記録した札幌市の清田団地でも地盤沈下、噴泥、道路や家屋の沈下や傾斜など無視できない被害をもたらされたことが、北郷・土岐の現地調査と解析<sup>16)</sup>により明らかにされていた。

1968年の清田団地内には279戸の住宅があったが、完全に切土の上にあった家屋（143戸）の被害は0件であったのに対して、盛土上の家屋（136戸）の被害は76戸に及び、このうち7戸は居住不能になったとのことである。盛土箇所は沢地を支筋軽石流堆積物である火山灰で埋め立てたものであるが、場所によっては盛土の下に泥炭層が分布する箇所もあったようである。

図-13に、1968年と2003年の十勝沖地震による被災家屋、道路の沈下箇所と盛土の範囲を示す。図には、上述した2003年の被災家屋や支筋軽石流堆積物の噴出位置も示した。この図から、2003年十勝沖地震による被災家屋と道路の沈下の位置は、1968年の地震時と同様に全て盛土上にあることが理解される。35年後の同規模の地震で、同様の崩壊が、再現されたことになる。なお、2003年十勝沖地震は1968年の地震に比べてマグニチュードが大きく、札幌市清田区と震央との距離は約60km短い。この地盤の被害が比較的小となった原因についてはさらなる調査・研究を必要としているが、暗渠の設置によって地下水位が低下した効果があったのではとの指摘もある。その後当該地区の旧地形を航空写真記録等の精査によれば、美しが丘地区で被災した家屋の位置は、清田団地の場合と同じく、全て沢地形の谷部や旧河道を埋めた箇所に位置していたことが示されている。

札幌市清田区における火山灰地盤の液状化発生箇所は、小河川を中心とした低地を埋立てた範囲に限定されていること、震央から極めて遠い火山灰地盤に液状化被害が集中したこと、同じような地震で繰返し起こっていたこと等は、宅地盛土工の安定問題を耐震地盤工学の面で再考察することを促した。

### (3)北見市の大規模液状化被害

北見市端野地区・広郷地区の火山灰造成農地6箇所ですべて液状化とそれに伴う地盤の大規模変動・破壊が発生した（写真-2参照）。端野地区では、大規模な火山灰噴出・流下を伴う農地陥没が幅（北西-南東方向）約35～62m、奥行き（北東-南西方向）約190mにわたって発生した。陥没は最大で3～4mに達していた。この大規模な陥没域の北西側の農地でも沈下があり、農地面の変動は最大幅（北西-南東方向）約80m、奥行き（北東-南西方向）約255mの範囲に及ぶ。液状化した火山灰は陥没域周縁に生じた複数の噴出口から噴き出し、幅（北西-南東方向）約100m、奥行き（北東-南西方向）約150mに及ぶ農地、道路および道路沿いの明渠を埋め、さらに近傍の河川に流れ込んで、河道を下流側約900m、上流側約100mにわたって埋めた。陥没域内での噴砂現象により多くの噴砂丘が見られた。

端野町の液状化域はいずれも、現在、畑作地として利用されている傾斜の非常に緩い斜面であるが、1947年撮影の空中写真観測によれば、起伏の小さな丘陵を刻む狭く、浅い埋積谷あるいはそれに流れ込む小沢に沿う低湿地である。埋積谷は水田として開発され始めており、1971年撮影の空中写真によればほぼ全域が水田となっており、用水確保のためため池や堰堤も点在していた。1983年頃から丘陵は切土、埋積谷や低湿地は埋め立て盛土され、畑作地へ転換されていったようである。さらに1986年撮影の空中写真では、いずれの液状化域

1968年と2003年の十勝沖地震による被害の比較と盛土の範囲

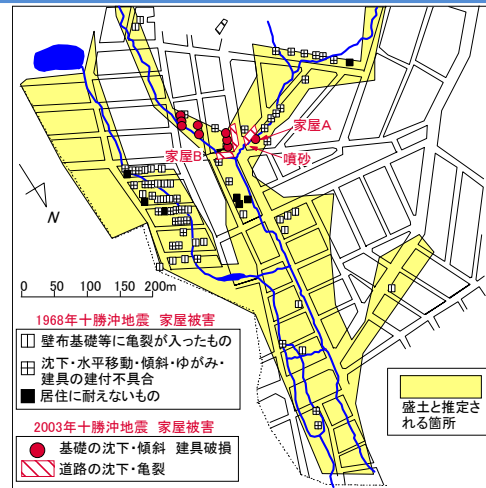


図-13 1968年と2003年の十勝沖地震による被災家屋、道路の沈下箇所と盛土の範囲



も緩傾斜の畑作地となっている。液状化域はいずれも旧地形の丘陵斜面に囲まれた埋積谷の範囲に限られており、谷部の埋め立て・盛土後も地表水が集水し易い地形条件にあったことがうかがえる。

液状化した火山灰土は間隙比が高いため高含水状態にあったこと、軽石を多く含み土粒子密度も低かったこと、細粒分が30%と高く砂質土よりも透水性が低かったため間隙水圧の消散が遅く液状化状態の持続時間が長かったこと等から、泥石流状態となり下流域まで流出したことが、地震後の室内液状化試験・原位置試験から明らかにされている。このような火山灰質土が関係している斜面崩壊の事例としては、2003年5月に三陸南地震で発生した宮城県築館町館下地区の斜面災害でも火山灰質土が泥石流状態となって高速流動したことが報告されている<sup>14)</sup>。

火山灰質土においても土工は切土と盛土が一般的であるが、被害は明らかに盛土に集中している。特に最近では、宅地の造成等について盛土か切土のかなど社会的関心の高い話題である。盛土工の適切な管理法の見直しとともに土材料のモデリングにきめ細かい配慮が改められた事例として注目されるべきである。

以上説明したように、被害に至った直接的な要因としては、火山灰質土の分布の地域性がまず挙げられるが、構成粒子の物理・工学特性が力学特性に強く関与していることは間違いない。したがって、火山灰質細粒土に関してもその動的力学特性を詳細に究明し、適切な耐震性能確保の要求が高まっていくのは必然のように考えられる。

#### 4.4 その他の特殊土地盤

軟弱粘性土の代表格である高有機質土（泥炭あるいは黒泥を指す）が広域にみられるのは北海道と東北地区である。特に北海道では、概算で2000km<sup>2</sup>におよぶ地域で堆積しており、北海道平野面積の6%強にも及ぶとされている。なお規模の大小はあるものの、高有機質土は全国各地に地域土として散在している。これらが少面積であると調査設計段階で見落とされるケースもあるようで、本工事を始めてから、問題の対応が求められることがたびたびある。

従来この種の地盤では、静的場の沈下（圧密・せん断による）問題が大きなテーマになっており、変形予測や設計パラメータについて詳細な研究がなされてきている。近年では、真空圧密工法などに工夫を加え、強制圧密に効果的な手法が開発されるなど、地盤改良技術が進んでいる。

ところで、2003年十勝沖地震の際に、十勝川流域や石狩川流域の高有機質土（特に泥炭）地盤を含む大規模



写真－2 北見市の火山灰地盤の大規模液状化  
(a) 端野地区の農地面に噴出した泥流化火山灰  
(b) 出現した多数の噴砂孔 (c) 広郷地区

な堤防の破壊が誘発された。特に被害は震源に近い十勝川水系下流域に集中し、被害形態としては、堤防天端の縦断方向の亀裂・沈下・法面のすべりが卓越していた（たとえば写真－3参照）。泥炭地盤が強震時にどのように応答し、破壊にどのような影響を与えたのかが、問題視された。

2003年十勝沖地震による堤防破壊は液状化を絡んだ極めて複合的なものであったが、破壊の主因については次のように考察<sup>15)</sup>している。すなわち堤防基礎下にある泥炭層が、その圧密沈下を受けたために、地下水以下に没した堤体土が液状化し、堤防を崩壊に導いたものである（図－14参照）。この点に関しては、1993年釧路沖地震の際にも指摘されていたが、本地震で改めて注目されたものである。このような破壊は、通常の沖積粘性土と比較しても、遙かに圧縮性の高い泥炭地盤特有の性質に起因するものであり、泥炭地盤が地震動を増幅させたこと、そもそも断抵抗力の小さなものであったこと等が、堤体の変状を拡大したものと見ている。泥炭のような軟弱な地盤上の堤防盛土の耐震性能を確保するという観点から、本事例は重要な知見とみなされる。泥炭地盤上に築造された河川堤防は相当な延長になっていることから、河川堤防の耐震性向上にいつそうの努力を傾注する必要がある。残念ながら、当時は泥炭に関する動的変形特性や解析に用いるべき妥当なパラメータの設定がデータの欠如のため叶わない状況にあった。動態時の力学特性の把握に全力を挙げる必要があると痛感した特殊土であった。

## 5. おわりに

日本各地にみられる特殊土について、その災害履歴との観点で概説し、地盤力学が果たしている役割を考察した。多様な地盤が、多様化する外力に対してどのように応答しているか、未知の部分が多々あり、研究上の課題が多岐にわたることを理解していただけたと思う。特に、土木・建築工学などの工学各領域からもとめられる問題に適切に対応しうる地盤工学の確立のためになすべき仕事が、まだまだ多いことを汲み取っていただければ幸いである。

地盤工学の大きな役割は、地震、降雨、急激な気温・環境変化などの自然外力に対して、社会基盤を支える地盤が示す反応を正当に評価し、適切に管理する術を構築することである。そのことをなし遂げるためには、地域土が示す特異な力学的応答を熟考し、従来の物差し



写真－3 十勝川水系の堤防崩壊の様子

- (a) 法面崩壊全景 (b) 天端面の崩壊状況  
(c) 液状化とみられる堤防のすべり崩壊



であるTerzaghi型地盤力学と大いに対話する必要がある。多くの場合、そこでの物差しでは事足りず、新たな物差し（新たな地盤パラメータや試験法）が求められることになると予想される。このような意味で、新たな視点で力学を構成する法則が誕生してくる可能性が、地盤力学にはあると思う。

上述のように、各地域土は特別なものでもなく、特殊なものでもない、その堆積環境が創出した地域固有の地盤である。今後とも地盤工学の学理に基づいた普遍的な議論をもとに、真理を追究していくことが、工学における地盤力学の健全な発展を促すことになる信じている。

### 参 考 文 献

- 1) Ishikawa, T. and Miura, S. : Influence of freeze-thaw action on deformation-strength characteristics and particle crushability of volcanic coarse-grained soils, *Soils & Foundations*, Vol. 51, No. 5, 2011 (in press).
- 2) Ishikawa, T., Tokoro, T., Ito, K. and Miura, S. : Testing methods for hydro-mechanical characteristics of unsaturated soils subjected to one-dimensional freeze-thaw action, *Soils & Foundations*, Vol. 50, No. 3, pp. 431-440, 2010.
- 3) Ishihara, K. and Towhata, I. : Sand response to cyclic rotation of principal stress directions as induced by wave loads, *Soils & Foundations*, Vol. 23, No. 4, pp. 11-26, 1983.
- 4) Miura, K. and Miura, S. and Toki, S. : Deformation behavior of anisotropic dense sand under principal stress axes rotation, *Soils & Foundations*, Vol. 26, No. 1, pp. 36-52, 1986.
- 5) Kawamura, S., Miura, S. and Yokohama, S. : Mechanical behavior of anisotropic sand ground beneath structures subjected to cyclic loading such as wave loading, *Soils & Foundations*, Vol. 50, No. 5, pp. 645-657, 2010.
- 6) 地盤工学会 2009年7月豪雨による山口県土砂災害緊急調査団：2009年7月21日豪雨による山口県防府地区での斜面災害，土と基礎，Vol. 57, No. 12, pp. 39~42, 2009.
- 7) 三浦清一・八木一善・石川達也：講座 火山灰質土 -その性質と設計施工- 2. 日本に分布する火山灰質土の概要と分類，土と基礎，Vol. 53, No. 10, pp. 39~46, 2005.
- 8) 地盤工学会編：地盤材料試験の方法と解説 -二分冊の2-，第8編 特殊土の試験，pp. 945~1022, 2009.
- 9) Miura, S., Yagi, K. and Asonuma, T. : Deformation-strength evaluation of crushable volcanic soils by laboratory and in-situ testing, *Soils & Foundations*, Vol. 43, No. 4, pp. 47-57, 2003.
- 10) 三浦清一・八木一善・川村志麻：北海道火山性粗粒土の静的および動的力学挙動と粒子破碎，土木学会論文集，No. 547/III-36, pp. 159-170, 1996.
- 11) 三浦清一・八木一善・川村志麻：破碎性粗粒火山灰土の繰返し非排水変形-強度特性に及ぼす応力履歴の影響，土木学会論文集，No. 547/III-36, pp. 221-229, 1996.
- 12) 三浦清一・八木一善：火山灰質粒状体の圧密・せん断による粒子破碎とその評価，土木学会論文集，No. 561/III-38, pp. 257-269, 1997.
- 13) 三浦清一：火山灰質地盤におけるN値評価と活用上の留意点，基礎工，Vol. 31, No. 2, pp. 257-269, 2003.
- 14) 風間基樹・三浦清一・八木一善・海野寿康・鈴木輝之・伊藤陽司：講座 火山灰質土 -その性質と設計施工- 6. 火山灰質地盤の被害事例，土と基礎，Vol. 54, No. 2, pp. 45~54, 2006.
- 15) 2003年十勝沖地震地盤災害調査委員会(委員長 三浦清一)：2003年十勝沖地震地盤災害調査報告書，地盤工学会，pp. 60-72, 2004.
- 16) 北郷繁・土岐祥介：地震による火山灰および砂地盤の沈下に関する土質工学的研究，1968年十勝沖地震調査委員会調査報告，北海道大学工学部，pp. 463~494, 1969.

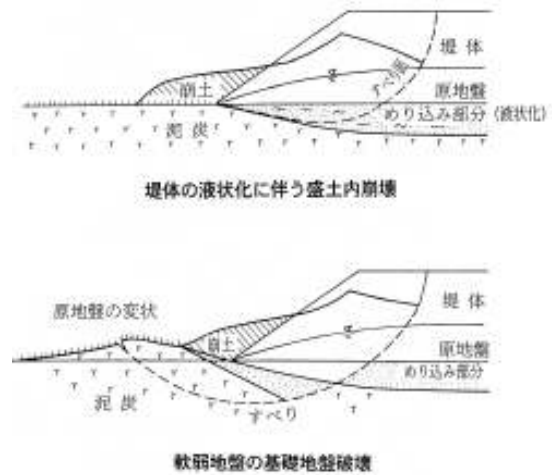


図-1 4 堤体材料の液状化と基礎地盤のすべり破壊に伴う堤防盛土の崩壊

土木学会 平成23年度 定時総会  
特別講演

# 地盤力学の理論から実践へ ー進化する災害に直面してー

みうら せいいち  
三浦 清一

(北海道大学大学院教授/土木学会副会長)

平成23年5月27日

ホテルメトロポリタンエドモント