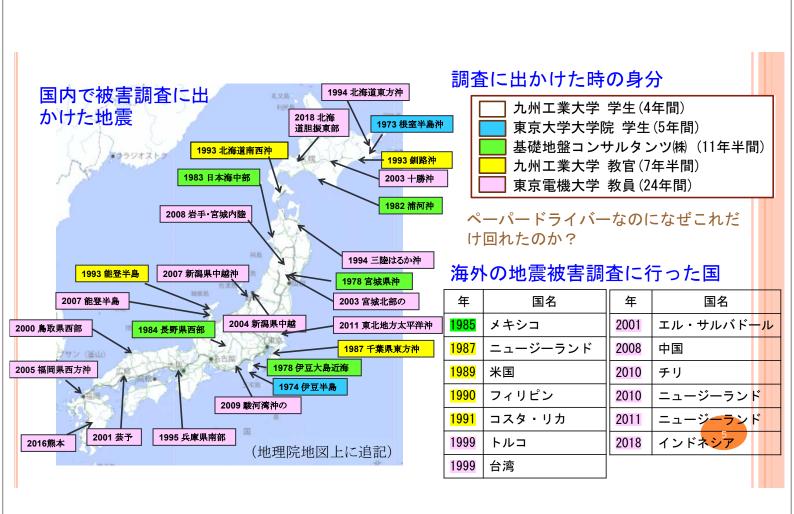




- 1. 鉱さい集積(堆積)場の被害調査
- 2. 盛土造成地の被害調査
- 3. 下水道マンホールの被害調査
- 4. 戸建て住宅の液状化による被害調査
- 5. 最近発生した不思議な地盤災害の調査

東京電機大学 名誉教授 安田 進



1. 鉱さい集積(堆積)場の被害調査

(1) 1978伊豆大島近海地震(1月14日、MJ=7.0)

1954年にたい積場建設 基準が制定

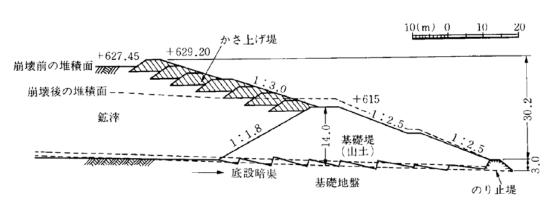
- ▶ 1週間後の1月22日に現地調査に出かけた。寒い日でたい 積場表面が凍っていたため、歩いて調査ができた。
- ▶ 初めて実物の噴砂を見て感激!
- ▶ すでに応急復旧して流出を止めてあった。











- ▶内盛式で建設されていた。
- ▶約80,000 m³の鉱 さいと堤体土が狩 野川に流出して駿 河湾まで流れり下 た。これにより狩 野川、駿河湾が 染された。

(2)1980年の技術指針の改正 (液状化関係)

液状化による過剰間隙水圧を考慮した円形滑り面法により安定性を検討

$$F_{S} = \frac{\sum R \left\{ C'\ell + \left((W - Ub) \cos \alpha - K_{h} W \sin \alpha \right) \tan \varphi' \right\}}{\sum \left(RW \sin \alpha + K_{h} Wh \right)}$$

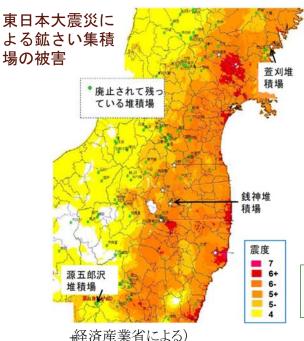
N値と平均粒径から繰返し応力比を推定する略算式の提案

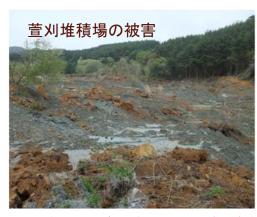
鉱さいの種類	繰返し三軸試験から得られる繰り返し応力比		
ア)黒鉱鉱床により生じる捨石又は鉱さい からなる築堤材料又は集積物の場合	$R_{\ell} = 0.088 \sqrt{\frac{N}{0.1\sigma_{v}^{'} + 0.7}} + 0.20$		
	ここに, R_ℓ :繰り返し応力比, σ_{V} ':有効上載圧(kN/m²),		
	N:標準貫入試験によるN値		
イ) ア)以外の捨石又は鉱さいからなる 築堤材料又は集積物の場合	$R_{\ell} = 0.088 \sqrt{\frac{N}{0.1\sigma_{\nu}' + 0.7}} + 0.085 \log_{10} \frac{0.50}{D_{50}}$		
	ただし, <i>R_t</i> の最小値は0.15とする。		
	ここに D ₅₀ :土粒子の平均粒径(mm)		
ウ)沈殿物からなる集積場の場合	$R_{\ell} = 0.088 \sqrt{\frac{N}{0.1\sigma_{v}^{'} + 0.7}} + 0.10$ ただし、 $N < 1$ のとき、 $R_{\ell} = 0$ とする。		
	ただし、 <i>N</i> <1のとき、 <i>R_i</i> =0とする。		

- ▶ 地震後に約30か所の鉱さい集積場で地盤調査、試料採取、繰返し三軸試験、地震応答解析が行われた。
- ▶調査・試験・解析をもとに鉱さい集積場独自の液状化強度推定方法、過剰間隙水圧の推定方法などが提案され、円弧すべり面法で安定性を検討する手順が指針に盛り込まれた。
- ▶ 全国の鉱さい集積場の総 点検が行われ、対策が必 要な箇所では対策が施さ れた。

日本鉱業協会編: 捨石・鉱さい建設基準および解説, 1980.

(3) 2011年東日本大震災(3月11日、Mw=9.0)





- ▶3か所の鉱さい集積場が崩壊し、集積物が流出し一部 民家や河川、鉄道、田畑への流入被害が発生。
- ▶ 萱刈たい積場では基礎堤上部の法面が幅120m, 長さ180mほど崩壊し、スライムが約1km下流まで流出して河川、田畑、住宅2戸に流入した。河川の水質汚濁(鉛, 砒素)も一時発生した。

Ishihara K, Ueno K, Yamada S, Yasuda S, Yoneoka T. Breach of a tailings dam in the 2011 earthquake in Japan. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 68; pp.3–22, 2015.

2012年に改正された技術指針の要旨

レベル1は現行の技術指針の考え方のままとする。

下記の集積場については大規模地震動における安定性評価を行う。

(1)評価対象集積場

- (a) 基礎堤より高く積まれた内盛り式スライム集積場
- (b) 浸潤水位が集積面より10m以浅又は飽和状態
- (c) 集積量が5万m³以上の集積場

(2)評価手法

フィルダムや河川堤防等の土木構築物分野で用いられているレベル2地震動に対する耐震評価手法を参照しつつ評価を行う。

(a) 耐震性能

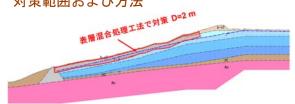
下流の重要構築物等に重大な被害を生じさせない

(b) 評価方法

土木構築物のレベル2地震動に対する耐震性能照査で採用されている動的解析法等を用いる。

経済産業省集積場管理対策研究会:集積場管理対策 研究会報告書,2012.

対策範囲および方法



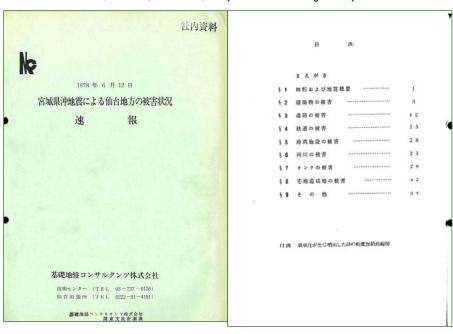
対策時の風景



安田進,安達健司,米岡威:液状化を考慮したすべり変形解析によるL2地震動に対する鉱さい集積場の点検,第16回日本地震工学シンポジウム,2023(提出中).

2. 盛土造成地の被害調査

(1) 1978宮城県沖地震 (6月12日、M」=7.4)







- ▶ 夕方地震発生、すぐ車を用意して出発、翌朝仙台着。
- ▶基礎地盤コンサルタンツとしては初めての報告書を作成、配布したが。。。

写真8-1,8-2,8-3は宅造盛土の破壊状況である。

白石市緑が丘



写真8-1

遊成地は谷の底部土 したちにはなる。 経路ではなりない。 日本のにはなりない。 日本のにはなりない。 日本のではなりない。 日本のではない。 日本のでは、 日本のでも 日本のでも 日本のでも 日本のでも 日本のでも 日本のでも 日本のでも 日本のでも 日本の

(白石付近宅造盛土)

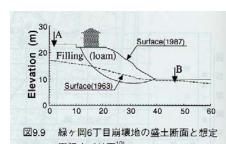
仙台市緑ヶ丘



写真8-2



(2) 1993年釧路沖地震 (1月15日、M_J=7.8)







- > 地盤工学会調査団で徹底的に調査。
- ▶ 開析谷には軟弱の粘性土や泥炭が堆積。
- ▶ 地表面は凍結。とにかく寒かった...

土質工学会4<<6年地震災害調査委員会:4<<6年釧路 沖地震·能登半島沖地震災害調査報告書

この後の地 震では被害 調査に出か

けた

(3) 中越地震での被害を契機に宅造法が改正、宅地耐震化推進事業が創設

年	関連した法律等の改正	盛土造成地に被害を与えた地震
1960 1970	宅造法創設(1962): 防災措置の設 置のみ	十勝沖地震(1968):札幌で被害
1980	住宅・都市整備公団「宅地耐震設	宮城県沖地震(1978):仙台で被害
1990	計指針(案)」(1984):公団のみ 宅地防災マニュアル出版(1988): 擁壁の設計法	千葉県東方沖地震(1987):千葉県で 被害 釧路沖地震(1993):釧路で被害
2000	宅地防災マニュアル(改訂版)出版 (1998):盛土の設計法も	兵庫県南部地震(1995):神戸・西宮 で被害 十勝沖地震(2003):札幌で被害 新潟県中越地震(2004):長岡で被害
2010	宅地造成等規制法改正(2006) 宅地耐震化推進事業の創設(2006)	新潟県中越地震(2004): 長崎で被害 新潟県中越沖地震(2007): 柏崎で被害 東日本大震災(2011): 東北で被害

現在進められている宅地耐震 化推進事業と課題

国土交通省での対応

- ①宅地耐震化推進事業を創設(2006年)
- ②「大規模盛土造成地の変動予測調査ガイドラ イン」の策定(2007年)
- ③「宅地耐震工法選定ガイドラインの策定」 (2012年)
- ④「大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」(2015年修正・加筆)

kwwsv=22z z z 1p olwljr1ns2wrvk12wrvk1bwrerxbwnb 3333481kwp o

- ▶ 第一次スクリーニングは終了。
- ▶ 現在、多くの地区で第2次スクリーニングの優 先度評価実施中。一部の地区で第2次スクリー ニングが実施。

ガイドラインの図を簡略化したもの

第1次スクリーニング

- ・盛土造成地の位置と規模の把握
- ・第1次スクリーニングのまとめ

大規模盛土造成地マップ

- 大規模盛土造成地マップの作成
- 大規模盛土造成地マップの公表と活用

第2次スクリーニング計画の作成

- 基礎資料整理
- 現地踏査

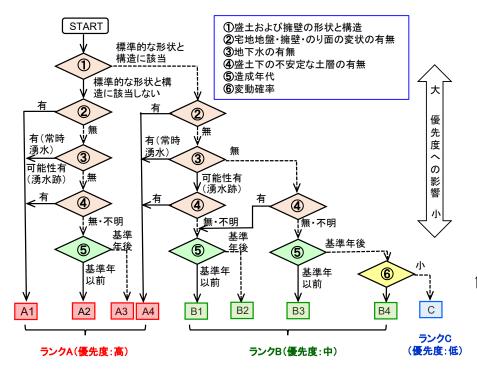
第2次スクリーニング

- 地盤調査
- ・安定解析
- ・第2次スクリーニングのまとめ

防災区域の指定等

- 保全対象の調査
- 危害を生じるおそれの有無

第2次スクリーニング計画優先度の評価フロー



数が多い盛土造成 宅地の中から調査 を実施する優先度 をどのように選定 するか?

(ガイドラインの図を 簡略化したもの)

変状していた箇所が東日本大震災で被災した事例

仙台市太白区緑ヶ丘4丁目



東日本大震災の約2年前に歩いていて擁壁の 補修跡が気になって撮影していた。



東日本大震災で被災した。調査の際に付近の住民の方に聞いたところ、1978年宮城県沖地震で被災した後、大雨の際に塀に変状が生じて補修したとのことであった。

大規模盛土造成地の安全対策の実施状況(R3.3 末時点見込)^{MM} 国土交通省

(別紙2)

(第1段階)

大規模盛土造成地の抽出 (第一次スクリーニング)



大規模盛土造成地マップを 全国で作成、公表 (R2.3)

> <u>999市区町村</u>に 約5万1千ヵ所

うち100ヵ所以上存在する 市区町村が117 (約3万3千ヵ所)

(第2段階)

大規模盛土造成地の調査

(第二次スクリーニング)

安全性把握を行う優先順位を決める計画 (第二次スクリニング計画) の作成

①造成年代調査

古い盛土ほど滑動 崩落が発生しやす い傾向があるため、 まず造成年代を調

大規模盛土が

存在するすべての

市区町村で完了

②現地踏査等

現地で盛土の形状や 地盤・法面の変状、 地下水の湧水の状況

着手済:55.4%

(553市区町村)

うち完了44.3%

(443市区町村)

③安全性把握

現地でボーリングに よる地盤調査等を 実施の上、地震時に盛土に滑りが発生 する可能性を計算 (安定計算)

着手済:6.4%

うち完了3.9% (39市区町村)

(64市区町村)

(第3段階)

対策(ハード事業)

滑動崩落防止工事

地震時の盛土の地滑り的 崩壊・変形を防止するため、 地下水の排除、盛土の滑 動抑止杭、擁壁の補強等 の工事を実施。

事前対策工事実績

: 3地区実施(3市町) (うち2地区完了)



※ 震災からの復旧事業につ いては実施地区多数

- 第一次スク リーニングは 終了。
- ▶現在、多くの 地区で第2次ス クリーニング の優先度評価 実施中。一部 の地区で第2次 スクリーニン グが実施。
- > 今後何年かか るのか?

宅地耐震化推進事業により支援

〇変動予測調査等

大規模盛土造成地マップの作成や、大規模盛土造成地の安全性 把握のための調査等に要する費用を補助。

事業主体 地方公共団体、宅地所有者等(間接補助) 1/3、1/2 (令和4年度まで)

〇滑動崩落防止工事

定の要件を満たす大規模盛土造成地について、滑動崩落防止工事 のための設計及び同工事に要する費用を補助。

事業主体 地方公共団体、宅地所有者等(間接補助) 交付率 1/4、1/3(公益施設等に被害のおそ)

1/4、1/3(公益施設等に被害のおそれ等の要件あり)、 1/2(立適計画の防災指針に即して実施する場合)

(4)2018年北海道胆振東部地震(9月6日、Mj=6.7) により発生した陥没被害







安田進:地震による盛土造成地の<mark>被害に</mark>経 年変化が与える影響の考察、日本地震工学 会、第15回年次大会梗概集,B-3-1, 2020.

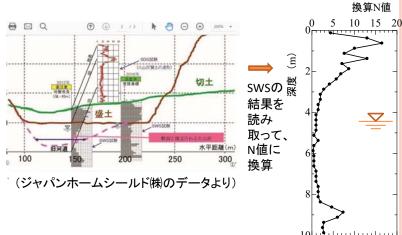
盛土範囲、暗渠排水管および三里川 ボックスの位置



(札幌市:第2回清田区里塚地区の市街地復旧に向けた地元説明会資料、2018.に加筆)

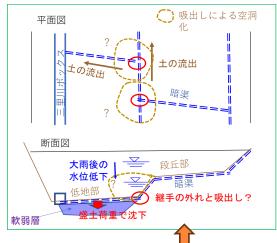
三里川ボックスに接続している暗渠排水管の 出口の写真を見ると、暗渠排水管から地震前 に土が流出したような跡が見られる

地震の数年前の地盤調査結果



- ➤ 数年前に家を建てられた時のSWS(スクリューウエイト貫入)試験の結果をN値に換算してみると、表層のN値は5程度以上あるのに対し、GL-4m~GL-8m付近は換算N値がほとんどゼロ。
- ▶ 地下水位はGL-3.5mと深い。
- この深さでN値が小さいのは不自然→地震前から空洞があいていたのではないかと考えられる

暗渠排水管の経年劣化で空洞が形成さ れていたと考えられるメカニズム



- ▶ 暗渠排水管の接合部が施工後に徐々にはずれ、 そこから土が排水管に流れ出し、地震前から 空洞が形成されていたのではないか。
- ▶ 地盤のすべりにともなって水道管に引張力が 働いて破損し、流れ出した水道水で洗堀区間 の土砂を流したのではないか

水道管の破損により土砂を流 したと考えられるメカニズム



- 現地調査に行った際、 住民の方で「陥没何に につか震前した感覚 があわるとかがいる につうがいに ので役った」がいて でもらがおられた。
- ▶ 住民の方々に地震前の 地盤変状や家を建てれの 時のSWS試験結果、杭の 打設状況などを一トカングやアンプログルであると がいるとが、自分達では なかったのが残念。

18

19

3. 下水道マンホールの被害調査

(1)1993年釧路沖地震



- ▶ 泥炭地盤の地区であり、液状化するような緩い砂層はないのになぜ浮き上がったのか?
- ▶ 下水道管渠も浮き上がっていた。

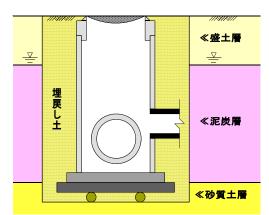


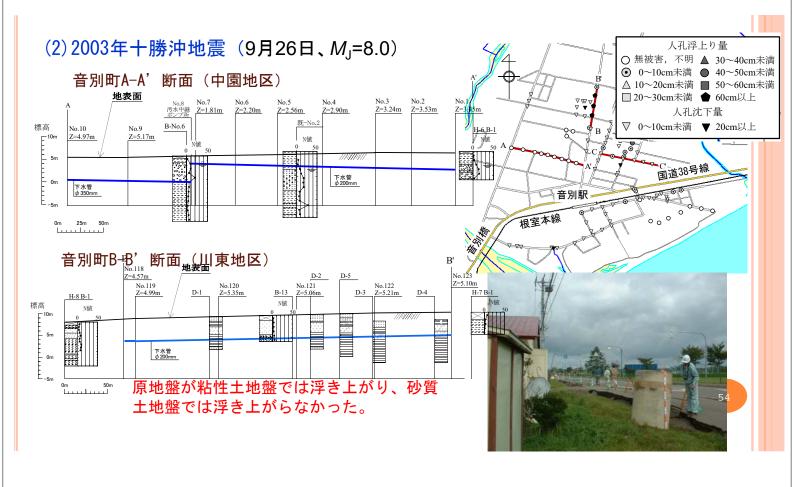
安田進・吉田望・穴道玲・板藤繁:釧路沖地震による下水道施設の被災箇所の特徴について,地域安全学会論文報告集,No.4,pp.270-275191994.

土木研究所で 行われた地震 後の掘削調査



埋戻し土の液状化によりマン ホールや下水管が浮き上がる 事が明らかになった。





(3) 2004年新潟県中越地震(10月23日、M_J=6.8)

公共下水道の被害

- ☆新潟県および県内6市12町3村の22 自治体で被災
- ☆被災総額:205億円 ☆被災延長:152.1km
- ☆路面から突出したマンホール:1453個





下水道地震対策技術検討委員会:新潟県中越地震の総括と地震対策の現状を踏まえた今後の下水道地震対策のあり方、2005。

自治体 名	管路延長 (km)	被災管路 延長(km)	突出マン ホール数	路面異 常数
新潟県	61.3	0.5	51	130
長岡市	1258	62.9	436	3685
柏崎市	421.5	3.9	12	230
小千谷市	182.8	31.1	400	349
栃尾市	135.1	2.5	9	20
見附市	195	0.2	64	315
越路町	83.7	4.7	93	157
三島町	58.7	1.8	5	16
与板町	56	5.1	88	187
和島町	37.7	6.1	36	114
出雲崎町	39.6	3.1	5	22
小国町	61.3	9.6	158	107
十日町	198.1	2.9	10	110
川口町	43	9.3	24	93
川西町	29.3	2.4	0	1
堀之内町	75.1		37	93
守門村	48.6	4.3	9	178
小出町	88.5		5	19
弥彦村	100.2	0	0	3
津南町	59	1.5	0	20
中之島町	33.3	0	0	19
西山町	25.8	0.3	8	2
その他			3	38
合計	3291.4	152.1	1453	5908

地震翌々日の調査ルートとその後の調査筒所



福岡空港でタクシーに乗った時に地震発生、翌日東京に戻り、翌々日朝、越後湯沢で学生と合流

和南津トンネルが通行不可なので魚野川 右岸へ迂回、通行規制を抜けて長岡まで 到達したが、帰路は小千谷より先が通行 不可

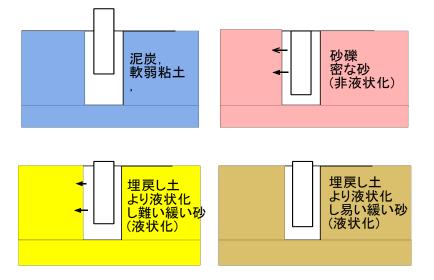
西の小国に抜けようとしたが斜面崩壊で 不可。ただしマンホールの浮上がりに出 会った。

上信越道→長野道→中央道で帰宅



56

周囲地盤の土質などが与える影響



Yasuda, S. and Kiku, H.: Uplift of sewage manholes and pipes during the 2004 Niigataken-chuetsu earthquake, *Soils and Foundations*, Vol. 46, No. 6, pp. 885-894, 2006.

マンマンホールの浮上がり量に影響を 与えると考えられる要因

①地震動、②周囲地盤、③管渠やマンホールの構造、深度、設置方法、④地下水位、⑤埋戻し部の幅、⑥埋戻し土の土質、密度

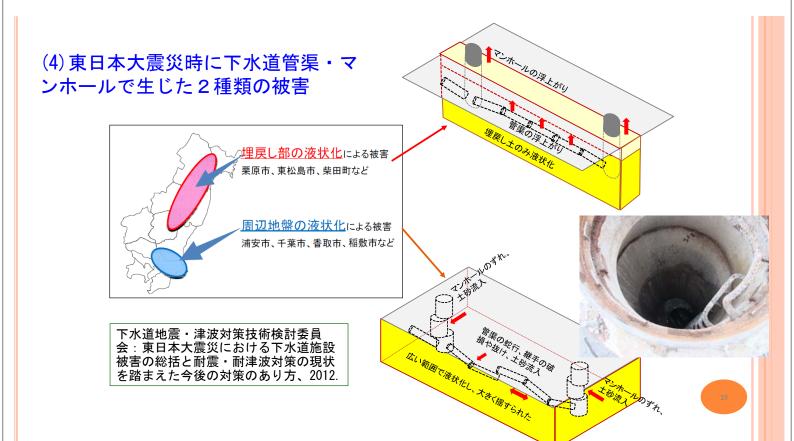
周囲の地盤の土質の違いが浮上り量に与 える影響に関する一考察

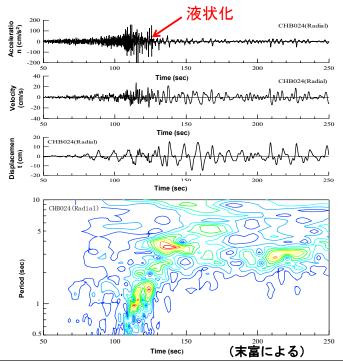
- ▶ 周囲が軟弱粘性土地盤だと埋戻し土の 施工がし難く緩くなってしまう。
- ▶ 周囲が軟弱粘性土だと震動中に非排水 状態になり、周囲地盤へ過剰間隙水圧 が消散し難い。

液状化ハザードマップで液状化し易い 地盤を優先的に対策をとるのは間違い になることの認識が、残念ながらされ ていない。

→ハザードマップの利用に注意

5'





- ▶ K-NET稲毛(液状化発生)地点の加速度記録を積分して変位波形を求めると、液状化発生後に約30cmの大きな変位振幅の揺れが1分以上生じていた。
- ▶ 地震動の継続時間が長かったので、液状化が発生したあとも揺すられ続ける"揺動" 現象が生じて、管路の接手のはずれやマンホールのずれが生じたのではないか。



安田進・石川敬祐・五十嵐翔太・田中佑典・畑中哲夫・岩瀬伸朗・並木武史・斉藤尚登:東日本大震災における 浦安市の水道管被害メカニズムの解明,日本地震工学会論文集,第16巻,第3号, pp. 183-200, 2016.

4. 戸建て住宅の液状化による被害調査

(1) 2000年鳥取県西部地震(10月6日、M_J=7.3)

自治会で詳細な被災調査が行われ、 我々は地下水位測定を実施

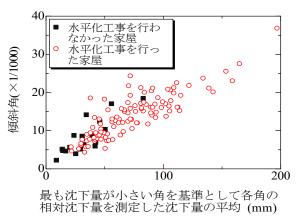
翌朝、飛行機で飛んでNHKの方から指定された安倍彦名団地に着いたところ。。。



- ▶ 液状化して家がめり込み沈下し傾いていたが、 住民の方は感じておられなかった。
- ▶ 10日位たって住民の方々がめまいや吐き気がするとのことで出かけて説明会を開いた。

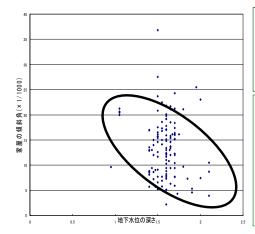


復旧で水平化工事を行う必要があった か否かと傾斜角との関係



- ▶一見すると液状化による被害は軽そうに見えるが、家が傾くとめまい・吐き気・頭痛がして住めなくなる。
- 液状化により沈下家屋において水平化工事を行わざるを得なかった家屋の傾斜角の限界→約1/100

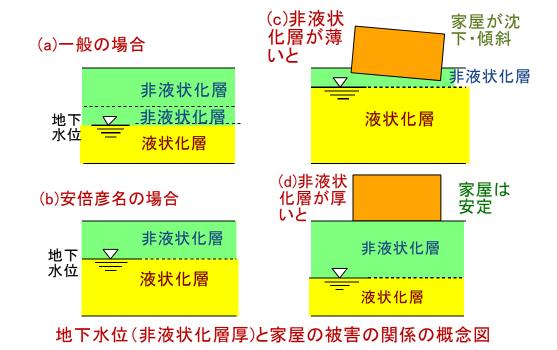
地下水の深さと家屋の傾斜角の関係



安田進:鳥取県西部 地震による団地の被 害,日本建築学会総 合論文誌,第2号, pp.45-46,2004.

橋本隆雄・安田進:鳥取県西部地震における液状化被害と地下水位の関係、土木学会第8:蛔年次学 術講演会講演概要集、Ⅲ0847、5335年、ss1435:0435;1

- 地下水はGL-0.8m~2.1mと浅かった。
- ばらつきは大きいが一般に地下水が浅い家屋ほど傾斜は大きかった。
- 井戸水を汲み上げている家では地下水 が深かった。



(2) 2007年新潟県中越沖地震(7月16日、M_J=6.8)











広い範囲で液状化による戸建て住宅の被害が発生

5.











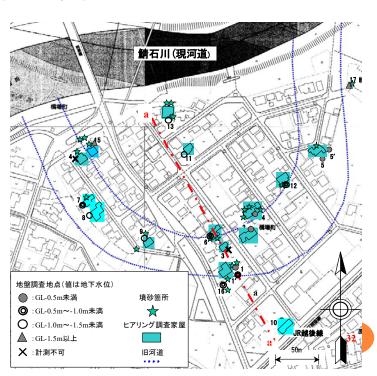
地震後に被害状況調査と地盤調査を分担して実施

長岡工業高等専門学校、長岡科学技術大学、 東京電機大学、関東学院大学、東京大学、 新潟大学、東京理科大学、群馬大学

東京電機大学は長 岡科学技術大学の 豊田浩史先生らと 橋場町を担当

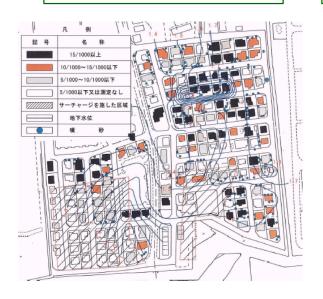


安田進,有山裕亮,井上貴文,豊田浩史:2007中越沖地震による宅地の液状化被害と地盤調査結果-橋場町その2-,第43回地盤工学研究発表会発表講演集,No.881,pp.1763-1764,2008.

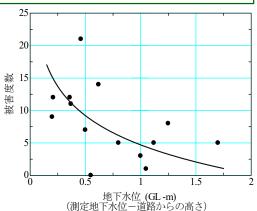


2000年鳥取県西部地震で被災した米子市安倍彦名団地の地下水位と家屋 の被害の関係との比較

地下水位が浅いと被害が甚大で、 深いと被害がなかった。



柏崎でも同様な関係を調べたら、 地下水位が深いと被害がなかった。



調査結果をもとに住民への説明会を実施 液状化対策として地下水位低下などがある ことを説明した。

尾上先生による調査結果のまとめ

Onoue, A., Yasuda, S., Toyota, H., Inotsume, T., Kiku, H., Yamada, S., Hosaka, Y., Tsukamoto, Y., Towhata, I., Wakai, A. and Ugai, K.: Review of Topographic Conditions for Liquefaction-related Damage induced by the 2007 Off Mid-Niigata Earthquake, Soils and Foundations, Vol.51, No.3, pp.533-548, 2011.

地震から1年後に行った住民の方々への説明会

液状化被害調查報告会

日時:533;年;月6日(日)47時~49時

場所:刈羽村生涯学習センター「ラピカ」文化ホール

入場無料

プログラム

4. 地盤の液状化のメカニズムと対策

2. 松波、長崎、山本本村の被害と地盤 尾上篤生 長岡工業高等専門学校,

6. 橋場町の被害と地盤

4. 山本団地の被害と地盤

5. 正明寺、下高町の被害と地盤

9. 刈羽村の被害と地盤

7. 情報交換会

安田進 +東京電機大学,

豊田浩史 +長岡技術科学大学,

規矩大義 -関東学院大学,

保坂吉則 新潟大学,

東畑郁生 +東京大学,

会場の皆様方と

復旧にあたって柏崎市山本団地の方々がとられた対応

地震後に大規模盛土造成地滑動崩落防止事業を適用して柏崎市と共に暗渠管設置による地区

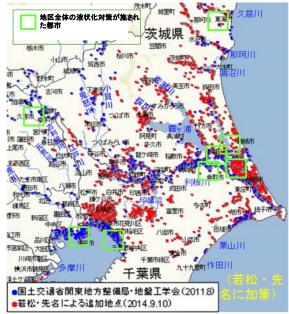




- 地区全体の地下水位 が約2m程度低下。
- この対応事例が東日本大震災後の関東地方の復興に大いに参考にされた。

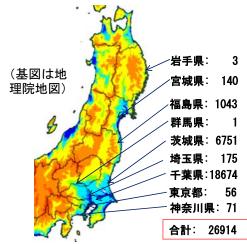
68

(3) 2011年東日本大震災での液状化による市街地の被害



若松加寿江・先名重樹:2011年東北地方太平洋沖地震による関東地方の液状化発生条件と土地条件,日本地震工学会論文集,Vol.15

東日本大震災での液状化による戸 建て住宅の被害数



- *国土交通省都市局調べ(平成23年9月27日 調査時点)
- *津波により家屋が流出した場合等については、上記被害件数に計上されていない。

36



東京湾岸の戸建て住宅の被害状況







6:

東京湾岸の市街地の平面道路の被害状況









市街地全体を一体化して対策を施す必要性

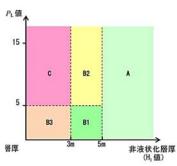
- ▶ 市街地が一面に液状化すると、戸建て住宅が沈下・ 傾斜するだけでなく、ライフラインが停止して生活 できなくなる。
- ▶ 平面道路にも通行障害が起きるので、消防車などの 緊急車両の通行や避難行動に支障が起きる。
- ▶ 市街地全体を一体化して対策を施すことが望まれた。

東日本大震災で液状化により被災した市街地の復興に 対し、国土交通省で半年後に創設され、実施されたた

市街地液状化対策事業



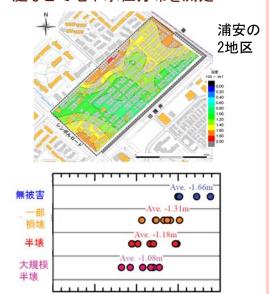
国土交通省都市局都市安全課「市街 地液状化対策推進ガイダンス」



(b) H₁~P_L判定図

(国土交通省による)

住民の方にご協力いただき住宅の 庭などで地下水位分布を測定



安田進・石川敬祐:地下水位低下が戸建て住宅の 液状化対策に与える効果,日本地震工学会論文集 第15巻, 第7号 (特集号), pp.205-219, 2015.

地下水位 (GL m)

千葉市と神栖市における排水 管設置状況





住民の方にアンケートを配布・ 回収してもらった結果

□直後

□~5分後 □~10分後

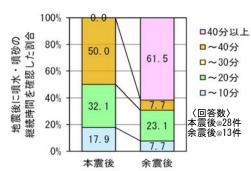
□~15分後

口~20分後

(1) 噴水・噴砂の発生時間



(2) 噴水・噴砂の継続時間



本震直後から10 分後位ま での間に噴水・噴砂が発 生し始め、約半分の地点 で29 分後の余震までに-度噴出が止まったが、残 りの地点では余震時まで 噴出が継続。

本震で一度噴出が止まっ た地点でも、余震直後に 再び噴出が発生。

余震が液状化による被害 を甚大にした可能性があ り、短時間で続いて発生 する余震の影響も頭に入 れておく必要がある。

石川敬祐・安田進・萩谷俊 吾:千葉県浦安市の液状化現 象の発生状況調査、日本地震 工学会論文集, Vol.12, No.4, pp.56~64, 2012.

最近発生した不思議な地盤災害の調査

(1) 2016年熊本地震により阿蘇カルデラで発生した帯状陥没被害

(4月14日 Mj=6.5、4月16日 Mj=7.3)





安田進・大保直人・島田政信・ 千葉達朗・永瀬英生・村上哲・ 先名重樹·北田奈緒子·石川敬 祐:2016年熊本地震により阿蘇 カルデラで発生した帯状陥没の メカニズム、日本地震工学会論 文集、Vol.21、No.1、pp.135-158、 2021.

過去の類似被害 で説明できる か?

- ①別府ー島原地溝帯に 関係した南北方向 の引張り力による 正断層型の落ち込 みで発生した可能 性
- ②布田川断層に続く横 ずれ雁行断層によ り発生した可能性
- ③液状化により発生し た可能性
- ④カルデラの縁の特異 な地層構成に起因 して発生した可能 性

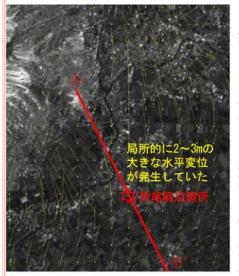


帯状陥没で生じた 被害

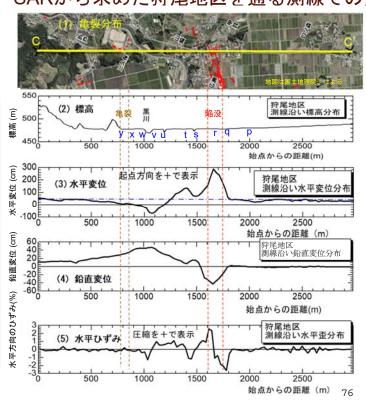
- ☆陥没区域内の家屋 の沈下
- ☆陥没境界上に位置 した家屋の傾斜・ 変形
- ☆農地の被害
- ☆道路の通行障害
- ☆上・下水道の寸 断·破損
- ☆黒川のコンクリー トブロック護岸の クラック
- ☆送電用鉄塔の傾<mark>斜</mark>

合成開ロレーダー (SAR)による変動量の 測定

地震による水平変位量の分布



SARから求めた狩尾地区を通る測線での変位・ひずみ分布



- ☆全体に40cm程度北西 側(図中左)に水平 変位が発生した。
- ☆q地点からu地点付近 までの範囲が局所的 に北西側に変位した
- ☆その内r地点付近はさらに2.5mほど大きく変位して、そこに大きな引張りひずみが生じたと考えられる。
- ☆v~y地点付近までは 南東側に少し変位したため、両者の中間のt~x地点付近で両 者の動きがぶつかり 合って盛り上がっと考えられる³

狩尾地区の地盤特性 の詳細調査

(1)既往の地盤データの収集

(2)探査

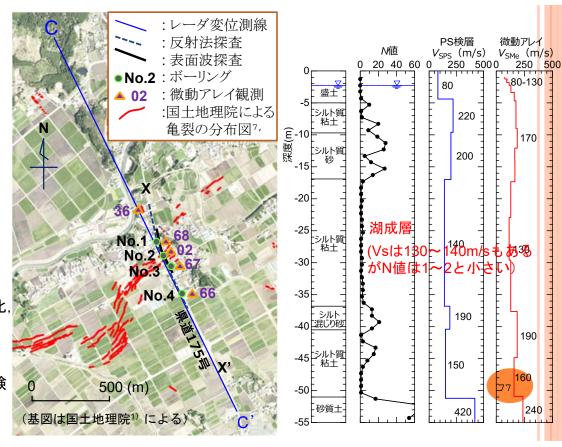
- 表面波探査
- 反射法探查
- 微動アレイ観測

(3)地盤調査

- ・ボーリング
- ・乱れの少ない試料採取
- コア観察
- · PS検層

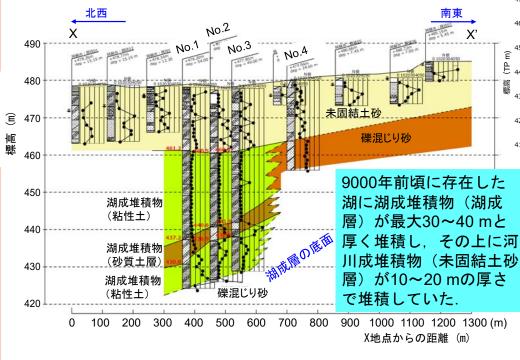
(4)土質試験

- ·物理試験(密度,含水比, 粒度,液性·塑性限界)
- 一軸・三軸圧縮試験
- 圧密試験
- 繰返しねじりせん断試験
- (5)地割れの深さの調査
- SWS



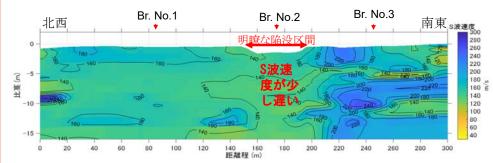
狩尾地区の推定土層断面図

湖成層の自然含水比,液性・ 塑性限界の深度分布



- - ☆湖成層は珪藻と軽石を 含む粘性土で、自然含 水比は200~300%と非 常に高い(液性限界よ り高い).
 - ★三軸圧縮試験の強度は ある程度高いが、一旦 練返すとドロドロの状態になる鋭敏な粘性土 である.

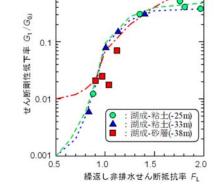
狩尾地区の表面波探査結果



引張り力で陥没が発生したメカニズム 局所的な水平変位 引張り応力 (土圧の減少) なおし込み 未固結土砂層

湖成層のF_とせん断剛性G₁の 低下率との関係

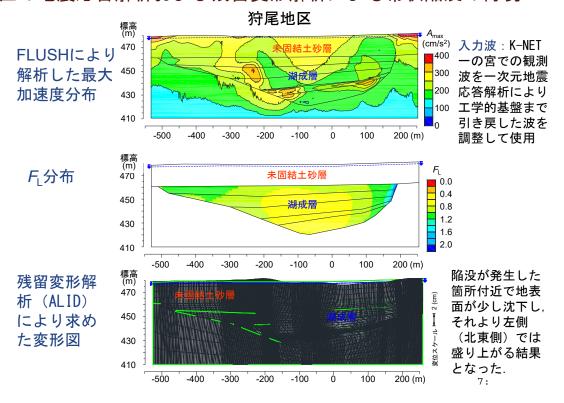
静的強度はかなり強いしっかりしたシルトであるが、標準貫入試験時の衝撃や強震動による繰返しせん断力を受けると、途端にせん断強度やせん断剛性が急減する、崩壊性土の特性を持っていた.



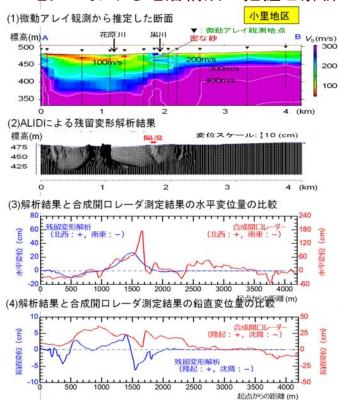
局所的な水平変位により水平 方向の土圧が減少し、未固結 土砂が落ち込むように陥没が 発生したのではないかと考え られた.



狩尾地区の地震応答解析および残留変形解析による帯状陥没の再現

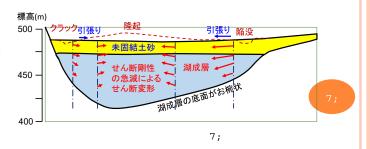


他の3地区における地層構成の把握と解析

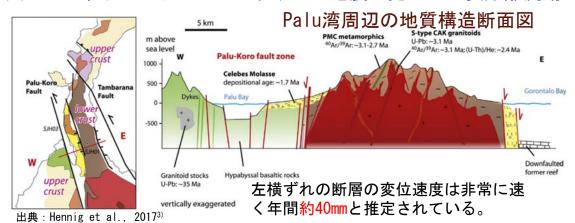


帯状陥没が発生したメカニズムの結論

- ①9,000年前頃に形成されていた湖に、珪藻や軽石を含む間隙比の大きい火山成粘性土の湖成層が 堆積していた。
- ②湖成層の底面はお椀状になり, さらに地表面も中央に向かってわずかに傾斜している地区もあった.
- ③地震動によって湖成粘性土のせん断剛性が急減し、下面傾斜に沿って中央部に回り込むようにせん断変形し、中央は盛り上がった。
- ④この変形によりかつての湖の両側の縁付近に局所的な水平変位が生じ、表層の未固結土砂層が水平に引っ張られ、陥没やクラックが発生した。



(2) 2018年インドネシア・スラウェシ地震で発生した長距離流動



地震発生: 2018年9月28日

Mw: 7.5

震源: Palu市街から北約80km、

深さ約10km

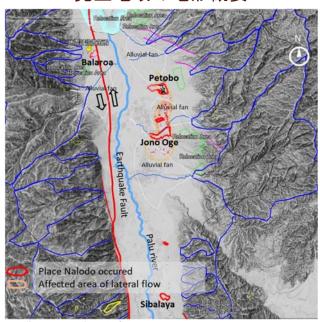
地表断層:約5mの左横ずれ

地表最大加速度: 281cm/s² (EW)



破壊伝播速 度は4.1km/s と速かったと 推定されてい る。

Nalodo発生地域の地形概要



出典:JICA調査団作成

「JICA:液状化地すべり(内陸部)に関する国内支援委員会技術検討書、インドネシア国中部スラウェシ州復興計画策定及び実施支援プロジェクト」による

- ▶パル市の数地区の緩やかな傾斜地盤で長距離流動が発生した。地震とともに大量の地下水も噴き出した。
- >年間降水量は500~900mmと少雨。地震発生前も 降水は観測されていない。
- ➤断層に伴うプルアパート堆積盆にあたる沈降帯により、北北西から南南東にかけて最大幅10km程度の細長い平野が形成されている。平野中央部の深い所では約300 mの厚さで第四系堆積物が堆積。
- ▶ 平野の西側には2000 m級、東側には1000 m級の 山が北北西から南南東に連なっている。中央に は北へPalu川が流れており、東西両側から川に 向って1~3%程度の緩やかな傾斜地盤が形成され、表層は東西両側の山から流出した土砂で覆 われている。
- ▶ JICAで「インドネシア国中部スラウェシ州復興 計画策定及び実施支援プロジェクト」の調査の 一環として検討が進められた。

Jono Ogeにおいて住民の方が撮影された流動状況

☆地震発生後約60 秒で、地盤と がかかい がかない がかない がかない がの家が倒壊し が乗りが倒壊し が乗りが が乗り、 がした。 が乗り、 が乗り、 がした。 が乗り、 がした。 がいました。 はいました。 がいました。 はいました。 はいまた。 はいまた









出典:JICA調査団作成

「JICA:液状化地すべり(内陸部)に関する国内支援委員会技術検討書、インドネシア国中部スラウェシ州復興計画策定及び実施支援プロジェクト」による



出典:JICA調査団作成

「JICA:液状化地すべり(内陸部)に関する国内支援委員会技術検討書、インドネシア国中部スラウェシ州復興計画策定及び実施支援プロジェクト」による

Jono Ogeにおける地物の移動量と地形変化





地震前と地震後(2018 年 9 月 30 日)AW3D 衛星画像を使用

J1 Long Profile 1:20 被災前の地形断面 被災前の地盤勾配1.2~1.8% 被災後の地形断面表層地盤の移動量 (約0.7~1")

地震前と地震後 (2018年9月30日) AW3D DTM 使用

出典: JICA 調査団作成

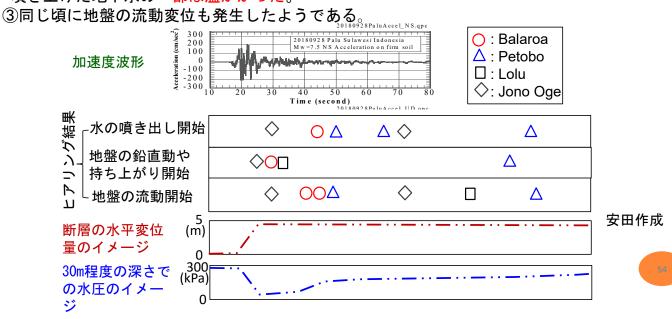
地震によって西側の1地区、 東側の4地区の緩やかな傾 斜地盤で、長さ1~3 km、 幅数百mの表層土(厚さ数 m)が滑って下流側に向 かって流動し住民に甚大な 被害を与えた。



「JICA:液状化地すべり(内陸部)に関する国内支援委員会技術検討書、イン ドネシア国中部スラウェシ州復興計画策定及び実施支援プロジェクト」による

住民からのヒアリング結果の概要

- ① 水平揺れが終わったと同時に大きな鉛直動や盛り上がりが発生した。持ち上がった時間は 10秒程度。地盤の唸りや壊れる音が発生した。
- ② 地震の水平動が終ったと同時とか2分程度以内に地下水が噴き上げたり湧き出したりした。 噴き上げた地下水の一部は温かかった。



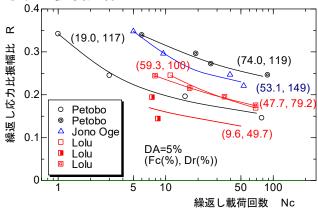
土質試験結果

流動の滑り面になったと判断された層から乱れの少ない試料を採取し液状化試験を行った結果によると、特に液状化し易いとかし難いとかなど、特殊な土とは思われない試験結果となった。

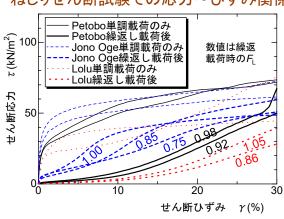
サンプリング状況



液状化強度曲線



ねじりせん断試験での応力~ひずみ関係



「JICA:液状化地すべり(内陸部)に関する国内支援委員会技術検討書、インドネシア国中部スラウェシ州復興計画策定及び実施支援プロジェクト」による

水質分析結果

流動内に常時湧水帯がある!



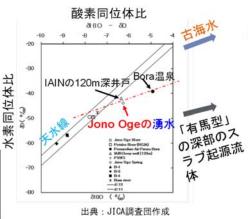
水質調査地点(全域)

河川水4試料 温泉保養地2試料 深井戸3試料 浅井戸3試料

注:地震時の 噴出水は採水 できていない。

流動内の湧水11試料 ボーリング揚水試験時 の採水(深度別に複数 試料)

合計37サンプル



- ▶流動範囲内には傾斜に直交する線上に湧水帯が形成され常時地下水が湧き出ている。
- ▶ 地震後に採水した湧水の水質 検査の結果(水素・酸素同位 体比の関係図)によると、 Jono Ogeの湧水は天水線から 少し「有馬型」の深部のスラ ブ起源流体と古海水の間に寄 る結果となった。
- 常時湧水帯は断層の割目や破砕帯に沿って地下から湧き上がってきている深層水に、表層の天水(東西両側の山とか、灌漑用水、南の山地からの浸透水を含む)が加わって希釈された水が、地表に湧き出して形成されているのではないかと考えられた。

数100mもの長距離流動を発生させた原因として考えられたこと

→大量の地下水の噴出

地震時に地下水が噴出したメカニズムとして考えられていること

- ①浅層地盤が液状化して地下水が噴き出した。
- ②東や西の背後の山や灌漑用水から流れてくる浅層の地下水が被圧していて噴き出した。
- ③横ずれ断層の割目や破砕帯にあった被圧水が噴き出した。

これらの三つの可能性があり、JICA国内支援委員会の検討書では結論が絞れず、これらが<mark>併記</mark>されている。

安田は「③横ずれ断層の割目や破砕帯にあった被圧水が噴き出した。」と考えている。

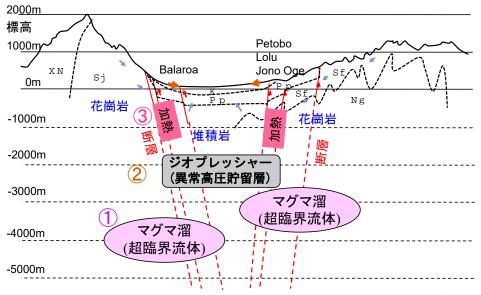
(4) 断層割目や断層帯から常時湧水しているメカニズムとして考えられること

地震前の湧水や地震時の噴水そのものではないので断定できないが、湧水帯は断層の割目や破砕帯に沿って地下から湧き上がってきている深層水に、表層の天水(東西両側の山とか、灌漑用水、南の山地からの浸透水を含む)が加わって希釈された水が、地表に湧き出して形成されているのではないか?

安田作成

深層水の可能性として考えられること (下の図は単なるイメージ)

- ①深部に海洋プレートが沈み込んでいてスラブ起源流体による。
- ②平野の下には堆積岩が存在しジオプレッシャーが貯留している。
- ③断層面に接して下部に高温の花崗岩が貫入していて比較的浅部の地下水が沸騰してそれが地表に向かって湧き出している。

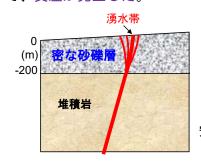


安田作成

45,湧水帯および付近で地震時に地下水が噴き出したメカニズムとして考えられること

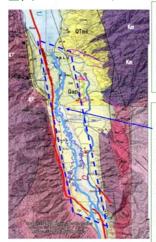
- a) 断層変位で深層の岩盤の割目が繋がって浅部の水が噴き出した。
- b) 断層の急速な動きで浅層の砂礫層内で間隙水圧が急減し、砂礫層内の地下水の沸点が下 がり沸騰して蒸気が発生し、それが浅部の地下水を押し上げて噴出が生じた。

〈理由 1〉: せん断によるダイレタ ンシーによって間隙水圧が急減 断層の急速な変位により、地下水位 以下の飽和した密な砂礫層は急速に せん断させられ、正のダイレタン シーが発生し、体積が膨張しようと するが、急速載荷で非排水状態なの で、負圧が発生した。



安田作成

〈理由2〉: プルアパートによって体積が膨張する力が働いた



西側の断層 は急速にず れ、5mにも 及ぶ大きな 左横ずれ地 表断層が生 じた。

このあたり の範囲内で 局所的に南 北に急速に 拡がるプル アパートが 発生し、局 所的に地表 面が少し陥 没したので はないかと 考えられる。

東側の伏在 O Pander

断層はあま り動かず、 Jono Oge の流動域の 南側で圧縮 リッジが生 じた程度で あった。

安田作成

注:地質図は「JICA:液状化地すべり(内陸部)に関する国内支援委員会技術検 討書、インドネシア国中部スラウェシ州復興計画策定及び実施支援プロジェク ト」による

地震時に横ずれ断層区域で熱水が噴き出したと考えられる他の事例 1999年トルコ・コジャエリ地震によるイズミット湾岸の被害

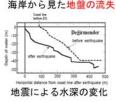
ディールメンデレでは



空から見た地盤の流失



海岸から見た地盤の流失





- ▶ ディールメンデレでは海岸線 の間口250~300 m、奥行き 100mあまりの地盤が海側に向 かって流失し、公園やホテル などの構造物を巻き込んで数 百人の人的被害を出した。
- ▶ デイールメンデレでは10~20 m程度の厚さで海底の滑りが 発生していた。原因として、 ①海岸に扇状地性の砂礫層が 堆積し、②安息角に近い勾配 で堆積、③地震により砂礫層 に慣性力が加わりすべったの ではないかとまず考えられた。

地盤工学会:1999年トルコ・コジャ エリ地震調査報告書、2000.

地震後に住民の方々からヒアリングが行われた結果によると、流失した建物にいた多くの人が 行方不明になった(地震発生は夜中)が、助かった従業員などから以下のような証言が得られ ていた。

- 1)海水温度が40度位の高温であった。
- 2) 海に流され生還した人が背中に火傷を負って治療を受けた。その人の話によると、
 - ①轟音を聞きつけて海の方を振り返ると海が割れ夕焼けのような赤い光が見えた、
 - ②直後に波にさらわれ木か電柱につかまっていたところ<mark>熱い泥のような波</mark>に運ばれて陸にた どり着いた、
 - ③全身泥まみれで漁師に助けられて応急措置を受けた、
 - ④海に投げ出されたときあたりに沸騰していない湯をかけられた時のような火傷を負った
- 3) 地震と同時に海中からなにか火山爆発のような熱い物が吹き上げた。

したがって、断層に沿って地震時に熱水が噴き出してきたと言えよう。そして、そのために 地下水の噴き上げで海岸地盤の滑りが発生したのではないかとの考えが出てきている。

→まだまだ分かっていない地盤災害があるはず!

調査時にも既成概念にとらわれない調査が必要

ご清聴有難うございました

94