

地震による都市域斜面災害 —2011年東北地方太平洋沖地震を例として—

村尾英彦*・釜井俊孝**・太田英将***

要旨

2011年東北地方太平洋沖地震によって、都市域住宅地における斜面災害が多発した。これらの斜面災害は、主に谷埋め盛土、腹付け盛土の造成地の変動が原因であり、家屋が全壊、半壊する被害に加え、ライフラインが破壊され、深刻な被害が生じている。日本国内の都市域に多数存在する盛土造成地における、今後の地震災害を防ぐことを目的として、42地点の調査結果をもとに、斜面変動のタイプを5つのタイプに分類し、各タイプにおける被害の特徴をまとめた。5つの分類は、タイプ1：谷埋め型盛土の変動、タイプ2：腹付け型盛土の変動、タイプ3：谷埋め型+腹付け型盛土の変動、タイプ4：盛土の崖崩れ、タイプ5：表層すべりである。タイプ5の表層すべりは、今回の地震で明らかとなった被害であり、盛土末端部が液化化することによって、斜面が不安定化するものである。いずれのタイプも、被害は盛土領域内で生じている。また、1978年宮城県沖地震後に施工された、地すべり対策工の耐震補強としての有効性に関する考察を行った。この考察から、地すべり対策工(杭工、地下水排除工)が、地震時における盛土斜面の大変形に対して効果を発揮することを確認した。一方で、地すべり対策工のみでは、住宅基礎周辺の変形を抑えることができず、今後は、その変動抵抗性を向上させる対策工の考案が必要であることを確認した。加えて盛土土塊内に、土塊を分断するような、強度の大きい領域を作り出し、変動土塊に作用する側部抵抗を増加させることにより、盛土の変動を抑えることが可能であることを確認した。

Key words : 宅地盛土 artificial fill, 地震 earthquake, 斜面安定 slope stability, 現地調査 site investigation

1. はじめに

2011年3月11日14時46分、東北地方太平洋沖地震(M_w : 9.0, 震源深さ: 23.7km, PGA : 2,933cm/s/s)が発生した。この地震の特徴はプレート境界地震で、地震動には、0.5秒以下の短周期成分が多く含まれており、東日本においては、6分以上も揺れが継続した点である。また本地震は、1900年以降に日本国内で発生した最大の地震である。

この地震で、盛土造成地が変動し、都市域住宅地における斜面災害が多発している。変動土塊内では、家屋が全壊～半壊する被害に加えて、ライフラインの破損が生じ、深刻な被害となっている。また、変動土塊が、余震や降雨によってさらに変動する危険性が高いことから、ガス・水道の供給は、長期にわたって停止されたままとなっている。

1995年兵庫県南部地震以降に認識されるようになった、盛土造成地の変動に伴う都市域宅地における斜面災害¹⁾は、

地震時の「応用地質学・地盤工学的な危険因子」といえる。盛土造成地のほとんどは、戦後における社会経済の成長期に作られたものであり、耐震性に関しての検討が行われている箇所は極めて少ない。また、被災後の復興を急ぐ必要性などの理由から、これらの被害箇所では今までに詳細調査が十分に実施されておらず、盛土造成地の変動特性が把握されているとはいえない。

本報は、2011年東北地方太平洋沖地震において多発した、都市域住宅地における斜面災害の広域的な調査結果をもとに、地震時の盛土造成地の斜面災害に関する考察を報告するものである。

2. 被害の概要

被害調査によって、宮城県仙台市、白石市、福島県福島市、いわき市、茨城県東海村等の市街地において、1978年宮城県沖地震を上回る規模の、甚大な都市域の斜面災害が発生していることが明らかになっている。これらは、谷埋め型盛土や、腹付け型盛土を主体とする盛土造成地の変動であり、被害は、一般住宅に加えて、公共の建築物や幹線道路にも及んでいる。図-1に震央と被災した地区の位置関係図を、図-2に調査を実施した42地点の分布を、図-3

* (株)村尾地研 Muraochiken Co., Ltd.(会員)

E-mail: hidehiko.murao@muraochiken.co.jp

** 京都大学防災研究所 Disaster Prevention Research Institute Kyoto University(会員)

*** (有)太田ジオリサーチ Ohta Geo-Research Inc.(会員)

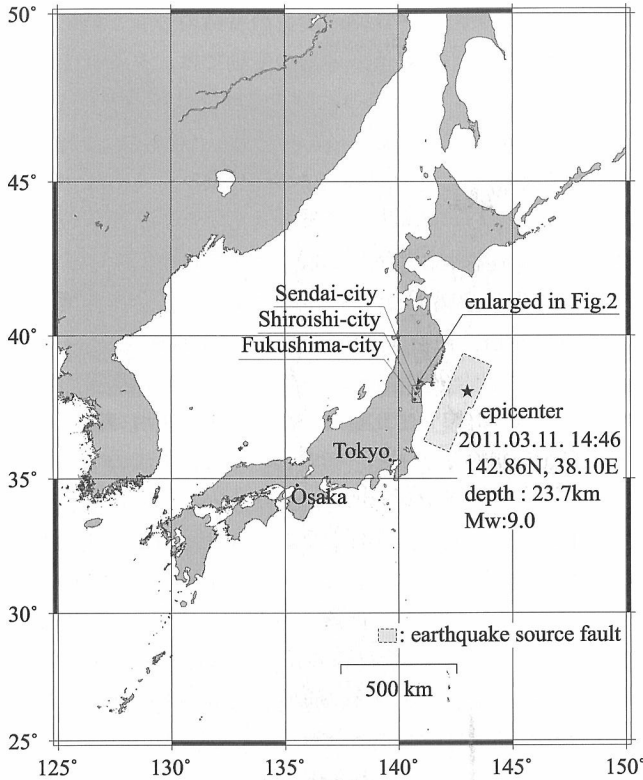


図-1 震央と被災地区の位置関係

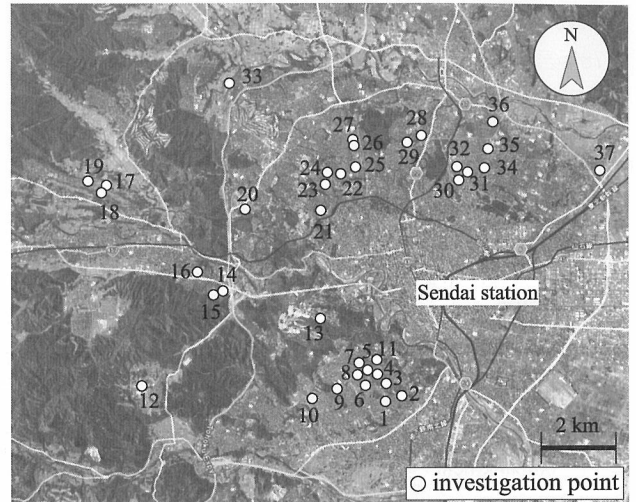


図-3 仙台市における調査地点の分布

に図-2中の仙台市郊外の丘陵地帯の分布詳細を示す。

調査を実施した42地点のうち、9割近くの37地点が仙台市郊外の丘陵地帯に分布する。仙台都市圏の発達に伴って、この地域では1965年頃から丘陵地の開発が増加した。一方、他の都市では、仙台市ほど人口の増加が進まなかったことが一つの要因となり、造成地は比較的少なく、被害の分布も限定的である。すなわち、こうした被害の分布は、約半世紀に及ぶ東北地方の人口動態と都市発達の歴史を反映していると言える。

丘陵地における住宅被害の大半は、盛土造成地盤の変動によるものである。盛土の変動発生箇所は、先述のとおり、仙台市の郊外に最も多い。とくに、南部の緑ヶ丘、八木山地区、西部の折立、西花苑、高野原地区、北部の桜ヶ丘、旭が丘、南光台地区で顕著な被害が認められる。白石市では南東部の緑が丘、寿山地区、福島市では南部のあさひ台地区、いわき市では常磐西郷地区において顕著な被害が発生している。

3. 斜面変動のタイプ

地表における変状は、切り盛り境界における盛土側の沈下、斜面変動による亀裂、液状化による隆起・沈下等によって生じている。これらの地表変状は、切土、盛土の違い、盛土の厚さ、造成年代を反映した地形改変様式、地下水位の高低、対策工事の影響等によって出現する種類と場所が異なっていた。図-4に横軸に「盛土の厚さ」を、縦軸に「すべり面の位置」をとり、これらの地表変動を5つのタイプに分類した結果を示す。各タイプの特徴は、3.1節以降の事例説明に記す。

表-1に、42被害地域ごとの地盤条件、造成年代、変動のタイプ、変動域内の建物数、過去の変動履歴(事実上、1978年宮城県沖地震時の履歴)を示す。自然地盤で発生した変動が2例あるので、盛土に関連した変動被害は40か所となる。このうち、少なくとも7か所では、1978年宮城県

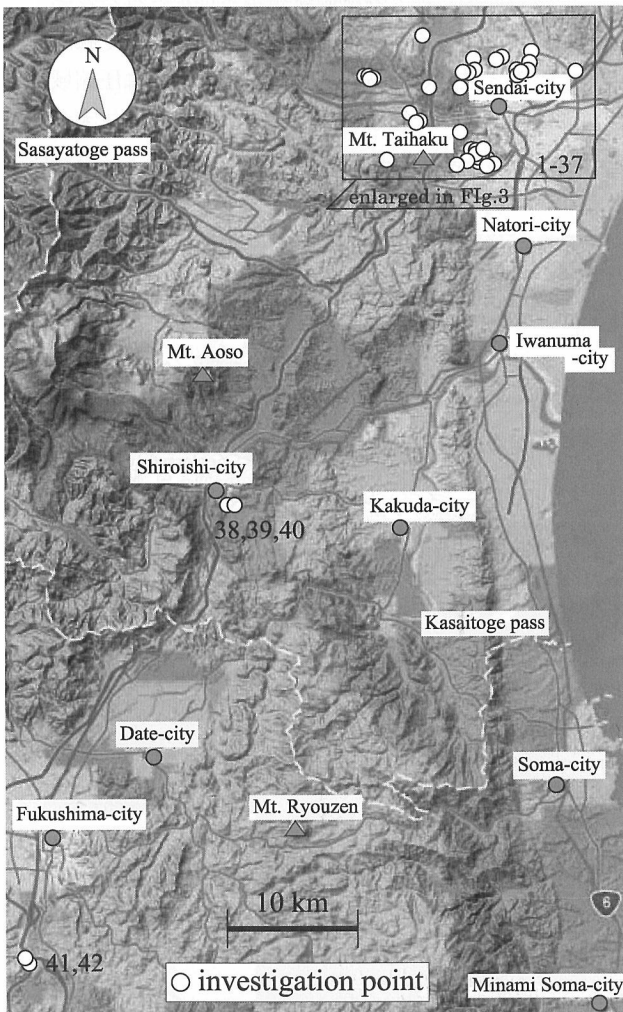


図-2 調査地点の分布

沖地震の際にも変動したことが報告されている²⁾。また、1978年宮城県沖地震以降に造成された比較的新しい造成地(施工時期は1990年以降)においても変動が発生している。これは、これまでの既往の地震災害では、ほとんど見られ

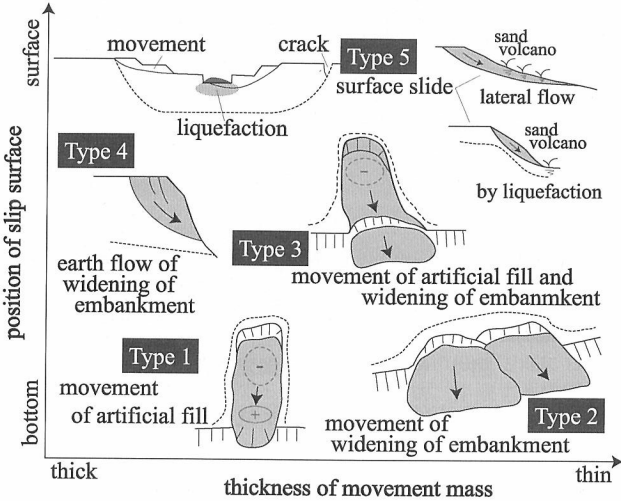


図-4 斜面変動のタイプ分類

表-1 調査地一覧

No.	district	Administrative district	ground condition	reclaimed period	types of movement	Number of buildings	history of movement
1	2-chome Midorigaoka	Taihaku-ku Sendai-city Miyagi Pref.	a	around 1968	1	50	1978
2	3-chome Midorigaoka		a		1, 5	59	1978
3	4-chome Midorigaoka		a + b		2	78	1978
4	1-chome Aoyama		a		5	49	-
5	2-chome Aoyama		b		2	27	-
6	Keiwa-town		a		5	45	-
7	Matsugaoka		b		3	41	-
8	Wakaba-town		b		2	10	-
9	2-chome Yagiya higaishi		a		5	10	-
10	4chome Yagiya minami		a		2	3	-
11	Yagiya Matsunami-town		a		1	17	-
12	5-chome Shigeniwadai	a + b	1982 - 1990	3	30	-	
13	Tohoku Univ. School of Engineering	a	after 1990	1	1	-	
14	5-chome Oritate (a)	a	around 1972	1	40	-	
15	5-chome Oritate (b)	cutting		4	-		
16	1-chome Seikaen	cutting		9	-		
17	1-chome Takanohara (a)	b	after 1990	4	8	-	
18	1-chome Takanohara (b)	b		4	4	-	
19	2, 3-chome Takanohara	b		4	28	-	
20	7-chome Minami yoshinari	b	around 1965	3, 4	11	-	
21	1-chome Kaigamori	a		1	18	-	
22	1-chome Nakayama	a + b		3	50	-	
23	2-chome Nakayama	a		3	13	-	
24	5-chome Nakayama	a		1	20	-	
25	Takimichi	a + b		3	5	-	
26	2-chome Sakuragaoka	a		5	18	-	
27	4-chome Sakuragaoka	a	5	37	-		
28	1-chome Futabagaoka	a	after 1990	3	21	-	
29	2-chome Futabagaoka	a + b	1972 - 1981	3	50	-	
30	2-chome Asahigaoka (a)	a	before 1970	1	77	1978	
31	2-chome Asahigaoka (b)	a		1	60	-	
32	3-chome Asahigaoka	a		1	65	-	
33	3-chome Kitanakayama	b	after 1990	4	8	-	
34	3-chome Nankoudai	a	1982 - 1990	5	56	1978	
35	4-chome Nankoudai	a		5	79	1978	
36	6-chome Nankoudai	a		4	21	-	
37	2-chome Iwakiri	Miyagino-ku Sendai-city Miyagi Pref.	b	after 1990	4	14	-
38	1-chome Midorigaoka	Shiroishi-city Miyagi Pref.	a	around 1978	5	8	1978
39	2-chome Midorigaoka		b		4	15	-
40	2-chome Matsugaoka		a		1	4	-
41	Asahidai	Fukushima-city Fukushima Pref.	a	around 1974	3	30	-
42	Sakuradai	Fukushima-city Fukushima Pref.	a	around 1974	3	7	-

a : artificial valley fill, b : widening of embankment

なかった現象であり、今回の震災の特徴の一つと言える。また、これらの新しい造成地での変動では、タイプ4の比率が高く、1970年代以前の古い造成地では、タイプ1~3が相対的に多く発生した。このことは、老朽化した盛土斜面では、盛土と基盤(旧地表面)の境界部で、すべりが発生しやすい条件が存在することを示している。次節以降に、各タイプの典型的な変動に関して例を挙げて説明する。

3.1 谷埋め型盛土の変動(タイプ1) —仙台市青葉区折立5丁目, 仙台市太白区緑ヶ丘2丁目—

変動した谷埋め型盛土は元来U字もしくは、V字形の谷を盛土によって埋立てたものである。変動土塊の層厚と幅は、旧地形に依存するが、傾向として10m未満のものが多く見られ、地山と盛土の境界周辺がすべり面となる。また、地下水位は地表面に近い位置に形成されている。仙台市青葉区折立5丁目では、顕著な変動が発生した。折立地区は、1972年頃に造成された比較的古い住宅地である。折立地区から約9km離れた、1978年宮城県沖地震の際に被害を受けた仙台市宮城野区鶴ヶ谷団地とほぼ同時期に開発されているが、当時の被害は報告されていない。図-5に折立地区の変動状況を示す。変動は旧谷地形に沿って形成されており、旧版地形図と地表変状の分布から推定される変動土塊の層厚は10m未満であり、変動土塊は、ほぼ盛土底面ですべてしていると推定される。写真-1に示すように圧縮域の変状が顕著であり、圧縮域にあたる箇所多くの住宅が破壊

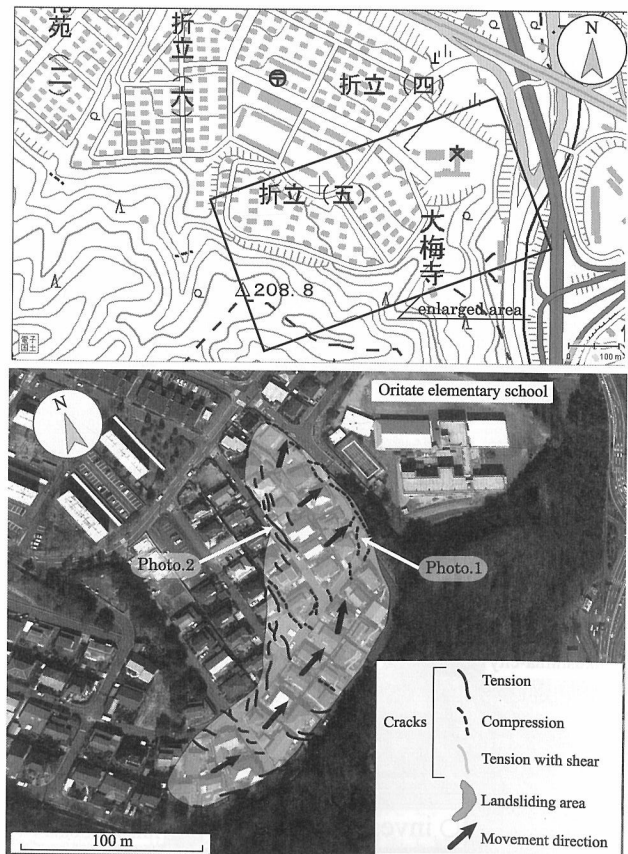


図-5 仙台市青葉区折立地区の変動状況

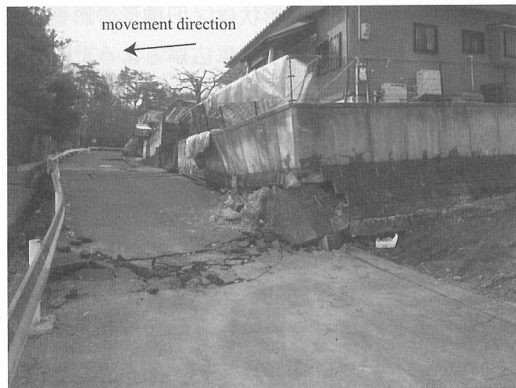


写真-1 仙台市青葉区折立地区における圧縮部状況



写真-2 仙台市青葉区折立地区における引張亀裂状況

された。明瞭な頭部滑落崖は見られないが、写真-2に示すように右翼部には引張亀裂が連続する。一方、左翼には右横ずれのせん断変位を持つ引張亀裂が発達する。

仙台市太白区緑ヶ丘2丁目においても、典型的な谷埋め盛土の変動が発生した。地震発生直後の、2011年3月末の時点では明瞭な移動体は形成されていなかったが、数箇月が経過した時点で、図-6に示すように変動土塊の範囲が上部斜面に拡大し、移動体を識別できるようになった。このことは、本震後にも、余震や降雨によって土塊の変動が継続することの具体的な事例である。図-7に移動体を横断する測線で実施した表面波探査結果を示す。盛土と地山のS波速度が異なっており、谷埋め型盛土の横断形状が明瞭に認められる。しかし、盛土層厚は、上部斜面が約8mであるのに対し、下部斜面では約5mと相対的に薄い。谷埋め型盛土では、盛土の層厚が薄いほど変動土塊の側部拘束が減少するため、より不安定になる傾向が知られている。よって、盛土層厚の薄い下部斜面から上部斜面に進行的な破壊もしくは、後退的なすべりによって変動が拡大したと考えられる。

3.2 腹付け型盛土の変動(タイプ2)―仙台市太白区緑ヶ丘4丁目―

変動した腹付け型盛土は、住宅を建てる平坦部を増やすために、元来、窪地であった箇所に、盛土を行ったものである。窪地の傾斜が緩い場合は、階段状に盛土が行われている。変動土塊の層厚は、旧地形と盛土形状に依存するが、

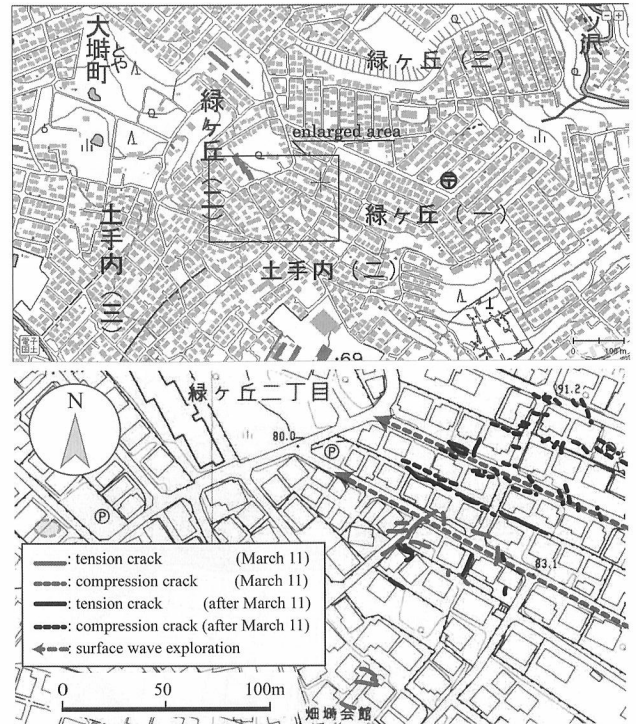


図-6 仙台市太白区緑ヶ丘2丁目の変動状況

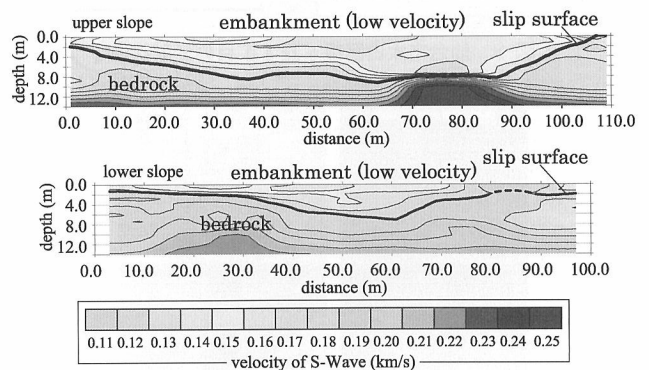


図-7 仙台市太白区緑ヶ丘2丁目のS波速度分布

10m未満のものが多く見られ、地山と盛土の境界周辺がすべり面となる。変動土塊の形状は、タイプ1の谷埋め型盛土と比較して、幅広となるものが多く見られる。地下水位はタイプ1と同様に、地表面近くに形成されている。

仙台市太白区緑ヶ丘4丁目では、腹付け型の盛土造成地が変動した。図-8に変動状況を示す。等高線に沿って、明瞭な頭部引張亀裂が認められる。変動方向は、基盤の地質構造とは関係なく、旧地表面の最大傾斜方向に変動している。本震から60日以上経過した時点と、本震直後の状況を比較すると、写真-3に示すように、擁壁の亀裂拡大が見られることから、余震、降雨の影響で、土塊の変動が継続していることがわかる。また、斜面の末端では、写真-4に示すように、圧縮亀裂を伴う変形や擁壁の変状がみられる。

3.3 谷埋め型+腹付け型盛土の変動(タイプ3)―福島市あさひ台―

元来、谷地形であった箇所を埋立て、窪地形となっていた谷の出口に腹付け型の盛土を行った箇所が変動したもの

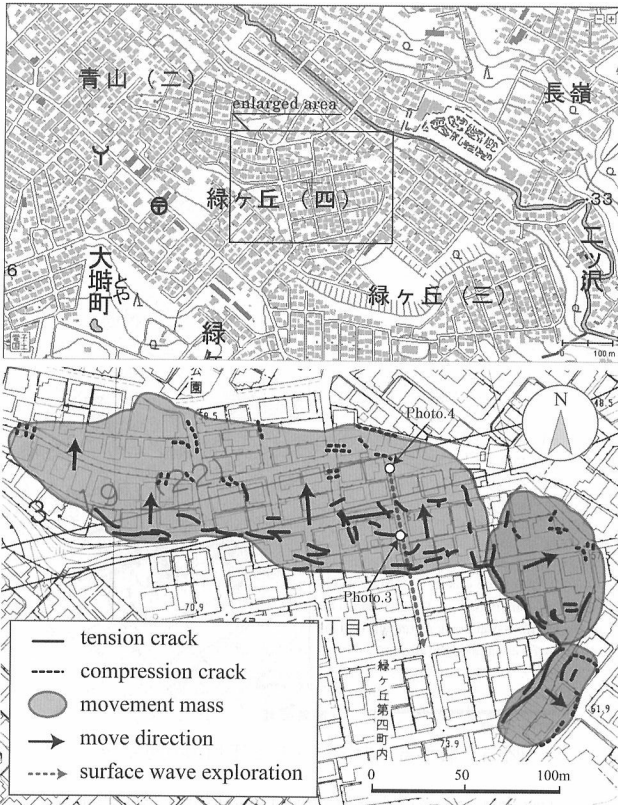


図-8 仙台市太白区緑ヶ丘4丁目の変動状況

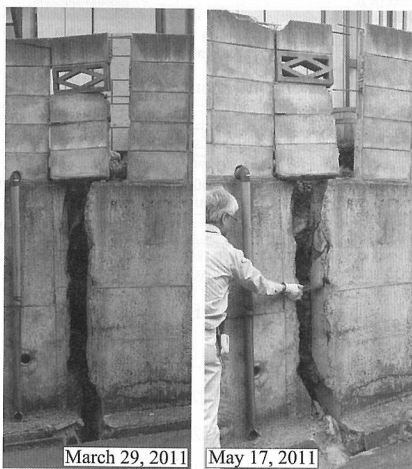


写真-3 仙台市太白区緑ヶ丘4丁目の亀裂拡大状況

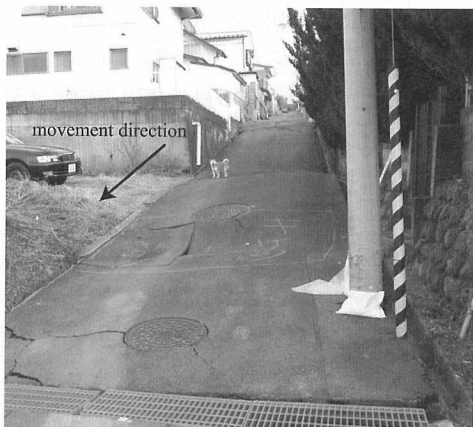


写真-4 仙台市太白区緑ヶ丘4丁目斜面末端部変状状態

である。腹付け型の盛土の形状は、旧地形の影響で、法肩から法尻方向に向けて八の字状に広がるようになっている。変動は、谷埋め型の盛土部分が腹付け型の盛土部分を押し出すようにして生じ、盛土末端部となる腹付け型盛土部分の変動量が、タイプ1, 2に比べて大きくなる傾向が見られる。すべり面は地山と盛土の境界付近に形成され、地下水位は地表面付近にある。

福島市あさひ台では、図-9に示すように谷埋め型盛土の末端部が崩壊し、住宅地に隣接する国道4号線を一時閉塞した。崩壊箇所は幅約60m、長さ約80mで、写真-5に示す現場状況から、盛土層厚は5m以上と想定される。地下水位は、崩壊後に生じた湧水箇所から推定して、崩壊発生前の地表面から3～4m程度の深さに形成されていると考えられる。崩壊箇所の滑落崖から上部に約100m、幅約80m範囲では、引張クラックや段差が生じており、谷埋め型盛土全体が変動していることを示している。ただし、滑落崖上部域と、崩壊発生箇所の変位量の違いは大きく異なり、旧谷地形の出口部分が大きく変動した。また、崩壊発生箇所の南側にも小規模な谷埋め型盛土が存在し、同様な変動が発生している。

あさひ台は、福島市が南部へ拡大する過程で1974年までに谷埋め型盛土による造成が完了した団地である。周辺より大規模な団地の開発は、あさひ台よりもやや早く、

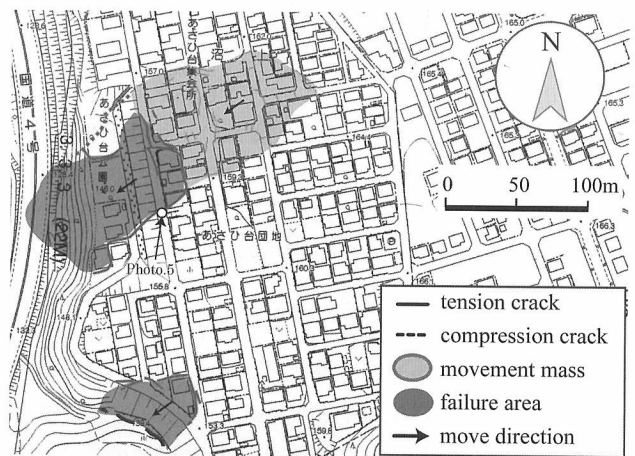


図-9 福島市あさひ台の変動状況



写真-5 福島市あさひ台の崩壊状況

1969年から開始されている。しかし、福島市周辺で大規模な変動が発生したのは、あさひ台のみである。このことは、造成年代にかかわらず、谷埋め型盛土による造成地の耐震性が極めて低いことを示している。

3.4 盛土の崖崩れ(タイプ4)—仙台市青葉区高野原団地1～3丁目—

段丘や、丘陵部などの高台において、平坦部を増やすために、高台の周縁部に貼り付けるように盛土を行った箇所が崩壊したものである。変動による引張クラックが、高台周縁に連続して見られるのが特徴である。すべり面は地山と盛土の境界に形成される場合が多い。

仙台市青葉区高野原団地は、広瀬川の高位段丘面を開発した造成地である。段丘面であったため、元来、平坦であった地形に対して、住宅地をより増やすために、周縁部に盛土斜面を造成した。図-10に高野原団地の変動状況を示す。地表変状は、盛土箇所に沿って台地周縁部に帯状に連続している。盛土形式が谷埋め型となる部分では、変状は旧谷地形に沿って台地内部に喰い込むような形となっている。盛土造成された、高台の周縁部に被害が集中するという点で、2004年新潟県中越地震の際に発生した高町団地の被害状況²⁾と類似したパターンであるが、比較的、地下水位が低かったために、大規模な崩壊には至っていない。

3.5 表層すべり(タイプ5)—仙台市泉区南光台・南光台南、仙台市太白区恵和町—

盛土末端部または底部の砂質土層で液状化が発生し、液状化に伴い盛土が不安定化する。必ずしも地山と盛土の境界がすべり面とはならず、盛土内ですべりが発生する場合が多く、盛土の表層部が変動する。

仙台市泉区南光台地区では、図-11に示すように、南光台2～6丁目、南光台南1丁目の広い範囲に地表変状が分布する。変状の多くは、切土と盛土の境界部における引張

クラックであるが、支谷を埋めた盛土末端部で圧縮域が形成され、緩傾斜の変動ブロックに発展している。とくに、南光台南1丁目では、幅約70m、長さ約150mの変動ブロックが発達し、写真-6に示すように末端部の顕著な隆起によって多数の住宅や道路に被害を与えている。また、写真-7に示すように、幹線道路上でも変動ブロックが形成され、道路の隆起、クラックの発生によって、交通に支障が生じた。主谷中心部にある排水路では、両岸からの圧縮と、液状化によって水路底面が隆起した。また、南光台6丁目に位置する主谷の出口では盛土斜面が崩壊し、5棟の住宅に被害が発生している。

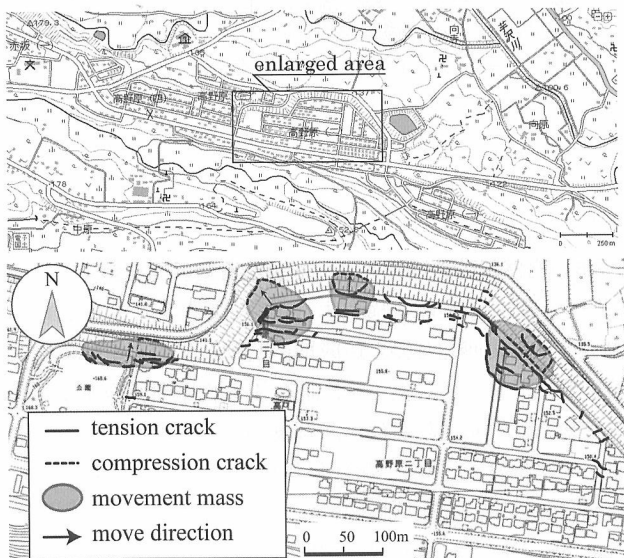
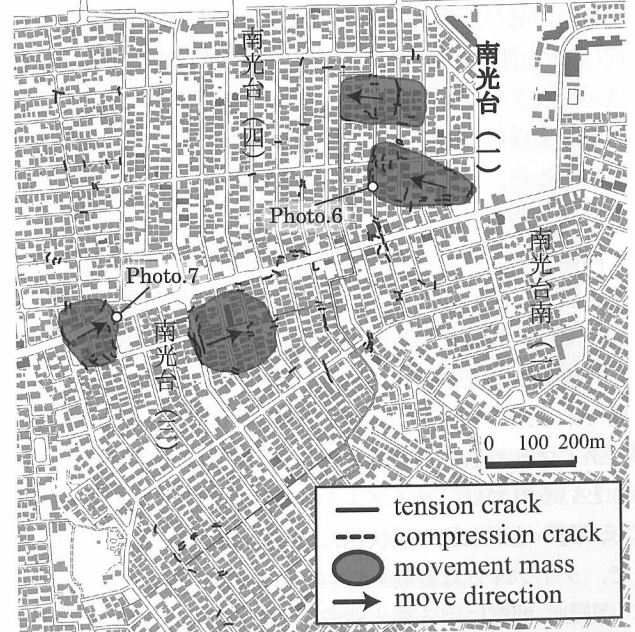
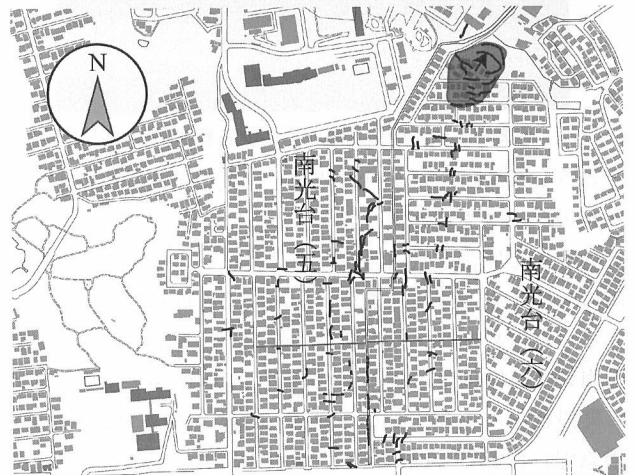
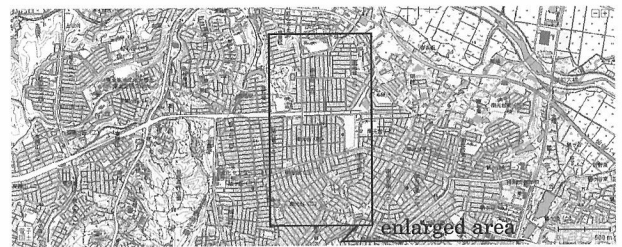


図-10 仙台市青葉区高野原団地の変動状況

図-11 仙台市青葉区高野原団地の変動状況



写真-6 仙台市泉区南光台の地表変状(その1)



写真-7 仙台市泉区南光台の地表変状(その2)

こうした高い地下水位に関連した表層すべりは、より急傾斜の斜面でも発生しており、図-12に示すように、典型的な事例を仙台市太白区恵和町に見ることができる。恵和町の一部には、深い大きな谷を埋めた谷埋め型盛土が存在する。谷埋め型盛土の下部は地表傾斜が急で、擁壁と階段を用いて雛壇状に造成された盛土斜面が広がっている。この階段状斜面の最上部の、地表傾斜の変化点(盛土内部の遷急線)付近には顕著な引張亀裂が確認でき、明瞭な変動土塊の頭部が形成されている。また、階段状斜面の下端付近(盛土内部の遷緩線)には圧縮域が形成されている。圧縮域が形成されている箇所の一部では噴砂痕が認められ、盛土末端部周辺で液状化が発生したと推定される。地下水位が高いため、砂質土が液状化した結果、斜面が不安定化して盛土土塊の変動につながったと考えられる。

同様なメカニズムによる盛土斜面の変動は、南光台の緩傾斜面でも認められる。液状化を伴う盛土造成地の変動に関しては、液状化が斜面の不安定化に及ぼす影響を定量的に評価することが困難であるため、今後の詳細な検討が必要である。

タイプ5の盛土造成地の変動は、盛土急斜面の浅いすべりという点では、タイプ4との共通点が認められる。しかし、高い地下水位や液状化に関連した現象であるという点で、タイプ4とは変動メカニズムが異なる。

以上、地震による盛土造成地の変動を5つのタイプに分類した。日本国中に数多く存在する盛土造成地のほとんど

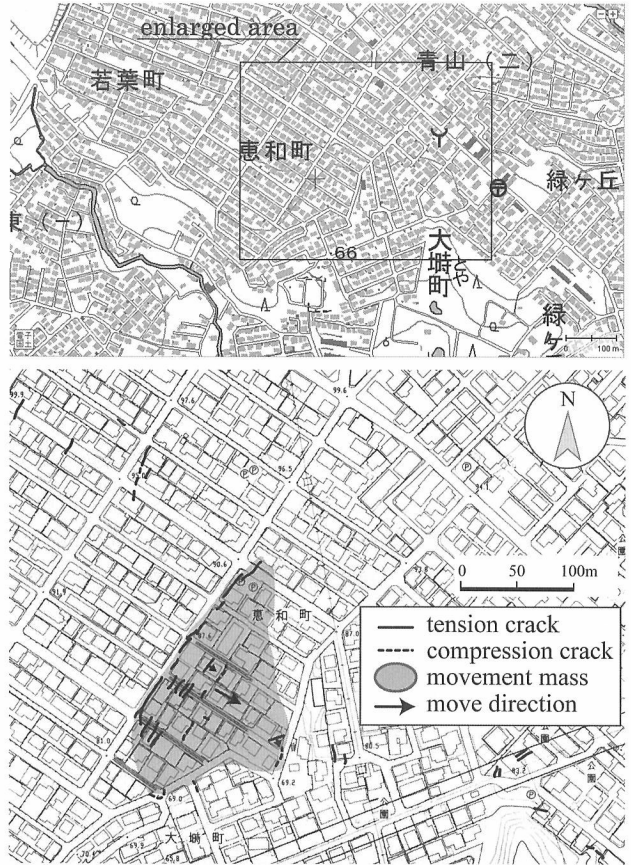


図-12 仙台市太白区恵和町の変動状況



写真-8 仙台市青葉区西花苑の変動状況

は、この5つのタイプに分類可能であると考えられ、今後、各タイプ別に斜面安定や、有効な対策工を考案することは、地震時の盛土造成地の変動被害を低減させることにつながると考える。

3.6 自然斜面の地すべり—仙台市青葉区西花苑1丁目—

仙台市郊外の丘陵を構成する新第三系では、自然斜面の地すべりに関連した盛土造成地の変動が発生している。今回の地震によって発生した、仙台市青葉区西花苑1丁目の再滑動型の地すべり変動は、写真-8に示すように、頭部で住宅4棟を巻き込み、末端部が斜面下部の住宅地に達した。変動発生域は、旧版地形図において、地すべり地形が認められることから、今回の変動域は、地すべり地形の再滑動であると考え、地すべり頭部であった箇所は切土され、

住宅地の平坦部分の一部となっており、今回は、地すべりの中腹および末端部に盛土された造成地が、変動したと考えられる。同様な自然斜面の地すべりは、仙台市青葉区折立5丁目でも発生している。

このように、盛土が関連しているものの、変動が地すべりの再滑動に起因すると考えられるものは、先述の5つの分類には属さないものとした。

4. 対策工事が施工されていた箇所の被害事例

仙台市太白区緑ヶ丘と白石市緑が丘における被害地域は、1978年宮城県沖地震時の変動域と重なっている箇所が多い³⁾。

1978年には、太白区緑ヶ丘1, 3, 4丁目、白石市緑が丘1丁目で顕著な盛土造成地の変動が発生した。そのため、1978年の災害後、太白区緑ヶ丘1, 3丁目では、鋼管杭と集水井が、白石市緑が丘1丁目では集水井が施工された。地震時に変動した盛土造成地に対して、杭工や地下水排除工などの地すべり対策工事を集中して施工した事例は極めて少ない。したがって、今回の事例は、結果として盛土造成地盤の変動に対して、地すべり対策工の地震時における有効性を検証する貴重な機会ともなった。

1978年の被災地のうち、太白区緑ヶ丘3, 4丁目と白石市緑が丘1丁目で今回も顕著な変動が発生した。しかし杭工と地下水排除工の施工されている、太白区緑ヶ丘1丁目の盛土では変状が認められず、太白区緑ヶ丘3, 4丁目の状況とは大きく異なっている。

太白区緑ヶ丘3丁目では、図-13に示すように、1978年宮城県沖地震後に5列の鋼管杭と2基の集水井が施工されていたが、図-14(図-13のa-a'断面)に示すように、住宅基礎部分周辺が回転するような表層すべりが杭列間で発生し、相当数の住宅に被害が発生している。ただし、1978年時のような、基礎と盛土境界面をすべり面とした盛土土塊全体の大変形は、今回は防止された。

図-15に示すように、集水井工が施工されていた白石市緑が丘1丁目においても、対策工は効果を発揮し、盛土土塊全体の大変形は発生していない。よって、1978年には、盛土底面でのすべりが発生したのに対し、今回の変動は限定的であったと言える。とくに、集水ボーリングの影響が及んでいる範囲では変形が少なく、変動域は、対策工が有効であると想定される領域の前面で停止している。集水井による集水域では変動がほぼ発生しなかったことから、本事例は地下水排除工の有効性を示している。一方で、盛土造成地全体の地下水を全面的に排除するという事は、メンテナンスや用地の問題等があり、容易ではない。よって、地下水排除工のみで盛土造成地の変動を抑えることは難しく、変動を抑止する工法の補助的な工法として用いることが有効であると考えられる。

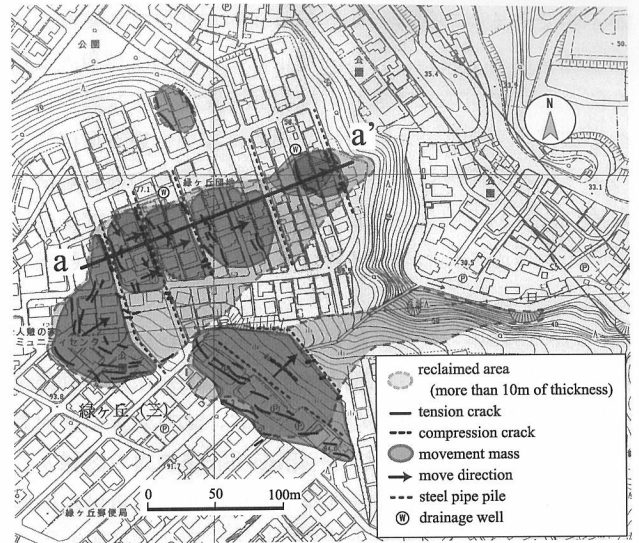


図-13 仙台市太白区緑ヶ丘3丁目の変動状況および対策工の施工位置

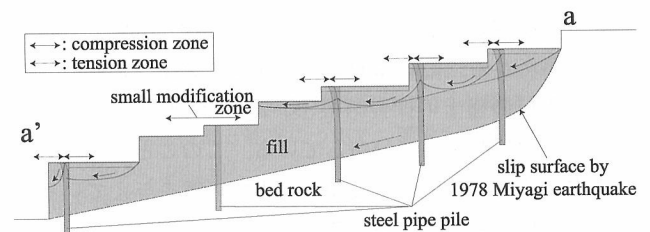


図-14 仙台市太白区緑ヶ丘3丁目の変動機構

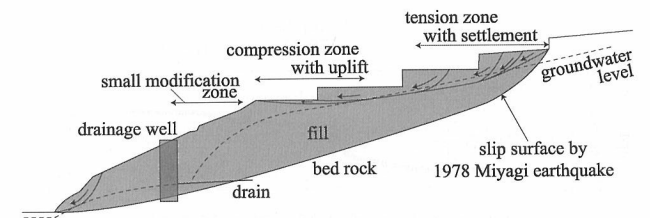


図-15 白石市緑ヶ丘1丁目の変動機構



写真-9 仙台市太白区緑ヶ丘4丁目の被害状況

一方で、対策工が施工されていなかった仙台市太白区緑ヶ丘4丁目では、1978年時とはほぼ同様の現象が再現されるようなかたちで、盛土底面でのすべりが発生し、写真-9に示すように、住宅に深刻な被害が発生している。

杭工や地下水排除工などの地すべり対策工は、地震時に、盛土土塊全体の大変形を防ぐ効果が認められる。設計内容

が不明であるため、今後の詳細な検討が必要であるが、太白区緑ヶ丘3丁目の事例は、抑止杭は、変動土塊の大変形を防ぐための対策工であり、地表面の変形、すなわち住宅への被害を完全に抑えるには最適ではないという可能性も考えられる。今後は、盛土造成地内の住宅への被害を防ぐために、変動土塊全体の大変形を防ぐことに加えて、住宅基礎部分周辺に変形を生じさせない対策工の設計、考案が必要とされていると考える。

一方、1978年の地震の際に変動した太白区緑ヶ丘1丁目において施工された、杭工と地下水排除工が所定の効果を発揮し、変動が発生しなかったことは、より効果的な対策工の考案に重要な示唆を与える。図-16に太白区緑ヶ丘1丁目における、表面波探査の結果を示す。探査は、旧地形における谷の上流から下流に向けて、盛土が変動し得る方向に対して直角方向、すなわち、盛土を横断する測線で実施している。探査結果において、地表付近までS波速度の大きい領域が、盛土を分断するように地表面まで分布することがわかる。これに対して、変動が発生した太白区緑ヶ丘2丁目の盛土の探査結果(図-7)ではS波速度の小さい領域が、比較的一様に分布している。このことから、盛土土塊内の状態が、盛土の変動に大きな影響を与えている可能性が高いと考える。図-17に、緑ヶ丘1丁目下部斜面の変化の模式図を示す。太白区緑ヶ丘1丁目の谷埋め盛土は、

1978年宮城県沖地震以後、対策工事(とくに地下水排除工)の結果、盛土土塊のS波速度が大きい領域、すなわち強度の大きい領域が、盛土土塊を分断するようなかたちで盛土内部に形成された。その結果、変動土塊の側部抵抗が増加し、変動が発生しなかったと考えられる。加えて、元来の地形が、比較的幅の狭いV字形の谷形状であったことも、変動しにくい盛土となった大きな要因である。このことは、今後、とくに谷埋め盛土型の盛土造成地の地震時における変動の抑制、抑止を考えるにあたって、元来の地形の及ぼす影響を考える必要があり、3次元での考察が不可欠であることを示していると考えられる。

5. 考察およびまとめ

盛土造成地は、都市圏の発達に伴う開発行為であるため、谷埋め型盛土(タイプ1)、腹付け型盛土(タイプ2)またはそれらの混合型盛土(タイプ3)を問わず、日本国中に多数存在する。よって、プレート境界地震、スラブ内地震、内陸地殻内地震の地震発生タイプを問わず、大地震発生によって、震源周辺の都市で盛土造成地の変動が発生する危険性は非常に高い。

現在、発生が危惧されている、南海トラフを震源とした、東海・東南海・南海地震が発生した際には、太平洋側の都市で、多数の盛土造成地の変動が想定される。また、首都直下地震が発生した際には、南関東の都市域の盛土造成地の変動が想定される。このため、盛土造成地の耐震化を進めることは、緊急の課題であり、変動機構の解明、有効な対策工の確立が求められている。

今回の検討から明らかになった事柄を以下に列挙する。

- (1) 盛土の厚さ、すべり面の位置から、斜面変動を、大き

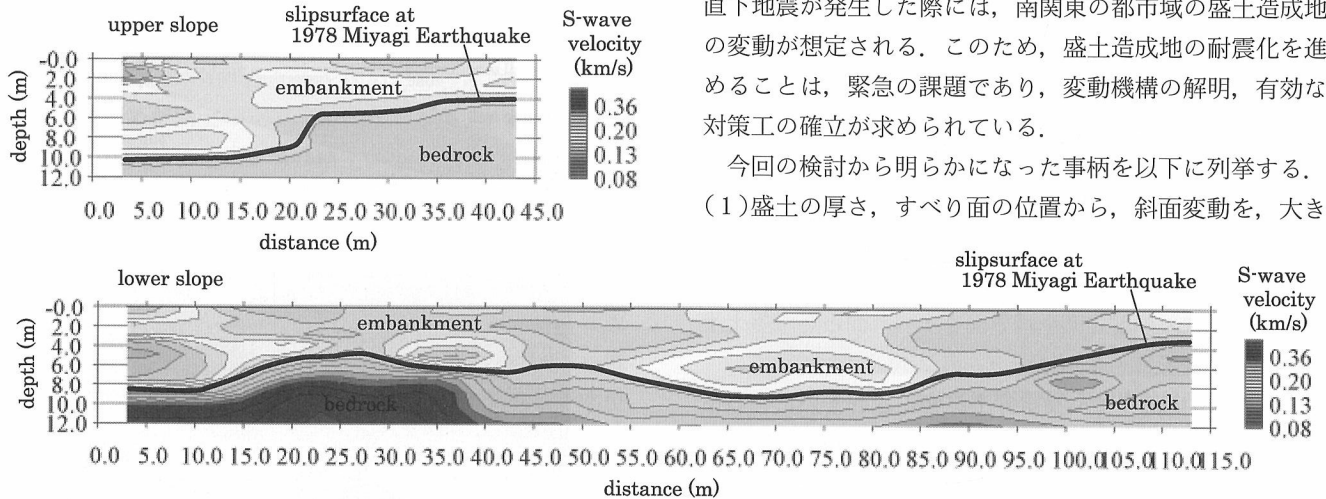


図-16 仙台市太白区緑ヶ丘1丁目のS波速度分布

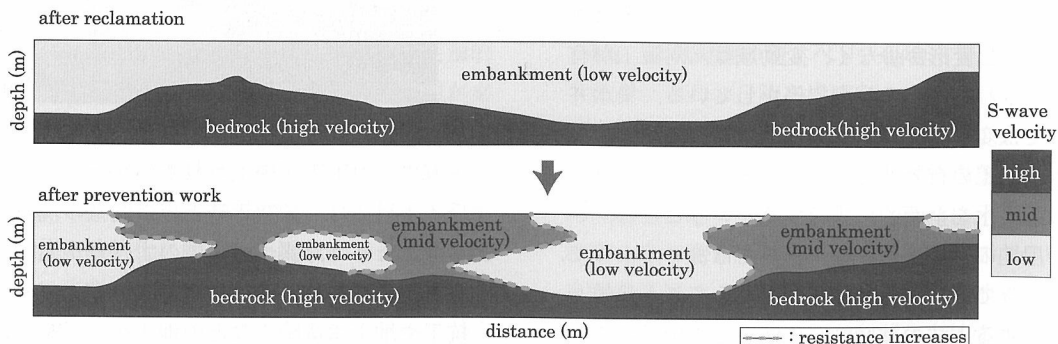


図-17 盛土土塊の側部抵抗の増加

く5つのタイプに分類可能である。多くの盛土造成地は、いずれかのタイプに分類でき、今後は、各タイプ別の検討を進めることが有効である。

(2)1970年代以前の比較的古い造成地では、タイプ1, 2, 3の変動が多く発生している。

(3)1990年以降に造成された、比較的新しい造成地においても変動が発生し、タイプ4の変動が多い。

(4)変動土塊は、降雨、余震の影響で継続的に変動し、とくに地下水位の高い盛土造成地においては、変動継続の危険性が高い。

(5)変動した土塊の移動方向は、旧地表面の最大傾斜方向に変動する。

(6)変動方向に直交するような擁壁には、はらみ出し、開口亀裂や、倒壊が多数みられる。

(7)自然斜面の再滑動型地すべりに盛土を行った結果、地震発生時に、地すべりの再滑動を誘発する可能性がある。

(8)盛土造成地に対して、杭工、地下水排除工などの地すべり対策工を適用することは、盛土土塊全体の大変形を抑えることには有効であるが、住宅への被害を完全に抑えることはできない。

(9)地下水排除工は盛土造成地の変動を抑えることに有効であり、補助的な工法として採用することが有効である。

(10)対策工事によって、変動土塊を分割するような形状を作り出し、盛土土塊の側部抵抗が発揮されるような状態や、元来の地形を利用し、盛土の変動抵抗性を向上させる状態

を作り出すことにより、盛土土塊の変動を抑えることが可能である。

(11)谷埋め盛土の変動抵抗性を検討するには、3次元での考察が不可欠である。

今後は、上記の事柄を踏まえ、解析手法の検討や、対策工の考案に加えて、地震動特性と盛土造成地の変動との関連性の解明を行い、盛土造成地の地震時における被害軽減のための検討を行っていく予定である。

謝辞 地図データにおいて、「電子国土」のロゴマークの入っているものは、国土地理院の電子国土Webシステムから提供されたものを使用させていただいた。また、査読者の方には貴重なご意見をいただいた。ここに記して謝意を表す。

引用文献

- 1) 釜井俊孝・守随治雄(2002)：斜面防災都市，理工図書。
- 2) 東北大学理学部地質古生物学教室(1979)：1978年宮城県沖地震に伴う地盤現象と被害について，東北大学地質古生物研報，No.80，pp.1-97。
- 3) 釜井俊孝・Aurelian C. Trandafir・村尾英彦(2005)：2004年新潟県中越地震による郊外住宅地の斜面災害，宅地地盤の安全性と性能評価に関するシンポジウム発表論文集，pp.17-24。

(2012年8月7日受付，2012年9月21日受理)

Slope Disaster in Urban Residential Region by Earthquake —Take “The 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake” as an Example—

Hidehiko MURAO, Toshitaka KAMAI and Hidemasa OHTA

Abstract

Slope disaster in urban residential region happened a lot by “The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake”. These slope disasters brought serious damages such as complete to half collapse houses and broken lifelines, mainly caused by movement of reclaimed area by valley fill or widening of embankment. As a purpose of preventing earthquake disaster at reclaimed area that exist a lot in urban regions in Japan, the features of each slope disaster are categorized in five types and that of each damages are put together based on the investigation results gotten from 42 places. These five types are 1) movement of artificial valley fills, 2) movement of widening of embankment, 3) movement of artificial valley fills and widening of embankment, 4) earth flow of embankment and 5) surface slide. The surface slide that was classified as Type 5 was a damage that appeared to be clear in this earthquake; the slope become unstable by liquefaction of the foot of slope. Each type of damages happens in the embankment area. Effectiveness of landslide prevention works for reinforcement against earthquake that was constructed after “1978 Miyagiken-oki earthquake” was examined. The examination showed that landslide prevention works (pile work and groundwater drainage work), was effective for large deformation of embankment slope. However, since only landslide prevention works could not control deformation around the foundation of house, it appeared that development of prevention works to improve movement resistance around it is necessary here after. In addition, it appeared to be possible to control mass movement by making a part of uniformly weak movement mass stronger, leading its flank resistance to be increased.

Key words : artificial fill, earthquake, slope stability, site investigation