

2016 年熊本地震による甲佐町芝原団地の 液状化被害分析

橋本 隆雄¹・和田 陽介²・宗川 清³

¹正会員 国士舘大学理工学部まちづくり学系教授 (〒154-8515 東京都世田谷区世田谷4-28-1)

E-mail: thashimo@kokushikan.ac.jp

²正会員 (株)千代田コンサルタント東京事業部社会システム部課長 (〒114-0024 東京都北区西ヶ原3-57-5)

E-mail: y-wada@chiyoda-ec.co.jp

³正会員 (株)千代田コンサルタント東京事業部社会システム部担当課長 (同上)

E-mail: v-sokawa@chiyoda-ec.co.jp

熊本県甲佐町の芝原団地では、2016 年 4 月 14 日から 16 日の熊本地震により、宅地が沈下や傾斜等の甚大な液状化被害が発生した。筆者らは地震直後に甲佐町に対して液状化被害調査の結果を取りまとめた結果を情報提供した。甲佐町ではこの資料を基に熊本県と調整し、国土交通省の「宅地耐震化推進事業」の液状化対策を行うことになった。その後、甲佐町から芝原団地の家屋調査及び土質調査等の業務依頼を受け、これまでに複数の住民説明会を開催した。現在は住民の同意を受け、地下水位低下工法による液状化対策事業を進めている。

そこで、本論文では、2016 年熊本地震による甲佐町芝原団地の宅地の液状化被害のメカニズムを分析し、地下水位低下工法を用いた液状化対策について検証することを目的としている。

Key Words : the 2016 Kumamoto earthquake, liquefaction, residential land, liquefaction counter-measure, earthquake damage

1. はじめに

2016 年熊本地震では、図-1 に示すように 4 月 14 日 21 時 26 分に発生したマグニチュード 6.5 の前震と約 28 時間後の 4 月 16 日 1 時 25 分に発生したマグニチュード 7.3 の本震の震度 7 が 2 回、震度 6 弱以上が 7 回発生した。この熊本地震は、熊本都市圏及び阿蘇地方を中心に 18 万棟を超える家屋被害や大規模な土砂災害をはじめ広範囲に甚大な被害をもたらした。宅地については、熊本市、益城町、西原村、南阿蘇村、大津町等の大規模盛土造成地における滑動崩落、熊本市、甲佐町等の液状化被害等の広範囲に数多くの被害を生じた。

熊本県甲佐町の芝原団地では、表-1 に示すように 2016 年 4 月 14 日から 16 日の熊本地震により、宅地が沈下や傾斜等の甚大な液状化被害が発生した。

筆者らは地震直後に甲佐町に対して液状化被害調査の結果を取りまとめた結果を情報提供した。甲佐町ではこの資料を基に熊本県と調整し、国土交通省の「宅地耐震化推進事業」の液状化対策を行うことになった。その後、甲佐町から芝原団地の家屋調査及び土質調査等の業務依

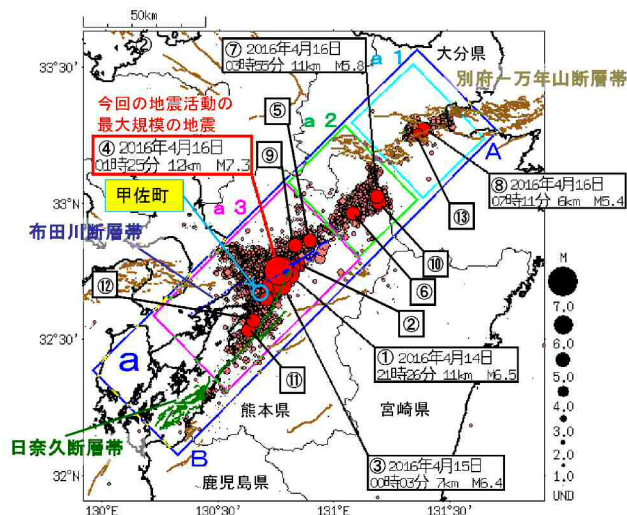


図-1 震央分布図¹⁾

注 1) M ≥ 5.0 以上または最大震度 5 強以上を赤表示

注 2) : 図中の青・緑・茶色の各線は活断層を示す

頼を受け、これまでに複数の住民説明会を開催した。現在は住民の同意を受け、地下水位低下工法による液状化対策事業を進めている。

そこで、本論文では、2016 年熊本地震による甲佐町芝原団地の宅地液状化被害のメカニズムを分析し、地下水位低下工法の液状化対策について検証することを目的としている。

2. 液状化被害状況

(1) 甲佐町の液状化被害状況

図-2 は、上益城郡甲佐町芝原地区であり甲佐町役場より北北西に約 8 km に位置し、熊本地震により甲佐町芝原地区の連続したクラック地割れと液状化による道路及び家屋の沈下・傾斜被害箇所である。

(2) 芝原団地の被害状況

写真-1 は熊本地震による芝原団地の噴砂状況や地割れ（クラック）状況である。芝原団地内では写真-2 のように、道路に噴砂・亀裂、宅地との境に側溝の開き・沈下、宅地に噴砂による沈下、団地周辺には大きな亀裂を生じた。芝原団地では、液状化に伴う噴砂による家屋の大きな傾斜や沈下被害が大部分を占めている。

図-3 は芝原団地全体の傾斜量であるが、精神的に以上を生じ生活に支障が生じる限界値である 10/1000 以上の沈下割合が 86%となっている。図-4 は、エリア毎の傾斜量で、エリア②地区が 93.3%，エリア③地区が 75.0%が 10/1000 以上の傾斜が生じていることが分かる。

図-5 は芝原団地全体の傾斜量であるが、精神的に以上を生じ生活に支障が生じる限界値である 10cm 以上の沈下割合が 95%となっている。図-6 は、エリア毎の沈下量で、エリア②地区が 69.2%以上、エリア③地区が 50.0%以上が 20cm 以上の沈下が生じた。

図-7 は、地震前後の道路縦断測量の差分から算出した最大地盤沈下量で 25cm あることが分かった。図-8 は、地震前後のレーザー航空測量の差分から算出した地盤沈下図である。この図は図-6 のエリアごとの沈下量とほぼ一致している。ただし、エリア③は北部の沈下がないが、写真-2(b)に示すように南側に線上に大きな沈下を生じていることが分かる。



図-2 液状化被害箇所

表-1 甲佐町の震度（5以上）

地震	発生の日時	マグニチュード:M	震源深さ:km	震度
前震	4月14日 21:26	6.5	10	5弱
余震	4月15日 00:03	7.0	6.4	5弱
本震	4月16日 1:25	7.3	13	5強

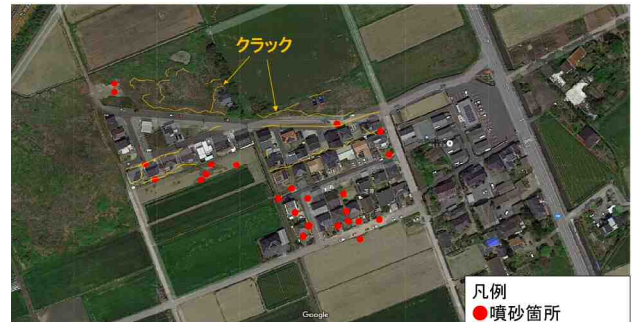


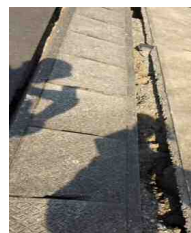
写真-1 芝原団地の噴砂及び地割れ（クラック）状況



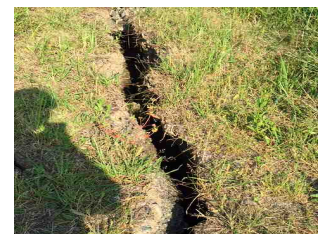
(a)道路の噴砂・亀裂



(b)側溝の開き・沈下



(c)宅地の噴砂による段差



(d)団地周辺の亀裂

写真-2 芝原団地の被害写真

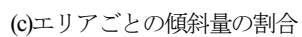
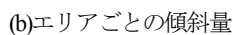
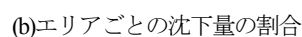
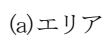
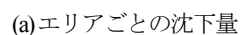
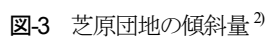
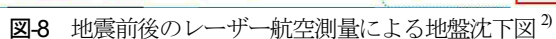
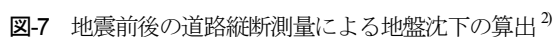
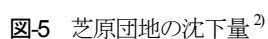


図4 エリアごとの傾斜量²⁾



3. 造成履歴及び地形区分図の考察

(1) 造成履歴

写真-3 は芝原団地の造成履歴で、1970 代頃の航空写真判読より当該地区が砂利採掘跡地と想定された。その後の地元ヒアリングにより九州自動車道のコンクリート材料のための砂利採取場であったことが明らかとなった。このため調査地は砂利採取後の砂の埋め戻しによって造成されたものである。

(2) 地形区分図

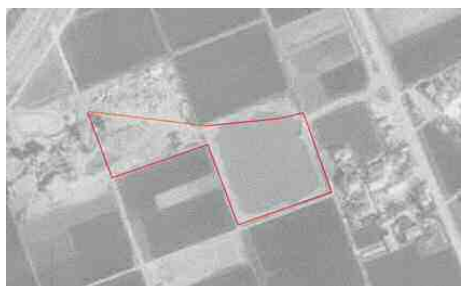
図-9 に示した芝原地区の地形区分図と被害状況の重ね図より、地区中央付近を南北方向に旧河道が位置しているものと想定される。造成履歴で 1979 年頃に行われている砂利採取は、この旧河道及び周辺で行われていたと思われる。

(3) 地形概要

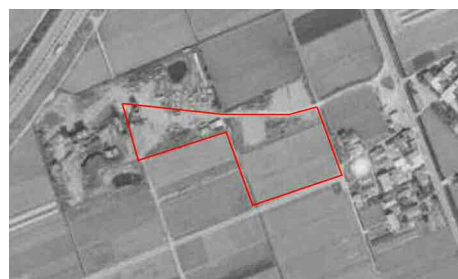
芝原地区は、図-10 の地形図に示すように調査地の地形は周辺を山地(白旗山標高 138m, 吉野山標高 87m)と標高 30~60m の丘陵地で囲まれた緑川流域の沖積平野である。調査地周辺は、水田・畑等の耕作地として利用され集落が点在する。緑川流域は川の流れによって侵食を受けてきたため周りに比べて低地となっていたが、約九万年前の阿蘇の大噴火による火砕流(阿蘇-4 火砕流)が流れてきて低地を埋めた。しかし緑川が再び同じ地域を流れてきて少しずつ侵食し同じように低地を形成された。緑川流域周辺では削り残した火砕流が分布する。図-11 に甲佐町中心部の東西断面推定図を示す。



(a)1962 (S37) 年(砂利採取前)



(b) 1979 (S54) 年(砂利採取中)



(c) 1992 (H4) 年の調査地(砂利採取後)



(d) 2016 年 (現在)

写真-3 芝原地区北側の造成履歴³⁾



図-9 地形区分と被害状況の重ね図

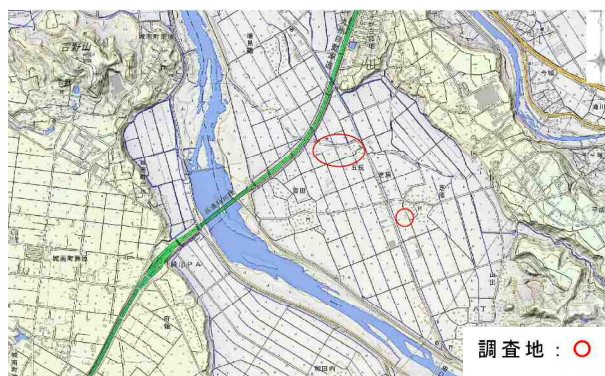


図-10 調査地地形図 S=1:25,000⁴⁾

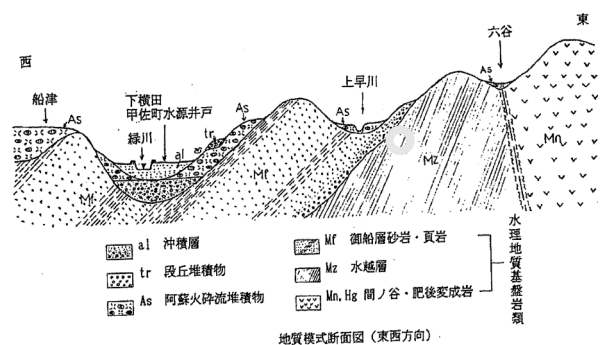


図-11 甲佐町中心部の東西断面推定図⁵⁾

(4) 地質概要

調査地周辺の地質は図-11の地質図に示すように中生代後期白亜紀の御船層群を基盤岩とする。御船層群は調査地の主に北東部から東～南東～南にかけて広い範囲に分布し標高百メートルあまりの山地を形成する。礫岩・砂岩・頁岩・シルト岩を主とし凝灰岩なども挟在する。

周辺部の丘陵地は新生代第四紀更新世の阿蘇-4火砕流堆積物及び中位段丘堆積物(河成段丘)が分布している。当該調査地はその上位の新生代第四紀更新世の沖積層(礫、砂及び泥)が分布している。

調査地の地質構造は文献資料「新甲佐町史」では次のように書かれている。

「完新世・緑川の形成時期はおよそ一万年前以降、いわゆる完新世の時代である、甲佐町の経済的中心地でもある岩下町の役場周辺から下流域にかけての平坦地の表層は、この時代に緑川が運んできて堆積させた礫や砂によって形成されている(図-12 参照)。この時期には既に海面の上昇が始まっており、約六千年前の縄文海進でピーク(現在の海面より3.5m高かった)を迎える。そのことも原因のひとつとなって完新世・緑川は礫や砂を堆積させながら流路を頻繁に変化させていたものと考えられる。」



図-12 調査地周辺の地質図 S=1:200,000⁹⁾

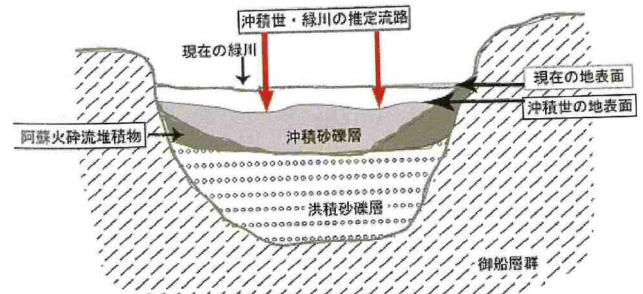


図-13 甲佐町中心部付近の東西模式断面図⁵⁾

4. 土質調査結果

(1) ボーリング調査結果

ボーリング調査は図-14の位置図に示す車道3箇所及び民地内2箇所の計5箇所で行った。表-2に地層層序表を示すが、当調査No.1～No.5の地質構成は地質図、模式断面図、写真及び調査結果より砂利採取後の埋土・盛土と自然地盤の沖積層に分類されるものと判断。沖積層はコア性状、標準貫入試験結果より沖積層1と沖積層2に区分した。

(2) 地下水位

調査時に測定した孔内水位変動図を図-15に示す。孔内水位は深度0.9m～3.45m(標高12.646m～10.356m)と調査地点毎でやや水位高に差異がみられた。孔内水位変動図からは各地点の作業前と作業後では極端な変位は確認されていない。水位高の差異はNo.3, No.4調査時には農業用水が開放されており水路にはかなりの量が流れていた。No.3, No.4調査以降は農業用水が極端に減ったため水位高は少なからずこの影響を受けたものと考えられる。



図-14 ボーリング調査・高密度表面波探査箇所位置図³⁾

表-2 地層層序表³⁾

地質時代	地層名	土質名	記号
新生代	現世	埋土・盛土	Bs
	第四紀	沖積層1	Ag1
	完新世	沖積層2	Ag2

(3) N 値一覧表

標準貫入試験結果より地層毎の N 値範囲及び平均 N 値を表-3 に示す。

(4) PS 検層試験結果

地盤内を伝播する弾性波(P 波・S 波)の深さ方向の速度分布を調べるために No.5 地点のボーリング孔を利用して PS 検層(ダウンホール法)を実施した。速度分布・弾性波速度解析結果は図-16 の走時曲線の示すように各地層ごとの速度は以下ようになった。

- ①速度層第 1 層 0.00～1.80 盛土(礫混じり砂質土), 粘土, 粘土質砂礫 : $V_p390\text{m/s}$, $V_s140\text{m/s}$
- ②速度層第 2 層 1.80～8.90 礫混じり粘土質砂, 礫混じり砂 : $V_p1450\text{m/s}$, $V_s250\text{m/s}$
- ③速度層第 3 層 8.90～12.70 粘土質砂礫 : $V_p1510\text{m/s}$, $V_s270\text{m/s}$
- ④速度層第 4 層 12.70～16.00 粘土混じり砂礫 : $V_p1730\text{m/s}$, $V_s330\text{m/s}$

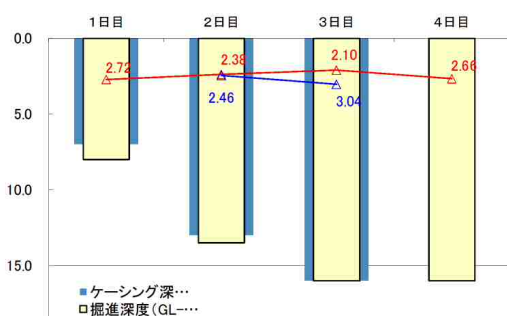
速度検層の結果より, P 波速度(V_p)は390～1730m/s, S 波速度(V_s)は140～330m/sの速度が得られた。P 波速度とS 波速度共に深度方向対して速度増加の傾向を示す。図-17にP S 検層結果図と柱状図を示すが, 概ねN 値が高くなるにつれて速度も増加していることが伺える。

また弾性波速度と各種の試験で得られた力学的な物性値との間には相関があることが知られている。図-18は今回の調査結果をN 値とS 波速度の関係図にプロットしたもので, ほぼ相関関係の結果が得られたため速度値として適当な値と判断される。

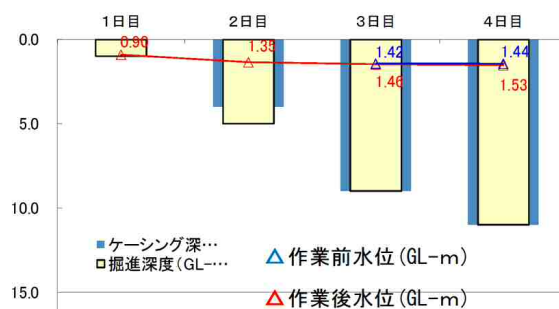
表-3 No.1～No.5 地点の N 値一覧表³⁾

地質時代			地層名	土質名	記号	N値範囲	平均N値
新 生 代	第 四 紀	現 世	埋土・盛土	アスファルト、碎石 粘土、砂、礫質土等	Bs	5～50/6	11.3
		完 新 世	沖積層1	砂、砂礫	Ag1	8～50/2	33.8
			沖積層2	砂礫	Ag2	31～50/2	47.9

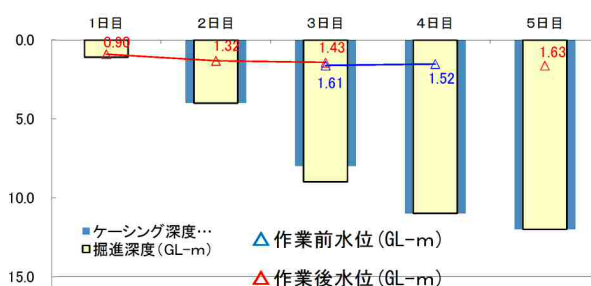
※埋土・盛土層 No.4 の 5.02～5.08m における N 値 50/6 はコア状況より明らかに巨礫による礫障害ため平均値の算出より省いた。



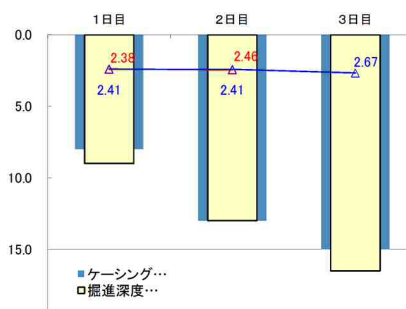
(a)No.2



(b)No.3



(d)No.4



(c)No.5

図-15 孔内水位変動図³⁾

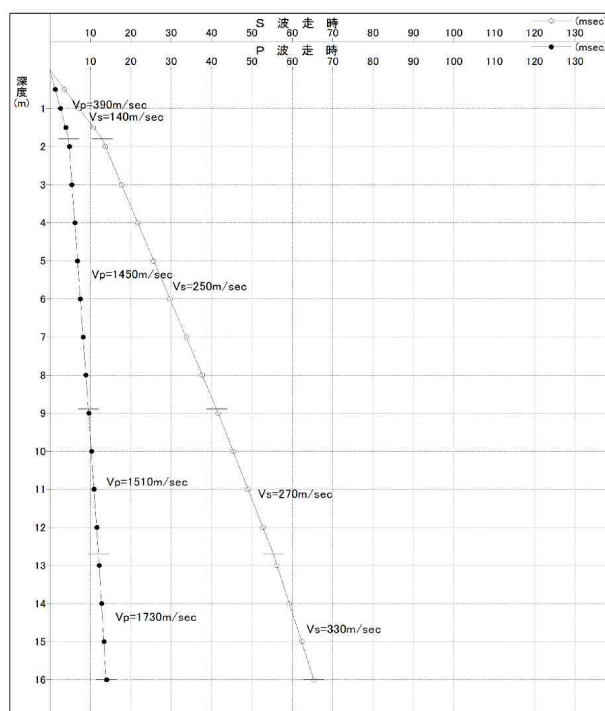


図-16 走時曲線図³⁾

(5) 現場透水試験結果

地盤内の透水特性を求めるため現場透水試験を No.5 の深度 9.0～9.5 m, 16.0～16.5 m で実施した。試験結果をまとめて表-4 に示す。いずれも透水係数は、 10^{-4} m/s を示し、図-19「透水性と土質区分」を参照すると、“中位”の透水性を示す土層と評価される。対応する土の種類は砂及び礫が代表される。

(6) 室内土質試験結果

室内土質試験は液状化判定に用いる資料及び物理特性値の把握等を目的とし、土粒子の密度試験、含水比試験、粒度試験(沈降分析)、液性限界・塑性限界試験を実施した。以下、各試験結果の概要を記す。

a) 土粒子の密度

土粒子の密度は、土の基本的性質を現す指標の一つであるとともに、間隙比や飽和度などの土の基本的物理量の算定に用いられるほか、粒度試験(沈降分析)、圧密試験など他の試験結果の整理に用いることを目的としたものである。土粒子の密度試験結果より概ね主な鉱物と土粒子の密度の例に示す沖積砂質土・沖積粘性土と同等の結果が得られた。

b) 自然含水比

含水比試験値は、土の基本的物理量の計算や他の土質試験結果の整理、土の力学的性質の推定、解釈などに用いることを目的とする。含水比試験結果より現世埋土・盛土は 5.9%～39.2% と幅広い範囲が得られた。No.1～No.5 地区は砂利採取場跡地で埋戻し材料には余った砂利や周辺の台地・丘陵地の土を利用し埋戻したものと考えられる。このため埋戻し材料の土質分類(礫主体あるいは粘土主体などの違い)及び地下水位の影響により含水比の幅広い結果が得られたと判断される。完新世沖積層は平均 7%～13%の結果が得られ表-5 に示す「我が国における土の密度のおおよその範囲」の沖積層砂質土の含水比よりやや低い結果が得られた。完新世沖積層は礫質土の分類が多かったため含水比も全体的に低い結果になったものと判断される。

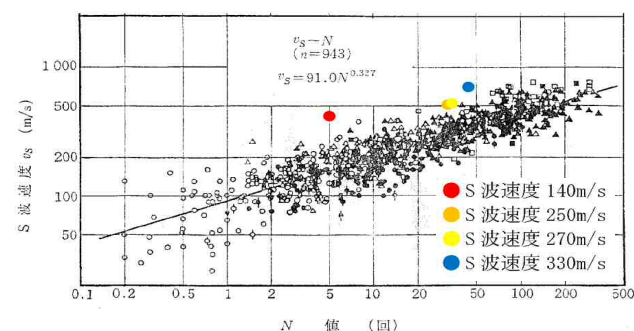


図-18 N値とS波速度⁷⁾

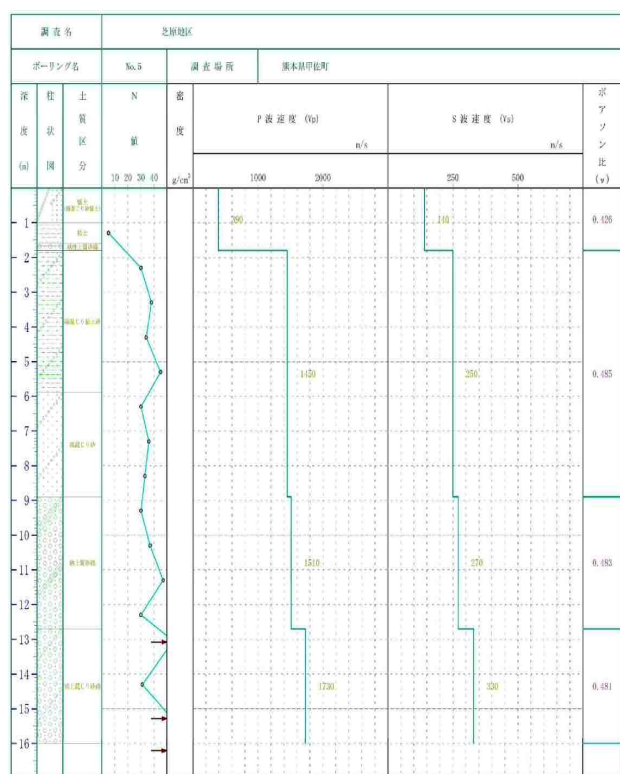


図-17 PS検層結果柱状図³⁾

表-4 現場透水試験結果一覧表³⁾

試験深度 (GL-m)	対象土質	平衡水位 (GL-m)	透水係数 k (m/s)
9.00～9.50	粘土質砂礫	2.36	3.57×10^{-4}
16.00～16.50	粘土混じり砂礫	2.77	3.10×10^{-4}

透水性	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	10 ⁰
透水性	事実上不透水	非常に低い	低い	中位	高い							
対応する土の種類	粘性土 (C)	微細砂、シルト 砂-シルト-粘土混合土 (SF) (S-F) (M)	砂および礫 (GW) (GP) (SW) (SP) (G-M)	清浄な礫 (GW) (GP)								
透水係数を直接測定する方法	特殊な変水位透水試験	変水位透水試験	定水位透水試験	特殊な変水位透水試験								
透水係数を間接的に推定する方法	圧密試験結果から計算	なし	清浄な砂と礫は粒度と間隙比から計算									

図-19 透水性と土質区分⁸⁾

表-5 我が国における土の密度のおおよその範囲⁹⁾

	沖積層	洪積層	関東ローム	高有機質土
	粘性土	砂質土	粘性土	
湿潤密度 $\rho_s (\text{g/cm}^3)$	1.2～1.8	1.6～2.0	1.6～2.0	1.2～1.5
乾燥密度 $\rho_d (\text{g/cm}^3)$	0.5～1.4	1.2～1.8	1.1～1.6	0.6～0.7
含水比 $w(\%)$	30～150	10～30	20～40	80～180

c) 粒度試験

土粒子の粒径別の含有割合を粒度といい、この分布状

態は全質量に対する粒径別の質量百分率を用いて表される。この試験は地盤材料の粒度を求めることを目的としている。粒度試験結果より粒径加積曲線(粒径の分布する範囲を曲線で示したもの)と粒度分布グラフ(各粒度の割合)をそれぞれ示す。

現世の埋土・盛土の粒径加積曲線は図-20(a)に示すようにバラツキが多い。これは自然含水比試験結果でも述べたが埋戻した材料の土質分類による差異と判断される。図-20(b)の粒度分布グラフをみても礫分を主体とする土質や砂分を主体とする土質、あるいは細粒分を主体とする土質に別れている。

d) 液性限界・塑性限界試験(コンシステンシー特性)

液性限界・塑性限界は、細粒土の分類や土質の分類に利用されるほか、その値及び自然含水比から土の状態をあらわす諸量の算定に利用されている。また試験結果より得られる塑性指数は液状化判定の材料としても利用される。今回液性限界・塑性限界試験の主な目的は液状化判定を目的としたものであるため粒度試験結果で細粒分含有率 F_c が 35% 以上を対象に試験を行った。なお、35% を超えた試料は何れも埋土・盛土部で確認された。

試験値は表-6 に示す液性限界・塑性限界の測定例に示されるシルト(沖積層)の範囲内で一般的な結果が得られた。

(7) 地盤状況及び地層想定断面図

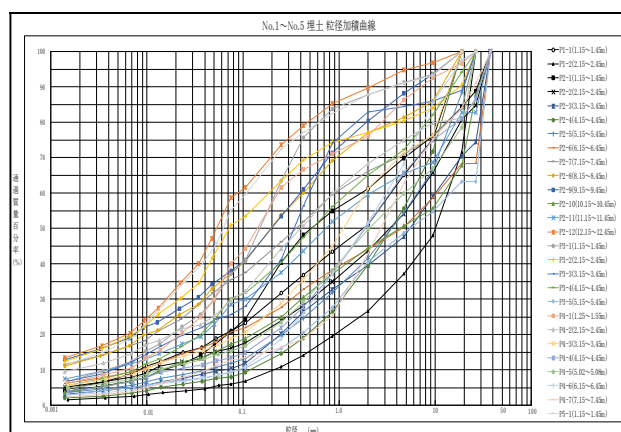
図-21は表面波探査によるS波速度層断面図である。既存及び今回の各ボーリング調査結果の柱状図から、図-22の地層想定横断面図を作成した。この地層想定図からNo.1～No.5地区ではNo.1とNo.5の埋土・盛土層が薄くNo.2に向かって埋土・盛土層が厚くなっているため、砂利採取がやや釜状に掘削されたものと判断される。地層は上位より新生代第四紀現世の埋土・盛土層(Bs)、新生代第四紀完新世沖積層1(Ag1)、新生代第四紀完新世沖積層2(Ag2)区分される。調査の地層状況を地層上位より述べる。

a) 新生代第四紀現世の埋土・盛土層(Bs)は、No.1～No.5で確認され過去の空中写真及び調査結果等から1970年～1980年代に砂利を採取した跡地であることが判明した。層厚は概ね2～13mで土質は舗装のアスファルト、砕石や粘土、砂、礫質土等である。一部No.2では10.7m、11.7m付近より植物根や木片が確認された。N値範囲は5～50/6と幅広く、一部巨礫にあたったN値50/6を除いて平均N値は11.3の中位な相対密度を示す。

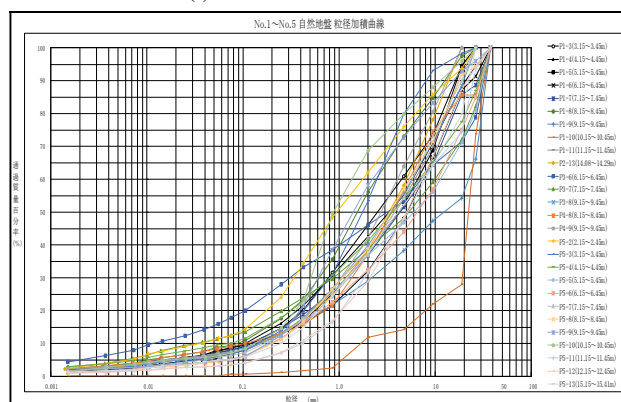
b) 新生代第四紀完新世沖積層1(Ag1)は、同地区内のNo.1～No.5ではNo.2を除いて確認され層厚は1～11m。土質は砂、砂礫で代表され粒径は不均一である。N値範囲は8～50/2と幅広く平均N値は33.8と密な相対密度を

示す。別地区のNo.6は層厚8mで土質は砂、砂礫が確認された。N値範囲は5～35で平均N値は16.9と中位な相対密度を示す。

c) 新生代第四紀完新世沖積層2(Ag2)は、同地区内のNo.1～No.5ではNo.1を除いて確認され層厚は概ね3m程度。土質は砂礫で代表され粒径は不均一である。所々φ80mm～100mm程度の粒径の大きい礫や一部20cm程のコア状で採取される転石を混在する。N値範囲は31～50/2で平均N値47.9と密な相対密度を示す。別地区のNo.6は層厚3mで土質は砂礫が確認で平均N値は48.3と密な相対密度を示す。



(a)埋土層 (Bs) の粒度分布

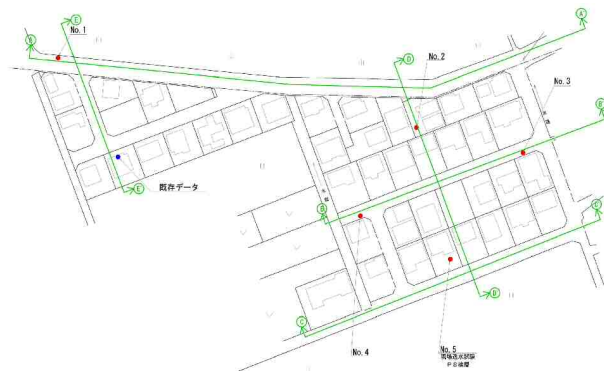


(b)自然地盤 (Ag) の粒度分布

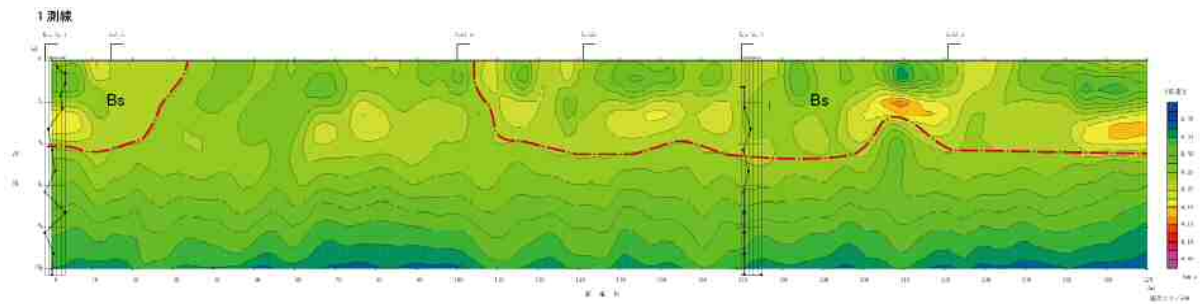
図-20 粒度分布図³⁾

表-6 液性限界・塑性限界の測定例⁹⁾

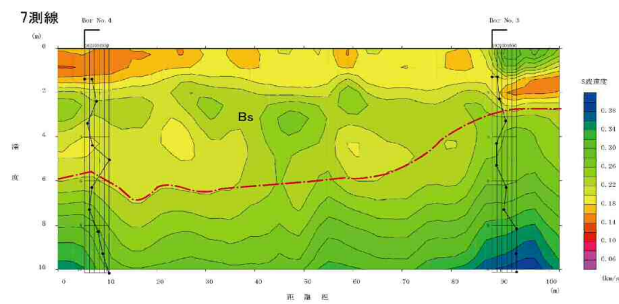
土 質 名	液性限界 WL (%)	塑性限界 WP (%)
粘土 (沖 積 層)	50 ～ 130	30 ～ 60
シルト (沖 積 層)	30 ～ 80	20 ～ 50
粘土 (洪 積 層)	35 ～ 90	20 ～ 50
関東ローム	80 ～ 150	40 ～ 80



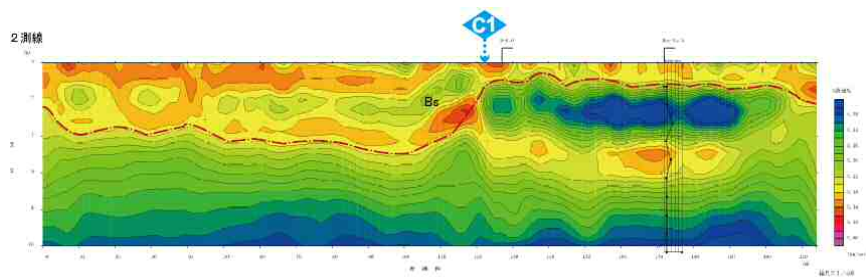
(a)断面位置図



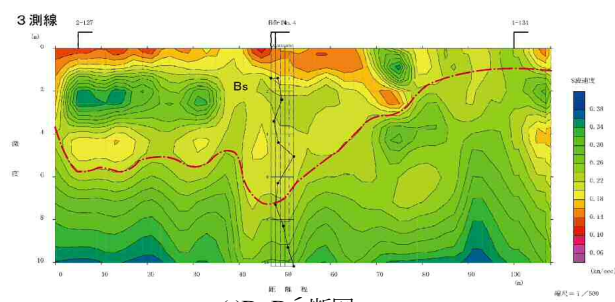
(b)A-A' 断面図



(c)B-B' 断面図



(c)B-B' 断面図



(e)D-D' 断面図

図-21 表面波探査位置及びS波速度層断面図³⁾

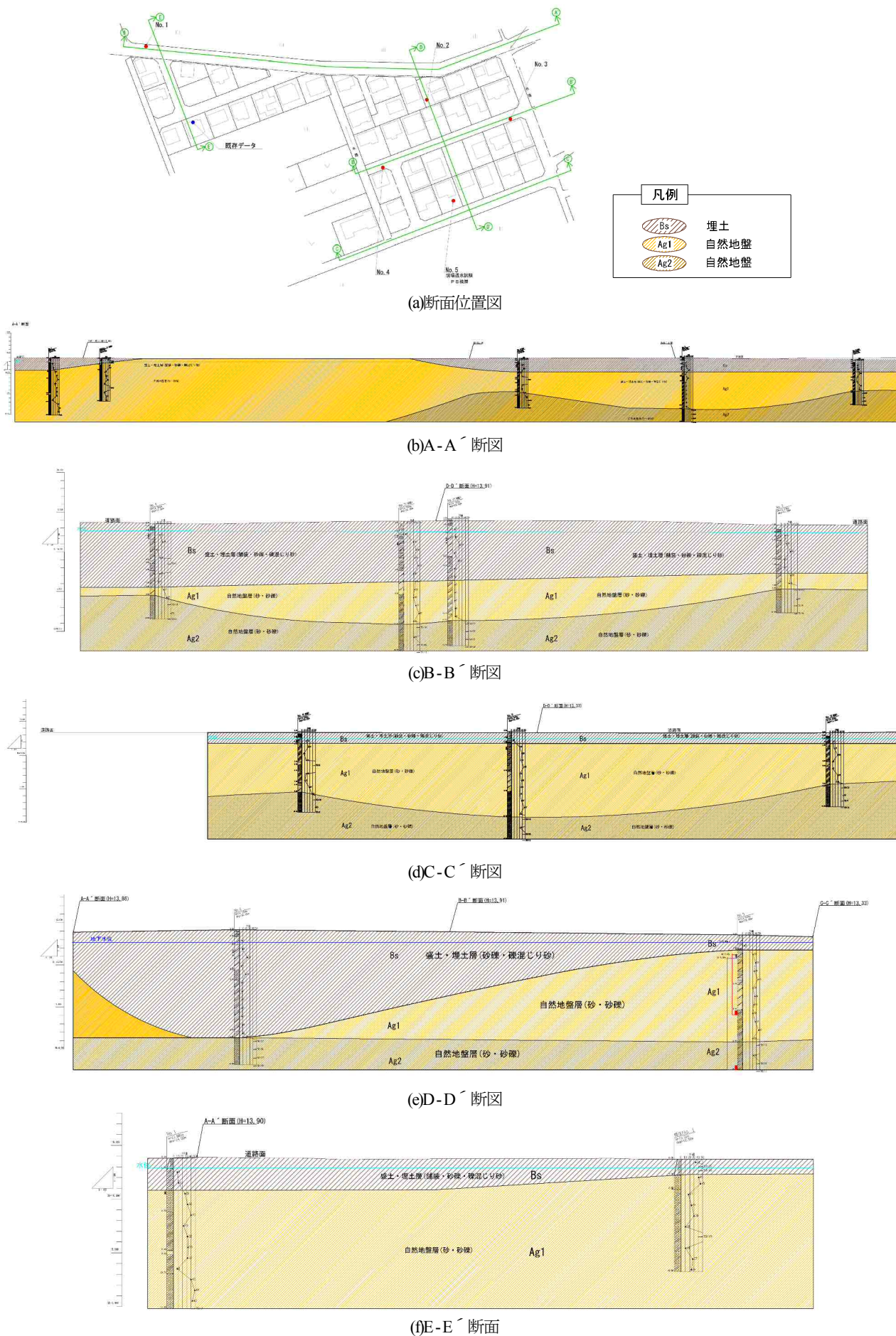


図-22 地層想定位置及び横断面³⁾

5. 液状化対策技術解析

(1) 液状化対策の目標値

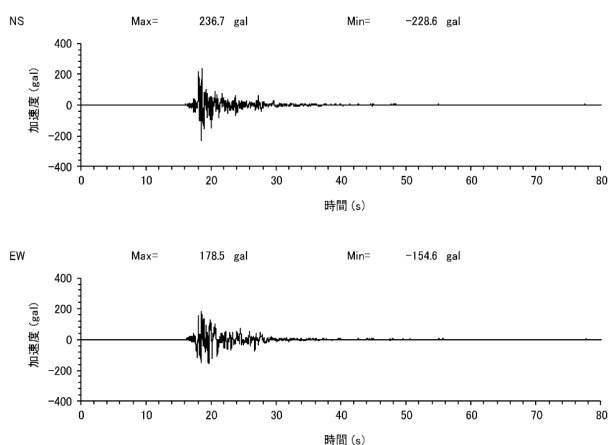
液状化対策技術解析業務は、「市街地液状化対策推進ガイドンス（平成 28 年 2 月）国土交通省都市局都市安全課：以下ガイドンス」を参考に以下の項目について解析・検討を行った。

- ①現況地盤解析 地盤液状化（5 断面）
- ②検討対策工法の選定

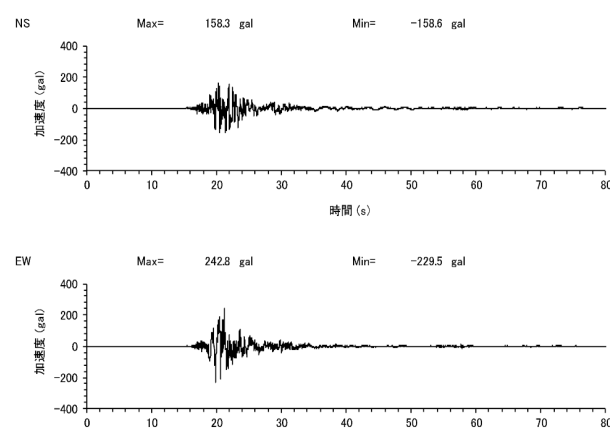
(2) 地震応答解析（等価線形解析）

地震時の地表面加速度の推定は、当該地区周辺で熊本地震による地表面加速度が観測されていないことから困難である。そこで、今次災害の規模を考慮するために、基盤層が確認されている既存の地質データを収集し、今回実施した PS 検層結果より、当該地区のモデル地盤を作成し、地震応答解析（等価線形解析）によって当該地区の地震動（地表面加速度）を想定した。

なお、入力地震動としては図-23 に示す「KiK-net 益城（地中で観測された波形）」で観測された地震波形「前震：M6.5（4 月 14 日）、本震：M7.3（4 月 16 日）」を用いた。



(a)前震時



(b)本震時

図-23 地表面応答加速度時刻歴結果¹⁰⁾

(3) 解析概要

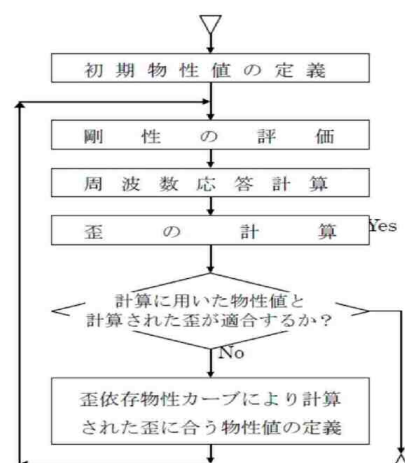
等価線形解析とは、歪に依存するせん断剛性係数および減衰定数を定義しておき、計算の結果として得られる歪と、計算に用いられた物性値が適合するまで繰返し計算を行う手法で、繰返し計算の 1 ステップごとに線形解析を行うので、重ね合わせの原理に基づく複素応答解析法をそのまま利用できる。計算は図-24 に示す手順となった。

①初期の物性値としてせん断剛性 G_0 及び減衰定数 h_0 を定義する。

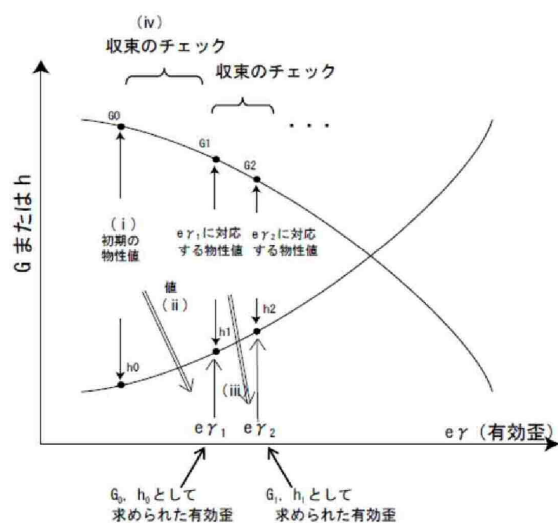
②応答解析を行い要素の有効ひずみ $e\gamma_1$ を求める。ここに有効ひずみは最大せん断ひずみ γ_{max} の時刻歴における最大値の 65% として計算する。

③物性値のひずみ依存カーブより $e\gamma_1$ に対する G_1 及び h_1 を求める。

④ G_0 と G_1 及び h_0 と h_1 の収束性をチェックし、収束している場合には解析を終了し、収束していない場合には G_1 , h_1 を物性値として②、③、④を繰り返す。



(a)解析のフロー



(b)物性値の歪依存曲線

図-24 等価線形解析法の概念図³⁾

(4) 解析物性値

地震応答解析に用いる地盤定数は、表-7 及び表-8 のように設定した。図-25 はせん断剛性係数および減衰定数のように設定した。

(5) 地震応答解析結果の考察

地震応答解析は、図-23 の4月14日発生地震 (M6.5) と4月16日発生地震 (M7.3) 入力地震動を用いて埋土層 (Bs) が最も深い No.2 地点を代表断面に選定し地震応答解析を実施した。図-26 は前震 (4月14日, M6.5) の場合で、図-27 は本震 (4月16日, M7.3) の場合の解析結果である。その結果、最大地表面加速度は、前震で159.5gal、本震で193.5galとなった。どちらの場合もともに、沖積砂礫層 (Ag) まで加速度が増加する傾向にあるが、埋土層 (Bs) になると減衰し地表面加速度が小さくなっている傾向を示す。しかし、場所によっては No.5 地点のように埋土層が薄い箇所もあるため、薄い箇所は減衰せず増加傾向を示すものと評価される。この場合においては、加速度深度分布図より概ね最大で地表面加速度「 $\alpha_{max}=300\text{gal}$ 」程度と推定される。

したがって、今回採用する加速度は、前震・本震も以下の3CASEの想定地震動に設定した。

- ① 前震：M6.5，地表面加速度 200gal
- ② 本震：M7.3，地表面加速度 200gal
- ③ 本震：M7.3，地表面加速度 300gal

(6) 現況地盤の液状化解析

現況地盤の液状化解析（再液状化の検討）については、「ガイドランス【資料編】：4.1 宅地の液状化可能性判定計算」に準拠し解析・検討を行った。

検討手法や計算結果は以降に示すが、ここでは、熊本地震の本震に対しての「再液状化被害の可能性について」判定した。それによると、表-9 に示すようにボーリング No.1～2 地点が「再液状化被害の可能性が高い」と判断され、調査地南側に向かって「再液状化被害の可能性が比較的低い～低い」と評価される。

これは、埋土層 (Bs) の層厚分布にも起因し、北側から南側に向かって埋土層 (Bs) 層厚が減少している。なお、再液状化の判定結果は、別途実施した「現地調査による家屋沈下とレーザー航空測量による地盤沈下図の重ね図」においても同様な傾向が見受けられる。

また、No.5 地点箇所は、今回のボーリング結果では液状化対象層厚が薄く、再液状化による「液状化被害の可能性が低い」と判定されたが、図-8 や実際の被害においても噴砂現象が認められている。

液状化対象層となる埋土層 (Bs) は、不均質な地盤であり、分布のバラツキも認められることから、今回の判

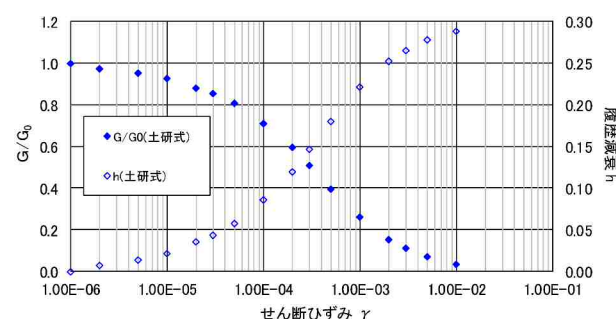
定において「再液状化被害の可能性が低い」と判定された箇所においても、対策工を検討する必要があるものと判断される。

表-7 地震応答解析に用いる地盤定数(1)³⁾

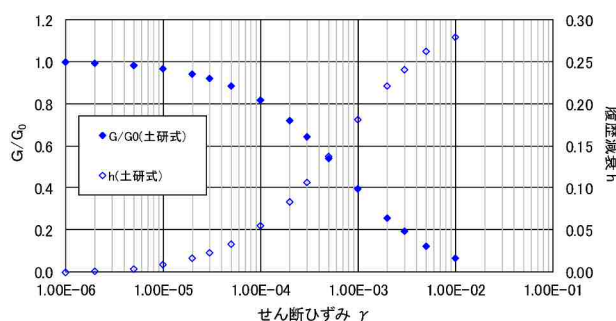
深度	地層名	地層	N 値	Vp (m/s)	Vs (m/s)
0.00～12.80	埋土	Bs	9.4	390	140
12.80～29.50	砂礫	Ag	50	1730	330
29.50～35.00	基盤岩	Ss	50		

表-8 地震応答解析に用いる地盤定数(2)³⁾

深度	ポアソン比	湿潤密度 (g/m ³)	剛性率 (kN/m ²)	ヤング率 (kN/m ²)
0.00～12.80	0.426	1.70	33,320	95,029
12.80～29.50	0.481	2.00	217,800	645,124
29.50～35.00		2.30		



(a)Bs 層

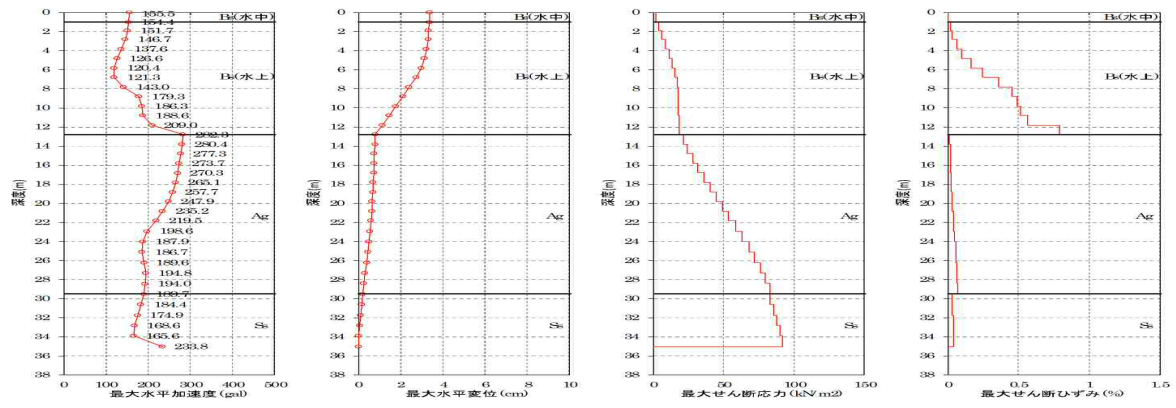


(b)Ag 層

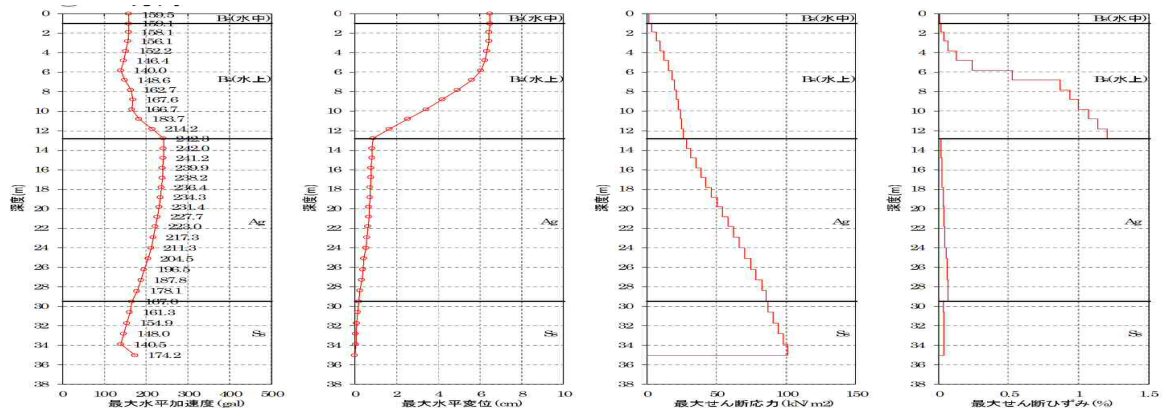
図-25 せん断剛性係数および減衰定数³⁾

表-9 再液状化の被害の可能性の判定³⁾

検討箇所	本震：M7.3、200gal		本震：M7.3、200ga	
	判定	液状化被害の可能性	判定	液状化被害の可能性
No.1 地点	C	高い	C	高い
No.2 地点	C	高い	C	高い
No.3 地点	B1	比較的低い	B1	比較的低い
No.4 地点	B3	比較的低い	B3	比較的低い
No.5 地点	A	低い	A	低い

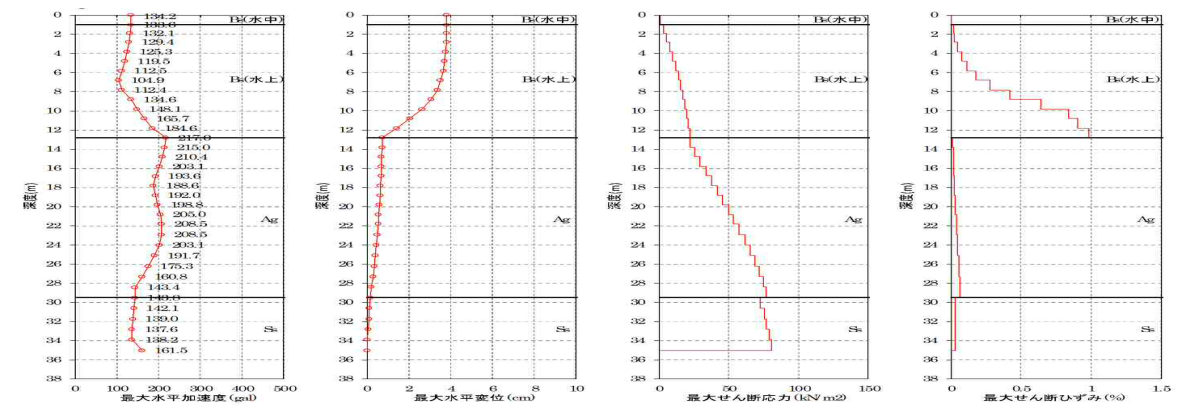


(a)NS方向

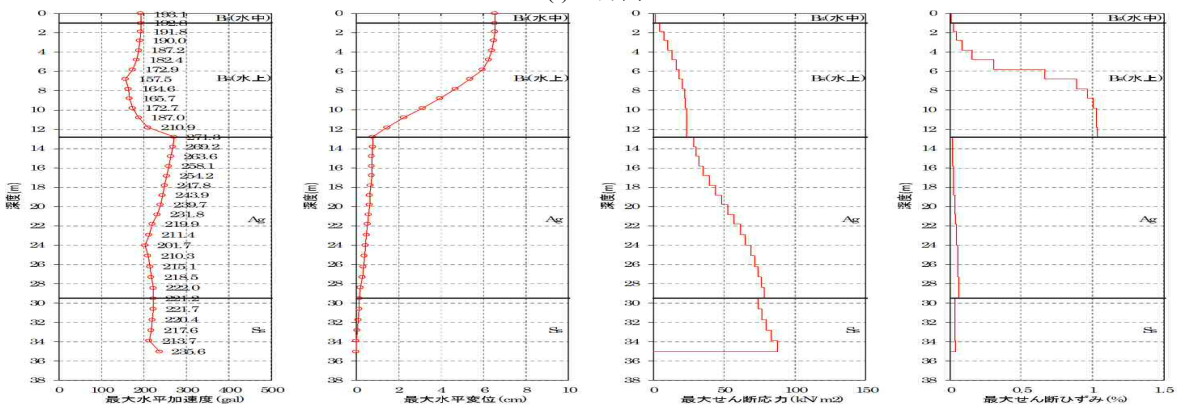


(b)EW方向

図-26 前震時の最大値深度分布結果³⁾



(a)NS方向



(b)EW方向

図-27 本震時の地表面応答加速度時刻歴結果³⁾

(7) 当該箇所の地下水位について

今回の調査ボーリングで確認された地下水位は図-15の地下水位変動図に示した。これによると、「最大水位＝GL-0.9m」,「最低水位＝GL-2.5～3.2m」程度を示しており、掘進延長が進むにつれて地下水位が低下し、概ね「GL-2.5～3.0m」程度で最終水位を示している。また、図-28のNo.5地点で実施した「現場透水試験の平衡水位（翌朝水位）」では表-10に示すとおりであり、いずれの地層もGL-2.4m～2.8mを示している。

これらのことから、当該地区の自然水位はGL-2.50m程度と評価されるが、GL-2.5mの地下水位が液状化現象によって噴砂に至るとは考えにくい。このため、2箇所の試掘で確認された水位（GL-0.9m）は、最上部埋土層内の水位と判断され、埋土層（Bs）は不均質地盤のため、降雨等が浸透しにくく、宙水として滞水しているものと評価される。よって、当該地区においては2層の地下水位面が存在するものと判断され、埋土層（Bs）の宙水を低下させることによって再液状化を抑制できるものと評価できる。

(8) 地下水位低下工法における効果検証

国土交通省のガイダンスに基づき図-29の指標を用いて地下水位低下工法の効果の検証を行った。その結果、No.1～No.4地点においては、表-11の「液状化被害軽減の目標として可」まで表-12の検証によって十分効果があることが明らかとなった。よって、対策案として「地下水位低下工法」が採用できるものと判断される。

6. まとめ

(1) 造成履歴

芝原団地は、1970代頃の航空写真判読及び地元ヒアリングにより九州自動車道のコンクリート材料のための砂利採取場跡地で、砂等の埋め戻しによって造成された地区であることが明らかとなった。

(2) 2層の地下水位

現地での試掘により、埋土層（Bs）が不均質地盤であり降雨等が浸透しにくく宙水（GL-0.9m）として滞水し2層の地下水位面が存在することが明らかとなった。よって、宙水を低下させる地下水位低下工法が有効で再液状化を抑制できることが分かった。

(3) 圧密沈下

芝原団地地区が元々砂利採掘地であることから、埋土層（Bs）の下粘土層がないことから地下水位低下工法による圧密沈下の恐れがないことが分かった。

表-10 現場透水試験結果一覧表³⁾

試験深度 (GL-m)	対象土質	平衡水位 (GL-m)
9.00～9.50	粘土質砂礫（Ag1層）	2.36
16.00～16.50	粘土混じり砂礫（Ag2層）	2.77

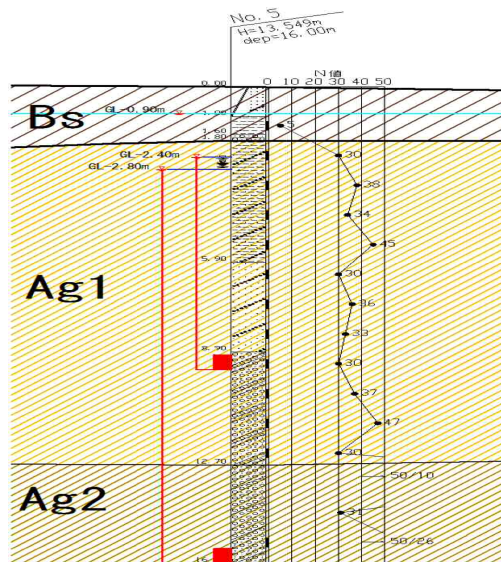


図-28 No.5地点で実施した現場透水試験の平衡水位³⁾

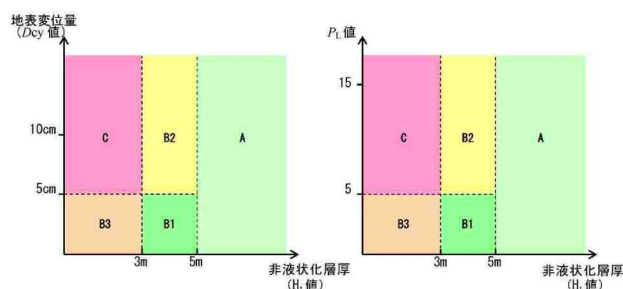


図-29 宅地の液状化可能性判定¹¹⁾

表-11 液状化対策工法における効果の目標値の設定³⁾

判定結果	H ₁ の範囲	Dcyの範囲	P ₁ 値の範囲	地下水位低下工法	格子状地中壁工法
C	3m未満	5cm以上	5以上	不可	不可
B3	3m未満	5cm未満	5未満	不可(※)	不可
B2	3m以上	5cm以上	5以上	液状化被害軽減の目標として可	不可
B1	5m未満	5cm未満	5未満	液状化被害抑制の目標として可	
A	5m以上	—	—		

表-12 再液状化の被害の可能性の判定³⁾

検討箇所	本震：M7.3、200gal		木震：M7.3、200ga	
	対策前	対策後	対策前	対策後
No.1地点	C	A	C	A
No.2地点	C	B1	C	B2
No.3地点	B1	A	B1	A
No.4地点	B3	A	B3	B1
No.5地点	A	—	A	—

(4) 最大地表面加速度

地震応答解析結果、最大地表面加速度は、沖積砂礫層（Ag）まで増加する傾向にあるが、埋土層（Bs）になると減衰し小さくなり、前震で 159.5gal、本震で 193.5gal となった。埋土層（Bs）が浅い場合で減衰がない場合では 300gal 程度と想定される。

(5) 地下水位低下工法における対策効果の検証

国土交通省のガイダンスに基づき地下水位工法の効果検証を行った結果、「液状化被害軽減の目標として可」となり十分な効果があることが明らかとなった。

謝辞：最後に、検討に当たったの関連資料は、甲佐町から提供していただきました。多くの方々にご尽力を頂き、誠にありがとうございました。これらの機関・関係者にこの誌面を借りまして深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 気象庁地震調査研究推進本部：地震調査委員会平成 28 年（2016 年）熊本地震の評価（平成 28 年 5 月 13 日公表），
http://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2016/2016_kumamoto_3.pdf
- 2) 甲佐町：芝原地区測量調査業務委託，2016.
- 3) 甲佐町：芝原地区地質調査検討業務委託，2017
- 4) 国土地理院地形図＋カシミール 3D
- 5) 甲佐町史編纂委員会：新甲佐町史，2013
- 6) 地質調査総合センター：20 万分の 1 地質図（熊本），2004
- 7) (社)土質工学会：土質調査法，1982
- 8) (公社)地盤工学会：地盤調査の方法と解説，2013
- 9) (社)地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，2010
- 10) 防災科学技術研究所：KiK-net（益城），2016
- 11) 国土交通省都市局都市安全課：市街地液状化対策推進ガイダンス，2016

LIQUEFACTION DAMAGE ANALYSIS OF THE SHIBAHARA HOUSING COMPLEX CAUSED BY THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE

Takao HASHIMOTO, Yosuke WADA and Kiyosi SOUKAWA

The building of the Shibahara housing complex caught the serious liquefaction damage of subsidence and the slant by the 2016 kumamoto earthquake. We gave information to Kosa Town by the result of the liquefaction damage investigation just after an earthquake. Kosa Town discuss with Kumamoto Prefecture based on this data, and decided to take the liquefaction countermeasure. After that, we received requests for work such as house investigation and soil survey of Shibahara housing complex from Kosa Town, and held several informative briefing sessions so far. Currently, we are advancing the liquefaction countermeasure project by underground water level lowering construction method with the consent of residents.

In this paper, we aim to verify the liquefaction countermeasure using groundwater level lowering method by analyzing the mechanism of liquefaction damage in Shibahara housing complex.