

2004 年新潟県中越地震による液状化が発生した 高盛土上宅地地盤条件の分析

橋本隆雄¹・宮島昌克²

¹ 千代田コンサルタント東京支店 (〒114-0024 東京都北区西ヶ原3-57-5)

E-mail: t-hashi@chiyoda-ec.co.jp

² 金沢大学大学院自然科学研究科教授 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: miyajima@t.kanazawa-u.ac.jp

新潟県中越地震により長岡ニュータウン中央西地区において 10～35 m の盛土高の街区で戸建住宅が液状化被害により甚大な被害を被った。そこで本論文では、対象地における地層構成や地盤の工学的特性を把握するため、ボーリング調査やスウェーデン式サウンディング調査および室内土質試験、地下水位観測を実施して、その解析結果からこの一街区の宅地地盤に液状化が発生した地盤要因の考察・分析を行う。

Key Words : the 2004 Niigata-ken Chuetsu earthquake, residential lands, liquefaction, damage analysis, earthquake damage

1. はじめに

2004 年 10 月 23 日に発生した新潟県中越地震によって、長岡ニュータウン・中央西地区において戸建住宅が甚大な被害を被った¹⁾。ただし、被害を被った地区はある一部に限られ、写真-1、-2 に示すように被害箇所では噴砂現象が確認された。

被害を被った箇所は、図-1 に示すように切盛り境から盛土区間に位置し、盛土厚が 10m～35m 程度を有する区間である。また、旧地形を見た場合、比較的狭い集水範囲で沢の出口付近に被災宅地が位置している。

一般に液状化による噴砂現象は、緩い砂が分布し地下水位が高く、かつ、土被りが薄い箇所に発生しやすい。当該盛土地区における既存調査では、図-2 に示すように表層部に緩い砂層が分布する箇所も認められるが、部分的であり、地下水位も GL-10～15m 程度と深い位置に分布することを考慮すると、今回のような噴砂現象は起こらないことになる。しかし、今回地震による被災宅地では実際に噴砂現象が確認されており、地層構成や地下水位の分布が既存調査の状況と異なることが想定された。

そこで本論文では、対象地における地層構成や地盤の工学的特性を把握するため、ボーリング調査やスウェーデン式サウンディング調査および室内土質試験、地下水位観測を実施して、この一街区の宅地地盤に液状化が発生した地盤要因の考察・分析を行う。



写真-1 液状化による駐車場の隆起現象



写真-2 液状化による噴砂現象



図-1 高盛土厚の分布

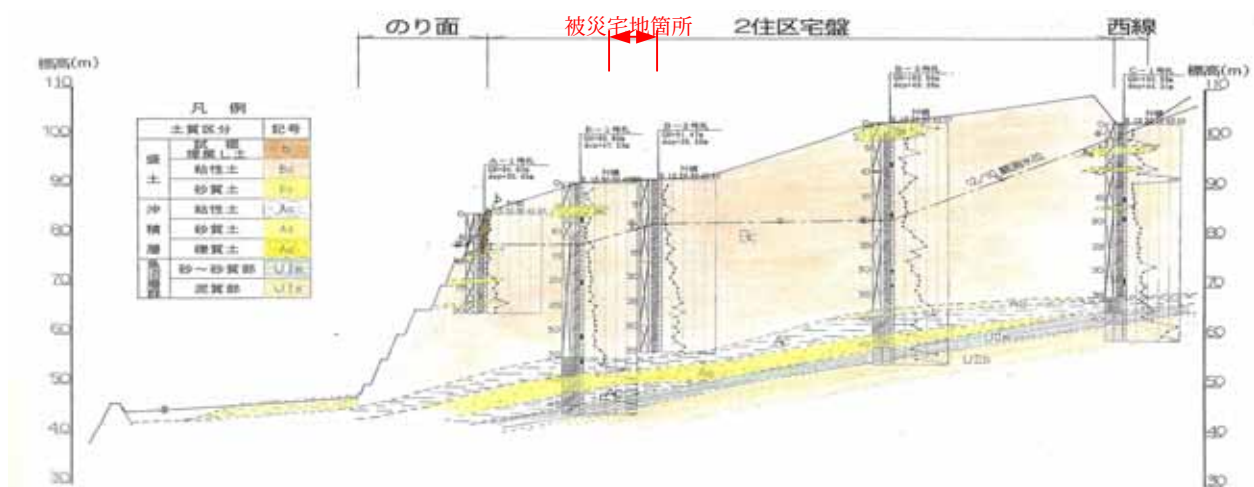


図-2 盛土部地質縦断面図 (A-A'断面)

2. 被災宅地地盤状況調査

被災した宅地地盤の状況を把握するために、ボーリング調査を街区内に3箇所、スウェーデン式サウンディング調査を各宅地毎の既存調査済箇所に対応するように1～2箇所行った。

(1) 機械ボーリング調査

今回のボーリング調査は、図-3に示すように街区の背割中央部に断面がわかるように3箇所行った。この調査結果に基づく地層推定断面図を図-4に示す。ボーリング調査で確認された地層の特徴は以下の4つに分類できる。なお、地下水位についてはGL-0.55～1.19m程度で非常に地表に近い位置で確認された。

①Bs：盛土

砂質土優勢の盛土で、粘性土を不規則に混入し、所々に礫分が点在している。

N=2～6回(平均値 4.07、標準偏差 1.49)

②Bc1：盛土

粘性土優勢の盛土で、砂分を不規則に混入する。礫分(硬質礫・泥礫)を少量混入する。

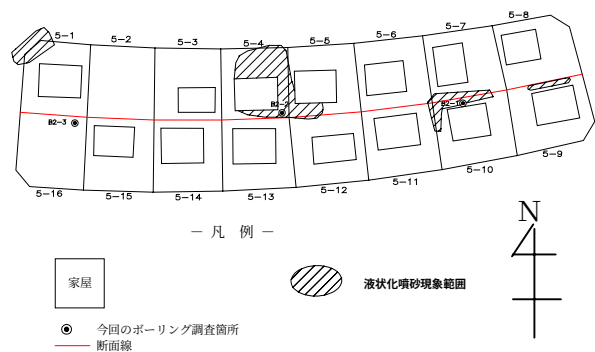


図-3 ボーリング調査位置及び断面線位置図

N=0～22回(平均値 6.56、標準偏差 3.57)

③Bc2：盛土

粘性土優勢の盛土で、砂分を不規則に混入する。礫分(硬質礫・泥礫)を少量混入する。

N=7～16回(平均値 12.73、標準偏差 2.71)

④地山

シルトを主体とし、固結度が比較的良好である。一部に固結砂を挟在する。

N=12～48回(平均値 25.33、標準偏差 13.01)

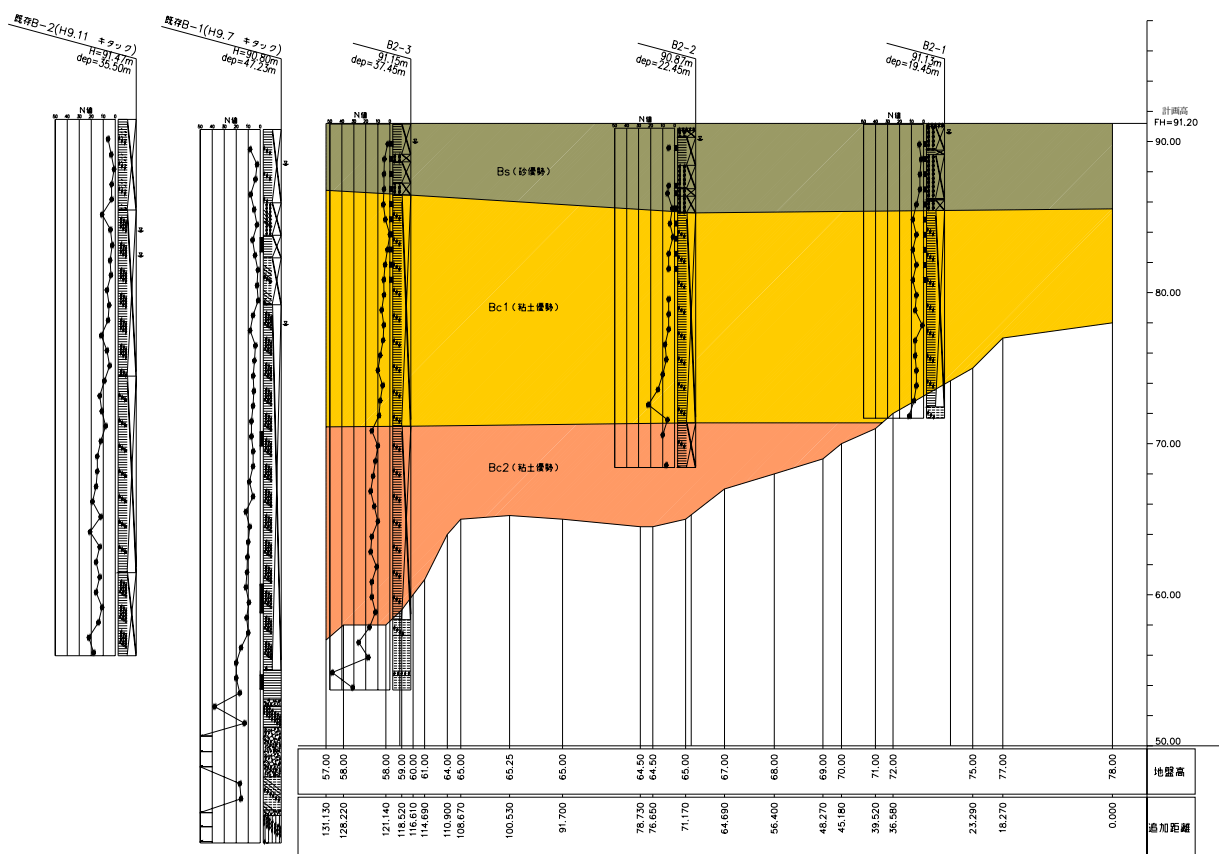
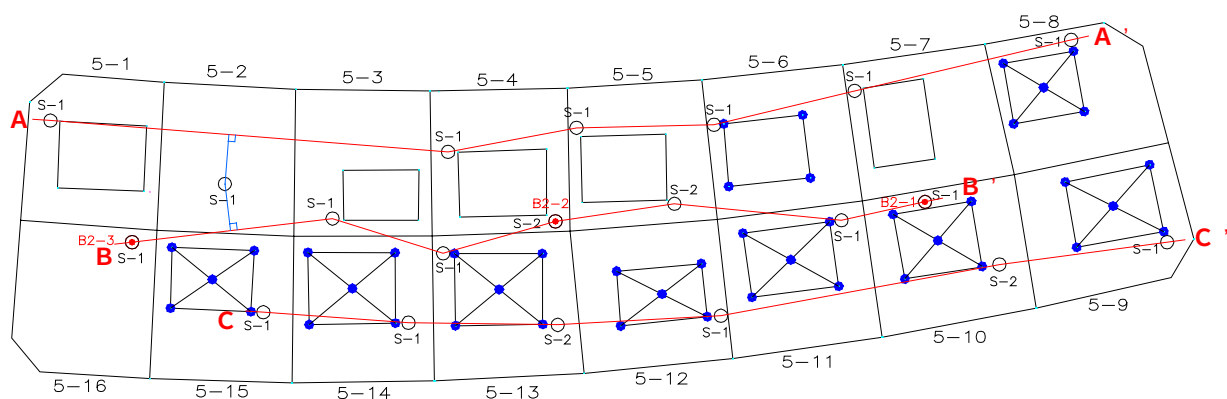
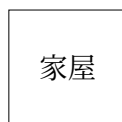


図-4 地層推定断面図 (図-3 a-a' の断面線)



— 凡 例 —



- 既往スウェーデン式サウンディング調査
- 今回スウェーデン式サウンディング調査
- 今回ボーリング、スウェーデン式サウンディング調査
- 断面線



図-5 ボーリング、スウェーデン式サウンディング調査位置及び断面線位置図

表-1 スウェーデン式サウンディングによる宅地地盤地耐力評価

住居表示	調査番号	平均 $qa(kN/m^2)$ (GL-0.5～2.0m間)
5-1	S-1	50.50
5-2	S-1	76.40
5-3	S-1	106.05
5-4	S-1	61.89
	S-2	47.81
5-5	S-1	48.24
	S-2	41.84
5-6	S-1	46.11
5-7	S-1	39.28
5-8	S-1	41.84
5-9	S-1	45.68
5-10	S-1	48.67
	S-2	73.84
5-11	S-1	45.68
5-12	S-1	49.52
5-13	S-1	71.92
	S-2	46.53
5-14	S-1	54.64
5-15	S-1	54.64
5-16	S-1	47.39

(2)スウェーデン式サウンディング調査

今回および既存のスウェーデン式サウンディング試験の調査位置を図-5に示す。既往のサウンディング試験結果は、被災した戸建住宅に対して各ハウスメーカーが独自に行った結果を整理したものである。また、今回のサウンディング試験結果については、宅地地盤性能評価基準(案)²⁾に基づき、表-1に示すように宅地の長期許容応力度 qa を算出し、宅地地盤の性能を評価した。

この結果より、いずれの試験値も $30kN/m^2$ 以上であり、基準を満たす結果となった。なお、既存の資料では、荷重 75kg 以下における自沈があったが、今回試験では荷重 100kg における自沈は多く確認されたものの、荷重 75kg 以下における自沈は 1箇所も確認されなかった。表-2は、地震前後の地盤の状況を把握するために今回および既存の調査箇所が一致する 10 地点の結果を整理したものである。

長期許容応力度 qa の平均値(GL-0.5～2.0m間)については、全体的に地震動で締め固まったと考えられ、強度増加の傾向が認められる地点が多い。

また、今回および既往試験における荷重(N_{sw})・半回転数(N_{sw})を比較すると、図-6に示すように既往試験において荷重 75kg 以下で自沈したものが、今回試験では確認されておらず、宅地性能の面から評価した場合、比較的良好な傾向を示している。

(3)砂層の分布の推定

ここでは、ボーリング調査およびサウンディング調査結果を比較し、対象地における砂質土層の分布を推定する。ボーリング調査結果とサウンディング調査結果の比較を、図-7に示す。砂質土優勢の盛土は、下方に向かって強度の増加傾向が認められない。一方、粘性土優勢の盛土は、下方に向かって強度増加の傾向があり、概ね $N_{sw}=25$ 回以上を示す傾向がある。したがって、対象地における砂質土優勢の盛土の分布範囲を以上の視点で図-8に示すように推定した。

表-2 長期許容応力度(GL-0.5～2.0m間の平均値)の比較

調査番号	長期許容応力度の平均値 (kN/m^2)		結果
	既存	今回	
5-6-S-1	46.11	46.11	→
5-8-S-1	39.71	41.84	↑
5-9-S-1	40.99	45.68	↑
5-10-S-2	53.36	73.84	↑
5-11-S-1	50.37	45.68	↓
5-12-S-1	38.85	49.52	↑
5-13-S-1	66.59	71.92	↑
5-13-S-2	52.93	46.53	↓
5-14-S-1	46.53	54.64	↑
5-15-S-1	58.48	54.64	↓

3. 液状化要因の検証

新潟県中越地震における宅地の被災原因は造成盛土に利用した砂質土が液状化したものである。ここでは、液状化の要因である盛土材の粒度組成ならびに地下水位の分布状況について、被災宅地と被災宅地外において比較を行った。

(1)地下水分布の検証

表-3に示すように平成7年7月26日の既往の地下水調査では、時期的な違いもあり、地下水位は高い位置にある。その他については、GL-7.39～17.26mと深い位置に地下水の分布が確認されている。しかし、被災宅地では明らかに液状化噴砂現象が生じているために、地下水の状況を調べることにした。

そこで、今回の調査では無水掘削で確認した水位の他、調査期間における水位の変化も観測を行った。その結果、表-3に示すように地下水位はGL-0.55～1.34mに分布が確認された。B2-1孔およびB2-3孔については、観測孔設置後数日の観測を行ったが、降雨がなかったこともあり、設置後に水位がしだいに下がる傾向を示したが、いずれも高い地下水位を示している。また、平成16年12月13日(調査終了日)から平成17年1月25日(調査終了43日後)の観測の間に、水位は低下せず、逆に上昇する結果となった。

以上の結果から、今回の被災宅地では地下水位が浅所に分布しているのに対し、被災宅地外では比較的深い深度に分布する結果を示していることから、被災宅地と被災宅地外とでは、地下水位の分布が明らかに異なるといえる。この理由として被災宅地は、被災宅地外に比べ、GL-5m以深の透水性が極端に悪くなるため、一様な砂質土層分布でなく、レンズ状またはシーム状の分布状況にあり、地下水が溜まりやすいことが考えられる。また、今回の観測日は季節的なことを考慮すれば、一般に冬季は渇水期とされるが、被災宅地では明瞭な地下水低下が認められていない。これは融雪の影響によるものと推察され、今後も地下水位が著しく低下する可能性は低いと考えられる。

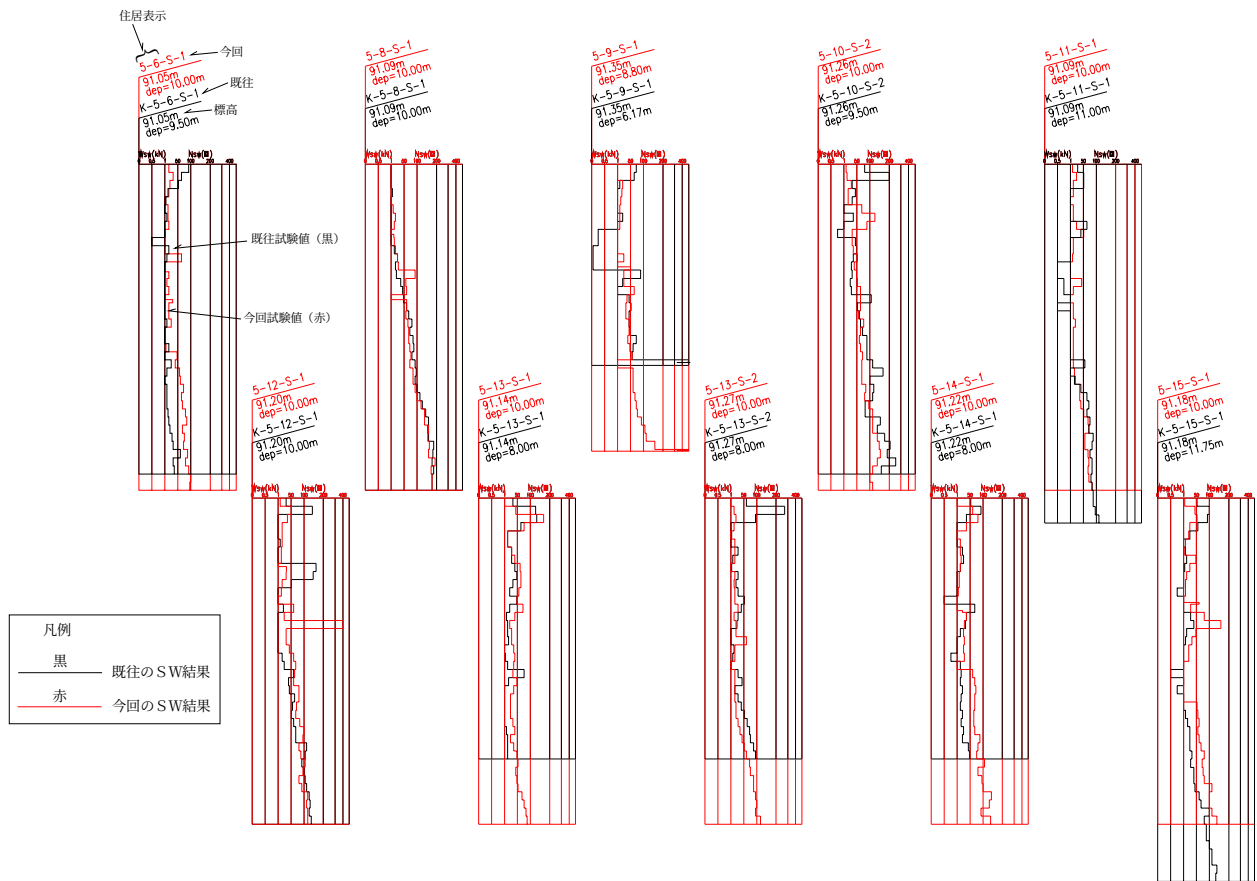


図-6 既往・今回のスウェーデン式サウンディング試験比較図
注) SWとはスウェーデン式サウンディング試験の略称である。

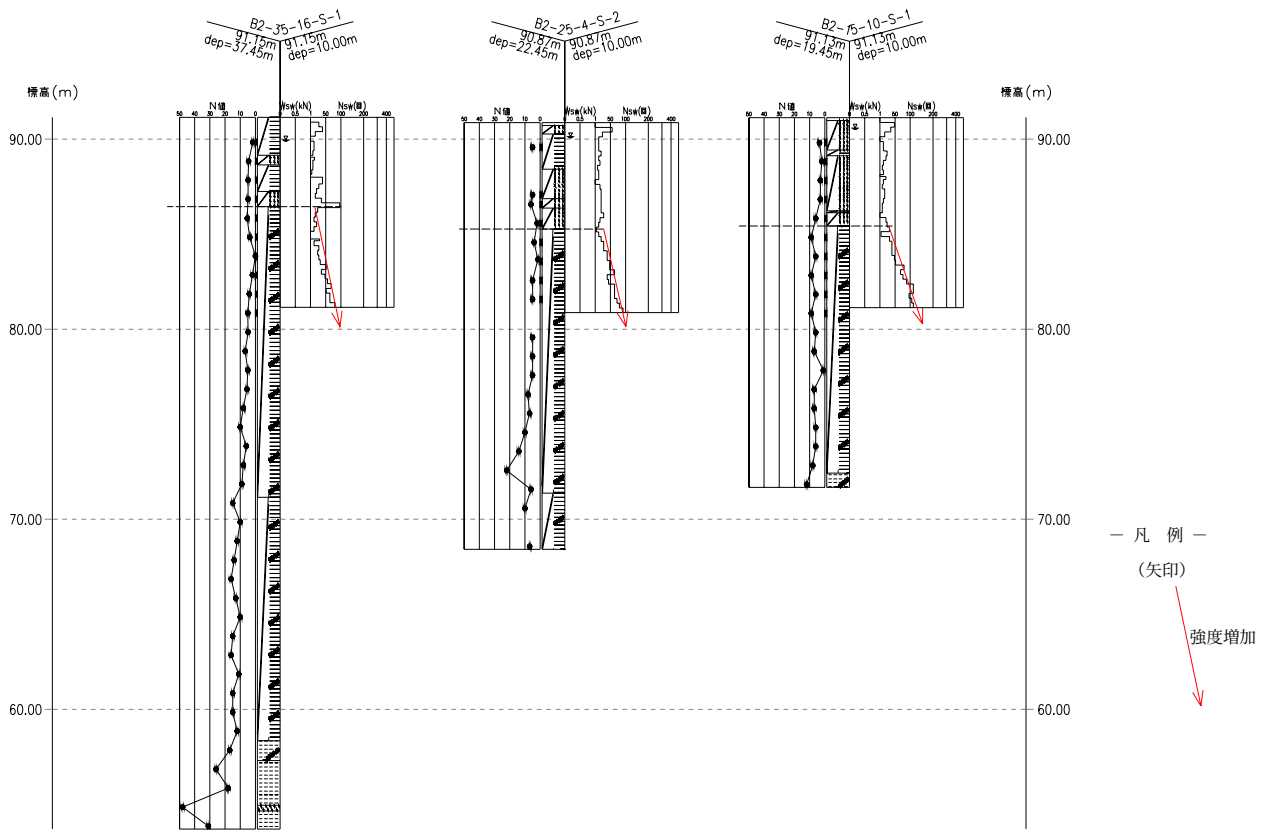
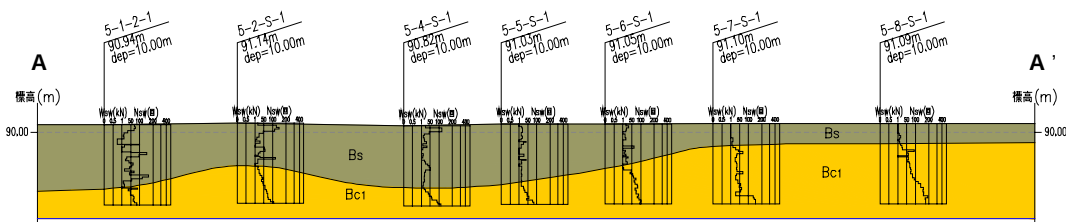
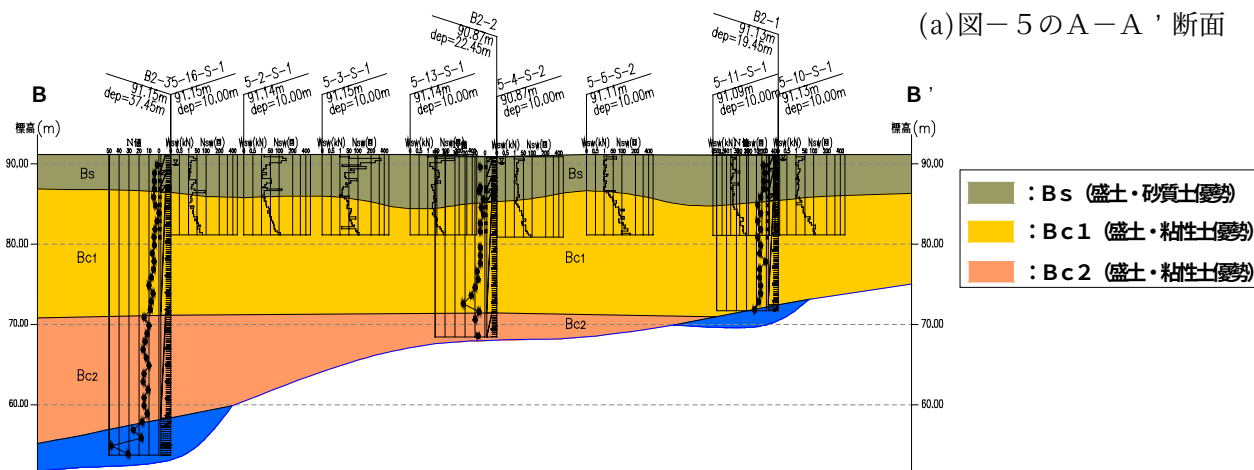


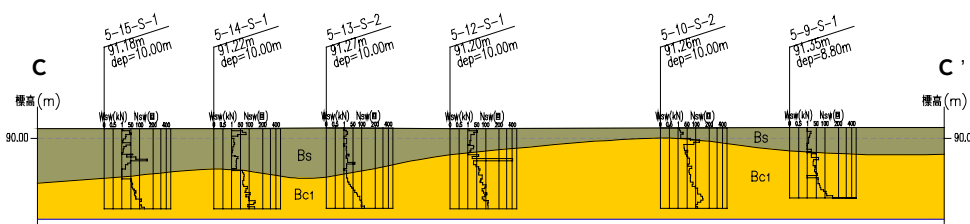
図-7 ボーリング調査及びスウェーデン式サウンディング調査の比較図



(a) 図-5のA-A'断面



(b) 図-5のB-B'断面



(c) 図-5のC-C'断面

図-8 砂層推定分布図

(2) 液状化対象層の検証

粒度組成からみた盛土の区分は、図-9～-11に示すように、B2-1およびB2-2孔が概ねGL-6m以深、B2-3孔が概ねGL-5m以深より、細粒分含有率50%を超えており、ボーリング結果と一致する結果となった。

今回着目したのは、造成盛土における粗粒分（礫＋砂）含有率である。被災宅地と被災宅地外との比較はGL-10～11m以浅について行った。すなわち、土質試験採取深度が深いものについては、液状化の可能性が低いものとし、ここでは比較を行わない。粗粒分含有率と深度の関係を図-12に示す。この結果、今回被災宅地箇所では浅所（GL-5m程度）における粗粒分含有率は概ね50%以上を示しており、それ以深ではほぼ細粒分優勢の粒度組成を示している。

一方、被災宅地外（1995年の既存資料）では深度方向への連続性は認められず、細粒分優勢又は粗粒分優勢の互層状を示している。

表-3 地下水分布一覧表

孔番号	孔口標高 H= m	観測年	観測月日	地下水深度 (GL- m)	地下水標高 (H= m)
既存B-1	90.80	平成9年	7月26日	2.30	88.50
			12月10日	12.90	77.90
		平成17年	1月25日	17.26	73.54
既存B-1'	90.80	平成17年	1月25日	10.11	80.69
既存B-2	91.47	平成9年	11月18日	7.39	84.08
		平成9年	12月10日	9.04	82.43
		平成17年	1月25日	-	-
今回 B2-1	91.13	平成16年	12月6日	0.55	90.58
		平成16年	12月10日	0.64	90.49
		平成16年	12月11日	0.66	90.47
		平成16年	12月13日	0.72	90.41
		平成17年	1月25日	0.58	90.55
今回 B2-2	90.87	平成16年	12月10日	0.74	90.39
		平成16年	12月11日	1.06	90.07
		平成17年	1月25日	0.55	90.58
今回 B2-3	91.15	平成16年	12月10日	1.19	89.94
		平成16年	12月11日	1.28	89.85
		平成16年	12月13日	1.34	89.79
		平成17年	1月25日	1.22	89.91

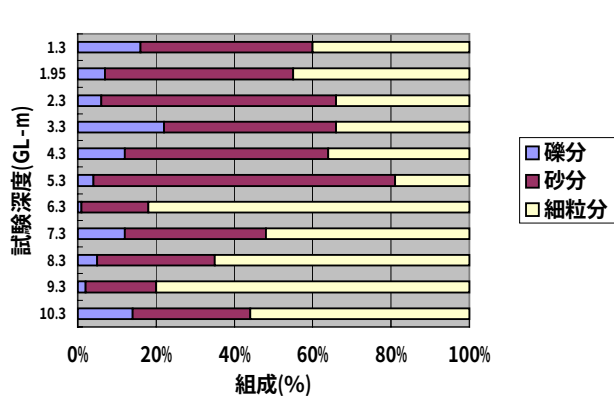


図-9 B2-1 地点における試験深度毎の粗度組成

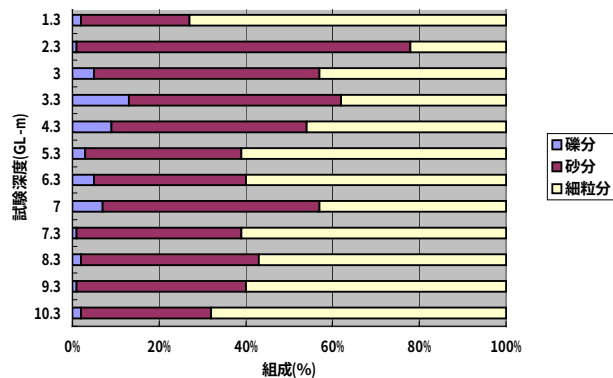


図-11 B2-3 地点における試験深度毎の粗度組成

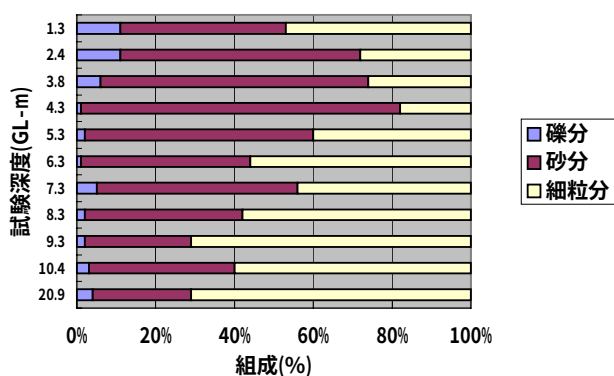


図-10 B2-2 地点における試験深度毎の粗度組成

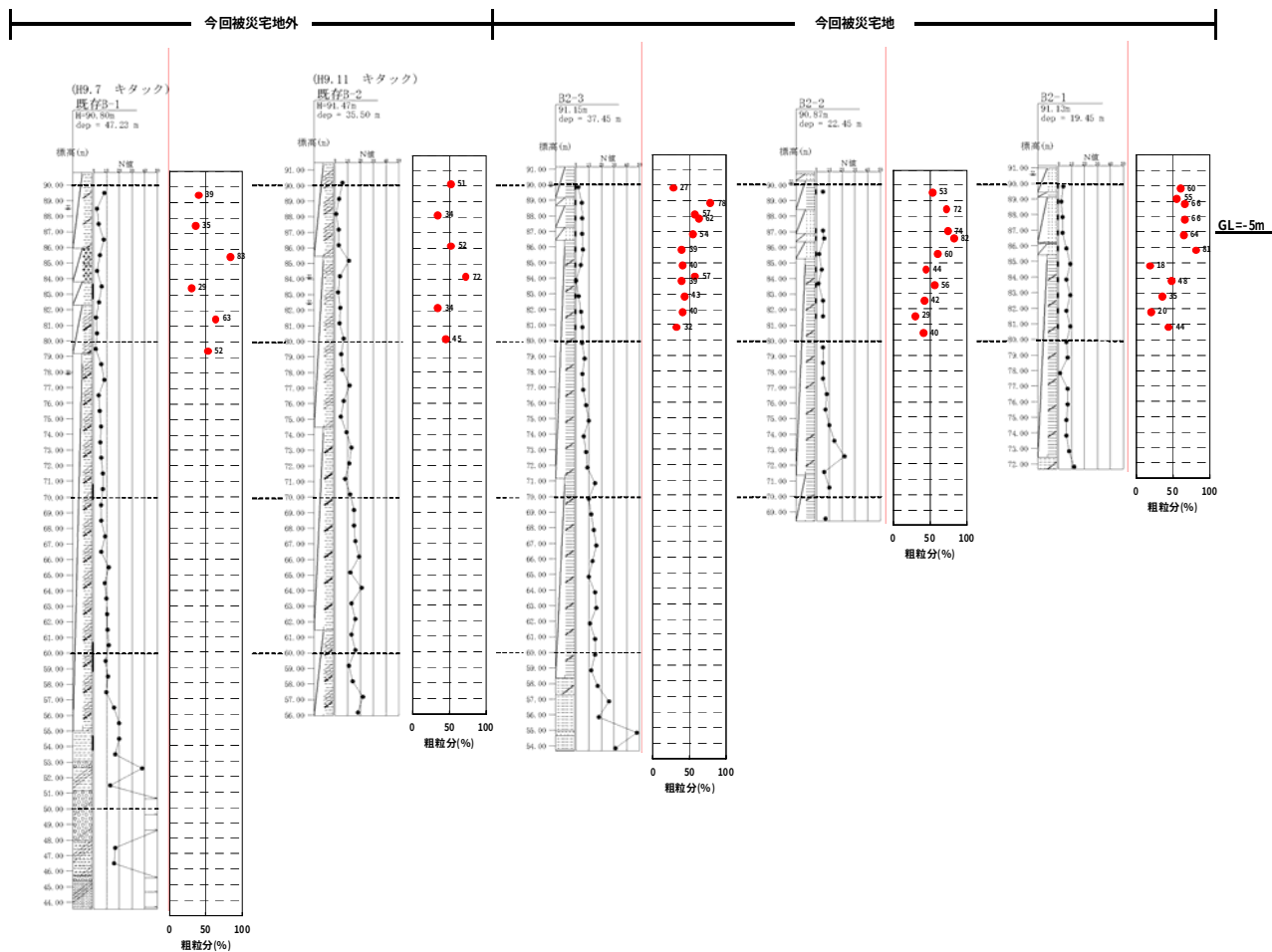


図-12 粗粒分含有率と深度（標高）の関係

4. 液状化被害分析

(1) 簡易液状化判定

液状化被害分析に当って、長岡市のこの地点の加速度を採用すべきであるが、長岡市で加速度が取れた地点が少なく地形・地盤特性が異なることから、基準値と噴砂現象の比較を行い、加速度を推定することとした。

N 値、粒度試験、液性塑性限界試験の結果を用いて、簡易液状化検討を行った。液状化判定対象の地層および水平加速度については、建築基礎構造設計指針³⁾ および宅地耐震設計マニュアル(案)⁴⁾ で以下のように示されている。

- ①飽和土層であること。
- ②地表面から 20m 以浅であること。
- ③細粒分含有率が 35%以下であること。
- ④粘土分含有率が 10%以下、または塑性指数が 15 以下の埋立あるいは盛土地盤。(埋立地盤などの人工造成地盤では、細粒分含有率が 35%以上の低塑性シルト、液性限界に近い含水比を持ったシルトなどが液状化した事例があるため。)

⑤水平加速度

建築基礎構造設計指針では、損傷限界検討用：150～200gal、終局限界検討用：350gal としている。また、宅地耐震設計マニュアル(案)では、損傷限界検討用：200gal、終局限界検討用：350gal としている。

以上の条件に基づき、液状化検討を行った結果を表-4～6 に示す。

土質試験結果から、GL-5m 付近までの地層(Bs)は、液状化の懸念がある地層と判断される。簡易液状化計算結果では、水平加速度により液状化抵抗値 F_L が異なるが、水平加速度 200gal で B2-1・B2-2 地点で液状化が発生し、B2-3 地点で発生しない結果となった。この結果は B2-1・B2-2 地点で噴砂を確認しているので現地の状況に概ね一致する。

なお、水平加速度を 350gal とした場合には、B2-3 孔でも液状化する結果となるが、現況で B2-3 地点に明らかな液状化(噴砂等)が確認されていないことを考慮すれば、水平加速度は 350gal 未満と推定される。

(2) 液状化要因の分析

被災宅地と被災宅地外では図-13 の模式図に示すように粒度組成、地下水位とも明瞭な違いが認められた。被災宅地では、地表面から 5m 程度まで粗粒分が優勢で降雨が浸透しやすく、一方の被災宅地外では細粒分が優勢なため地盤に浸透しやすく表流水として流出しやすい傾向にある。以下にその詳細について述べる。

a) 被災宅地

- ①GL-5m 前後まで、粗粒分優勢の盛土。
- ②GL-5m 以深、細粒分優勢の盛土。
- ③降雨(融雪)はほぼ浸透し、表流水や蒸発は少ない。

- ④GL-5m 以深の透水性が極端に悪くなるため地下水位が溜まりやすく、浅所に地下水が分布。

b) 被災宅地外

- ①概ね細粒分優勢の盛土。
- ②降雨(融雪)の地表面からの浸透は少なく、表流水・蒸発が多い。
- ③浸透水が少ないため、地下水は深い箇所に分布
被災宅地部分では粗粒分優勢箇所が連続性を持って分布しているのが認められるのに対し、被災宅地外では粗粒分優勢箇所の連続性は認められず、レンズ状またはシーム状の分布状況にあるものと判断される。当該地の盛土材は現地発生材(魚沼層群：凝灰岩類)を掘削・転圧して造成されたものであり、魚沼層群を細粒化させた場合、粗粒分を多く残す岩質でもある。

以上のことから、長岡ニュータウンの盛土性状としては細粒分・粗粒分を混在した盛土で盛土材としては良質材であり、今回の被災宅地区間だけが部分的に粗粒分が卓越したものと推定される。

5. まとめ

本論文では、被災した高盛土上宅地地盤の解析結果からこの一街区の宅地地盤に液状化が発生した地盤要因の考察・分析を行った。被災宅地外で実施されている既往のボーリングでは宅地造成初期の段階の地下水位線は、地表面から 10～15 m 程度下であった。しかし、被災宅地では、造成の際に街区付近にレンズ状またはシーム状の砂質土を含んだ地盤があり、地下水位線が非常に高く大規模な地震動を受け液状化したことが明らかとなった。

今後の教訓としては、宅地防災に関する技術指導として宅地防災マニュアル⁵⁾ が最も広く活用されているが、さらに以下のことについても追加検討し、見直しが必要である。

①宅地造成上の配慮

宅地造成では、高盛土部であっても砂質土を含んだ粗粒分優勢箇所をレンズ状やシーム状に分布させないよう配慮する必要がある。

②地下水低下工法の導入

高盛土においては、これまで以上に地下水を低下させる暗渠工法や水平排水層を設ける必要がある。

③宅地地盤の液状化検証の強化

宅地地盤の性能は、いわゆる品確法⁶⁾ ができ、液状化層の検証も行われることになっているが、現実的にはスウェーデン式サウンディングの地耐力評価が主体で、地下水の推定に基づく液状化検討が行われていない。今後、液状化マップ⁷⁾ に加えて簡易的な検討が望まれる。

表-4 B2-1 地点の簡易液状化判定

B2-1		地下水位 GL=0.55m				棄却判定 ○: 液状化対象外 ×: 液状化対象	N値 (回)	液状化係数FL		
試料採取深度 (GL-m)	シルト分	粘土分	細粒分FC (シルト分+粘土分)		塑性指数Ip (シルト分+粘土分)			水平加速度	水平加速度	水平加速度
	%	%	%	%				150gal	200gal	350gal
1.3	20	20	40	24.8	○	4	-	-	-	
2.3	21	13	34	24.7	×	2	0.942	0.707	0.404	
3.3	23	11	34	20.5	×	3	0.952	0.714	0.408	
4.3	21	15	36	23.3	○	3	-	-	-	
5.3	12	7	19	23.7	×	6	0.983	0.737	0.421	
6.3	41	41	82	36.0	○	9	-	-	-	
7.3	25	27	52	33.5	○	6	-	-	-	
8.3	30	35	65	32.0	○	9	-	-	-	
9.3	39	41	80	37.4	○	6	-	-	-	
10.3	28	28	56	33.8	○	9	-	-	-	

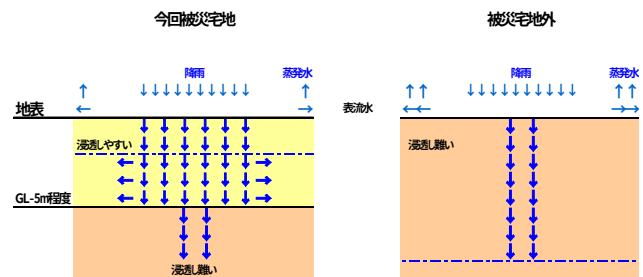


表-5 B2-2 地点の簡易液状化判定

B2-2		地下水位 GL=0.74m											
試料採取深度 (GL-m)	シルト分 %	粘土分 %	細粒分FC (シルト分+粘土分) %	塑性指数Ip (シルト分+粘土分) %	棄却判定 ○: 液状化対象外 ×: 液状化対象	N値 (回)	液状化係数FL						
							水平加速度	水平加速度	水平加速度	150gal	200gal	350gal	
1.3	27	20	47	25.8	○	5	-	-	-	-	-	-	
2.4	17	11	28	7.2	×	5	1.310	0.982	0.561	-	-	-	
3.8	18	8	26	7.0	×	5	1.079	0.810	0.463	-	-	-	
4.3	13	5	18	NP	×	6	1.073	0.805	0.460	-	-	-	
5.3	28	12	40	9.8	○	2	-	-	-	-	-	-	
6.3	29	27	56	37.9	○	4	-	-	-	-	-	-	
7.3	22	22	44	42.9	○	2	-	-	-	-	-	-	
8.3	28	30	58	43.4	○	5	-	-	-	-	-	-	
9.3	37	34	71	47.4	○	5	-	-	-	-	-	-	
10.4	32	28	60	31.2	○	5	-	-	-	-	-	-	

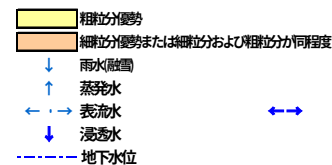


図-13 被災宅地内外の粗度組成に対応した地下水位の模式図

表-6 B2-3 地点の簡易液状化判定

B2-3		地下水位 GL=1.19m											
試料採取深度 (GL-m)	シルト分 %	粘土分 %	細粒分FC (シルト分+粘土分) %	塑性指数Ip (シルト分+粘土分) %	棄却判定 ○: 液状化対象外 ×: 液状化対象	N値 (回)	液状化係数FL						
							水平加速度	水平加速度	水平加速度	150gal	200gal	350gal	
1.3	37	36	73	33.3	○	2	-	-	-	-	-	-	
2.3	17	5	22	NP	×	5	1.430	1.072	0.613	-	-	-	
3.3	23	15	38	24.1	○	5	-	-	-	-	-	-	
4.3	29	17	46	22.5	○	5	-	-	-	-	-	-	
5.3	29	32	61	41.9	○	5	-	-	-	-	-	-	
6.3	32	28	60	34.6	○	4	-	-	-	-	-	-	
7.3	29	32	61	43.5	○	0	-	-	-	-	-	-	
8.3	28	29	57	38.6	○	2	-	-	-	-	-	-	
9.3	28	32	60	34.2	○	4	-	-	-	-	-	-	
10.3	32	36	68	41.2	○	5	-	-	-	-	-	-	

参考文献

- 1) 釜井俊孝ほか：2004.10.23.新潟県中越震調査速報、日本地すべり学会、2004.11.
- 2) 都市基盤整備公団：宅地地盤性能評価基準（案）、pp.2-13～2-17、2002.5.
- 3) 建築基礎構造設計指針：日本建築学会、pp.62、2001.10.
- 4) 都市基盤整備公団：宅地耐震設計マニュアル（案）、pp.27～28、2003.3.
- 5) 建設省民間宅地指導室監修：宅地防災マニュアル、1998.5.
- 6) 住宅の品質確保の促進等に関する法律：2000.4.
- 7) 若松加寿江：日本の地盤液状化地点分布図、東海大学出版会、1991.

(2005.3.14 受付)

LIQUEFACTION DAMAGE ANALYSIS OF RESIDENTIAL LANDS AT HIGH EMBANKMENT IN THE 2004 NIIGATA-KEN CHUETSU EARTHQUAKE

Residential lands at a high embankment was liquefied and serious damage to the houses was occurred in Nagaoka City during the 2004 Niigata-ken Chuetsu Earthquake. The study is focusing on liquefaction at a high embankment. SPT blow count test, Sweden type sounding, soil test and observation of underground water level were conducted in order to clarify the characteristics of subsurface ground and stratum constitution. The mechanism of liquefaction of subsurface ground at a high embankment is investigated by using these data.