

論文 Original Paper

2018年北海道胆振東部地震による北広島市大曲並木地区の
宅地被害の安定解析分析橋本隆雄*¹, 内田秀明*², 宗川清*³Stability analysis of residential land damage in the Omagari Namiki
area of Kitahiroshima City by the 2018
Eastern Hokkaido Iburu EarthquakeTakao Hashimoto*¹, Hideaki Uchida*², Kiyoshi Sokawa*³

Abstract: The residential land in the Omagari area of Kitahiroshima City collapsed 28 houses along the river by the 2018 Hokkaido Iburu Eastern Earthquake. In addition, the stricken area suffered heavy rain by Typhoon 21 the day before the earthquake. The cause of the damage is thought to be an increase in groundwater level in the valley-filled embankment in addition to the earthquake. Therefore, in this paper, the cause of residential land damage was estimated by slip stability analysis, and the effect of groundwater reduction method was clarified.

Key words: Hokkaido Iburu Eastern Earthquake, earthquake, residential land damage, embankment damage, slip, settlement

1. はじめに

2018年9月6日早朝3時8分に発生した北海道胆振東部地震（Mj 6.7, 震源深さ37km）では、震度7を観測した厚真町で土砂災害を原因とする36人を含めた42人の死者と762人の負傷者が発生した。これに対して、震央距離50kmを超える札幌市で震度5強を観測し、清田区里塚や美しが丘地区では、大規模な液状化による地盤変状が生じ建物の沈下・傾斜を生じた。

清田区の東隣の北広島市大曲地区では、震度5弱を観測し、写真1に示すように大曲川に面した28戸の宅地（1972年造成）が崩壊した。被災した宅地は、間知ブロック擁壁で支えられた道路の川側に腹付けされた盛土地盤である。道路側には一期造成盛土時に構築された擁壁が残地埋設されており、埋設されたままの擁壁と三期造成時に構築された川に面した擁壁が宅地とともに滑ったため、腹付け部分である道路より川側の宅地に顕著な陥没帯を生じたと推測される。支笏火山山麓で標高は約81m、火山山麓を開析する大曲川の右岸（東側）に面した南北に細長い街区の一角である。

また、札幌市清田区と北広島市では台風21号により、地震前かなりの降雨（里塚では総雨量46.5mm）があった。いずれの被災地も谷沿いの集水地形であったことから、地下水位が上昇し地盤を緩めた可能性は高い。

そこで本論文では、円弧滑り安定解析により宅地被害原因を推定し、さらに地下水低下工法の対策効果を明らかにした。

2. 災害履歴

(1) 過去における地震被害

「北広島市地域防災計画（地震災害対策編）」によると、「本市における地震の発生状況は、地震については1884



写真-1 北広島市大曲地区における盛土地盤の崩壊

*¹ 国士舘大学理工学部 まちづくり学系 教授*² 株式会社千代田コンサルタント 国土保全事業部防災地盤室 室長*³ 株式会社千代田コンサルタント 国土保全事業部防災地盤室 担当課長

年の入植以降、大きな被害を受けた記録がなく、近年、北海道内で発生した1993年釧路沖地震及び1993年北海道南西部地震、1994年北海道東方沖地震、2003年十勝沖地震等においても大きな被害はおきていない。」と記載されており、大きな被害のあった地震は北海道胆振東部地震が初めてであった。ただし、北広島周辺では、2003年9月26日に発生した十勝沖地震で、隣接する札幌市清田区の清田団地及び美しが丘において液状化被害が発生している。また、今回発生した北海道胆振東部地震においても、清田区では大規模な液状化被害が発生している。

(2) 地表加速度

北広島市に設置されている地表加速度計は、国立研究開発法人防災科学技術研究所の観測所（HKD182広島）であり、位置を図-1に示す。北広島市の最大地表加速度は199.1galであった。表面加速度分布を図-2、加速度波形を図-3に示す。

(3) 気象状況

北海道胆振東部地震では、前日に台風21号が北海道の西側を通過し、その影響があり地下水位が高くなり被害が発生している可能性がある。しかし、これまで北海道南西沖地震、十勝沖地震では被害を受けていない。

そこで、図-4のように各地震1か月間の降雨状況につ

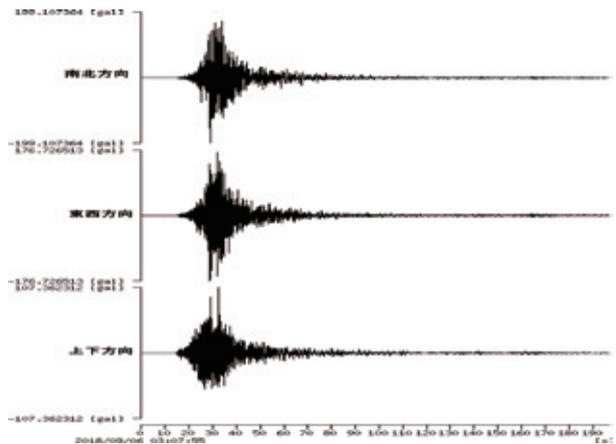


図-3 地表加速度波形¹⁾

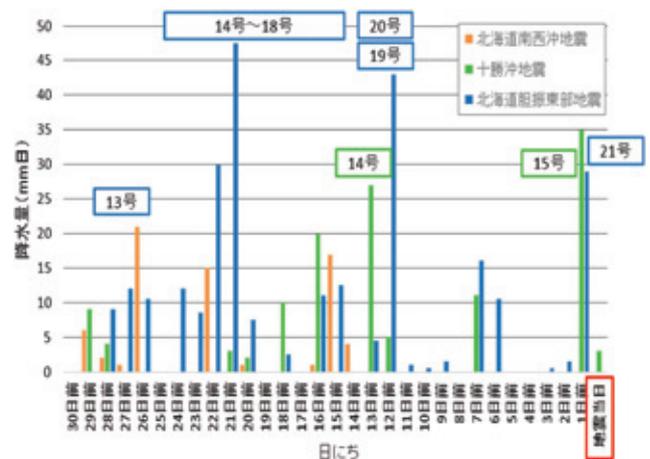


図-4 地震発生1ヶ月間の降水量



図-1 地表加速度計観測所位置図

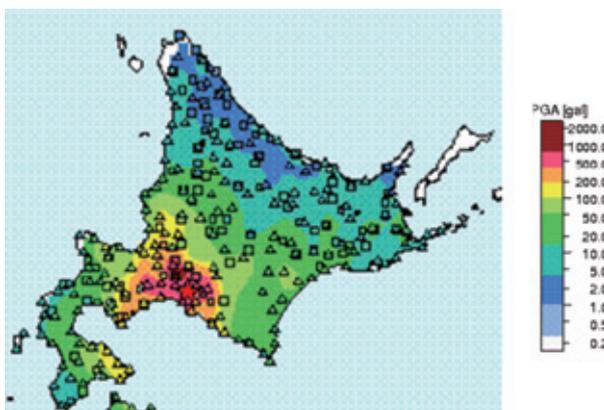


図-2 表面加速度分布図¹⁾

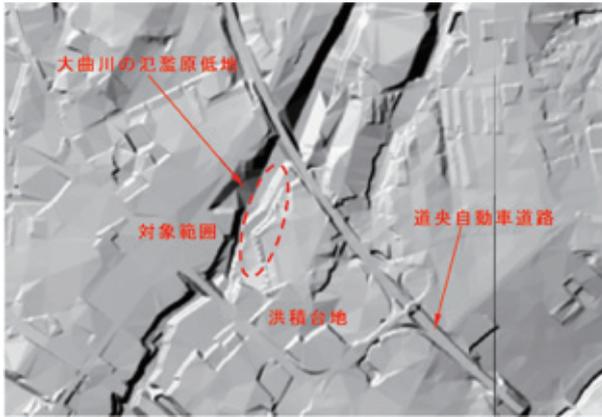
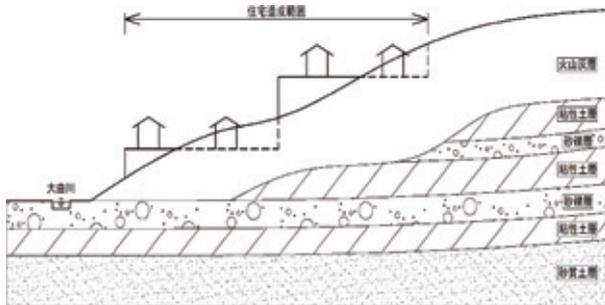
いて恵庭島松観測所の降水量を整理した。十勝沖地震および北海道胆振東部地震では、地震発生1週間前と前日に降雨があったことが観測されている。また、1ヶ月間の積算降水量も北海道南西沖地震での68mm/月に対して、十勝沖地震ではほぼ倍の129mm/月であり、北海道胆振東部地震では4倍の271mm/月の降雨量があり、地下水位が高くなっていったと考えられる。これは、十勝沖地震発生前には台風14号、15号が連続して日本付近を通過し、北海道胆振東部地震発生前には台風13号から21号が発生し、そのうち13号、19号、20号、21号の4つの台風が東北、北海道に近接して通過した影響によるものである。

これに比べて北海道南西沖地震は、台風3号が南の海上にあっただけなので降水量が少ないと考えられる。このように、十勝沖地震と北海道胆振東部地震では、台風による地下水位上昇しているところに地震が発生したことによる複合災害であると考えられる。

3. 被害地域の地形・地質、造成の経緯

(1) 被害地域の地形・地質

北広島市大曲並木地区造成団地の被災箇所は、図-5

図-5 陰影起伏図²⁾図-6 地質堆積状況の模式図³⁾

に示すように道央自動車道の北広島ICから北西へ約500mの月寒丘陵地に発達する洪積台地と、北広島市と札幌市の市境に位置する大曲川によって形成された氾濫原低地が分布し、「台地～低地」に向かって緩やかな勾配を示す傾斜地上に宅地造成された団地である。これらの造成形状は、「大規模盛土造成時の滑動崩落対策推進ガイドライン及び同解説（平成27年5月）」に示される「谷埋め型盛土」や「腹付け型盛土」の形状を呈している。

対象区域に分布する地形は、台地状の地形と段丘面がみとめられる丘陵地であり、標高100m前後の丘陵性台地面が広範囲に広がっており、この台地は一般的に月寒丘陵地とよばれている（陰影起伏図参照）。またこれらの台地面には樹状に発達した小河川等が一部谷地形を形成して流下しており、対象地は南西方向から北東方向へ流下する大曲川に面した台地面の末端部の傾斜地に位置している。なお、現況においては宅地造成が進み樹状に発達した谷地形等は、切盛りされ平坦面になっており、旧地形は確認できない状況にある。

現地形の成り立ちは、洪積世（更新世：1万年前以前）の地質時代に、大曲川沿いに発達した古い時代の河岸段丘地形に、支笏火山噴出物（主に火山灰）が堆積して丘陵性台地地形が形成されたものであり、この台地面が大曲川に向かって緩やかな傾斜地になっている斜面に宅地造成されたものである。

大曲団地は大曲川に面した台地面の末端部の傾斜地に位置しており、地表面より支笏火山噴出物であると考えられる火山灰層が厚く堆積しており、地質構造は、図-6に示すようにこの層の下部には部分的に厚別砂礫層（低位段丘礫層）や粘性土層・砂質土層（段丘堆積物）が厚く堆積している。なお、火山灰層は下位に従い弱溶結状態を呈し、部分的に凝灰岩状を呈する箇所も見られる。

(2) 造成の経緯

当該地区は1970年（昭和45年）に都市計画決定当初より市街化区域に指定されており、市街地として形成されることになった。造成工事は1972年（昭和47年）に地区のほとんどを行ったものの、大曲川沿いの南西側は地元の地主が1973年（昭和48年）に開発した。北広島市では、その後14回に渡って市街化区域の編入がなされてきた。当該地区の土地利用は、第1種低層住居専用地域となっており、南側の一部が第1種特別工業地区となっている。

写真-2は、造成履歴がわかる年代別の航空写真である。(a) 1947（昭和22）年は周辺に集落もほとんど見当たらず、農地の間に家が点在している状況であった。地区南側には旧街道が北西から南東に向かって通っているが、大曲川の谷部で大きく蛇行しながら谷底を横切っているのが分かる。(b) 1961（昭和36）年になると南側には国道36号が整備され、地区の南側と西側の国道に沿って開墾が進み、樹林地が減っているのが分かる。また、地区内でも開墾が進み大曲川を横切っていた旧道が分からなくなっている。また、西側には北へ道路が延びている。(c) 1974（昭和49）年には1992（昭和47）年から始まった当該地区の造成が終わり、現在の大曲並木地区造成団地に住宅が建ち始めている。南側の国道36号も幅員が広くなり、周辺の宅地化が進み地区北側の一部を除いて農地が見られなくなった。道央自動車道の整備が進み北広島ICより東側では供用開始している様子うかがえる。(d) 1985（昭和60）年になると地区内の宅地はほぼ家が建ち並び、道央自動車道も西側が開通している。地区周辺の宅地化もさらに進んでおり、宅地の需要が伸びていることがうかがえる。(e) 2008（平成20）年になると、地区内及び周辺の状況は震災前と同じ状況となっており、北広島IC西側の宅地にもほぼ家が立ち並んでいる。また、西側の札幌市内の北へ延びる厚別東通も現在の位置に付替えが完了している。震災後 (f) 2018（平成30）年は、航空写真からも大曲川沿いの家屋が西側に移動しているのが確認できる。

4. 宅地被害の状況

(1) 全体の被害状況

宅地は、大曲川の河川に沿って図-7に示すように盛



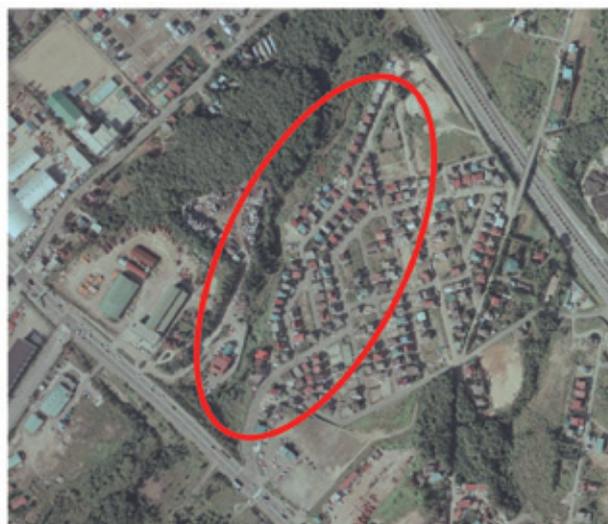
(a) 1947(昭和22)年



(b) 1961(昭和36)年



(c) 1974(昭和49)年



(d) 1985(昭和60)年



(e) 2008(昭和20)年



(f) 2018(平成30)年：震災後

写真-2 年代別の航空写真 (造成履歴)⁴⁾

土の崩壊等の被害を生じた。北海道胆振東部地震により発生した地盤沈下及びクラック等は、南側街区の切土の箇所にも一部見られるものの、大半は盛土範囲に発生しており、特に大曲川沿いの第3期開発の街区に顕著に現れている。盛土厚さが比較的薄いと想定される盛土範囲の東側や切土の範囲では、変状はほとんど確認されていない。そこで、被害状況については、盛土の変状が顕著な宅地北側エリア、宅地中央エリア、宅地南側エリア、宅地擁壁エリアの4つに区分して行う。

(2) 宅地北側エリアの被害状況

宅地北側エリアは、図-8に示すように旧谷地形に盛土した箇所となっている。この地区の被災形態は盛土のり面が崩壊し、道路では切盛境界付近にクラックが発生している。また、崩壊したのり面の南側は浅い腹付け盛土となっており法面方向に複数のクラックが発生している。これらの変状は、盛土の滑動によるクラック発生と同じであることから、盛土が動いていることが分かる。

(3) 宅地中央エリアの被害状況

宅地中央エリアは、図-9に示すように旧谷地形に盛土した箇所となっている。この地区の被災形態は道路で切盛境界付近にクラックが発生している。これらの変状は、盛土の滑動によるクラック発生と同じであることから、盛土が動いていることを示している。クラックが発生している箇所付近で部分的な沈下は観測されているが、あまり連続性は見られない。

(4) 宅地南側エリアの被害状況

宅地南側エリアは、第3期開発許可事業で造成した区

域である。この地区の東側には第1期開発許可事業で設置されたブロック積擁壁を存置したまま盛土がなされており、この擁壁に沿って盛土が落ち込み、大曲川沿いの擁壁を押し出している。宅地内には図-10に示すように複数のクラックが発生している。沈下についての連続性は見られないが、旧谷地形の縁あたりに点在している。

(5) 宅地擁壁エリアの被害状況

宅地擁壁部エリアのブロック積擁壁は平積みされた擁壁である。擁壁調査の結果では、図-11に示すように目地ズレやブロックの間隙が生じているが、擁壁上部で水平方向の段ズレが多く発生している。また、一部地盤の不同沈下によりブロック積擁壁も不同沈下が発生している。擁壁の前面勾配は開発許可申請図書では1:0.3と1:0.5となっているが、このエリアのブロック積擁壁は



図-9 宅地中央エリアの現況測量による被災状況



図-8 宅地北側エリアの現況測量による被災状況



図-10 宅地南側エリアの現況測量による被災状況

壁高が3.0mを超える擁壁についても前面勾配はすべて1:0.3と急になっている。

5. 現況地盤の安定解析

(1) 安定解析の方針

安定解析の手法は、表-1及び表-2に示す「宅地防災事業」および「災害復旧事業」の手法を参考とする。しかし、「強度定数の設定」および「すべり面の設定」は、以下のように両事業の手法により異なるため、表-3に示す適切な手法によるものとした。

a) 宅地防災事業

1) 強度定数の設定：三軸圧縮試験等のせん断試験を実施し、盛土等の粘着力 (c) および内部摩擦角 (ϕ) を求め、安定解析を行う (順計算)。

2) すべり面の設定：谷埋め型盛土は盛土と地山境界、または盛土脆弱面等をすべり面とした複合すべり、腹付け型盛土は盛土内の円弧すべりを基本とする。

b) 災害復旧事業

1) 強度定数の設定：地すべり等の被災時の安全率を初期安全率として仮定し、この初期安全率に適合する粘着力 (c) および内部摩擦角 (ϕ) を求める手法 (逆計算) である。

2) すべり面の設定：調査結果 (ボーリングコア観察によるすべり粘土や風化境界、動態観測結果) に基づきすべり面を判定する。

c) 本解析

1) 強度定数の設定：安定解析は、せん断試験による強度定数を基にした順計算が望ましいと判断されるが、一般的にせん断試験を実施した場合、試験値のパラッキや高い値が得られることが多く、必ずしも被害状況に適合した結果が得られない可能性が高い。よって、本解析では「災害復旧事業」で示される逆計算により強度定数を設定する。

【すべり面の設定】：安定計算で用いるすべり面は、「すべり面が特定できない被害形態が主体」「地震時の被災のため、動態観測等ですべり深度を特定できない」ことから、調査ボーリングに基づく地層区分や物性値、宅地の被災状況等に基づく「設計上のすべり面」により、谷

埋め盛土では「複合すべり」、腹付け盛土では「円弧すべり」として検討を行う。

表-1 各事業における準拠指針等

準拠指針等名称		発行年月	編集発行
宅地防災事業	宅地防災マニュアル【第二次改訂版】 ⁸⁾	平成19年3月	宅地防災研究会
	大規模盛土造成地の変動予測調査ガイドライン【改訂版】 ⁹⁾	平成24年4月	国土交通省都市局
	宅地耐震対策工法選定ガイドライン ¹⁰⁾	平成24年4月	国土交通省都市局
災害復旧事業	災害手帳 ¹¹⁾	平成23年5月	全国建設技術協会
	災害復旧事業における地すべり対策の手引き ¹²⁾	平成18年5月	全国防災協会

表-2 宅地における安定解析手法

項目	宅地防災事業	災害復旧事業
準拠指針等	・宅地防災マニュアル ・大規模盛土造成地の変動予測調査ガイドライン	・災害復旧事業における地すべり対策の手引き ・災害手帳
すべり面の設定およびすべり形状	◆谷埋め型盛土盛土と地山境界等をすべり面とした複合すべり ◆腹付け型盛土盛土内の円弧すべり	調査結果(ボーリングコア・動態観測)に基づきすべり面を設定
計算式	二次元分割法 ※腹付け型盛土は分割法のうち簡便法	スウェーデン分割法
計算方法	順計算	逆計算
設計強度定数 (c・ ϕ)	せん断試験値 (c, ϕ)	c：最大層厚から計算する ϕ ：逆計算による
初期安全率	—	【常時】 ・継続的に運動している場合： $F_s=0.95$ ・降雨等に伴い断続的に運動している場合： $F_s=0.98$ ・沈静化している場合： $F_s=1.00$
設計水平震度	$k_h=k_0 \times Z$ $k_0=0.25$	—
計画安全率	常時： $F_s=1.50$ 地震時： $F_s=1.100$	常時： $F_s=1.10\sim 1.20$

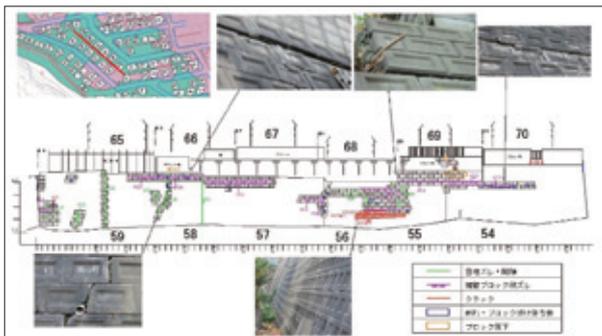


図-11 擁壁被災状況図⁷⁾

表-3 採用する安定解析手法

項目	解析手法
準拠指針等	・原則宅地防災事業に準拠 ・定数設定や初期安全率は別途設定
すべり面の設定 およびすべり形状	◆谷埋め型盛土 各エリアの検討結果に基づき、設計上のすべり面を設定 ◆腹付け型盛土 円弧すべりを標準とし、擁壁の変状をもとに判定
計算式	◆谷埋め型盛土 ・二次元分割法 ◆腹付け型盛土 ・二次元分割法 (簡便法)
計算方法	逆計算 (※順計算による検証を実施)
設計強度定数 ($c \cdot \phi$)	c : 逆計算による ϕ : 地層毎に設定
初期安全率	【地震時】 ・変位が小さいと考えられる : $F_s=0.95 \sim 0.98$ ・変位が大きいたと考えられる : $F_s=0.80 \sim 0.90$ ※「変位が小さいもの」とは被災宅地の調査・危険度判定マニュアルの危険度評価区分が中のもの、「変位が大きいたもの」とは危険度評価区分が大のものを標準とした。
設計水平震度	$k_0=k_0 \times Z=0.25 \times 0.90=0.225$
計画安全率	常時: $F_s=1.50$, 地震時: $F_s=1.00$

(2) 安定解析算定式

「大規模盛土造成地の滑動崩落対策推進ガイドライン」¹³⁾によると、図-12に示すように「安定計算は、二次元の分割法による計算を基本とし、地震力及びその盛土の自重による滑り出す力が、そのすべり面に対する最大摩擦抵抗力その他の抵抗力を上回るか否かを確認する。」とされている。そこで、地震力及びその盛土の自重による当該盛土の滑り出す力と、そのすべり面に対する最大摩擦抵抗力その他の抵抗力を以下のように計算した。

a) 盛土の滑り出す力

盛土の自重による滑り出す力のモーメント S_m は以下の式 (1) で表される。

$$S_m = \sum W_i \cdot R_0 \cdot \sin \alpha_i + \sum k \cdot W_i \cdot R_{ei} \quad (1)$$

この式において、 S_m 、 W_i 、 α_i 、 k 、 R_{ei} および R_0 は、それぞれ次の数値を表すものとする。

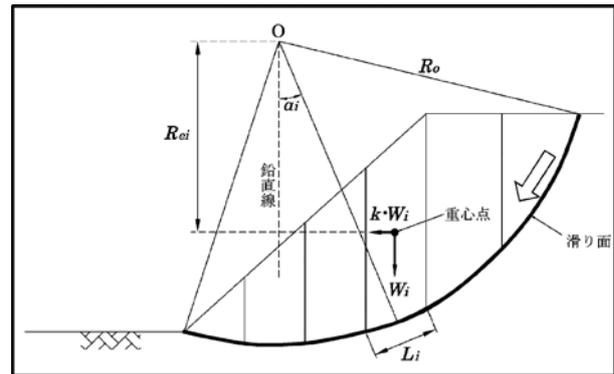
S_m : 盛土の自重による滑り出す力のモーメント
(単位 $\text{kN} \cdot \text{m}$)

W_i : 滑り面を分割した時の分割片ごとの重量
(単位 kN)

α_i : 滑り面を分割した時の分割片ごとの滑り面の傾斜角度 (単位 ラジアン)

k : 水平震度 ($k=0.25 \times z$ z : 建築基準法施行令第八十八条第一項に規定する z)

R_{ei} : 滑り面を分割した時の分割片ごとの自重に比例し

図-12 円弧すべり面方における各分割片に働く力¹³⁾

た地震力による、モーメントの腕の長さ (単位 m)

R_0 : 円弧の半径

b) 抵抗力のモーメント

最大摩擦抵抗力その他の抵抗力のモーメントは以下の式 (2)、式 (3) で表される。

$$T_m = \sum [c'_i \cdot L_i + |W_i (\cos \alpha_i - k \cdot \sin \alpha_i) - u_i \cdot L_i| \tan \phi'_i] \cdot R_0 \quad (2)$$

$$T_m = \sum (c_{ui} \cdot L_i) \cdot R_0 \quad (3)$$

この式において、 T_m 、 c'_i 、 L_i 、 W_i 、 α_i 、 k 、 u_i 、 ϕ'_i 、 c_{ui} 、 R_0 は、それぞれ次の数値を表すものとする。

T_m : 最大摩擦抵抗力その他の抵抗力のモーメント
(単位 $\text{kN} \cdot \text{m}$)

c'_i : 分割されたそれぞれの滑り面の有効粘着力
(単位 kN/m^2)

L_i : 分割されたそれぞれの滑り面の傾斜方向の底面長さ (単位 m)

W_i : 分割されたそれぞれの滑り面上の盛土の自重 (単位 kN)

α_i : 次の式によって計算した分割されたそれぞれの滑り面の勾配 (単位 ラジアン)

$$\alpha_i = \tan^{-1} (H_i / L_i)$$

この式において、 H_i および L_i は、それぞれ次の数値を表すものとする。

H_i : 分割されたそれぞれの滑り面の最下流端と最上流端の標高差を計測した数値 (単位 m)

L_i : 分割されたそれぞれの滑り面の標高差を計測した二地点間の水平距離を計測した数値 (単位 m)

k : 水平震度 ($k=0.25 \times z$ z : 建築基準法施行令第八十八条第一項に規定する z)

u_i : 分割されたそれぞれの滑り面上の間隙水圧
(単位 kN/m^2)

ϕ'_i : 分割されたそれぞれの滑り面の有効内部摩擦角
(単位 ラジアン)

R_{ei} : 分割されたそれぞれの滑り面のモーメントの腕の長さ (単位 m)

R_0 : 円弧の半径

c_{ui} : 分割されたそれぞれの滑り面の非排水せん断強度 (単位 kN/m^2)

c) 安全率

盛土の滑り出す力とすべり面に対する抵抗力の比から安全率を計算する。計算式は以下の式 (4) とおりである。

$$F_s = T_m / S_m \quad (4)$$

この式において、 F_s , T_m , S_m は、それぞれ次の数値を表すものとする。

F_s : 安全率

T_m : 最大摩擦抵抗力その他の抵抗力のモーメント (単位 $\text{kN}\cdot\text{m}$)

S_m : 地震力及び自重による盛土の滑り出す力のモーメント (単位 $\text{kN}\cdot\text{m}$)

d) 必要な抑止力

一定の安全率を確保するために必要な抑止力は以下の式 (5), 式 (6) で表される。

$$F_s = (T_m + P \cdot R't) / S_m \geq 1.0 \quad (5)$$

$$P \geq (S_m - T_m) / R't \quad (6)$$

この式において、 F_s , T_m , S_m , P , $R't$ は、それぞれ次の数値を表すものとする。

F_s : 安全率

T_m : 最大摩擦抵抗力その他の抵抗力のモーメント (単位 $\text{kN}\cdot\text{m}$)

S_m : 地震力及び自重による盛土の滑り出す力のモーメント (単位 $\text{kN}\cdot\text{m}$)

P : 対策施設の抵抗力 (抑止力) (単位 kN)

$R't$: 対策施設の工法により決まるモーメントの腕の長さ (単位 m)

e) 地震地域係数

地震地域係数は、建築基準法施行令第88条第1項の規定に基づき、地震地域係数 Z は、図-13に示すように、1.0~0.7の数値として行政区域ごとに定められている。

過去の地震記録等により得られた地震動の期待値の相対的な比を表す数値である。地震動の期待値については、多くの研究成果があるが、それらを統計的に処理し、工学的判断を加え行政区域ごとに振り分けて、地震地域係数 Z は定められている。北広島市の地震地域係数は、は北海道道央地域に属することから、B区域の $Z=0.9$ である。

e) 地震地域係数逆算法算定式

一般的には、地すべり解析等で用いられる手法であり、すべり土塊が粘性土主体の場合は表-4に示す、すべり土塊層厚より粘着力 (c) を推定し、図-14に示した「 $c \sim \tan \phi$ の関係図」より内部摩擦角 (ϕ) を導き出す手法である。しかし、当該区間分布する「盛土層 (Bs)」や「火山灰層 (Dv)」はいずれも「砂質土層」主体であることから、内部摩擦角 (ϕ) が優勢な土質である。このため、内部摩擦角 (ϕ) を固定し、粘着力 (c) を推定することとした。

(3) 解析に採用する地盤定数値

表-5は地盤の一般的な特徴である。設計に採用する地盤定数値は、地質調査結果を参考に及び表-6に示した地盤定数値を基本とする。逆算定数値を採用する場合は、現況安全率に応じ、内部摩擦角 (ϕ) を固定し粘着力を算出する。また、盛土層 (Bs) については、台地に広く分布する火山灰層 (Dv) 起源の盛土材である。火山灰層 (Dv) は支笏火山噴出物で細粒土も多く混入し、盛土施工から長時間経過しているため、シキソトロピー効果等により、盛土に対するせん断強度は粘着力 (c) も考慮できるとされている。今回、定数値設定に際して、盛土層の粘着力を「 $c=10 (\text{kN}/\text{m}^2)$ 」見込んで設定しているが、実際の強度は不明確なため、今回の地震被害の現象より安定解析によって検証する。

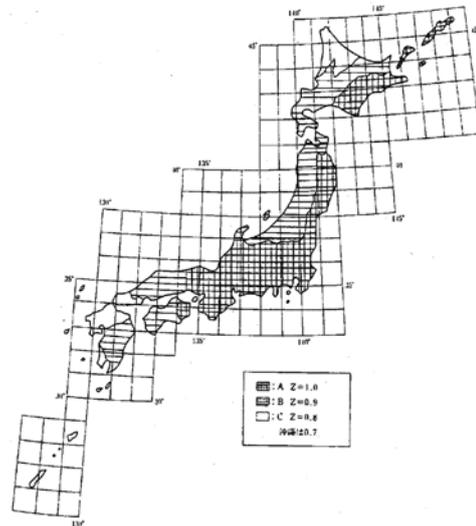


図-13 地震地域係数 (Z)¹⁴⁾

表-4 c の経験値

すべり面の平均鉛直層厚 (m)	粘着力 c KN/m^2
5	5
10	10
15	15
20	20
25	25

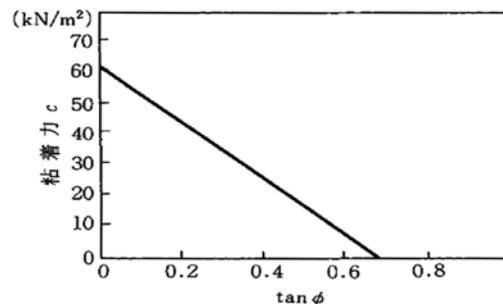


図-14 地すべり面形状をもとに逆算で求めた $c \sim \tan \phi$ 関係図

(4) 盛土層定数値設定の検証

今回の地震によって、盛土を対象としたすべり破壊が発生した宅地南側エリアにおいて写真-3の箇所について図-15及び図-16に示した「断面3」の地質構成により検証を行う。断面3付近では、表-7及び図-17に示すように「杭基礎の家屋（宅16）」では擁壁の倒壊は起こらず、「直接基礎の家屋（宅15, 17）」では擁壁の倒壊が発生している。このため、擁壁背面に「上載荷重を考慮（直接基礎）」した場合と「上載荷重を考慮しない（杭基礎）」場合において、今回の地震被害に応じた安全率が得られるものかを検証した。安全率は各case地震時の算定において、 $F_s \geq 1.0$ は「倒壊しない」、 $F_s < 1.0$ は「倒壊した」と評価する。

なお、今回の地震規模は「M7.3, 地表面加速度=200gal」であるため、「設計水平震度： $k_h=0.2$ 」に設定した。検証の結果、下記に示すように、盛土の地盤定数値は表-6に示す定数値を採用した結果、地震被害と解析結果が概ね整合しているものと評価される。

- ①宅15は直接基礎なので上載荷重を考慮して解析をした結果 $F_s=0.828$ となり、「倒壊する」となり、実際と一致した。
- ②宅16は杭基礎なので上載荷重を考慮しないで解析を行った結果 $F_s=1.038$ となり、「倒壊しない」となり、実際と一致した。

表-5 地盤の一般的な特徴^{4)~6)}

地層名	地質記号	層相	代表N値	相対的強さ	
盛土	Bs	火山灰	3	非常に緩い	
崩積土	dt	火山灰	2	非常に緩い	
沖積層	腐植土層	腐植土	1	非常に軟らかい	
支笏火山噴出物	火山灰層	火山灰	22	中位	
厚別砂礫層	砂礫層	シルト混り砂礫	Dg上	21	中位
			Dg下	46	密な
段丘堆積物	腐植土層	腐植土	15	非常に硬い	
	粘性土層	火山灰質シルト 砂質シルト	15	硬い	
	砂質土層	火山灰質砂 礫混り火山灰質砂	44	密な	

表-6 解析に用いる地盤定数値^{4)~6)}

地層名	地質記号	単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	粘着力 c (kN/m ²)	せん断抵抗角 ϕ (°)	
盛土	Bs	16.0	10	25	
崩積土	dt	16.0	0	25	
沖積層	腐植土層	15.0	13	0	
支笏火山	火山灰層	16.0	0	35	
厚別砂礫層	砂礫層	Dg上	18.0	0	35
		Dg下	20.0	0	40
段丘堆積物	腐植土層	Dp	16.0	188	0
	粘性土層	Dc	18.0	188	0
	砂質土層	Ds	19.0	0	37



写真-3 検討断面箇所

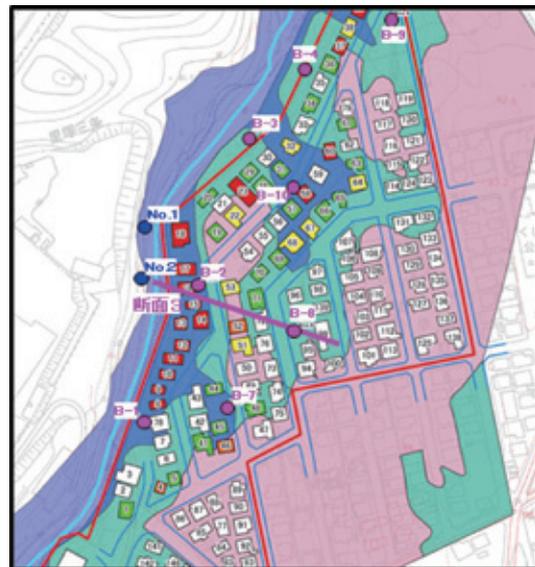


図-15 地質調査箇所及び解析断面位置図

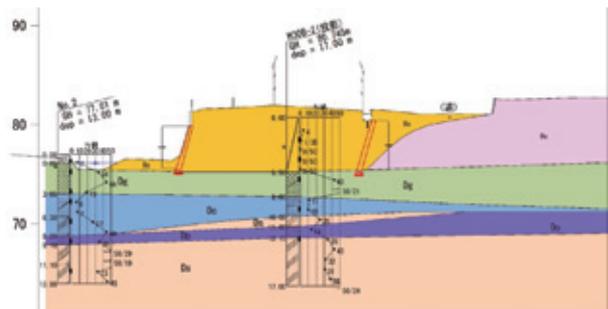


図-16 検証断面

(5) 安定解析結果一覧表

被害形態や被害状況からエリア区分を行い、各エリアで調査測線を設定し、ボーリング調査の結果を踏まえて解析断面および土質定数を設定し、安定解析を実施した。

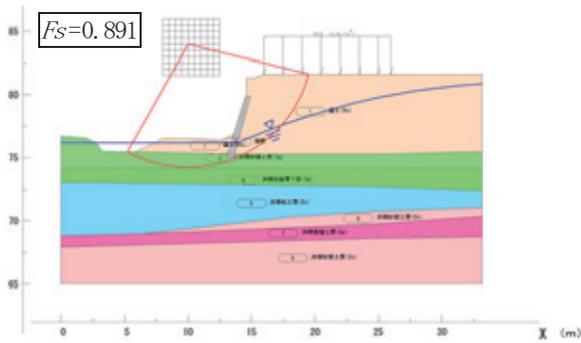
宅地北側エリアでは、一部大崩落箇所も認められるが、全体的にはクラックや沈下等の変状で比較的小規模であることから、初期安全率を「 $F_s=0.95 \sim 0.98$ 」に設定し「火山灰層 (Dv)」の逆算定数値を求めて検討を行った。

また、宅地擁壁エリアでは、擁壁の崩落、崩壊は認め

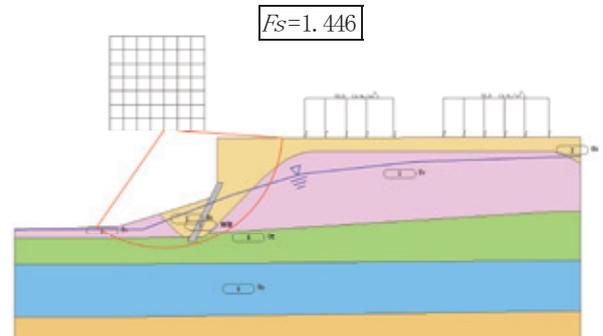
られず、擁壁の変状はブロックの中抜けや水平クラックの発生などであり、宅地擁壁の危険度判定から評価すると、擁壁の変状程度は「小被害」分類されるため、初期安全率を「 $F_s=0.98$ 」程度に設定し、「火山灰層(Dv)」の逆算定数値を求めて検討を行った。安定解析結果一覧表を表-7に示した。宅地北側エリアの解析結果は断面4を図-18、断面5を図-19、断面7を図-20に示す。宅地南側エリアの解析結果は16宅地(水位上昇時)を図-21、17宅地(水位上昇時)を図-22、既設擁壁を図-23に示す。宅地中央エリアの解析結果は66宅地を図-24、71宅地を図-25に示す。宅地中央(谷埋め盛土)の解析結果は断面8を図-26、断面9を図-27に示す。



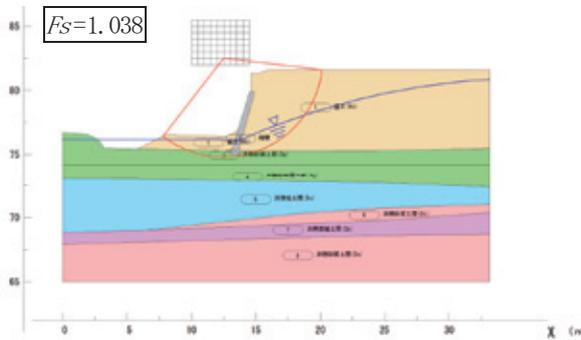
(a) 断面位置図



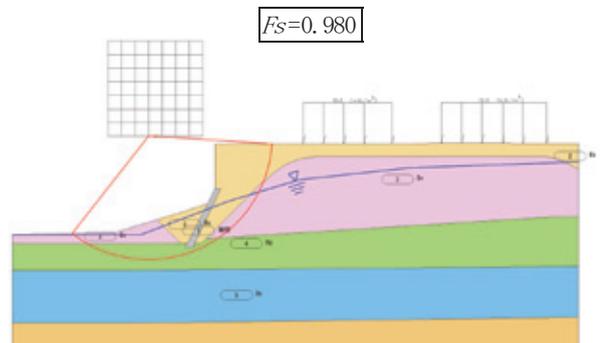
(a) 直接基礎の家屋(宅17)



(b) 今次災害(常時)



(b) 杭基礎の家屋(宅16)

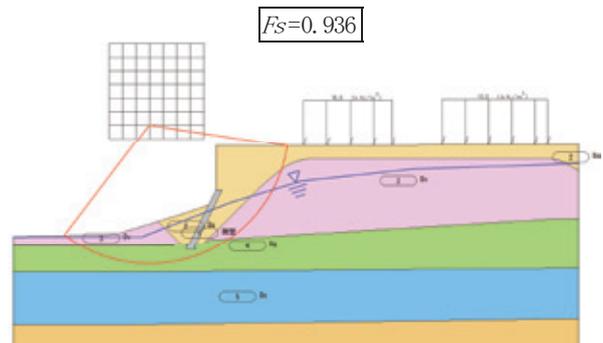


(c) 今次災害(地震時 $k_h=0.20$)

図-17 宅17・宅16の安定解析結果^{4)~6)}

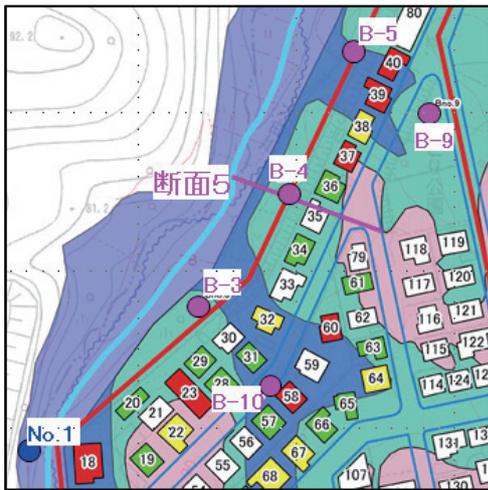
表-7 解析結果一覧表

エリア区分	解析断面	今次災害		今後想定される大地震
		地震時($k_h=0.20$)	常時($F_s=1.5$)	地震時($k_h=0.225$)
宅地北側	断面4	0.980	1.446	0.936
	断面5	0.980	1.419	0.939
	断面7	0.950	1.428	0.907
宅地南側(水位上昇時)	16宅地	1.038	1.436	0.999
	17宅地	0.891	1.293	0.855
	既設擁壁	0.980	1.365	0.980
宅地擁壁	66宅地	0.980	1.266	0.979
	71宅地	0.980	1.243	0.979
宅地中央(盛土)	断面8	1.470	4.152	1.154

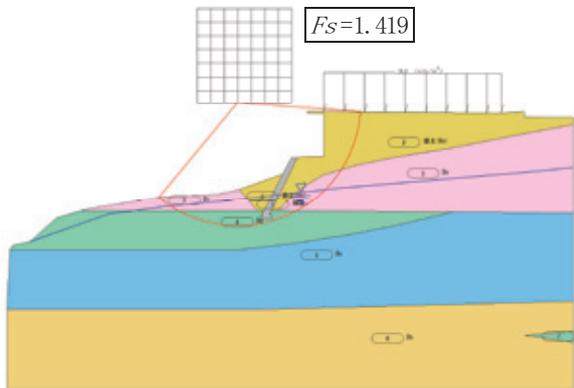


(d) 今後想定される大地震(地震時 $k_h=0.225$)

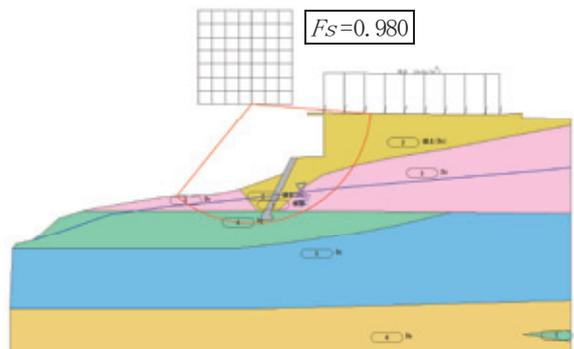
図-18 断面4の安定解析結果



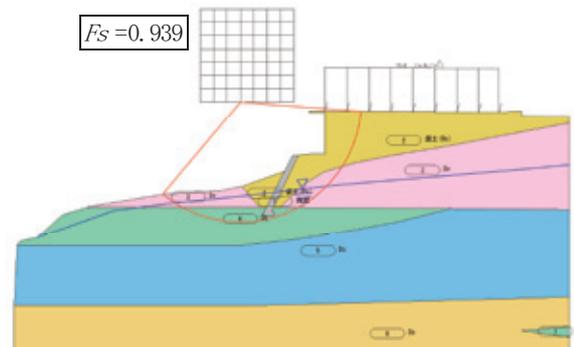
(a) 断面位置図



(b) 今次災害 (常時)



(c) 今次災害 (地震時 $k_h = 0.20$)

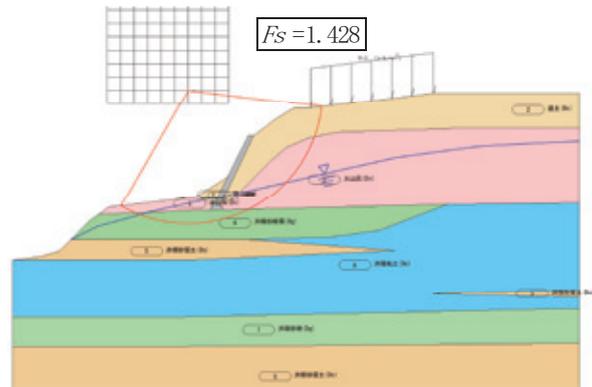


(d) 今後想定される大地震 (地震時 $k_h = 0.225$)

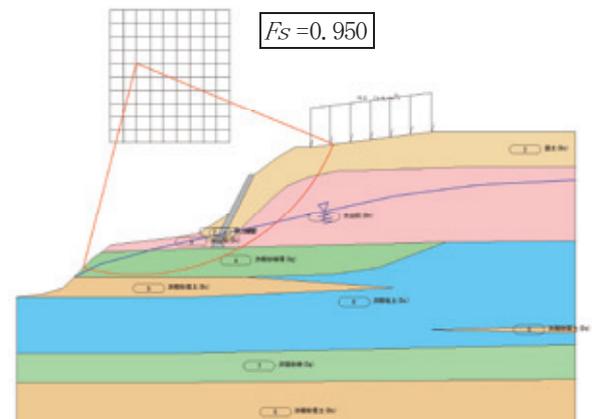
図-19 断面5の安定解析結果



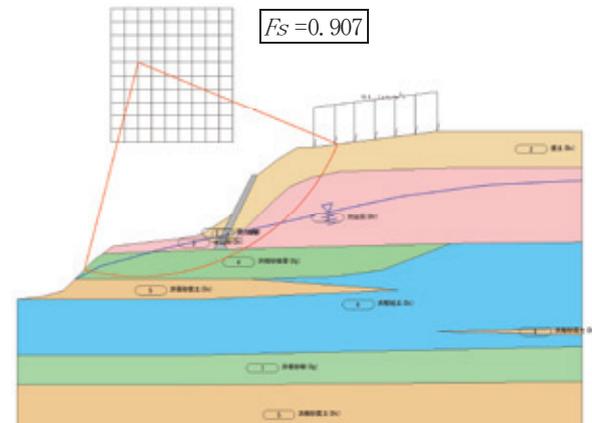
(a) 断面位置図



(b) 今次災害 (常時)

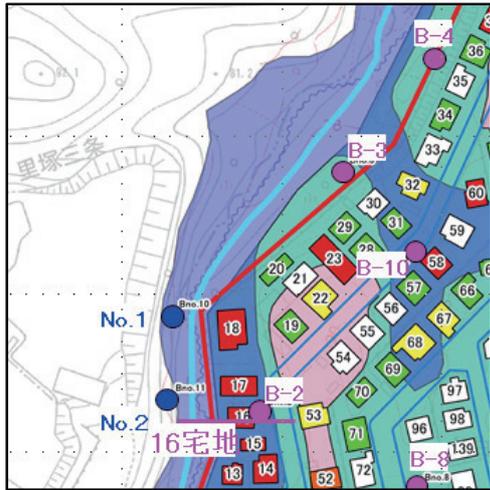


(c) 今次災害 (地震時 $k_h = 0.20$)

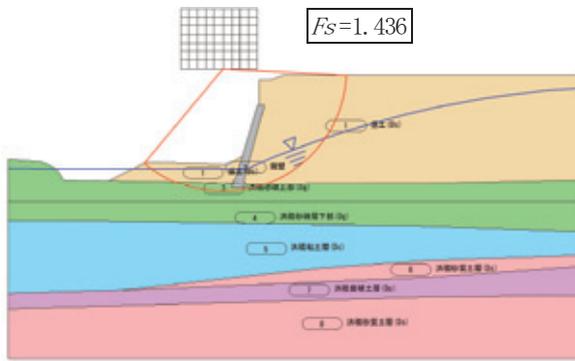


(d) 今後想定される大地震 (地震時 $k_h = 0.225$)

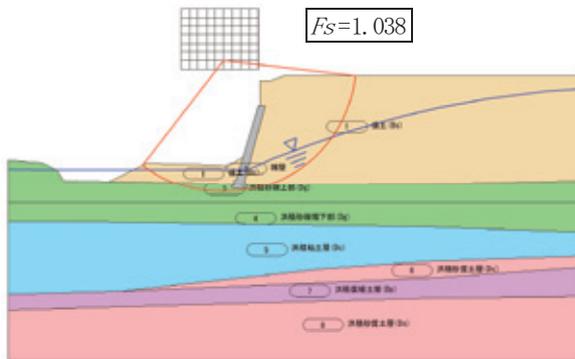
図-20 断面7の安定解析結果



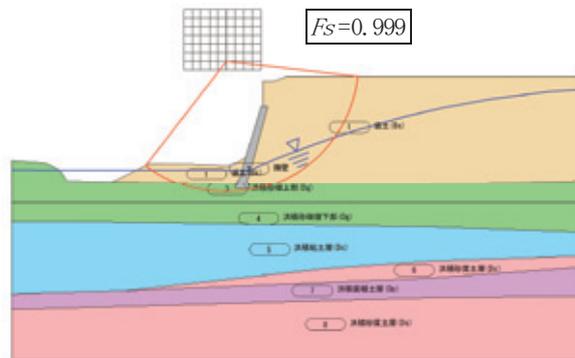
(a) 断面位置図



(b) 今次災害 (常時)

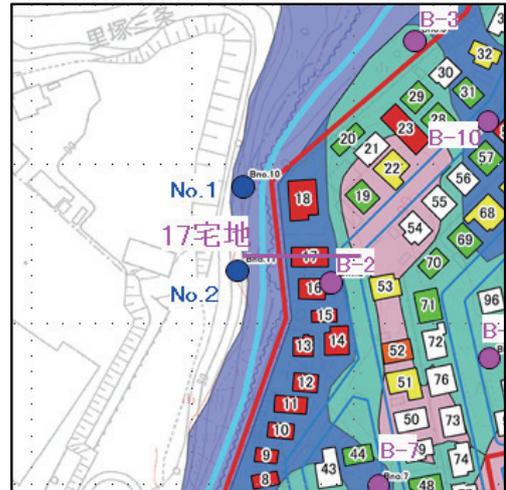


(c) 今次災害 (地震時 $k_h = 0.20$)

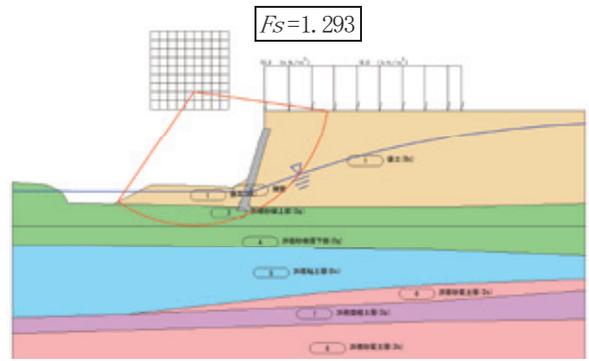


(d) 今後想定される大地震 (地震時 $k_h = 0.225$)

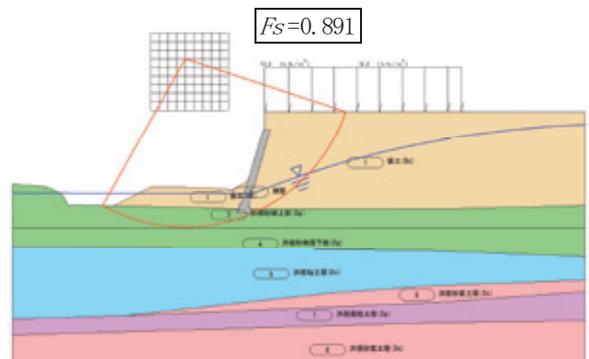
図-21 16宅地の安定解析結果



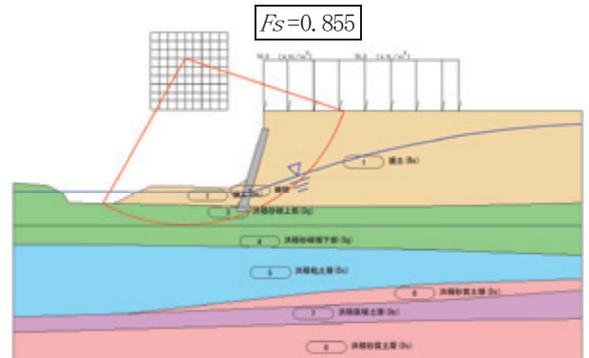
(a) 断面位置図



(b) 今次災害 (常時)

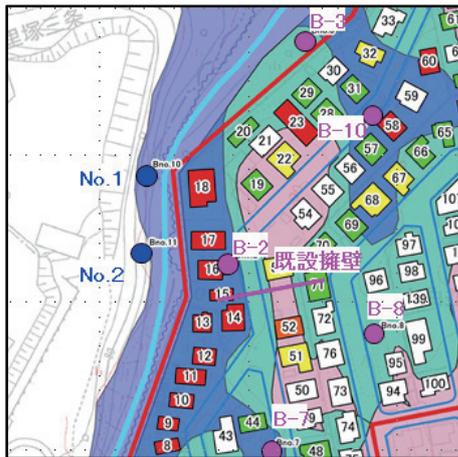


(c) 今次災害 (地震時 $k_h = 0.20$)

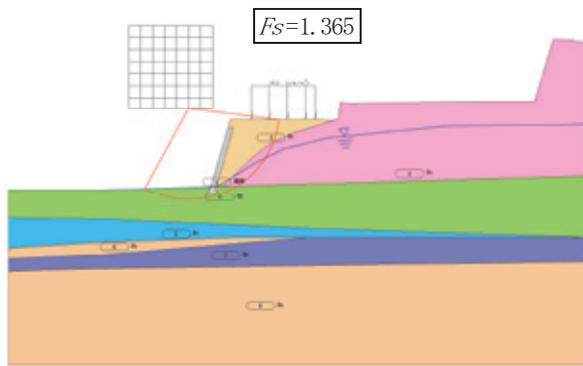


(d) 今後想定される大地震 (地震時 $k_h = 0.225$)

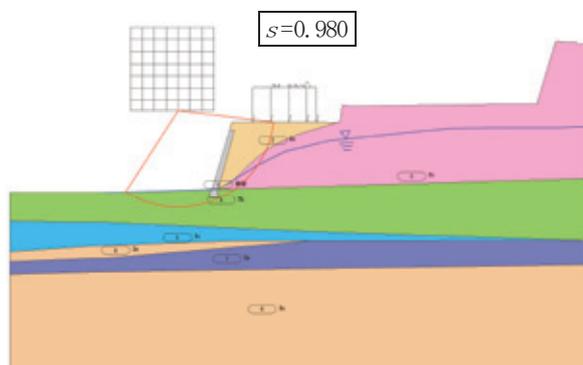
図-22 17宅地の安定解析結果



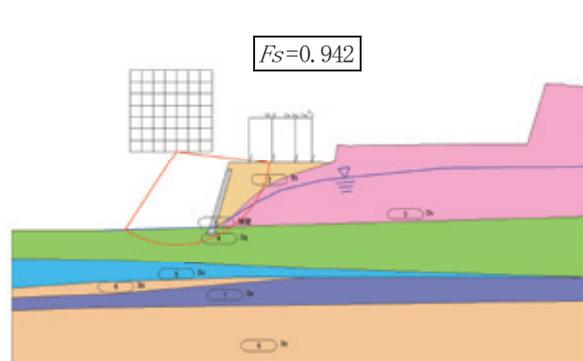
(a) 断面位置図



(b) 今次災害 (常時)

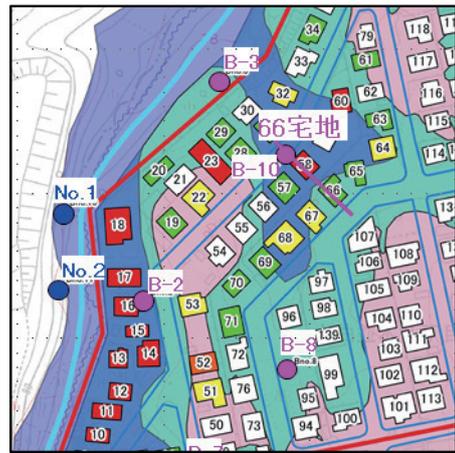


(c) 今次災害 (地震時 $k_h = 0.20$)

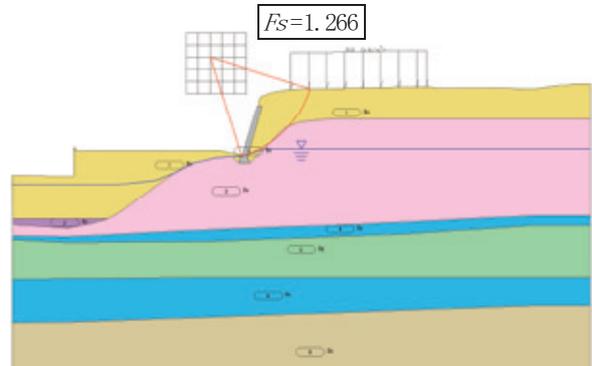


(d) 今後想定される大地震 (地震時 $k_h = 0.225$)

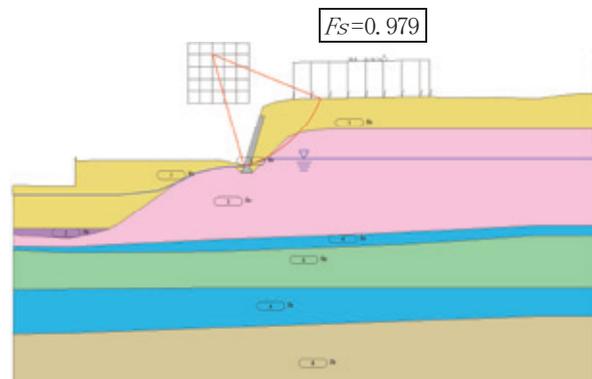
図-23 既設擁壁の安定解析結果



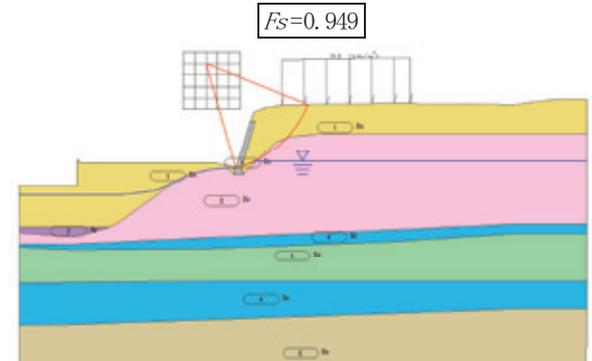
(a) 断面位置図



(b) 今次災害 (常時)

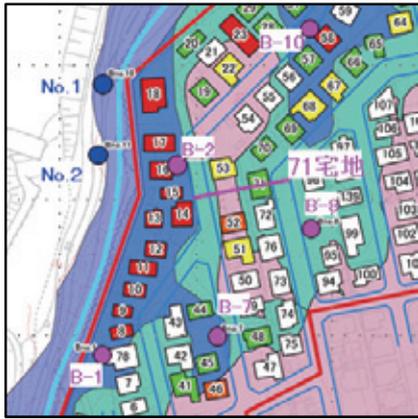


(c) 今次災害 (地震時 $k_h = 0.20$)

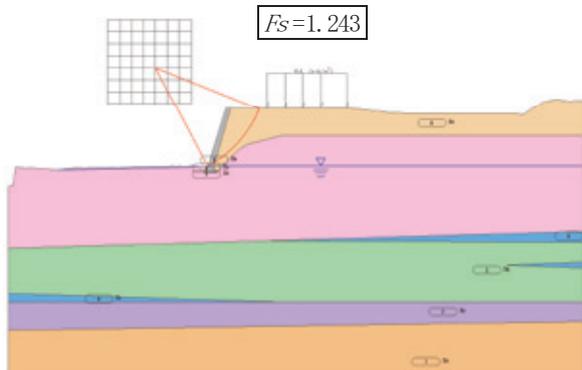


(d) 今後想定される大地震 (地震時 $k_h = 0.225$)

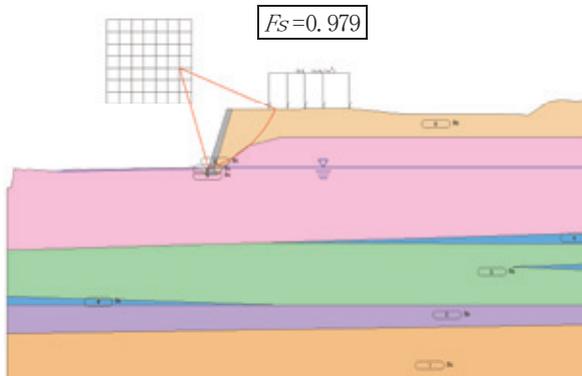
図-24 66宅地の安定解析結果



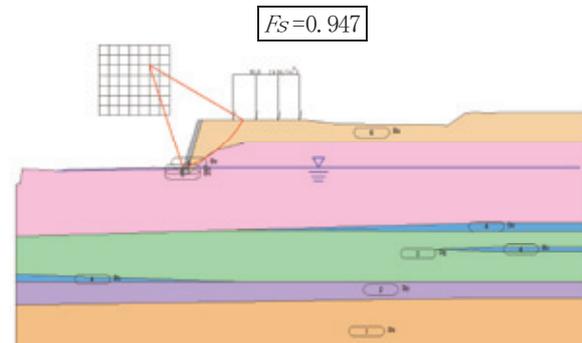
(a) 断面位置図



(b) 今次災害（常時）



(c) 今次災害（地震時 $k_h=0.20$ ）



(d) 今後想定される大地震（地震時 $k_h=0.225$ ）

図-25 71宅地の安定解析結果

6. 対策後の地盤解析

宅地中央エリアにおいては、地下水位低下工法の採用となるため、一般的に非液状化層厚を3.0m確保することによって、液状化被害を軽減できるとしている。このため、暗渠排水管によってGL-3.0mまで地下水位を低下させた場合を想定して解析を行った。解析結果を表-8に示した。断面8地点では、図-28に示すように地下水位低下前では安全率 $F_s=1.154$ が地下水低下後で $F_s=1.727$ とさらに安全になった。断面9地点では、図-29に示すように地下水位低下前では所定の安全率（ $F_s \geq 1.00$ ）を満足できていないが、地下水位低下後では「 $F_s=1.060 > 1.00$ 」を示し、谷埋め盛土の安定性については、地下水位低下による効果が有効であることが検証できた。

また、宅地北側エリア、宅地南側エリアについては、「グラウンドアンカー工」や「鉄筋挿入工」の適用となるため、各検討断面において対策工検討のための「必要抑止力」が必要となる。各断面における必要抑止力は、常時の場合を表-9に、地震時の場合を表-10に示した。これを基に、各工法において対策工の検討を行うことになる。

表-8 安定解析（地下水位低下工法）

エリア区分	解析断面	地下水位低下前	地下水位低下後
		地震時 ($k_h=0.225$)	地震時 ($k_h=0.225$)
宅地中央（谷埋め盛土）	断面8	1.154	1.727
	断面9	0.911	1.060

表-9 常時における必要抑止力の算定結果

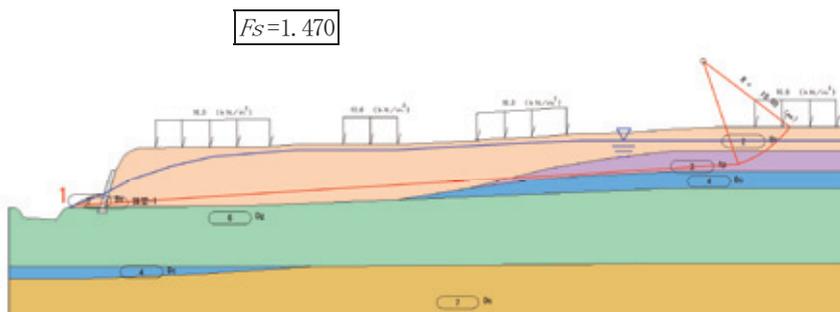
エリア区分	解析断面	常時計画安全率 $F_s \geq 1.5$	
		安全率	抑止力 (kN)
宅地北側	断面4	1.446	15.5
	断面5	1.419	25.3
	断面7	1.433	28.9
宅地南側	既設擁壁	1.365	30.9
宅地擁壁	66宅地	1.275	41.7
	71宅地	1.290	29.0

表-10 地震時における必要抑止力の算定結果

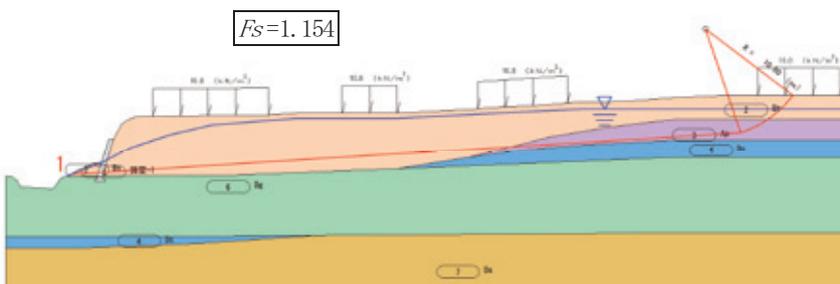
エリア区分	解析断面	地震時 ($k_h=0.225$)	
		安全率	抑止力 (kN)
宅地北側	断面4	0.945	34.0
	断面5	0.940	26.7
	断面7	0.913	57.1
宅地南側	既設擁壁	0.946	19.0
宅地擁壁	66宅地	0.949	11.5
	71宅地	0.947	9.6



(a) 断面位置図

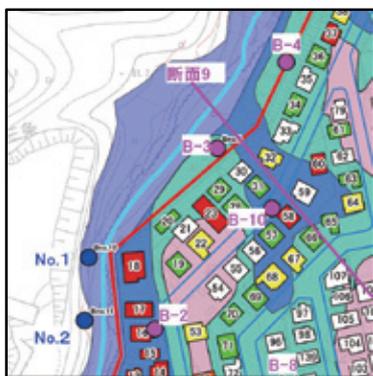


(b) 今次災害 (地震時 $k_h = 0.20$)

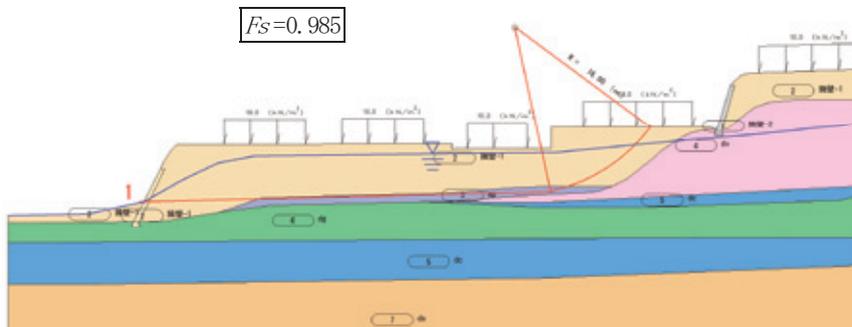


(c) 今後想定される大地震 (地震時 $k_h = 0.225$)

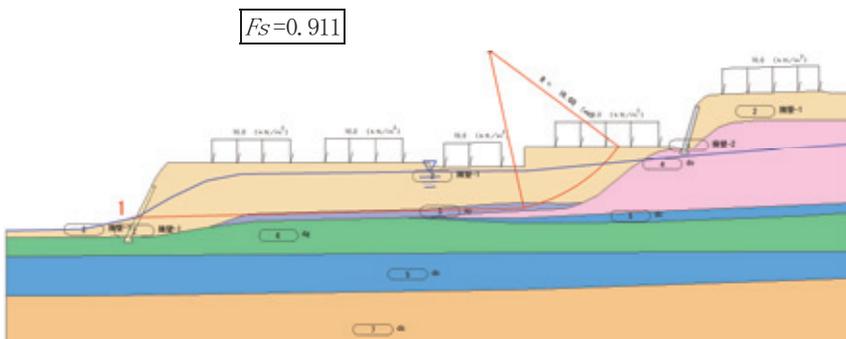
図-26 断面8の安定解析結果



(a) 断面位置図



(b) 今次災害 (地震時 $k_h = 0.20$)



(c) 今後想定される大地震 (地震時 $k_h = 0.225$)

図-27 断面9の安定解析結果

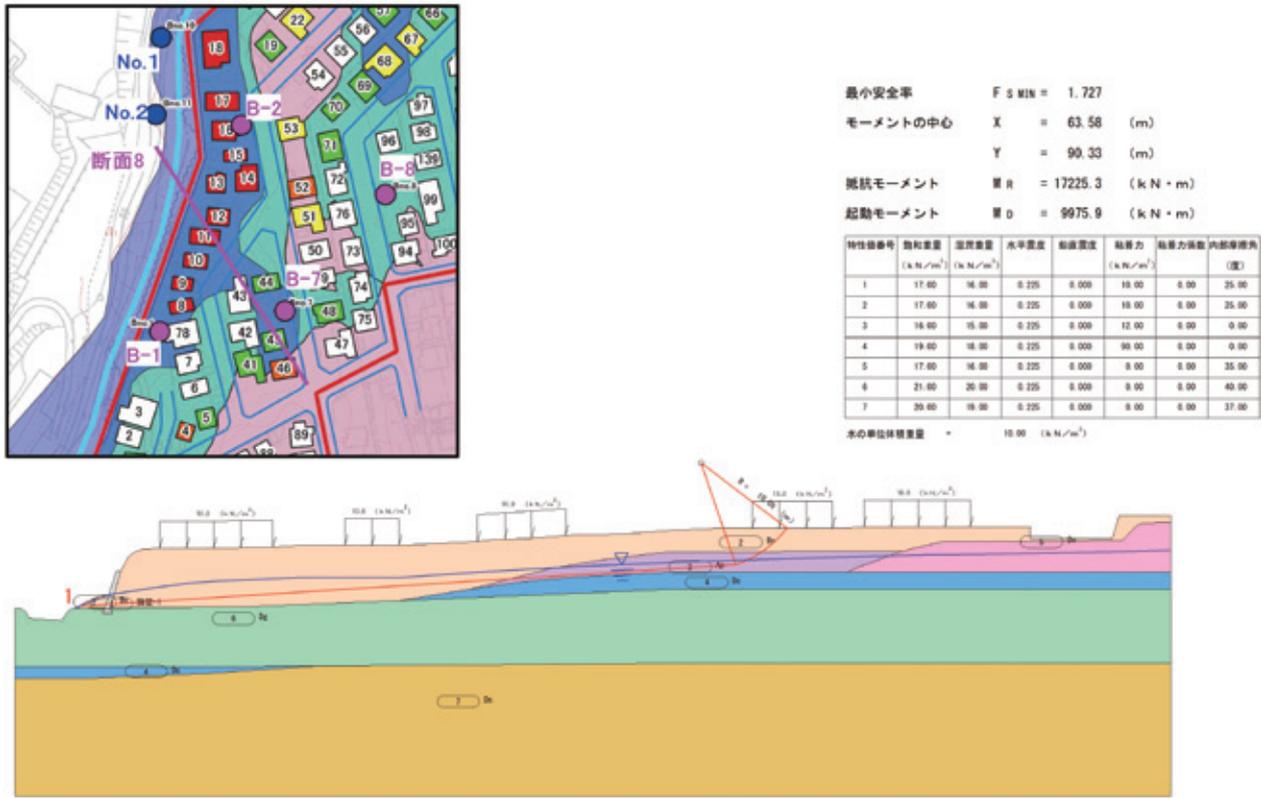


図-28 断面8地下水位低下後 (GL-3.0m) の安全率

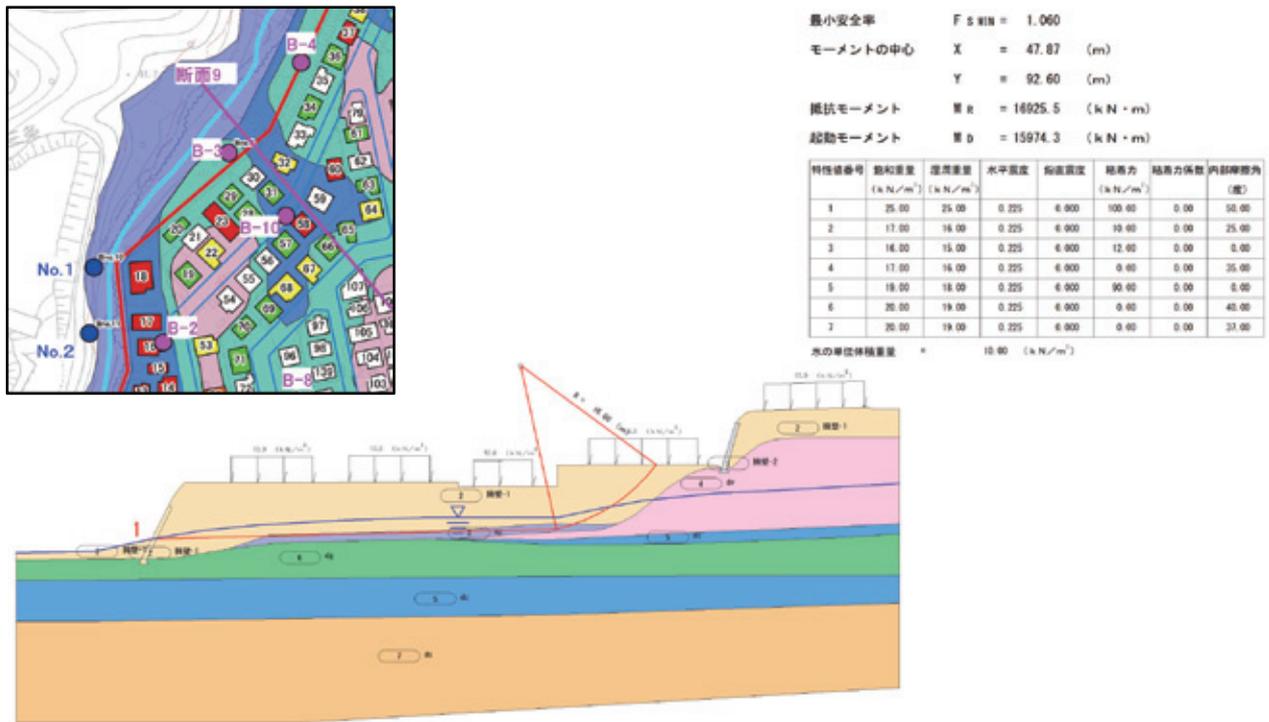


図-29 断面9地下水位低下後 (GL-3.0m) の安全率

7. ま と め

(1) 被害状況の分析

被害状況の分析を行った結果、以下のことが明らかとなった。

今回被災した住宅地及び公共施設等は、盛土造成したエリアに大半が集中しており、特に沢部の谷埋め盛土を造成した箇所では被害が顕著であった。

宅地南側エリアでは、崩落背面に残置された旧擁壁面の摩擦係数が少なく、液状化の発生等により家屋などの上載荷重を支えきれないで、宅地が滑動崩落した。

地震発生直前に到来した台風21号の影響により盛土部の地下水位が非常に高い状態に地震が重なった複合的要因により大きな被害となった。

(2) 安定解析の結果

安定解析の結果、以下のことが明らかとなった。

① 宅地北側エリア

常時、地震時ともに計画安全率を満足できない。対策工は地震時における抑止力の採用となり、荷重及び施工条件よりグラウンドアンカー工や鉄筋挿入工の採用となる。

② 宅地中央エリア

断面9で常時、地震時ともに計画安全率を満足できない。対策工は地下水位低下工法の採用により、GL-3.0mまで地下水位を低下させた場合、地震時安全率が $F_s = 0.911 \Rightarrow F_s = 1.060$ まで向上することができる。

③ 宅地南側エリア

常時、地震時ともに計画安全率を満足できない。特に直接基礎形状（上載荷重考慮）では、 $F_s < 0.9$ を示し、現地の状況（擁壁がほとんど倒壊）を反映した結果である。対策工は擁壁の再構築案が提案される。

宅地擁壁：常時、地震時ともに計画安全率を満足でき

ない。対策工は常時における抑止力の採用となり、荷重及び施工条件より鉄筋挿入工（圧縮型）の採用となる。

謝辞：本論文を作成するにあたり、北広島市の皆様のご協力をいただきました。この紙面をお借りしまして、厚く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 気象庁：平成30年北海道胆振東部地震の関連情報 https://www.jma.go.jp/jma/menu/20180906_iburi_jishin_menu.html
- 2) 地理院地図電子国土Web, <http://geolib.gsi.go.jp/node/2555>
- 3) 北海道地下資源調査所：5万分の1地質図幅説明書「石山」(札幌-第30号), 昭和31年3月
- 4) 北広島市災害対策本部・国士館大学橋本隆雄：第1回北海道胆振東部地震に係る大曲並木地区住民説明会資料, 平成30年9月24日
- 5) 北広島市災害対策本部・国士館大学橋本隆雄：第2回北海道胆振東部地震に係る大曲並木地区住民説明会資料, 平成30年11月11日
- 6) 株式会社シーウェイエンジニアリング：平成30年度北広島市被災宅地土質調査委託, 平成30年12月
- 7) 北広島市災害対策本部・国士館大学橋本隆雄：第3回北海道胆振東部地震に係る大曲並木地区住民説明会資料, 平成30年12月12日
- 8) 宅地防災研究会：宅地防災マニュアル【第二次改訂版】, 平成19年3月
- 9) 国土交通省都市局：大規模盛土造成地の変動予測調査ガイドライン【改訂版】, 平成24年4月
- 10) 国土交通省都市局：宅地耐震対策工法選定ガイドライン 平成24年4月
- 11) 建設技術協会：災害手帳, 平成23年5月
- 12) 全国防災協会：災害復旧事業における地すべり対策の手引き 平成18年5月
- 13) 規模盛土造成地の滑動崩落対策推進ガイドライン及び同解説, 平成27年5月
- 14) 建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会：2007年版建築物の構造関係技術基準解説書, pp.264-265, 2007.