

### 3.3 地盤変状の影響を受ける道路橋の耐震安全対策技術に関する研究②

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：地質・地盤研究グループ（地質）

研究担当者：佐々木靖人、浅井健一、日外勝仁

#### 【要旨】

本研究は、山地部の地盤を主対象として、地震による斜面地盤変状の事例を収集・分析することにより、地震時に道路橋に影響を及ぼすような変状を起こしやすい地盤条件の判定手法を提案することを目的としている。

本研究ではまず、過去の地震における斜面の地盤変状事例を収集し、地盤変状箇所の地形・地質の特徴の整理と変状パターン分類を行った。その結果、変状パターンについては以下に示すパターンに分類することができた。①古い地すべりなどにより形成された崩積土のすべりまたは崩壊、②厚い風化層または未固結層のすべりまたは崩壊、③流れ盤の層理面・節理面・断層面・薄い脆弱層によるすべりまたは崩壊、④下部の脆弱層の変形による上部の岩盤の変状又は崩壊、⑤柱状節理の発達した岩盤の節理面からの変状または崩壊。

続いて、上記の変状パターン③に相当する事例を代表事例として、地形面、地層境界面、弱層等の3次元地質モデルをベースに数値解析モデルを作成して3次元FEMによる動的解析を行った。その結果、すべり面が存在するケースの解析では、大変位という点では実際の現象と調和的であるが変位量の予測は困難であることが示された。また、すべり面が存在するケースと存在しないケースでは解析結果に差があり、弱層等の地質構造を適切に解析モデルに反映させることが重要であることが示された。

以上の結果をふまえて「地盤変状の影響を受ける道路橋の耐震安全対策ガイドライン（案）（仮称）」（共通編・調査編）を作成した。

キーワード：道路橋、地震、斜面、災害、地盤、変状

#### 1. はじめに

平成20年6月に発生した岩手・宮城内陸地震における国道342号祭時（まつるべ）大橋の落橋や国道397号尿前（しとまえ）溪谷橋の橋台基礎地盤の変状などの例のように、地震時に大きな地盤変状を生じる箇所に立地する道路橋は、道路通行の安全性はもとより、復旧、復興の長期化などにより地域経済に大きな損失を及ぼしかねない甚大な被害を生じる可能性を有する。このような橋梁が多いと想定される山地部等の橋梁は数万橋に及び、道路ネットワークの確保のためにも地震時に大きな地盤変状を受ける立地条件の道路橋に対する耐震安全性の確保が求められる。そのためには、地震時に変状を起こしやすい地盤条件の判定と道路橋への影響を推定する手法が必要となるが、その手法は確立されていない。

したがって、本研究では、山地部の地盤を主対象として、地震による斜面地盤変状の事例を収集・分析することにより、地震時に道路橋に影響を及ぼすような変状を起こしやすい地盤条件の判定手法を提案することを目的

としている。

本研究ではまず、岩手・宮城内陸地震、新潟県中越地震、東北地方太平洋沖地震などにおける斜面の地盤変状事例を収集し、地盤変状箇所の地形・地質の特徴の整理と変状パターン分類を行うとともに、代表事例として分類した変状パターンのうち1つ（流れ盤の層理面・節理面・断層面・薄い脆弱層によるすべりまたは崩壊）に相当する事例について、地形面、地層境界面、弱層等の3次元地質モデルをベースに数値解析モデルを作成して解析を行った。また、地震時に変状を起こしやすい斜面の地盤条件の判定を行うための「地盤変状の影響を受ける道路橋の耐震安全対策ガイドライン（案）（仮称）」（以下「ガイドライン（案）」）（共通編・調査編の案）を作成した。

#### 2. 研究方法

##### 2.1 斜面地盤の変状事例収集と変状パターン分類

過去に土木研究所が調査した平成16年新潟県中越地

震の報告書<sup>1)</sup>、平成20年岩手・宮城内陸地震の道路斜面災害事例、同地震や東北地方太平洋沖地震での災害箇所について個別に土木研究所が道路管理者等から入手した報告書等の資料に加え、文献の検索も行い、それらをもとに斜面地盤の変状事例を収集した。収集事例は当該箇所に道路橋がない事例も含めているが、小規模な表層崩壊や落石は含めず、道路橋の基礎が存在した場合に変状を生じると想定される規模のものとし、42事例を収集することができた。

収集した斜面地盤変状事例について、上記の資料および検索した文献に基づき、地形・地質の特徴を整理するとともに、変状のパターン毎に分類した<sup>2)</sup>。

## 2.2 数値解析

分類した変状パターンのうち、特に「流れ盤の層理面・節理面・断層面・薄い脆弱層によるすべりまたは崩壊流れ盤の層理面・節理面・断層面・薄い脆弱層によるすべりまたは崩壊」などは良好な岩盤内に存在することが多く、またすべり面となりうる層や面の強度に依存するため、踏査だけでは把握しにくい。このような箇所については、地盤物性・強度の試験や解析などの検討が必要となる。したがって、本パターンの事例から代表事例を選定し、地形面、地層境界面、弱層等の3次元形状をモデル化した地質モデルを介して3次元のFEM解析モデルを作成し、地震時の応力状態に関する動的解析を行った。当該地区は岩手・宮城内陸地震により長さ約160m、幅約120m、深さ約35mの規模の岩盤地すべりが発生し、当該箇所に架設されていた道路橋の地すべり移動体側の基礎が約11m移動し落橋した。地質は新第三紀の凝灰質砂岩であり、層理面とすべり面の傾斜が調和的（いずれも約5度の緩傾斜）な流れ盤構造であった。すべり面となったのは凝灰質砂岩に挟まれた凝灰岩の薄層である。当該箇所の地形は緩傾斜の平坦面（段丘面）で両側が河川の浸食により急崖となり、半島状の地形となっていた。

24年度作成の地質モデルからのFEM解析モデル作成は、当該地区の調査検討委員会報告書（以下「報告書」）で検討された地質状況も参考にしながら行った。

## 2.3 ガイドライン（案）作成

変状事例のパターン分類結果、地形・地質の特徴、数値解析の結果等をふまえ、「ガイドライン（案）」案は、①既存資料調査、地形判読などによる地形および地質構造の把握、現地踏査による確認と補足→詳細調査→②ボーリング等の詳細地質調査による詳細な地質構造の解明、解析等の詳細検討に必要な物性値情報の取得→③地震時の応力状態等に関する数値解析などの詳細な検討を加え

た判定、という流れに沿って構成することとし、共通編として総則、調査編として予備調査、詳細調査、判定について記述した。また、調査編の冒頭では、調査および判定にあたって認識しておく必要のある、地震時の斜面地盤変状の形態、特徴等について記述した。これらの記述にあたっては、本研究で整理した変状パターンおよび地形・地質の特徴、数値解析結果のほか、道路土工一切土工・斜面安定工指針<sup>3)</sup>、杭基礎設計便覧<sup>4)</sup>、斜面上の深礎基礎設計施工便覧<sup>5)</sup>を参考とした。

## 3. 研究結果

### 3.1 収集した事例の概要

収集した42事例の地震の内訳は、北海道東方沖地震（平成6年）1、新潟県中越地震（平成16年）6、新潟県中越沖地震（平成19年）3、岩手・宮城内陸地震（平成20年）19、東北地方太平洋沖地震（本震：平成23年）7、同誘発地震（いわき：平成23年）2、長野県北部地震（平成23年）4である。なお、収集できた事例数は入手できた資料や検索できた文献に依存するものであり、地震ごとの地盤変状の発生数の状況をそのまま反映しているわけではない。変状の形態は、資料・文献に記載の名称に従えば地すべり26（「崩壊型地すべり」と記載されている1事例を含む）、崩壊16（「深層崩壊」と記載されている1事例を含む）である。ただし、地すべりと記載されているものの中にも土塊が完全に攪乱された状態で発生域外まで崩落した（崩壊とみなせる）事例や中間的と見なせる事例があるなど、必ずしも同一の基準で区分されていない。

### 3.2 収集した事例の地形・地質の概略的特徴

収集した事例の斜面変状幅、斜面変状長さ、斜面変状層厚についてそれぞれ図-1～3に示す。ただし、資料・文献に記載のないものは除いている（以下同じ）。また、斜面変状長さについては斜距離のものと水平距離のものがある（斜距離を基本としたが、一部に水平距離のみの記載で斜距離を算出できないものがあるため）。幅では300mまで、長さでは400mまで、層厚では40mまでのもので約9割を占めるが、地すべりとされた事例の中にはこれを超えるものも存在する。表-1に収集した事例箇所の地質を示す。第三紀層の火山砕屑岩類と堆積岩類（砂岩泥岩互層、薄層を挟む層状砂岩・泥岩）の割合が多い。ただし、前述のように収集できた事例は入手できた資料や検索できた文献に依存するものであるため、各地質における変状の発生のしやすさを直接反映しているわけではないことに留意する必要がある。図-4に収

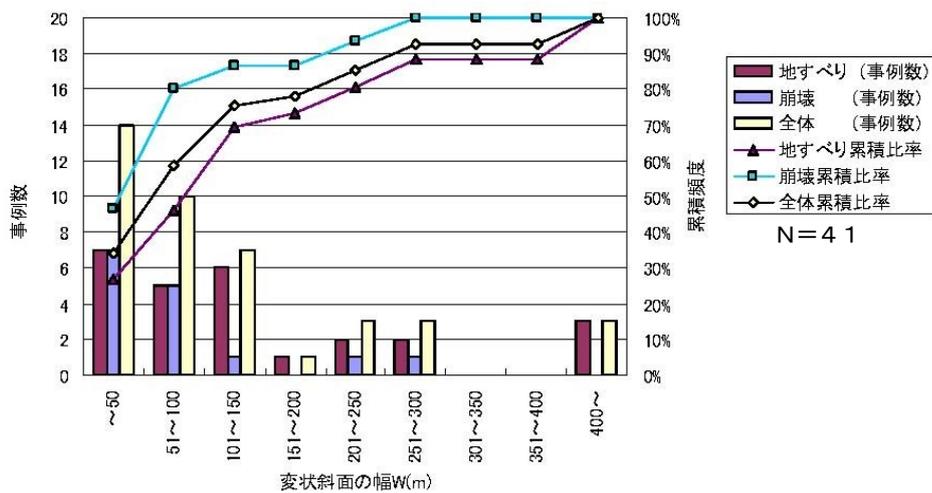


図-1 収集した事例の斜面変状幅

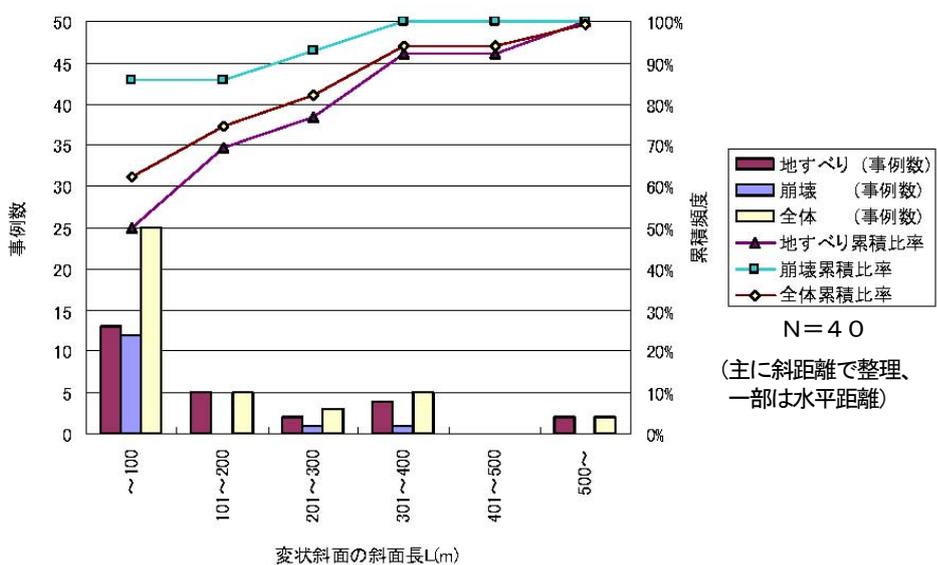


図-2 収集した事例の斜面変状長さ

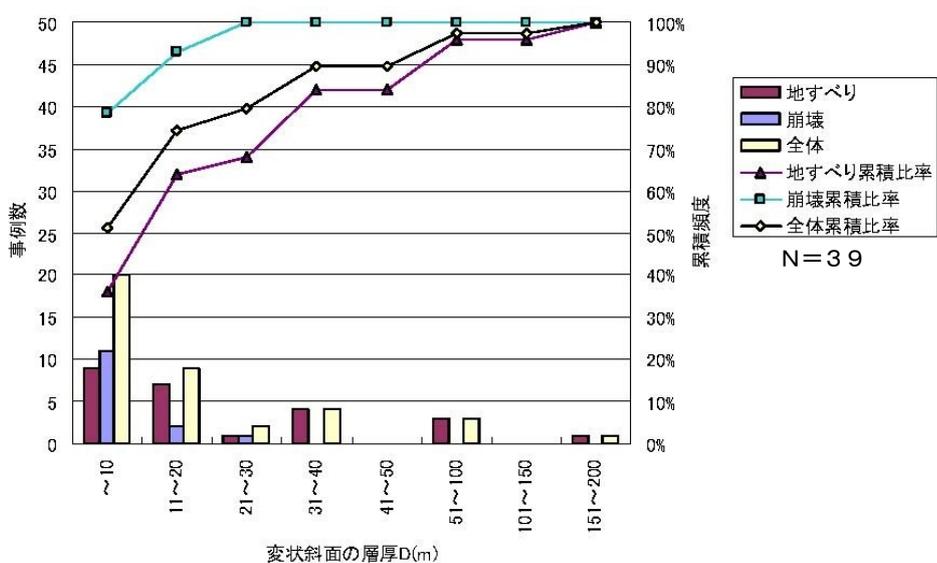


図-3 収集した事例の斜面変状層厚

集した事例のすべり面・崩壊面の勾配を示す。第四紀層や中生層の事例は少ないため地質年代の違いによる差を示すのは難しいが、地すべりとされた事例の方が崩壊とされた事例に比べて緩勾配のものが多く、中生層では $10^\circ$ 以下の事例は見られない。表-2に収集した事例箇所の地質構造(層理面、節理面など)の流れ盤・受け盤の別を示す。流れ盤の事例が非常に多い。

### 3.3 変状パターンの分類

収集した42事例について、資料・文献の記載をもとに変状パターンの分類を行い、以下に示すパターンに分類することができた。なお、あくまでも資料・文献の記載をもとにした分類であるため、事例によっては詳細調査等が明らかになれば別の変状パターンに属することもありうる。また、中間的なものや複数に属する(どちらが主か判断しがたい)ものもあるため、事例数の合計は42に一致しない。  
 (1) 古い地すべりなどにより形成された崩積土のすべりまたは崩壊(図-5)

いわき市の才鉢地区の地すべり(東北地方太平洋沖地震の誘発地震:平成23年4月11日)など5事例が該当すると考えられる。

(2) 厚い風化層または未固結層のすべりまたは崩壊(図-6)

元の地盤が風化した層のすべり・崩壊は5事例、新しい時代に堆積した未固結層のすべり・崩壊は7事例(東北地方太平洋沖地震(平成23年3

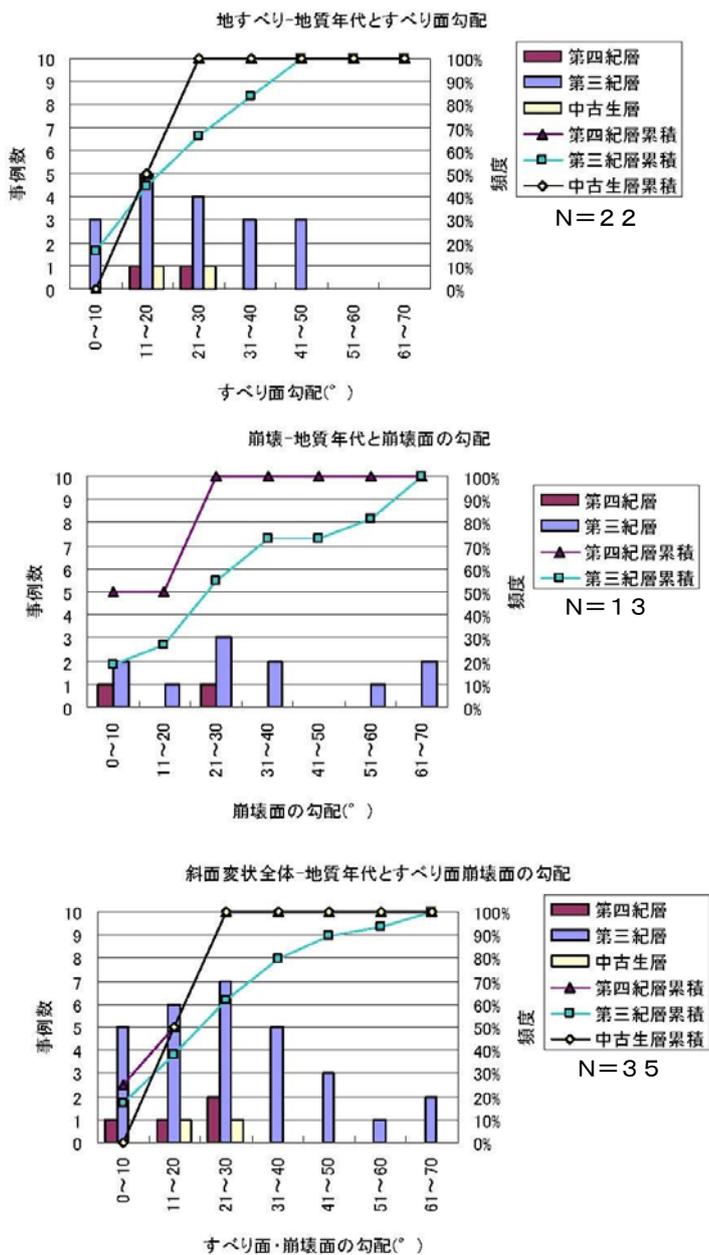


図-4 収集した事例のすべり面勾配

表-1 収集した事例箇所の地質

地質年代	岩相	事例数
第四紀層	溶結凝灰岩	1
	ローム	5
第三紀層	層状砂岩(薄層挟在)	2
	層状泥岩(薄層挟在)	4
	砂岩泥岩互層	11
	石英安山岩	1
	火山碎屑岩類	16
中生層	砂岩頁岩互層	1
	片岩類	1

N=42

月11日)における白河市周辺の葉ノ木平地区・岡ノ内地区等)が該当すると考えられる。

(3)流れ盤の層理面・節理面・断層面・薄い脆弱層によるすべりまたは崩壊(図-7)

表-2 収集した事例箇所の地質構造の流れ盤・受け盤の別

	事例数
流れ盤	32
水平	2
水平~受け盤	1
受け盤	1

N=36

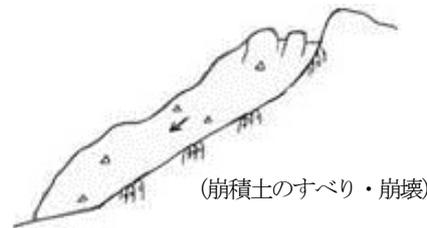
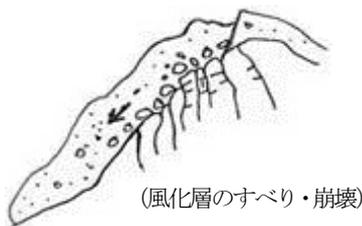
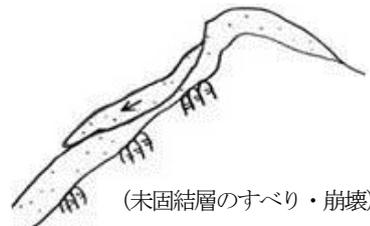


図-5 変状パターン(1)模式図



(風化層のすべり・崩壊)



(未固結層のすべり・崩壊)

図-6 変状パターン(2)模式図



(流れ盤の層理面・節理面・断層面・薄い脆弱層によるすべり・崩壊)

図-7 変状パターン(3)模式図

祭時大橋の落橋をもたらした地すべり(岩手・宮城内陸地震:平成20年6月14日)、荒砥沢地すべり(岩手・宮城内陸地震:平成20年6月14日)、いわき市の上釜戸地区の地すべり(東北地方太平洋沖地震の誘発地震:平成23年4月11日)など19事例が該当すると考えられる。(4)下部の脆弱層の変形による上部の岩盤の変状又は崩壊(図-8)

4事例が該当すると考えられる。いずれも岩手・宮城内陸地震によるもので、溶結凝灰岩の下部に脆弱層が存在していた。なお、脆弱層が薄くなると(3)に該当し、どこで区分するかは難しい。

(5)柱状節理の発達した岩盤の節理面からの変状または



図-8 変状パターン(4) 模式図

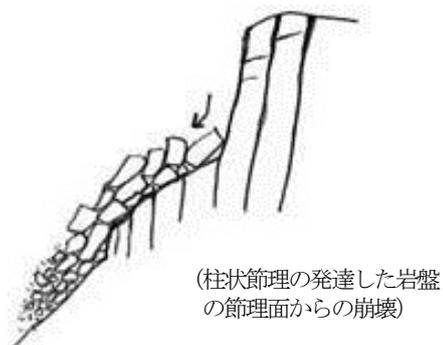


図-9 変状パターン(5) 模式図

崩壊 (図-9)

4 事例が該当すると考えられる。いずれも岩手・宮城内陸地震によるもので、溶結凝灰岩または溶岩からなる斜面であった。

### 3.4 代表的な事例における地形・地質の特徴

変状パターン③を中心に代表的な事例について地質調査報告書等の詳細資料を収集し、収集することができた6事例について地形・地質の特徴を整理した結果を表-3に示す。3.3で示した変状パターン③が4事例、①(古い地すべりなどにより形成された崩積土のすべりまたは崩壊)と②(厚い風化層あるいは未固結堆積層のすべりまたは崩壊)が各1事例である。各事例の状況を以下に述べる。

#### (1)M地区

岩手・宮城内陸地震により長さ約160m、幅約120m、深さ約35mの規模の岩盤地すべりが発生した。当該箇所には道路橋が架設されており、地すべり移動体側の基礎が約11m移動し落橋した。すべり面の傾斜は約5度で下部はさらに緩い。地質は新第三紀の凝灰質砂岩であり、

表-3 各地区の地形・地質の特徴

変状パターン <sup>1)</sup>	地区	規模および地形の特徴	地質構造等の特徴
③	M地区	<ul style="list-style-type: none"> <li>・岩手・宮城内陸地震により発生</li> <li>・長さ約160m、幅約120m、深さ約35m、土量約226,800m<sup>3</sup></li> <li>・緩傾斜の平坦面(段丘面)で、両側が河川により浸食されて急崖となっている。</li> <li>・当該箇所は地すべり地形を呈していないが、近隣には地すべり地形が多く存在する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地質:新第三紀の凝灰質砂岩</li> <li>・すべり面傾斜約5度(下部はさらに緩い)</li> <li>・地質構造:層理面の傾斜約5度、すべり面と調和的</li> <li>・複数のポーリングですべり面付近に軟質化した凝灰岩層(厚さ2~5cm程度)が存在</li> </ul>
	K地区	<ul style="list-style-type: none"> <li>・東北地方太平洋沖地震の誘発地震により発生</li> <li>・長さ約200m、幅約250m、深さ約30m、土量約775,000m<sup>3</sup></li> <li>・尾根状の丘陵地を呈する。</li> <li>・当該箇所の末端部および近隣に地すべり地形が判読されている(過去の調査報告書)。当該地区を包括する地すべり地形や、防災科学技術研究所の地すべり地形分布図による地すべり地形は見られない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地質:新第三紀中新世の堆積岩(凝灰質砂岩、砂岩、シルト岩等)</li> <li>・すべり面傾斜約10度</li> <li>・地質構造:層理面の傾斜約10度、すべり面と調和的</li> <li>・すべり面の上方延長に破碎部(厚さ10~20cm程度、層面断層と記載されている)が存在(ポーリング調査および現地踏査による)</li> </ul>
	O地区	<ul style="list-style-type: none"> <li>・東北地方太平洋沖地震(本震)により発生</li> <li>・長さ約33m、幅約30m、深さ約7m、土量約1,730m<sup>3</sup></li> <li>・傾斜30度前後(上部は20度前後)のやや凸状の斜面。</li> <li>・当該箇所は地すべり地形を呈していない。防災科学技術研究所の地すべり地形分布図でも当該地区に地すべり地形は見られない。ただし周辺地区において同様の走向・傾斜の斜面で地すべり地形が判読されている箇所がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地質:新第三紀中新世の砂岩、シルト岩</li> <li>・すべり面傾斜約20度</li> <li>・地質構造:層理面の傾斜約20度、すべり面と調和的</li> <li>・すべり面の上方延長に粘土質の脆弱層(厚さ60~70cm程度)が存在(ポーリング調査による)</li> </ul>
	Y地区	<ul style="list-style-type: none"> <li>・東北地方太平洋沖地震(本震)により発生</li> <li>・長さ約90m、幅約50m、深さ約10m、土量約22,500m<sup>3</sup></li> <li>・傾斜30度前後のやや凸状の斜面。</li> <li>・当該箇所は地すべり地形を呈していないが、当該箇所と同様の走向・傾斜の近隣の斜面で地すべり地形が判読されている(調査報告書)。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地質:新第三紀中新世の砂岩、泥岩等</li> <li>・すべり面傾斜約25度</li> <li>・地質構造:層理面の傾斜20~30度、すべり面と調和的</li> <li>・すべり面付近に脆弱層が存在したかどうかは不明(上方斜面でのポーリング調査がないため)</li> </ul>
①	S地区	<ul style="list-style-type: none"> <li>・東北地方太平洋沖地震の誘発地震により発生</li> <li>・長さ約90m、幅約120m、深さ約18m、土量約64,800m<sup>3</sup></li> <li>・傾斜30度前後の尾根状斜面。</li> <li>・当該箇所をほぼ包括する地すべり地形が存在する。防災科学技術研究所の地すべり地形分布図にも記載されている。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地質:基盤は古生代の結晶片岩(塩基性片岩、泥質片岩等)、その上位に地すべり崩積土が厚く分布</li> <li>・すべり面傾斜約25度</li> <li>・地質構造:地すべり崩積土と基盤の境界が傾斜20~25度の流れ盤</li> <li>・すべり面の上方延長に粘土化が顕著な層(厚さ約20cm)が存在(ポーリング調査による)</li> </ul>
②	H地区	<ul style="list-style-type: none"> <li>・東北地方太平洋沖地震(本震)により発生</li> <li>・長さ約160m、幅約70m、深さ約10m、土量約30,000m<sup>3</sup></li> <li>・傾斜20度前後のやや凸状の斜面。</li> <li>・当該地区は地すべり地形を呈していない。防災科学技術研究所の地すべり地形分布図でも当該地区や隣接地に地すべり地形は記載されていない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地質:第四紀の火山灰層</li> <li>・すべり面傾斜15~20度(上部は30度程度とやや急)</li> <li>・滑落崖のすべり面付近に脆弱な粘土化した火山灰層(厚さ10cm程度)が存在(すべり面と同方向・同程度の傾斜)</li> </ul>

層理面の傾斜は約5度とすべり面の傾斜と調和的であった。当該箇所は緩傾斜の平坦面（段丘面）で両側が河川の浸食により急崖となり、半島状の地形となっていた。当該箇所自体には地すべり地形は認められていなかったが、周辺には複数の地すべり地形が認められていた。地すべり移動体および背後のボーリング調査によれば、すべり面付近の弱層化した部分の厚さは2～5cm程度と薄い。すべり面となった層準には厚さ約3cmの凝灰岩の薄層が認められた<sup>9)</sup>。

#### (2) K地区

東北地方太平洋沖地震の誘発地震により長さ約200m、幅約250m、深さ約30mの規模の岩盤地すべりが発生した（写真-1）。すべり面の傾斜は約10度であった。地質は新第三紀中新世の堆積岩（凝灰質砂岩、砂岩、シルト岩等）であり、層理面の傾斜は約10度とすべり面の傾斜と調和的であった。当該箇所は尾根状の丘陵地であり、過去の報告書では末端部および近隣に地すべり地形が判読されていたが、当該地区を包括する地すべり地形は見られず、防災科学技術研究所の地すべり地形分布図でも当該地区に地すべり地形は記されていない。ボーリング調査および現地踏査により、すべり面の上方延長部に厚さ10～20cmの破砕部が認められた。



写真-1 K地区（管轄事務所提供の調査報告書より）

#### (3) O地区

東北地方太平洋沖地震（本震）により長さ約33m、幅約30m、深さ約7mの規模で岩盤地すべりが発生した（写真-2）。当該箇所は傾斜約30度のやや凸状の斜面で、すべり面の傾斜は約20度であった。地質は新第三紀中新世の砂岩およびシルト岩であり、層理面の傾斜は約20度の流れ盤で、すべり面の傾斜と調和的であった。当該箇所には地すべり地形は認められておらず、防災科学技術研究所の地すべり地形分布図でも当該地区に地すべり地形は記されていないが、周辺地区の同様の走向・傾斜の斜面で地すべり地形が記されている箇所がある。ボー

リング調査により、すべり面の上方延長部に厚さ60～70cm程度の粘土質の脆弱層が認められた。



写真-2 O地区（管轄事務所提供の調査報告書より）

#### (4) Y地区

東北地方太平洋沖地震（本震）により長さ約90m、幅約50m、深さ10mの規模で地すべりが発生した（写真-3）。当該箇所は傾斜約30度のやや凸状の斜面で、すべり面の傾斜は約25度であった。地質は新第三紀中新世の砂岩、泥岩等であり、地すべり移動体は崩積土および風化部に相当する。層理面の傾斜は20～30度の流れ盤で、すべり面の傾斜と調和的であった。当該箇所には地すべり地形は認められていないが、約200～400m東南東の同様の走向・傾斜の斜面には防災科学技術研究所の地すべり地形分布図に複数の地すべり地形が記されている。地すべり移動体内のボーリング調査ではすべり面付近は厚さ20～25cm程度の礫混じり粘土状であったが、上方斜面でのボーリング調査が行われていないため、すべり面の上方延長部が同様の状態であったかどうかは不明である。



写真-3 Y地区（管轄事務所提供の調査報告書より）

#### (5) S地区

東北地方太平洋沖地震の誘発地震により長さ約90m、幅約120m、深さ約18mの規模の崩積土地すべりが発生

した(写真-4)。当該箇所は傾斜約30度の尾根状斜面で、すべり面の傾斜は約25度であった。地質は基盤が古生代の結晶片岩(塩基性片岩、泥質片岩等)であり、その上位に地すべり崩積土が分布する。基盤と地すべり崩積土の境界は傾斜20~25度の流れ盤で、すべり面の傾斜と調和的であった。防災科学技術研究所の地すべり地形分布図では当該箇所を包括する地すべり地形が記されており、地すべり崩積土が分布することと調和的である。ボーリング調査により、すべり面の上方延長部に厚さ20cm程度の粘土化の顕著な層が認められた。



写真-4 S地区(管轄事務所提供の調査報告書より)

#### (6) H地区

東北地方太平洋沖地震(本震)により長さ約160m、幅約70m、深さ10mの規模で崩壊した(写真-5)。当該箇所は傾斜約20度のやや凸状の斜面で、すべり面の傾斜は約15~20度程度(上部は約30度とやや急)であった。当該箇所には地すべり地形は認められておらず、防災科学技術研究所の地すべり地形分布図でも当該地区や隣接地に地すべり地形は記されていない。当該地区の地質は第四紀の火山灰層からなる。滑落崖の露頭調査により、当該地区の火山灰層の走向・傾斜はすべり面と調和



写真-5 H地区(土木研究所HPより)

的であり、またすべり面付近に厚さ10cm程度の軟弱な粘土化した火山灰層が認められた<sup>7)</sup>。

以上に述べた6地区の地形・地質の特徴を整理すると、以下のことがいえる。

- ① S地区(平成23年度整理の変状パターン①)以外では、周辺に地すべり地形が認められる場合も多いものの、変状発生箇所自体が必ずしも地すべり地形を呈していない。地すべり地形以外の微地形の特徴についても今後検討する必要があるが、地形的特徴のみから変状範囲を一義的に推定できないことを示しているといえる。
- ② 地質構造が流れ盤ですべり面と調和的な事例が多い。変状の可能性や範囲を判定する上で地質構造の把握が重要であるといえる。
- ③ すべり面の上方延長部に破砕部、粘土質な部分などの脆弱層が存在する事例が多い。このような脆弱層の分布と性状(強度特性等)の把握が重要であるといえる。

### 3.5 数値解析

3.4で述べたように、当該箇所の地形だけから簡単に変状可能性や範囲を判定するのは難しいことから、周辺の変動地形、地質構造、脆弱層の分布・性状(強度特性等)と併せ、判定手法を検討する必要がある。そのためには、調査手法の検討とともに、数値解析手法の適用についての検討も必要である。したがって、表-3の6事例のうちM地区を代表事例として選定し、地震時の応力状態に関する動的FEM解析を行った。

数値解析モデルの構築にあたっては、地質構造を適切に反映することが必要である。したがって、解析モデル構築のベースとなる、地形面、地質境界面、脆弱層などの3次元形状をモデル化した地質モデルを作成し、それをもとに3次元のFEM解析モデルを作成した。地質モデルおよび解析モデル作成にあたっては、当該地区の調査検討委員会報告書<sup>8)</sup>(以下「報告書」)で検討された地質状況を参考にした。作成した3次元FEM解析モデルを図-10に示す。解析モデル化した地質は次の通りである。

- ・凝灰質砂岩(当該地区の基盤地質)
- ・地すべり移動体(構成物質は上記と同じ凝灰質砂岩)
- ・段丘堆積物(上部平坦面に載る)
- ・河床砂礫(地すべり末端を流れる河床部)
- ・断層破砕帯(地すべり移動体および基盤を横切ると推定されている高角度断層で、報告書の記載では岩手・

表-4 解析に用いた物性値

名称	静的変形特性						
	物性値						
	ポアソン比 $\nu$	ヤング率 $E(\text{kN/m}^2)$	単位体積重量 $\gamma(\text{kN/m}^3)$	粘着力 $C(\text{kN/m}^2)$	内部摩擦角 $\phi(^{\circ})$	引張強度 $\sigma_t(\text{kN/m}^2)$	静止土圧係数 $K_0$
CH級	0.30	1,000,000	23.00	2,000	45	400	0.5
CM級	0.30	500,000	22.00	1,000	40	200	0.5
CL級	0.30	100,000	20.00	300	30	60	0.5
段丘堆積物	0.35	50,000	18	20	35	4	0.5
河床砂礫	0.35	100,000	20	20	40	4	0.5
断層破砕帯	0.40	50,000	19	70	25	14	0.5

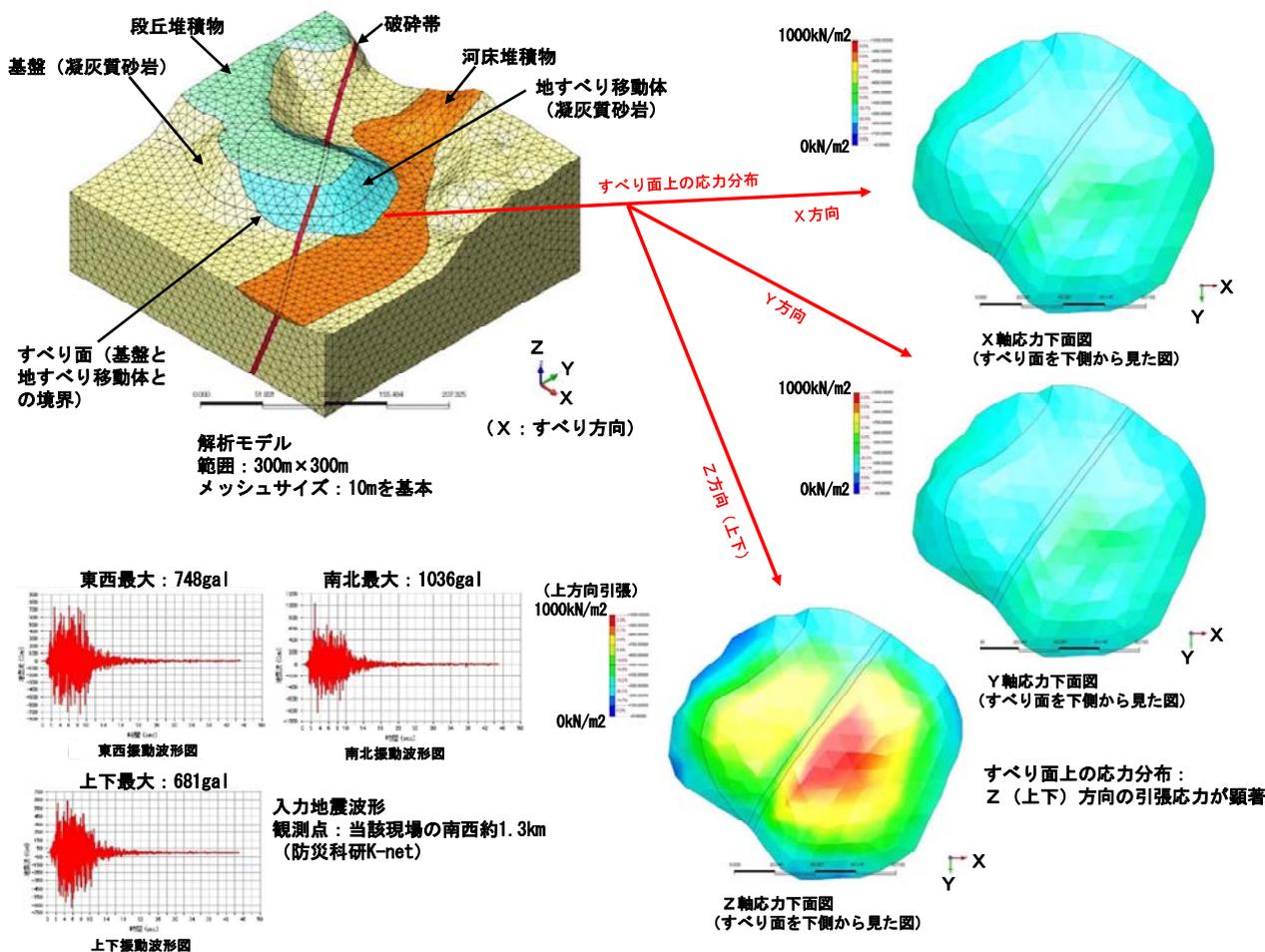
名称	動の変形特性		
	物性値		
	動的ポアソン比 $\nu_d$	動的ヤング率 $E_d(\text{kN/m}^2)$	減衰 材料減衰 減衰比 h
CH級	0.35	2,000,000	0.130
CM級	0.35	1,000,000	0.200
CL級	0.35	200,000	0.260
段丘堆積物	0.40	100,000	0.300
河床砂礫	0.40	200,000	0.300
断層破砕帯	0.45	100,000	0.300

名称	鉛直方向剛性率 $K_n(\text{kN/m}^3)$	せん断方向剛性率 $K_s(\text{kN/m}^3)$	閉口最大量 $V_{mc}(\text{m})$	引張強度 $\sigma_t(\text{kN/m}^2)$	粘着力 $C(\text{kN/m}^2)$	内部摩擦角 $\phi(^{\circ})$	せん断破壊時の応力分配係数 FACT
CH級ジョイント	10,000,000	3,846,154	0.10	400	2,000	45	0.0
CM級ジョイント	5,000,000	1,923,077	0.10	200	1,000	40	0.0
CL級ジョイント	1,000,000	384,615	0.10	60	300	30	0.0

名称	一軸圧縮強度 $q_u(\text{kN/m}^2)$	最大強度に対する残留強度の比 $B_0$	ダイレタンシー角 $I_0(^{\circ})$	$U_r - \tau_p$ の関係係数 M
CH級ジョイント	4,000	0.0	30	0
CM級ジョイント	2,000	0.0	25	0
CL級ジョイント	600	0.0	15	0



宮城内陸地震では動いていないとされている。)

・すべり面（地すべり移動体と基盤の境界に設けた）

モデル化は地すべりのさらに 100m 前後外側付近の範囲まで行った。用いた解析ソフト（市販の 3 次元 FEM 解析ソフト「SoilPlus」）のメッシュ量の制限から、モデルのメッシュサイズは 10m を基本として作成した。

設定した物性値を表-4 に示す。これらのほとんどは、実測値がなく、一般的な値を参考にした仮定である。凝灰質砂岩については報告書に岩級区分についての記載がなかったため、CH 級、CM 級、CL 級の場合の 3 種類について設定した。

入力した地震波形は、当該地区の約 1.3km 西南西の深さ 260m にある防災科学技術研究所 KiK-net 観測点で観測された波形で、最大加速度の絶対値は東西 748gal、南北 1036gal、上下 681gal である。

解析はすべり面が存在するケースと存在しないケースを設けて解析を行った。解析結果の例を図-10 に示す。本図は凝灰質砂岩が CH 級の設定ですべり面が存在する場合の例である。すべり面上の応力分布は上下方向が特に大きく、圧縮方向と交互ではあるが 1000kN/m<sup>2</sup> に近い大きな引張応力が発生した結果となった。

また、同じくすべり面が存在するケースで凝灰質砂岩が CM 級、CL 級の設定で解析を行った場合、いずれのケースにおいてもいつまでも変形し続けて計算が収束しない結果となり、CM 級の場合は入力地震波を観測波形の 90% に低減、CL 級の場合は入力地震波を観測波形の 60% に低減させた解析で初めて計算が収束する結果となった。これは大変位を起こしたという点では実際の現象と調和的であると解釈できる。ただし変位量については全く合わない。強度については仮定で設定しているため限定的な結果ではあるが、数値解析により大変位の可能性についての予測は可能であるが変位量の定量予測は困難であるといえる。

なお、すべり面が存在しないケースでは、凝灰質砂岩が CH 級、CM 級、CL 級のいずれの設定においても入力地震波を低減させる必要なく計算が収束していることから、すべり面が存在する場合の解析結果と併せ、すべり面のとなる弱層の有無が安定性に影響していることを示しているといえる。

したがって、適切な解析を行うためには地盤に存在する弱層など、地質構造を適切に解析モデルに反映していく必要があり、それに見合った十分な調査を行う必要があるといえる。

### 3.6 判定の方向性検討およびガイドライン（案）作成

変状事例のパターン分類結果、地形・地質の特徴、数値解析の結果等をふまえると、地震時に変状を起こしやすい斜面の地盤条件の判定は以下のような流れが考えられる。

- ① 資料調査、地形判読などによる地形および地質構造の把握をまず行い、現地踏査によってそれらの確認と補足を行う。
  - ② ①の結果をもとに、ボーリング等の詳細地質調査を行い、弱層の存在と連続性なども含めた詳細な地質構造を明らかにするとともに、解析などの詳細検討に必要な物性値に関する情報を得る。
  - ③ ①および②の結果をもとに、地震時の応力状態等に関する数値解析などの詳細な検討を加えて判定する。
- このような流れをふまえて「ガイドライン（案）」（共通編・調査編）を作成した（表-5）。その内容は以下のとおりである。

#### (1) 共通編

##### 1) 第 1 章 総則

総則には、「ガイドライン（案）」の目的と適用範囲を記述した。

##### 1-1 目的

「ガイドライン（案）」は、地震時に発生する斜面地盤変状の影響を受ける道路橋に対する耐震安全対策の方法を示すもので、平成 20 年 6 月の岩手・宮城内陸地震で発生した地すべりによる祭時（まつるべ）大橋の落橋を受け、このような災害を完全に防止するのは難しいが、道路橋の被災を少しでも減ずることを目的としていることを記述した。

##### 1-2 適用の範囲

後述の「調査編」に示すように、地震時に地盤変状が発生する斜面の地盤条件の判定と道路橋に対する影響の検討のためには、十分な調査を必要とする。一方で、そのような調査を全国すべての路線の道路橋に適用するのは現実的に困難である。したがって、「ガイドライン（案）」は、特に重要であると道路管理者が認める路線ないし道路橋に対して適用する旨を記述した。

#### (2) 調査編

##### 1) 第 2 章 地震時の斜面地盤変状の形態

地震時に発生する斜面地盤変状に対する調査および地盤条件の判定にあたっては、地震時に発生する斜面地盤変状の形態、特徴等について十分認識しておくことが非常に重要である。したがって、調査編の冒頭に章を設けてその旨を記述するとともに、事例分析で明らかになった地震時の斜面地盤の変状パターン<sup>1)</sup> ①古い地すべり

などにより形成された崩積土のすべりまたは崩壊、②厚い風化層または未固結堆積物のすべりまたは崩壊、③流れ盤の層理面・節理面・断層面・薄い脆弱層によるすべり、④下部の脆弱層の変形による上部の岩盤の変状または崩壊、⑤柱状節理の発達した岩盤の節理面からの変状または崩壊)について解説した。

なお、以上に挙げた地震時の斜面地盤変状の形態は収集できた事例から整理した結果によるものであり、実際に発生しうる斜面地盤変状の形態がこれらに限定されるとは限らない。そのため、どのような斜面地盤変状が発生しうるかについては個々の斜面について十分調査を行った上で、その結果に基づき検討する必要があることも記述した。

## 2) 第3章 予備調査

### 3-1 予備調査の目的

予備調査は計画路線ないし道路橋の周辺の地形・地質条件の概略を既存資料調査、地形判読、現地踏査等によって明らかにすることにより、地震時に地盤変状を起こす可能性のある箇所を抽出することを目的としていることを記述した。

### 3-2 予備調査の内容

予備調査で行う項目について、「既存資料調査」「地形判読」「現地踏査」に分けて列挙し、解説した。

「既存資料調査」では、収集すべき主な資料(地形図、

地質図、地質・土質調査報告書、空中写真、航空レーザ測量データ、災害記録・工事記録、土地条件図・土地利用図・地すべり地形分布図、地震・気象等の資料、文献資料)を列挙し、解説した。特に航空レーザ測量データについては、道路土工一切土工・斜面安定工指針(平成21年度版)ではほとんど触れられていないが、空中写真では見えない樹木下の詳細な地形情報が得られるため、地形判読および現地踏査の精度向上に役立つ点で非常に重要であること、既に十分実用化された技術となっていることから、収集すべき主な資料の1つとして列挙し解説した。

「地形判読」では斜面地盤変状の可能性を把握するために重要となる、斜面変動に関連する地形を判読する旨を記述し、判読の対象となる地形について解説した。また、判読には空中写真および航空レーザ測量データを利用するよう記述した。

「現地踏査」では資料調査および地形判読による地形・地質状況の確認を行うとともに、資料調査および地形判読ではわからない斜面内の微小な変動地形、地盤の風化状況等を調査するために行うこと、特に露頭調査においては、弱層の存在とその性状についての記載を十分行うことを記述し、踏査で得られる地形・地質情報について解説した。

### 3-3 予備調査結果の整理

表-5 「地盤変状の影響を受ける道路橋の耐震安全対策ガイドライン(案)(仮称)」構成

<p><b>第1編 共通編</b></p> <p><b>第1章 総則</b></p> <p>1-1 目的 地震時に発生する斜面地盤変状の影響を受ける道路橋に対する耐震安全対策の方法を示すことを目的とする</p> <p>1-2 適用の範囲 特に重要であると道路管理者が認める路線ないし道路橋に適用</p> <p><b>第2編 調査編</b></p> <p><b>第2章 地震時の斜面地盤変状の形態</b> 地震時に発生する斜面地盤変状の形態、特徴等について十分な認識が必要: 主なものについて解説</p> <p><b>第3章 予備調査</b></p> <p>3-1 予備調査の目的 計画路線・道路橋周辺の地形・地質条件を明らかにすることにより、地震時に地盤変状を起こす可能性のある箇所を抽出することを目的とする</p> <p>3-2 予備調査の内容 既存資料調査、地形判読、現地踏査等、予備調査の方法を解説</p> <p>3-3 予備調査結果の整理 地形図編纂、判読図・地質図の作成、詳細調査の必要な箇所の抽出等、予備結果の整理方法を解説</p>	<p><b>第4章 詳細調査</b></p> <p>4-1 詳細調査の目的 詳細な地質構造、地盤物性、発生しうる地盤変状の形態等を明らかにすることを目的とする(特に地震時の斜面地盤変状の発生に大きく影響する弱層の分布・性状・強度特性の調査を含む)</p> <p>4-2 詳細調査の内容 現地踏査、物理探査、ボーリング、サンプリング、地下水調査、現地計測、室内試験等、詳細調査の方法を解説</p> <p>4-3 詳細調査結果の整理 地質平面図・断面図、地盤物性とその分布等、詳細調査結果の整理方法を解説</p> <p><b>第5章 地盤条件の判定</b> 詳細調査結果をもとに対象斜面地盤の安定性について、数値解析等を含めて検討し、地盤変状の発生可能性について判定を行う</p> <p><b>参考資料</b></p> <p>(1) 地震時の斜面地盤変状の事例集</p> <p>(2) 地震時の斜面地盤変状に関する数値解析の事例集</p> <p>(第3編 設計編 に続く)</p>
--	--

予備調査結果については、「既存資料の整理」、「地形判読および現地踏査結果の整理」のそれぞれについて必要事項を解説した。

「既存資料の整理」では、地形図の編纂（基図作成）、地質図の編集等、必要な情報の整理の考え方について解説した。特に地形判読および現地踏査に先立って行われる地形図の編纂では、地形判読や現地踏査の基図としてできるだけ大縮尺で精度よい地形図が望ましいため、大縮尺で精度のよい既存地形図が存在しない場合は、航空レーザ測量データや空中写真等を用いて新たに地形図を作成する必要がある旨を記述した。

「地形判読および現地踏査結果の整理」では、地形図・地質編集図をもとに判読結果や踏査結果を加えて、問題箇所を抽出しやすくするよう路線地質図、災害地形分類図という形で整理することを記述した。また、これらの整理結果をもとに、計画路線ないし道路橋にとって問題となる地盤変状を生じる可能性のある箇所および詳細調査が必要な箇所の抽出と詳細調査項目の整理を行う旨を記述した。

### 3) 第4章 詳細調査

#### 4-1 詳細調査の目的

詳細調査は予備調査で抽出された必要箇所についてより詳細な検討を行うため、現地踏査、ボーリング調査、物性試験等により、詳細な地質構造、地盤物性、発生しうる地盤変状の形態等を明らかにすることを目的としていることを記述した。

#### 4-2 詳細調査の内容

詳細調査で行う主な項目（現地踏査、物理探査、ボーリング、サウンディング、サンプリング、地下水調査、現地計測、室内試験）を列挙し、解説した。

特に、現地踏査では、予備調査の段階よりも綿密に行い、地盤変状の原因となる地質構造と物性、風化部、弱層などの把握に主眼を置くこと、また、すべり面となるような断層、軟質層、劣化した層理面、あるいはゆるみにより開口した節理等が存在する場合にはその方向性や連続性、性状を特に詳細に調査する必要があることを記述した。

また、地震時の斜面地盤変状を対象とした調査・検討では薄い脆弱層や地すべりのすべり面、未固結層や風化層等の軟質な地質、土や岩石の力学的性質（強度特性、変形特性等）を把握する必要がある。そのため、ボーリングは原則としてオールコアボーリングとし、比較的口径の大きなボーリングや高品質ボーリングを採用することによって良い試料を採取するよう努め、標準貫入試験

を実施する場合には別孔を削孔して行うこととした。また、サンプリングでは乱れの少ない試料の採取が必要であり、特に採取が難しい薄い弱層の乱れの少ない試料を採取するためにはブロックサンプリングや高品質ボーリングによる採取を検討する必要があることを記述した。

このほか、ボアホールテレビ等による孔内の観察が弱層やすべり面の方向性や挟在物の性状、割れ目の開口状況等の把握に有効であることを記述した。

#### 4) 第5章 地盤条件の判定

地震時に斜面地盤変状が発生する地盤条件かどうかの判定は、詳細調査により明らかになった地質構造および地盤物性をもとに、発生しうる地盤変状の形態を考慮しながら安定性を十分検討した上で行うこととするが、現状では地震時の斜面の安定解析手法はまだ十分確立しているとはいえない状況であるため、様々な面から十分検討する必要があること、種々の解析手法のうちいずれの手法を用いる場合でも、対象地盤の地質構造や物性値（強度定数等）を適切に反映させる必要があることを記述した。また、橋梁基礎の場合は許容される変位量が非常に小さいと考えられるため慎重な検討が必要であり、特に、実際に地震時において生じる地盤変状が解析で求めるとおりの挙動になることは保証されていないことから、対策で防止できない規模の地盤変状の発生を否定しきれない場合は、路線のシフトおよび架橋地点の変更を検討するべきであることを記述した。

## 4. まとめ

地震時に道路橋に影響を及ぼすような変状を起こしやすい山地部の地盤条件の判定手法を提案することを目的として、地震による斜面地盤変状42事例を収集し、地盤変状箇所の地形・地質の特徴の整理と変状パターン分類を行い、3.3で述べたような変状パターンに分類できた。

代表事例について3次元FEMによる動的解析を行った結果、すべり面が存在するケースの解析では、大変位という点では実際の現象と調和的であるが変位量の予測は困難であることが示された。また、すべり面が存在するケースと存在しないケースでは解析結果に差があり、弱層等の地質構造を適切に解析モデルに反映させることが重要であることが示された。

以上の結果をふまえて「地盤変状の影響を受ける道路橋の耐震安全対策ガイドライン（案）（仮称）」（共通編・調査編）を作成した。なお、本研究の終了直後に発生し

### 3.3 地盤変状の影響を受ける道路橋の耐震安全対策技術に関する研究②

た熊本地震においては斜面地盤変状の影響による橋梁の被災事例も多く発生していることから、「ガイドライン(案)」についてはそれらの熊本地震による被災の実態から得られる知見も反映させながら、斜面地盤変状が道路橋へ及ぼす影響の検討結果(CAESAR 担当分)とも併せて内容の追加を行って充実させていく予定である。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人土木研究所：平成 16 年(2004 年)新潟中越地震土木施設災害調査報告，国土技術政策総合研究所報告第 27 号・土木研究所報告第 203 号，2006 年 1 月
- 2) 浅井健一，日外勝仁，佐々木靖人：地震時に構造物基礎の安全性に影響を及ぼすような斜面地盤変状のパターン，地盤工学会関東支部発表会(CD-ROM)，2012 年 10 月
- 3) 日本道路協会：道路土工一切土工・斜面安定工指針，平成 21 年 6 月。
- 4) 日本道路協会：杭基礎設計便覧，平成 25 年 6 月。
- 5) 日本道路協会：斜面上の深礎基礎設計施工便覧，平成 24 年 4 月。
- 6) 佐々木靖人，大河原正文：平成 20 岩手・宮城内陸地震により落橋した祭時大橋基礎のコアに見られる特徴，平成 21 年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集，pp1-2，2006 年 10 月
- 7) 杉本宏之，宇都忠和，本間宏樹，武士俊也：東北地方太平洋沖地震により白河丘陵で発生した地すべりの発生斜面の地形・地質的特徴，土木技術資料，第 54 巻第 10 号，pp18-21，2012 年 10 月
- 8) 国道 342 号祭時大橋被災状況調査検討委員会：国道 342 号祭時大橋被災状況調査検討委員会報告書，179p，平成 21 年 6 月

## RESEARCH ON THE COUNTERMEASURES FOR PREVENTING THE DAMAGE OF A ROAD BRIDGE CAUSED BY MOVEMENT OF THE GROUND BY EARTHQUAKE ②

**Budget** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2011-2015

**Research Team** : Geology and Geotechnical Engineering  
Research Group(Geology)

**Author** : Yasuhito SASAKI

Ken-ichi ASAI

Katsuhito AGUI

**Abstract** : The purpose of this research is to propose method for judging ground condition which is likely to be deformed to influence bridge safety by earthquake in mountainous area.

Firstly, we collected and analyzed 42 cases of slope deformation by past earthquakes, to reveal the geographical and geological features of these cases and to divide deformation patterns of these cases. We divided the deformation patterns of these cases as follows: 1) slide or collapse of earth formed by past landslide, 2) slide or collapse of thick weathered layer or soft sediments, 3) slide or collapse by bedding plane, joint plane, fault plane or thin weak layer which dips concordant to the slope, 4) deformation or collapse of rocks caused by the deformation of underlying weak layer, 5) deformation or collapse of jointed rock by columnar joint plane.

And we performed numerical analysis of a typical case of slope deformation pattern (mentioned above) No.3 (slide or collapse by bedding plane, joint plane, fault plane or thin weak layer which dips concordant to the slope). Dynamic analysis of three dimensional FEM using the model which slip surface exist suggested that the occurrence of large displacement in the analysis was concordant with the fact, but it is difficult to the displacement scale quantitatively. Difference of the results between analyses of the model which slip surface exists and that which slip surface does not exist suggests that it is important to reflect geological structure and physical and mechanical properties of ground materials to the analysis properly.

Based on these results, we wrote drafts of “Common volume” and a “Investigation volume” of “Guideline of the countermeasures for preventing the damage of a road bridge caused by movement of the ground by earthquake (draft)”.

**Key words** : road bridge, earthquake, slope, disaster, ground, deformation