

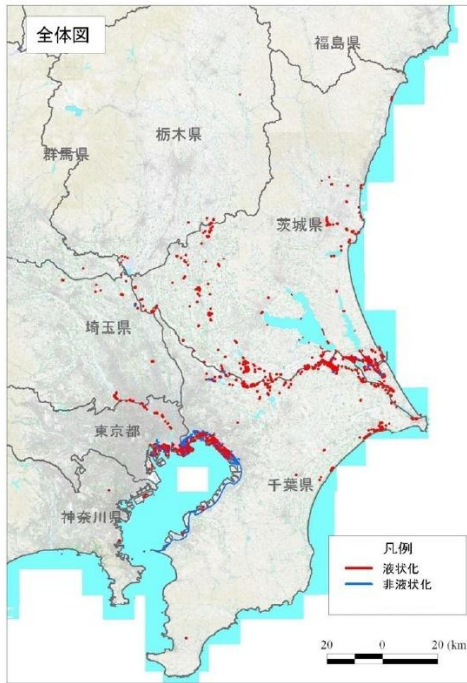
兵庫震災記念21世紀研究機構
21世紀文明研究セミナー
12.19.2012 人と防災未来センター、
県立大学防災教育センター大教室

地震による地盤液状化のメカニズムと被害 東日本大震災の大都市圏の教訓

京都大学大学院工学研究科
人と防災未来センター上級研究員

岡 二三生

液状化による住宅の被害



東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤
液状化現象の実態調査関東地方整備局、地盤工学会,2011

1都6県(茨城県、栃木県、群馬県、千葉県、埼玉県、
東京都、神奈川県)の96市区町村

関東地方液状化発生地点

千葉県東京湾沿岸の埋立地では液状化による被害が大きく、
噴砂の発生、地盤の不同沈下による建物傾斜、ライフラインの利用停止など



千葉市美浜区磯辺



写真24 建物外観 (左端が大きく傾斜した住宅)



写真25 傾斜した住宅 建築研究所報告書

浦安市の液状化被害の概要



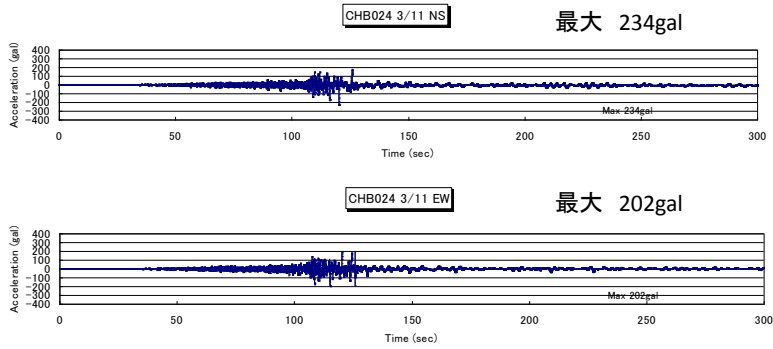
浦安市での液状化被害の概要図（建物・道路）
 資料 浦安市 東日本大震災への対応 平成23年7月22日 に加筆

液状化被害 浦安市（H23,4月4日）



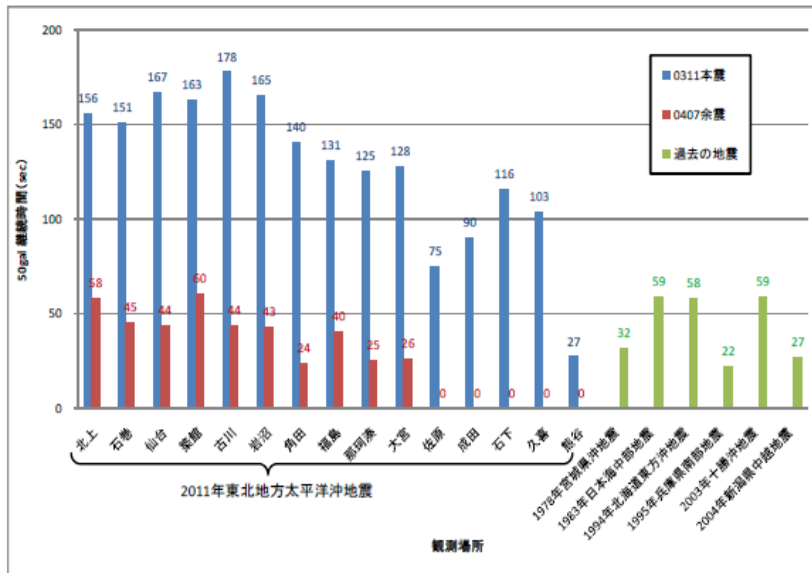
防災科学研究所 K-NET

K-Net 稲毛(液状化が観測された地点)



非常に長い地震動継続時間
120秒以降液状化により波は減衰し、周期も大きくなっている

地震動継続時間 土木研究所



被害と継続時間

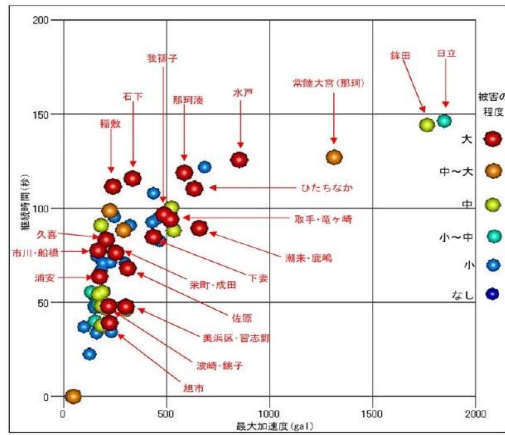


図 3.5.11 最大加速度、50gal 以上の強震継続時間と被害の程度の関係

日本建築学会による調査
地震動継続時間は地盤の悪いところで被害を大きくさせている

液状化による被害

- 噴砂
- 傾斜
- 沈下
- 上部構造の損壊
- 駐車場など周辺構造物
- ライフラインの被害

沈下と傾斜角

沈下と傾斜角
沈下30cm以上で
60%が傾斜角1/100
以上となり健康被害
が発生する

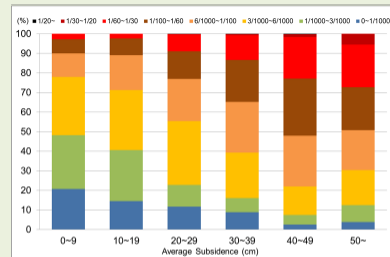


図 平均地盤沈下量と建物平均傾斜角との関係
(東日本大震災における浦安市の液状化による建物被害)
(Kohji TOKIMATSU & Kota KATSUMATA, LIQUEFACTION-INDUCED DAMAGED TO BUILDINGS IN URAYASU CITY DURING THE 2011 TOHOKU PACIFIC EARTHQUAKE, Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, March 1-4, 2012, Tokyo, Japan)

健康被害

傾斜	角度	感じ方
1/1000	0.06°	違和感を感じません。
3/1000	0.17°	違和感を感じます。
6/1000	0.34°	傾いていることを認識します。
10/1000	0.57°	傾いていることを認識し、苦痛を感じます。
15/1000	0.86°	気分が悪くなるなど、健康被害が起きます。

出典：日本建築構造技術者協会千葉支部より

液状化被害による健康被害については、1964年の新潟地震以降本格的に始った。特有のものとして、傾斜による視覚障害や 平衡感覚障害でめまいや吐き気などが生じる。

個人差はあるが、傾斜が1/100以上で障害が起これと考えられるが、昨年の傾斜による被害認定では、1/100で半壊と認定されることになった。

内容

- 液状化による被害の認定

地盤被害による住家の被害認定は以下の表のとおりである。

内閣府事務連絡(平成23年5月2日)「地盤に係る住家被害認定の調査・判定方法について」によって、新たに被害の判定基準認定が以下の表2.2のように決まった。

表-2.2

地盤被害に伴う傾斜(床・基礎を含む)及び潜り込みに係る住家の被害認定

傾斜	1/20 以上 ※不同沈下がある場合	1/60 以上 1/20 未満 ※不同沈下がある場合	1/100 以上 1/60 未満 ※不同沈下がある場合	1/100 未満
潜り込み				
床上 1m [1.5m]	1次・2次 全壊	1次・2次 全壊	1次・2次 全壊	1次・2次 全壊
床まで [0.5m]	1次・2次 全壊	1次 大規模半壊 2次 $35+25x+\alpha$	1次 大規模半壊 2次 $20+25x+\alpha$	1次 大規模半壊 2次 $10+35x+\alpha$
基礎天端下 25cm まで [0.2m]	1次・2次 全壊	1次 大規模半壊 2次 $35+\alpha$	1次 半壊 2次 $20+\alpha$	1次 半壊 2次 $10+10x+\alpha$
それ以下	1次・2次 全壊	1次 大規模半壊 2次 $35+\alpha$	1次 半壊 2次 $10+\alpha$	1次 被害なし 2次 <通常の被害認定>

x: 1階の床面積/住家の延床面積、α: 建具、設備等の被害

内容

- H23年5月2日「液状化現象の被害判定(内閣府)地盤に係る住家被害認定の調査・判定方法について」では、以下のように傾斜による認定が行われた。

液状化による被害の認定は、全国で初めて、鳥取県西部地震後に米子市が自治体として基準を設定している(浅井、2004)。その判断基準では、現在の大規模半壊が半壊に対応していた。昨年2011年の改正で、健康被害が顕在化する1/100の傾斜以上が半壊となり、改善されている。

- (1)傾斜による判定
 - 傾斜が1/20以上の場合は損害割合を50%以上とし、全壊と判定する(従前と同じ)
 - 傾斜が1/60以上1/20未満の場合は損害割合を40%以上50%未満とし、大規模半壊と判定する。
 - 傾斜が1/100以上1/60未満の場合は、損害割合を20%以上40%未満とし、半壊と判定する。

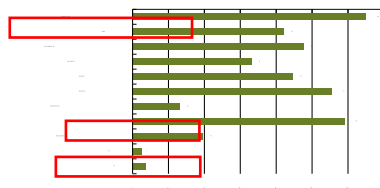
(2)住家の潜り込みによる判定

- 住家の床上1mまでのすべての部分が地盤面下に潜り込んでいる場合は、損害割合を50%以上とし、全壊と判定する。
- 住家の床上1mまで地盤面下に潜り込んでいない場合は、潜り込んだ程度に応じて、部位の損害割合を判定し、被害認定を行う。

宅地の液状化に関する法制度

- 宅地造成等規制法と都市計画法:**
 盛土の締固めなどの対策が義務づけられている。ただし、地盤の沈下や崩壊に対するものであり、液状化については完全なものではない。
- 公有水面埋立法:**
 災害防止に十分な配慮をすることが明記されている。
- 建築基準法:**
 施行令第38条:建築物基礎の安全性の確保を規定されている。
 施行令第93条(2001年改正)で、液状化の検討が盛り込まれた。
 液状化地盤の許容支持力を除外。
 但し提出図書の省略が認められている木造2階建てなどの4号建築物では提出図書の省略が認められており、大半の1戸建住宅には反映されない。
- 国土交通省告示第1113号:**(平成13年7月2日、平成17年7月改正)では、地盤の調査方法(SWSなど)や支持力の決定法が示され、液状化の恐れのある地盤や軟弱な地盤に対する支持力の定め方が規定されているが、対策法など明示されてなく不十分である。
- 建築物の耐震改修の促進に関する法律(平成7年法律第123号)第4条第1項の規定に基づく 国土交通省告示184号 平成18年1月25日**
 - ハ 地震時に液状化に恐れのある地盤の土地にあつては、当該地盤の液状化により建築物に構造耐力上著しい支障が生じることのないように適当地盤の改良等が行われていること。促進であつて義務ではない

アンケート調査結果

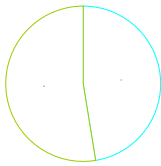


戸建住宅での被害と対策

- ・建物被害が発生し、生活面だけでなく、財産面での被害も見られた。
 →既存住宅への液状化対策や液状化を含めた住宅の性能表示など、埋立地での戸建住宅の安全性を高めていくことが重要。
- ・道路や上下水道・ガスなどライフラインの被害が発生し、生活に大きな影響を与えた。
 →ライフラインの液状化対策や液状化被害を想定した防災対策が必要。

岡良、住宅地での液状化被害の住民の被害に関する研究—千葉市美浜区磯辺8丁目を対象として—日本建築学会大会学術講演梗概集 No.7417pp.913-914,2012 (千葉大学建築都市史研究室岡良)

アンケート調査集計結果（健康被害）



罹災証明書 判定結果	回答数	健康被害 該当数	健康被害 割合
大規模半壊以上	34	17	50.0%
（全壊）	2	2	100.0%
（大規模半壊）	32	15	46.9%
半壊	30	12	40.0%
一部損壊	48	19	39.6%
不明	25	6	24.0%
罹災証明書 発行	137	71	51.8%
未発行	19	3	15.8%
合計	156	74	47.4%

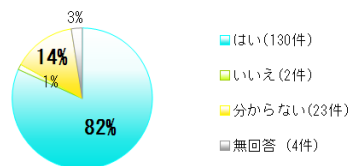
・約半数の世帯で健康被害を受け、多くの世帯で罹災証明書の発行を受けている。

・一部損壊の世帯のうち、約4割の世帯が健康被害を受けている。
（参考：一部損壊の場合、国や県からの医療費の免除は適用外）

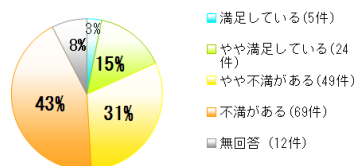
健康被害
戸建住宅で多く発生し、主に平衡感覚障害による症状である。
罹災証明書の判定区分に関わらず症状が発生している。
→一部損壊の世帯への医療費の支援が必要と考えられる。

アンケート調査結果（千葉市）（千葉大学建築都市史研究室岡良氏）

問14 液状化に関して法制度（建築基準法など）を改善すべきだとおもいますか？



問15 行政の対応について



液状化を知っていた(82%)が、今回の被害の可能性が
ら思っていた(38%)

制度の改善

日本建築学会 復興・復旧WG「液状化の基礎知識」にも示されているように、法的には、宅地の液状化は法的な制度は十分ではなく、制度として安全が確保されてはいない。今回の液状化被害では、住民は法制度の改善を望んでおり、液状化被害を受けた住民から不動産業者が訴えられることまで起きている。

規範的期待、このくらいの地震では液状化による被害は受ける可能性は低いと考えていたことになる。このように、規範的期待が裏切られると感ずる場合、つまり公共的な規範への疑いは、同様な条件の他者との共同的な主観の共有へつながるが、不満の蓄積は正当な対応を見失わせることにもなる。また、規範的期待が損なわれたと感ずる場合、それは政治への不信や地域コミュニティへの崩壊につながりかねない。

まとめ 住宅の液状化被害

- 東日本大震災では、関東平野とくに東京湾湾岸を中心に液状化による住宅被害が多発
- この原因は、軟弱な地盤へ継続時間の長い地震動が作用したことと、住民や行政ともに、液状化についての知識はあったが、ここまでの被害想定を想定しておらず、対策が不十分であったことによると思われる。しかし、一戸建て住宅に対しては、建築基準法などの法制度が不十分であることに加え、経済的な対策方法が開発されてこなかったことも大きな原因であり、既設住宅の対策の選定は現在も難航している。
- 今回の被害は、住民の規範的期待を裏切るものである。つまり、当然住宅はこの程度の地震では大丈夫だと思っていたことに対して、建築基準法など現在の法制度がその期待を裏切っているため、今後は、住民が対策法等のいくつかのメニューから実態にあった方法を選んでも大きな被害は受けたくないような取り組みが必要であろう。
- 制度の改善が望まれる。また、地盤工学会などでは、被害調査や対策法に関する検討がなされ、その結果が公表されているが、宅地の液状化による住家の問題は、基本的に個人住宅に関するものであるため、住民の意識の把握にもっと力を入れるべきではないだろうか、この点は再考の余地が大きい。

宅地盛土の被害

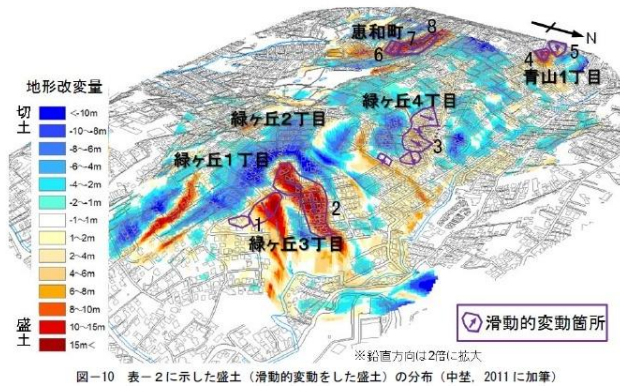


図-10 表-2に示した盛土（滑動的変動をした盛土）の分布（中埜，2011に加筆）

谷埋め盛土での被害が多かった
高い地下水位も影響

仙台市の丘陵地における地すべり性地表変動の状況、佐藤、中埜、国土地理院時報、No.112,pp.153-161,2011

杭基礎を持つ建物の被害

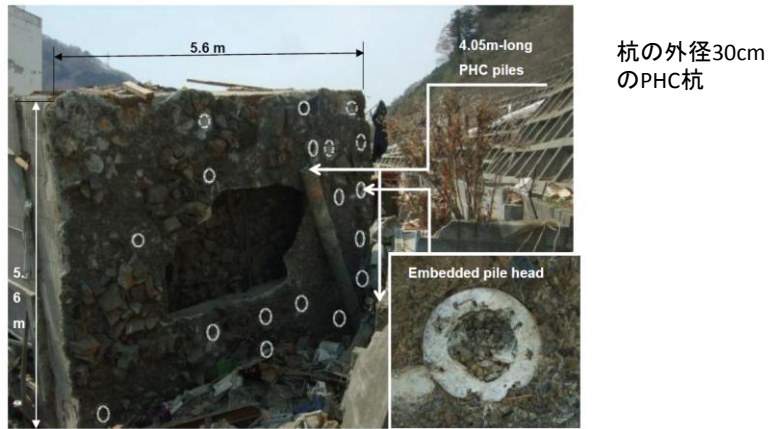


女川町宮城県石巻市女川町
遡上高34.7m 浸水高18.5m
市街地を1km以上遡上し、1000人以上の行方不明者を出し、約350人の方々の死亡（宮城県警察本部4月28日時点）。

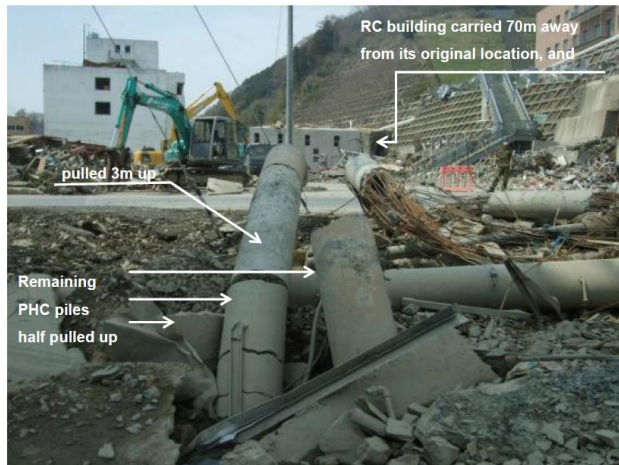
女川町（震度6弱）

女川原子力発電所岩盤面
O.P.-8.6mの加速度波形
MAX=467Gal(NS)

杭基礎を持つ建物の被害



土木学会東日本大震災被害調査団報告
川島一彦、小長井一男 2011



引き抜けた杭(土木学会報告書2011より)

杭基礎を持つ建物の被害

- 女川町における杭基礎を有する鉄筋コンクリート(RC)構造物被害
- 建物(奥行、幅、高さ15.4m)が基礎の杭ごと引き抜かれ70m流された。女川役場で浸水高14m。
- 原因は津波による水平力だが、その前に液状化が発生し、地盤が劣化した可能性が高い。
- 住民の証言:地震発生直後地面から泥水が湧き上がってきたという。N値は10以下で液状化の発生が予測される地盤 建築研究所、関東学院大学や東北大学による調査

土木学会東日本大震災被害調査団報告
川島一彦、小長井一男 2011

女川町の地盤(建築研究所2011)



8-6 地下水位 (m) 1.90

深さ (m)	土質	単位体積重量 (t/m ³)	有効上載圧 (kgf/cm ²)	SPT-N値	細粒分含有率 F _c (%)	50% 粒径 D ₅₀ (mm)	補正 N _v	液状化 抵抗比 R _{li}	液状化安全率 F _l			(液状化による) 震動中の最大水平変位分布 (cm)		
									300gal	400gal	500gal	300gal	400gal	500gal
1.3	埋土 (粘性土を多く含む砂層)	2.10	0.273	5								23.3	23.9	24.0
2.3		2.10	0.443	2	15	2.0	0.4	0.126	0.489	0.365	0.263	23.3	23.9	24.0
3.3		2.10	0.553	5	15	2.0	12.3	0.148	0.500	0.375	0.300	19.8	29.2	20.3
4.3		2.10	0.663	4	15	2.0	10.0	0.130	0.438	0.327	0.262	17.2	17.4	17.4
5.3		2.10	0.773	3	15	2.0	9.7	0.128	0.365	0.266	0.237	14.1	14.2	14.2
6.3		2.10	0.883	2	15	2.0	8.7	0.121	0.365	0.273	0.219	10.6	10.6	10.6
7.3	シルト	2.10	0.993	3	15	2.0	8.4	0.126	0.374	0.281	0.225	6.6	6.7	6.7
8.3		2.10	1.103	9	15	2.0	11.5	0.140	0.414	0.311	0.249	3.9	3.9	3.9
9.3		1.75	1.203	3								0.0	0.0	0.0
10.3	黄砂	1.75	1.270	2								0.0	0.0	0.0
11.3		1.75	1.350	3								0.0	0.0	0.0
12.3		1.75	1.420	2								0.0	0.0	0.0
13.3		1.75	1.500	2								0.0	0.0	0.0
14.3		1.75	1.570	9								0.0	0.0	0.0
15.3		2.10	1.660	46								0.0	0.0	0.0
16.3		2.10	1.770	50								0.0	0.0	0.0
17.3		2.10	1.860	50								0.0	0.0	0.0
18.3		2.10	1.990	50								0.0	0.0	0.0
19.3		2.10	2.100	50								0.0	0.0	0.0

地盤変位 D_{cy}(深下層 S) (cm) 23.3 23.9 24.0
液状化の程度 (cm) 大 大 大
[F_l = 35%の場合]
地盤変位 D_{cy}(浅下層 S) (cm) 17.5 18.4 18.5
液状化の程度 (cm) 中 中 中

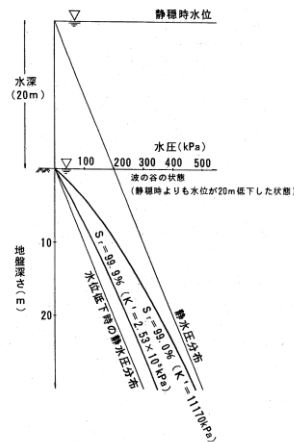
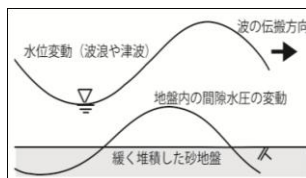
図 11.3-2 津波で転倒、あるいは12歳された杭支持構造物の位置 (図面は電子図上より)

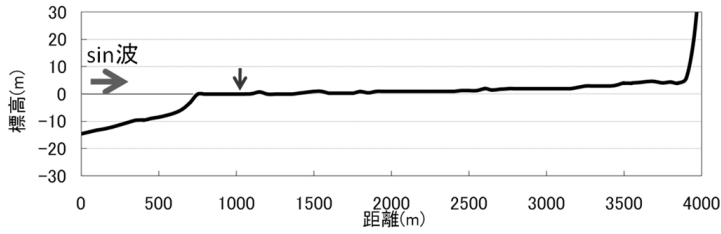
土木学会東日本大震災被害報告書2011

女川の地盤(B6地点)

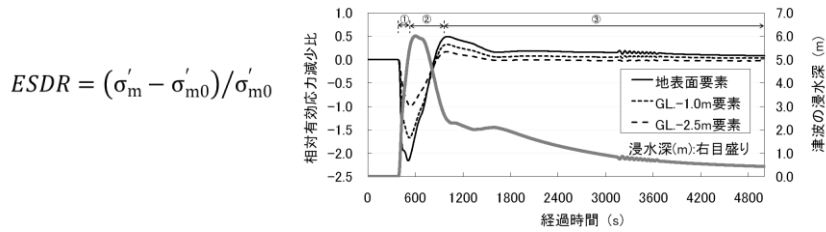
- 0-8.3mまでN値2-6の埋土(粘性土を多く含む砂礫)
- 8.3-14.3mまで: N値2-9のシルト
- 14.3m以深: N値46-50の頁岩
- 杭の長さは10-20m程度

波浪作用下の海底地盤





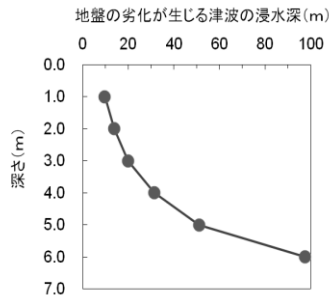
御坊市の断面2次元モデル地形



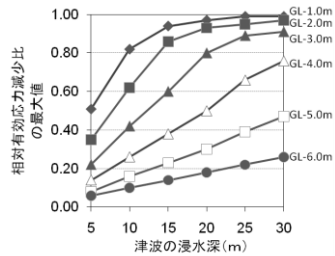
$$ESDR = (\sigma'_m - \sigma'_{m0}) / \sigma'_{m0}$$

N1=5地盤での代表地点における地表面要素, GL-1.0m要素, GL-2.5m要素の相対有効応力減少比

津波による液状化

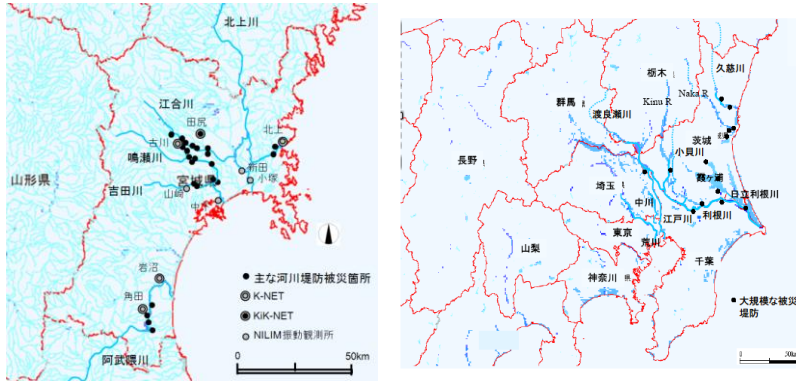


津波による地盤の劣化を生じさせるのに必要な津波の浸水深(m)と地盤の深さの関係 (T=20min, N1=5.0) ESDR>0.8



相対有効応力減少比の最大値と津波の浸水深の関係(T=20min, N1=5.0)

河川堤防の被害



宮城県と関東地方の主な河川堤防被災箇所(国土交通省国土数値情報(国土情報ウェブマッピングシステム)使用)

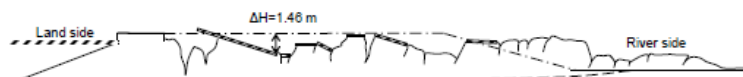
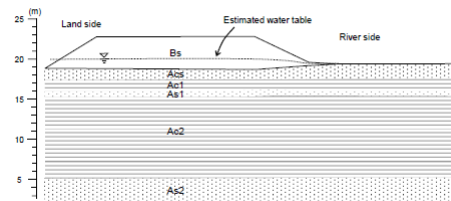
江合川 堤防

Earthquake disasters



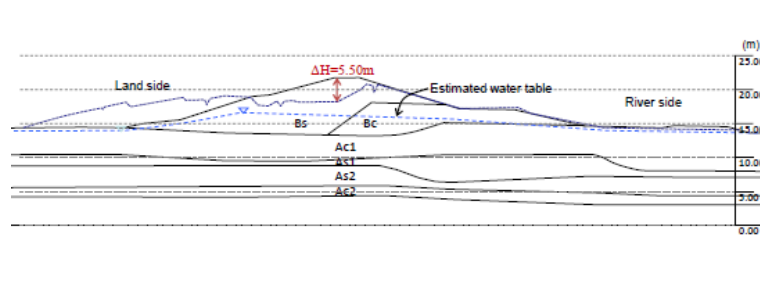
江合川左岸27.6k付近(堤防亀裂・沈下)

Tohoku Regional Development Bureau of MLIT, 2011



堤防被害例

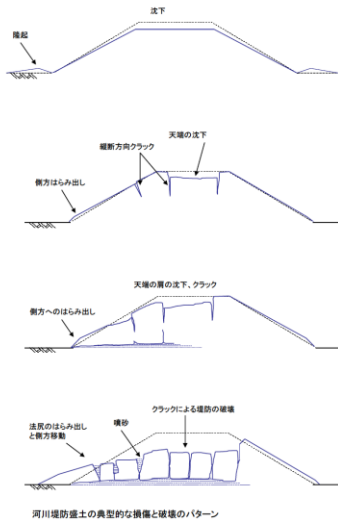
- 下中目上流, 鳴瀬川
- (東北地方整備局, 2011)



河川被害 まとめ

- 全国: 2115箇所
- 東北地方: 緊急復旧堤防は29箇所であり、青森県の馬淵川、岩手都宮城県の北上川、江合川、鳴瀬川、吉田川、名取川、阿武隈川などの堤防である。
- 宮城県管轄では、146の河川の611箇所被害を受けた。迫川、七北川などの21河川の25箇所を含んでいる。福島県では、210箇所堤防や河川構造物が被害を受けた。
- 関東地方では、国土交通省関東地方整備局管内での河川堤防や河川構造物の被害は939箇所であり、大被害を受けた堤防は55地点、中レベルの被害は149地点、小レベルの被害は735地点である。
- 茨城県管轄では、106箇所、国土交通省管轄では343箇所であり、利根川、霞ヶ浦、久慈川、那珂川、涸沼川、新利根川の堤防が被害を受けた。千葉県では、利根川の右岸や江戸川で堤防の被害を受けた。
- 埼玉県では、江戸川、幸手市関宿で、中川の堤防も被害を受けた。また、東京では、荒川の河川敷で液状化が発生した。
-

被害の形態



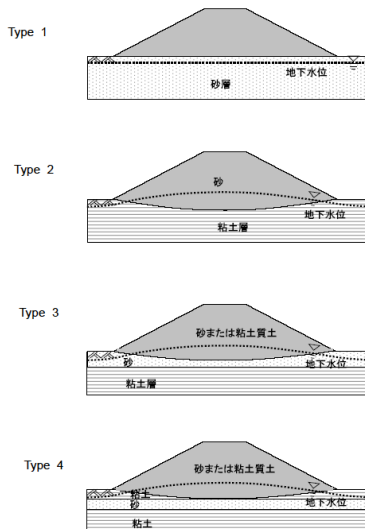
被害の形態: 沈下、クラック、法面のはらみ出し、ブロック状の破壊と側方への移動などである。

そのメカニズムは、

- (1) 基礎砂地盤の液状化、
- (2) 地下水面以下となった堤体砂質材料の液状化、
- (3) 津波による越流と侵食が主な原因と考えられる。

(2)の原因として、堤防下の厚い粘土地盤の圧密による堤体の沈下、また他の理由による堤防内の高い地下水位などが考えられる。また、今回の地震では50ガルを超える液状化に影響のある地震動の継続時間が150秒以上と長いことも原因である。

地盤構成



タイプ 1 小貝川、

タイプ 2 阿武隈川(枝野、坂津田)、鳴瀬川(下中の目上流)、那珂川(湊沼)、

タイプ 3 江合川(湊尻上流、福沼)、

タイプ 4D 吉田川(山崎)、江戸川(関宿)

レンズ状、閉封領域 (佐々木康、1994,1995)

解析ケース モデル地盤

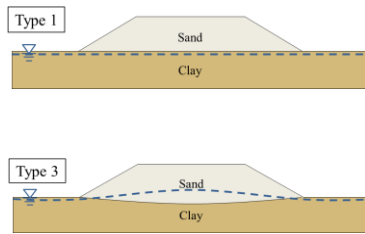


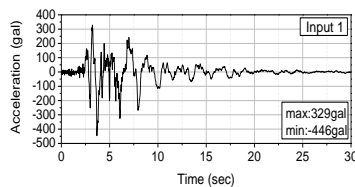
図-2.7 解析に用いた地盤構成

今回の被害について、基礎地盤が粘性土のものについて被害が大きかった、ここでは液状化解析法LIQCA2Dの最新バージョンLIQCA2D11を用いた解析を行った。この方法では、粘性土地盤を弾粘塑性体としてモデル化している。以下に解析された例を紹介する(Oka, Tsai, Kimoto, Kato, 2012)。

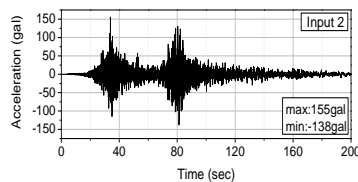
Table 2 Analysis Cases

	Input1	Input2
Type1	Case1-A	Case2-A
Type3	Case1-B	Case2-B

入力地震動



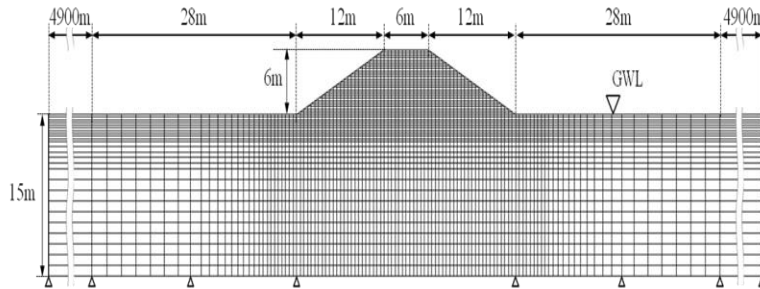
兵庫県南部地震観測動
東神戸大橋
橋軸直角方向成分(地中-34m)
(建設省土木研究所,1995)



東北地方太平洋沖地震観測動
田尻.MYGH06
NS成分(地中-80m)
(Kik-net,2011)

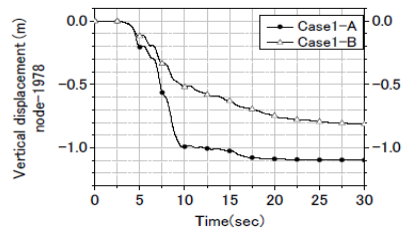
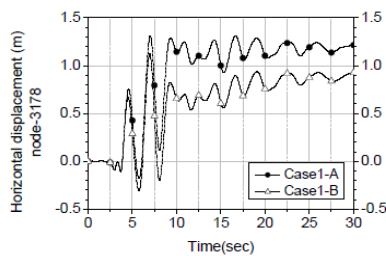
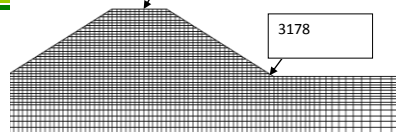
図-2.9 入力地震動

堤防—地盤モデル



図—2.8 解析モデルと有限要素メッシュ

解 1978 結果



図—2.10 Case1—A、Bの天端沈下と法尻水平変位

解析結果

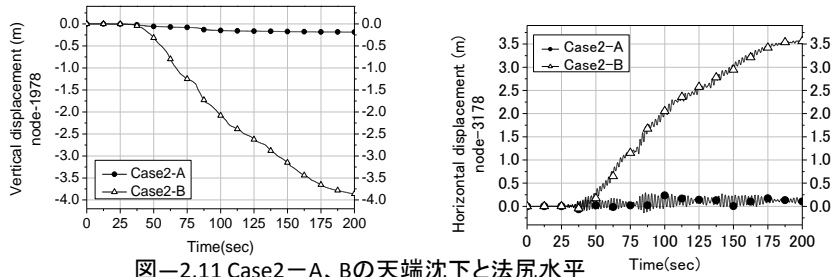


図-2.11 Case2-A、Bの天端沈下と法尻水平変位

入力地震動のタイプのINPUT-1では、Case1-Aの天端沈下、法尻の水平変位が大きいですが、継続時間の長いINPUT-2では、Case-2-Bの変形が大きい。このように、基礎の粘性土層と堤防内部の水位が堤防の変形に大きな影響を与えていることが明らかになった。

変位分布

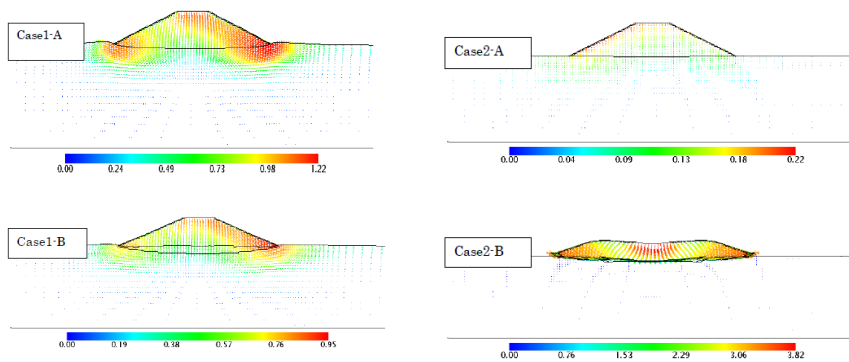


Table 2 Analysis Cases

	Input1	Input2
Type1	Case1-A	Case2-A
Type3	Case1-B	Case2-B

まとめ 河川堤防

- 今回の地震による堤防の被害の主な原因は、2.1節にも述べたように、堤防基礎地盤の液状化のほか、堤防下の厚い粘土地盤の圧密による堤体の沈下、種々の理由による堤防内の飽和領域や津波による越流と侵食と考えられる。さらに、基礎地盤の軟弱な粘土層の存在と長い地震動の継続時間にも注意する必要がある。
- 軟弱粘土層は、継続時間が短くても加速度の大きい地震で被害が大きくなる。
- 復興への留意点として、堤防の被害と地震動の特性を考慮すると、以下の4点に留意すべきある。
 - ・堤防の基礎地盤の強度を高めるため地盤改良を行う。また、堤防を高規格のものにする。
 - ・堤体内の地下水位を低下させ、水分量を減少させるためドレーンを考慮する。
 - ・津波に強い堤防の構築が望まれる。
 - ・基礎地盤での軟弱粘土層の影響を考慮する。

道路の被害

国道4号線、国道6号線、国道45号線などの道路盛土に大きな被害が生じた。

- 1) 沢埋め土など集水地形、
- 2) 基礎地盤の液状化、
- 3) 軟弱基礎粘土地盤
(河川堤防に類似)



2004年新潟県中越地震M6.8 国道117号小千谷市塩殿

集水地形の道路

- 国道6号線福島県双葉郡富岡町
 沢部の埋め立て、盛土高17m、延長20m
 （3車線の崩壊）集水地形
 盛土材料は砂質シルト、湧水による水分
 高い地下水位
 国道6号線宮城県亘理郡山元町
 谷埋め土：盛土高10m、50mで崩壊

基礎地盤の液状化

2011年東北地方太平洋沖地震・・・M9.0の長時間にわたる海溝型巨大地震



福島県双葉郡広野町における国道6号線崩壊箇所では、沼池に近接して建設された盛土が崩壊。
盛土高10-15m、延長約70mが崩壊

道路基礎地盤の公園造成盛り土の液状化
盛土の基礎地盤部の水分量が高かった可能性が指摘されている。

国道6号福島県双葉郡広野町の盛土崩壊箇所
空中写真（出典：Google衛星写真3月18日撮影）

国総研、土木研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震土木施設被害調査速報、国総研資料第646号、土木研究所資料第4220号、2011

軟弱基礎地盤上の道路

- 国道45号線宮城県石巻市鹿又
 沢部の埋め立て、盛土高5-7m、延長m
 盛土下に3-5mの軟弱粘土(N=3-5)区間
 のみ崩壊
 EPS軽量盛り土による拡幅区間

国総研、土木研究所：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震土木施設被害調査速報、国総研資料第646号、土木研究所資料第4220号,2011

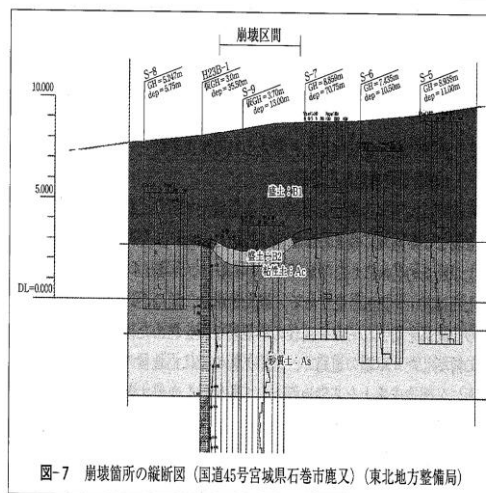


写真-10.28 被災箇所の状況(全景)
(EPSの側壁パネルの柱が2本残されているが、前額が見られる。)



写真-10.29 のり尻部の状況
(近隣の家屋には変状は見られない)

石巻市 鹿又



まとめ 道路

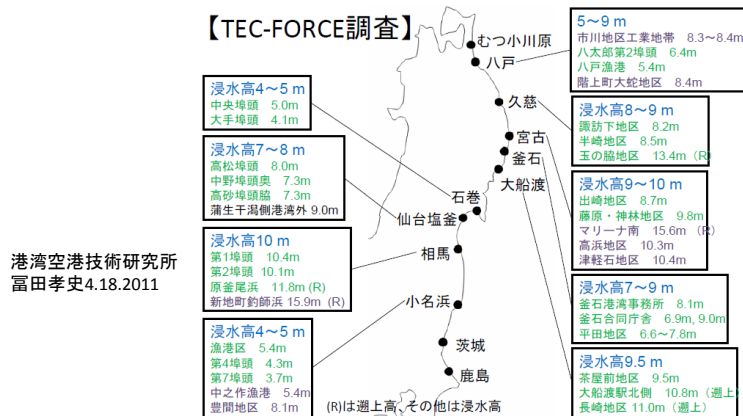
- 集水地形で盛土内の水位が高い
- 軟弱地盤上の盛土の液状化
河川堤防の被害形態に類似
- 傾斜地盤上の道路



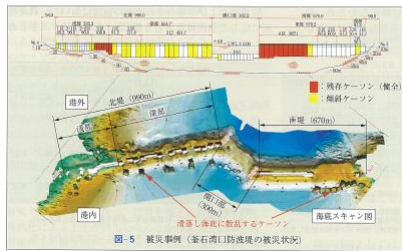
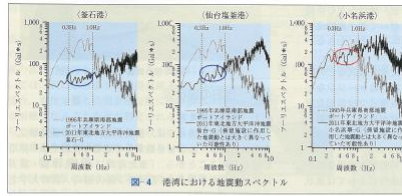
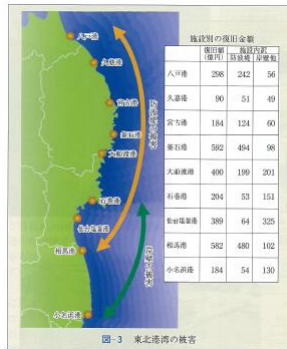
2004年新潟県中越地震M6.8 国道117号小千谷市塩殿

港湾、海岸施設 津波

- 岩手、宮城北部は津波による被害中心
- 宮城福島南部は地震動による被害中心

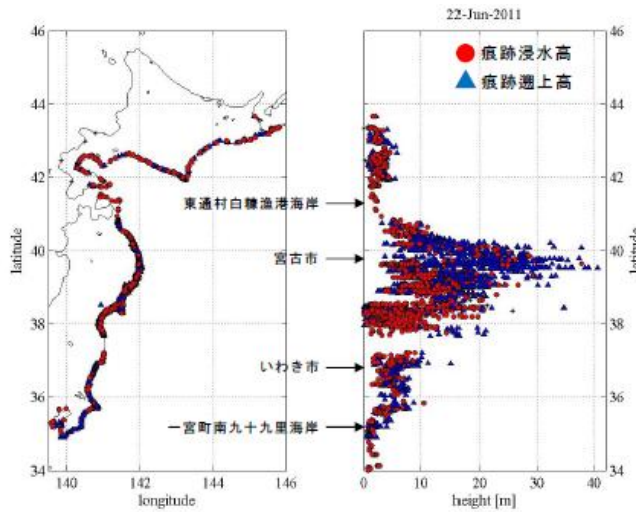


被害の特徴



津田修一、港湾施設の地震津波による被害と復旧の現状、基礎工、2012.8、pp.14-18 より

津波 浸水遡上



※東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ調査結果速報(6月22日)に加筆

国総研、土木研究所：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震土木施設被害調査速報、国総研資料第646号、土木研究所資料第4220号,2011

漁港の被害



小名浜港 5.4m (I)

港湾空港技術研究所2012



名取市閑上漁港(岡 撮影)

港湾の被害まとめ

- 岸壁護岸の被害は仙台より南部で大きかった。小名浜港など；
地震動スペクトルの違い；0.3-1.0Hzの成分が南部で大きい。南部で埋立て地盤が多い
岸壁のはらみだし、沈下 0.7-1.7m
- 液状化と津波の複合被害 相馬港など
- 仙台より以北は津波による被害
防波堤、防潮堤
地殻変動による沈下 牡鹿半島で最大1.2m

ため池などの被害

名称	場所	堤高 (m)	堤長 (m)	貯水量 (m3)	受益面積 (m2)	主な被害
岩根大池	本宮市	7.5m	100m以上	59,000	40.0	上流斜面にクラック
青田新池	本宮市	8.3m	275	17,000	6.0	決壊
蛇の鼻中の池	本宮市	6.4m	153	55,000	60.0	上流斜面崩壊
蛇の鼻中の池	本宮市	5.5m	81	24,000	60.0	上流斜面崩壊
細蕨池 (ほそわらび)	国見町	5.0	40	31,700	11.0	天端にクラック
三ツ森池	安達群	28.8	205	720,000	750.0	天端に段差 60cm、長さ 130m
藤沼湖ダム (昭和24年築造)	須賀川市	18.0	133.0	1,500,000		決壊 7名死亡、1名不明、家屋 19棟全壊など

藤沼湖 ダム1949年築造



Wikipedia 藤沼湖 より

被害の特徴

- 震度が大きく、築造年代の古く大きなため池などに被害が発生
- 灌漑直前で貯水は満水状態
- 天端のクラック、河川堤防と異なり単一のクラックが多い
- 堤体のすべりは上流側;貯水による
- ダムでは堤軸方向のクラック

千葉石油コンビナートの被害

- 液化石油ガスタンクが倒壊し、周辺設備が損傷し、漏洩したガスに着火し火災爆発が発生した。
- 14時46分の地震(震度5弱)で支柱の筋交いが破断し、15時15分(震度4)の地震で支柱が座屈倒壊した。
- 検査後の準備のため満水で普段の2倍の重量になっていた。

- 千葉県石油コンビナート防災アセスメント
検討部会耐震対策分科会検討結果報告書
H23年10月



市原市

液状化

短周期で継続時間の長い地震動による液状化被害
(京葉臨海北部、中部地区)

- 防油堤の傾き、沈下、目地の亀裂、開口
- 防油堤内での噴砂や陥没
- 配管基礎支柱の沈下
- 蒸発器、少量タンクの沈下、陥没
- 護岸のせり出し
小規模の噴砂、波うちや沈下は発生したが被害なし
- 液状化対策の効果が確認、サンドコンパクションパイル、グラベルドレーン、薬注、深層混合処理、杭基礎ケムン工法(回転攪拌根固め+コンクリート杭)、他の地盤改良、コンボウザーパイル工法

消防庁消防研究センター



タンクの支柱の座屈と配管の損傷
市原市



液状化により防油堤が沈下傾斜
鹿島地区



護岸被害 鹿島地区



タンク沈下でバルブが基礎に接触
いわき市

危険物施設の被害

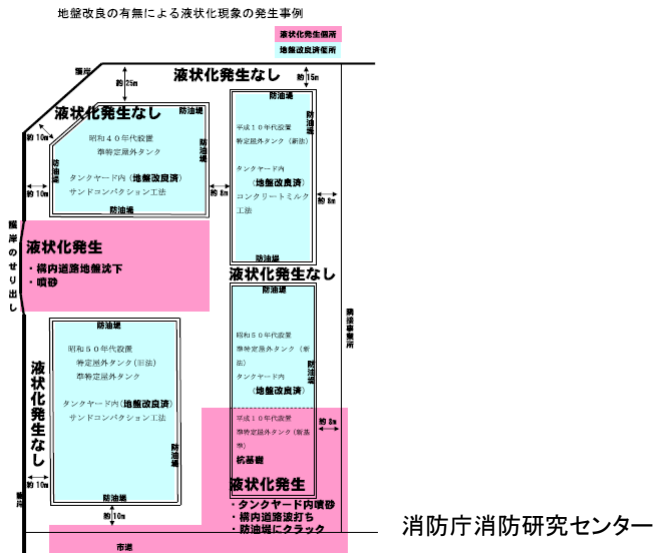
消防庁消防研究センター H23

- 長周期地震動、関連施設や配管基礎の液状化



図1 調査地域と主な危険物施設等の被害

地盤改良が部分的



東日本大震災による被害

- 最大震度:7、M 9.0
- 死者 1万5869人 行方不明者 2847人
- 4.11.2011;女性 54%、
- 倒壊・焼失建物: 全壊した住家は112,975 棟、
- 半壊は145,375 棟、一部破損は539,899 棟
- 非住家の建築物においても、45,416 戸に被害(役場や学校、病院等の公共施設も大きな被害)
- 津波などによる浸水 (8月4日時点)青森、岩手、宮城、福島、茨城、千葉の6県62市町村について、浸水範囲全体約535km²のうち、市街地の浸水範囲は約119km²となっている。
- 建築物の多くが全壊(流失を含む)の区域は約99km²、建築物の多くが大規模半壊、半壊の区域は約58km²となっている。
- 津波高さ 最大40m弱、遡上高 宮古市で40m以上
- 関東大震災の焼失面積が約35km²、阪神・淡路大震災の土地区画整理事業実施面積が約2.6km²であった。

東日本大震災の被害 (約16兆9千億円)

建築物など	:10兆4千億円
(住宅宅地、店舗事務所、工場、機械等)	
ライフライン施設	:1兆3千億円
(水道、ガス、電気、通信放送施設)	
社会基盤施設	:2兆2千億
(河川、道路、港湾、下水道、空港等)	
農林水産関係	:1兆9千億
(農地農業施設、林野、水産関係施設など)	
その他	:1兆1千億
(文教施設、保健医療福祉関係施設、廃棄物処理施設、その他公共施設等)	

南海トラフ巨大地震による被害想定

- 震源域: 東海、東南海、南海トラフ、日向灘
- 震度: 最大7; 名古屋市、静岡市など10県151市区町村
マグニチュード M=9.1
最悪のケース; 冬5時冬夕18時強風毎秒8m
(内閣府 2012.8.29) 30都道府県
- 死者 32万3000人
- 倒壊・焼失建物 238万6000棟
- 浸水 1015平方キロ
- 津波 約34.4m 高知県、黒潮町;
中部電力浜岡原発(静岡県御前崎市)で19メートル、
東京都区部や大阪市は3~5メートル

中央防災会議2012

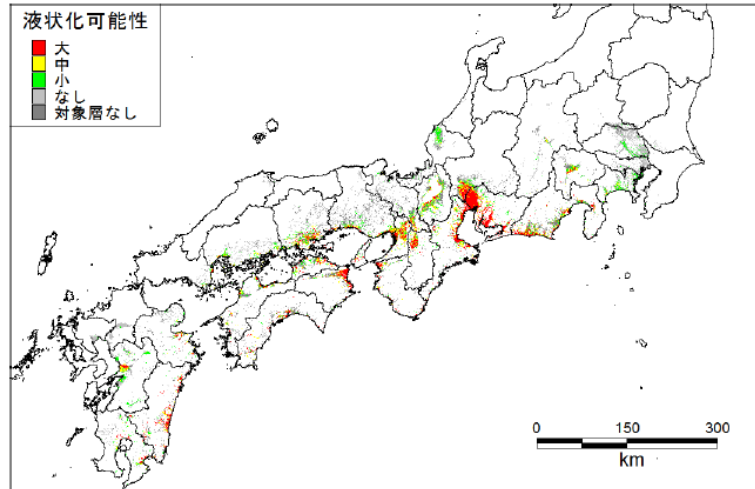
被害想定項目

	項目	想定シーン	評価の考え方
建物被害	1.1 揺れによる被害	-	時刻によって変化しない
	1.2 浸水による被害	-	時刻によって変化しない
	1.3 津波による被害	-	時刻によって変化しない
	1.4 急傾斜地崩壊による被害	-	時刻によって変化しない
	1.5 地震火災による被害	季節・時刻別 風速別	時刻による出火の違い、風速の違いを考慮
	1.6 津波火災による被害	-	-
落下物等	2.1 ブロック塼・自動販売機等の転倒	-	時刻によって変化しない
	2.2 屋外落下物の発生	-	時刻によって変化しない
人的被害	3.1 建物倒壊による被害	時刻別	時刻による滞留人口の違いを考慮
	3.2 津波による被害	時刻別	時刻による滞留人口の違いを考慮 +海水浴客についても検討
	3.3 急傾斜地崩壊による被害	時刻別	時刻による滞留人口の違いを考慮
	3.4 火災による被害	季節・時刻別 風速別	時刻による滞留人口の違いを考慮
	3.5 ブロック塼・自動販売機等の転倒、屋外落下物による被害	時刻別	時刻による滞留人口の違いを考慮
	3.6 屋内収容物移動・転倒、屋内落下物による被害	時刻別	時刻による滞留人口の違いを考慮
	3.7 揺れによる建物被害に伴う要救助者(自力脱出困難者)	時刻別	時刻による滞留人口の違いを考慮
	3.8 津波被害に伴う要救助者・要捜索者	時刻別	時刻による滞留人口の違いを考慮

中央防災会議2012

液状化被害予想

$P_L > 15$: 液状化の可能性が大
$5 < P_L \leq 15$: 液状化の可能性が中
$0 < P_L \leq 5$: 液状化の可能性が小
$P_L = 0$: 液状化の可能性なし



中央防災会議2012

基本ケース 液状化可能性_全域

RLは液状化強度比で抵抗力

密度

石原ら(1977)による相対密度(D_r (%))と液状化強度(R_t)との線形関係

$$R_t = 0.0042D_r$$

ここで、 $R_t = \sigma_d / (2\sigma'_0)$ は
 繰り返し回数20回で初期液状化が発生するせん断応力比
 σ_d :繰り返し三軸試験での軸差応力、
 σ'_0 :初期有効拘束圧である。

MeyerhofによるN値と相対密度(D_r (%)) の間の関係

$$D_r = 21 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_v + 0.7}}$$

ここで、 σ'_v (kgf/cm²):鉛直有効応力

L はせん断応力比で外力

$$L = \frac{a_{\max} \sigma_v}{g \sigma'_v} r_d$$

$$r_d = 1 - 0.015z$$

ここで, a_{\max} は推定最大加速度 (ガル [gal], cm/sec²), g は重力加速度 (980 gal)
 σ_v は全上載圧, σ'_v は有効上載圧, z は地表からの深さ (m) である。

$$F_L = \frac{R_N}{L} \quad R_N = C_W R_L$$

液状化ポテンシャルPL (Liquefaction Potential) 値

液状化ハザードマップでよく使用される指標にPL値がある。この値は以下のようにして求められる。

ある地点の地盤の液状化の程度を表す指標として、液状化ポテンシャル PL 値が用いられているが、先に述べたようないくつかの判定法を適用する場合、

PL 値と液状化の程度を明らかにしておく必要がある。

$$P_L = \int_0^{20} F \cdot (10 - 0.5z) dz$$

$$F_L < 1, F = 1 - F_L, \quad F_L \geq 1, F = 0$$

ここで、 z は深さ(m)である。

$$F_L = \frac{R_N}{L}$$

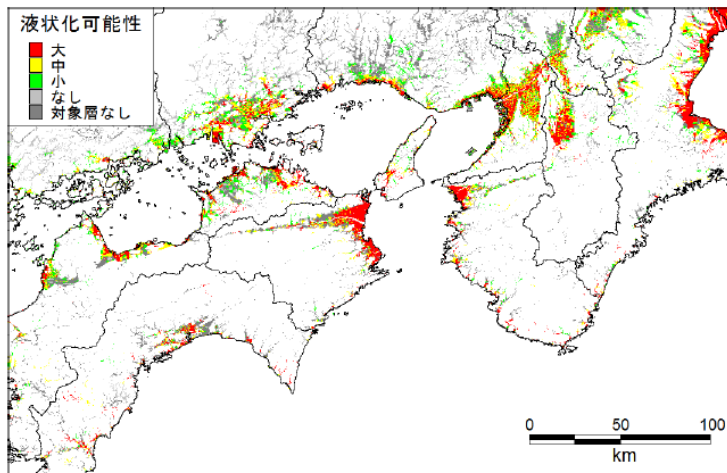
PL値と被害の関係

阪神大震災での被害との対応でキャリブレーションを行った結果をもとに以下のように対応を求めた。
可能性ではなく液状化の程度であって、可能性ではない。

- PL値0-5 液状化はほとんどなし、被害なし
- PL値5-10 液状化の程度は小さい、構造物への影響はほとんどない
- PL値10-20 液状化は中程度、構造物によっては影響の出る可能性がある
- PL値20-35 激しい液状化、噴砂が多く、直接基礎の建物が傾く場合あり
- PL値35以上 非常に激しい液状化、大規模な噴砂と構造物の被害

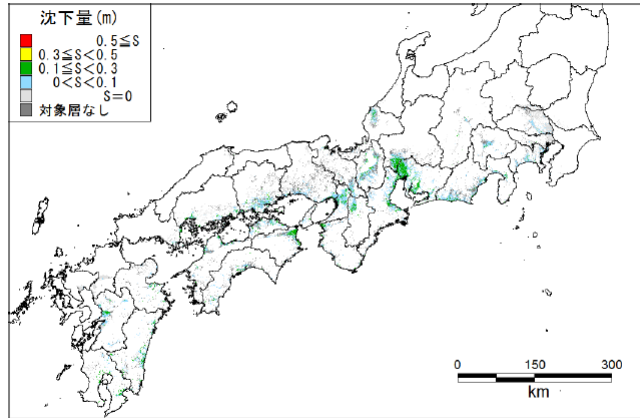
$P_L > 15$: 液状化の可能性が大	
$5 < P_L \leq 15$: 液状化の可能性が中	
$0 < P_L \leq 5$: 液状化の可能性が小	
$P_L = 0$: 液状化の可能性なし	中央防災会議2012

近畿 四国



基本ケース 液状化可能性_近畿_四国

液状化に伴う地盤の沈下量 S は、建築基礎構造設計指針(2001)に示されている補正 N 値と繰返しせん断ひずみの関係を用いて、補正 N 値と応力比のプロット点に対応する繰返しせん断ひずみを隣接する γ_{cs} 曲線の対数補間により求める。



基本ケース 沈下量_全域

中央防災会議2012

問題点 継続時間

年代効果:埋め立てられた地盤の強度が時間が経つと大きくなること

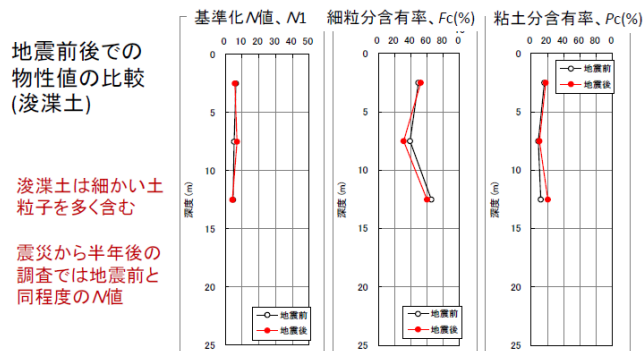
千葉県で江戸時代や明治大正に埋め立てられた地盤では被害が少なかった
1946年以降、特に昭和末期から現在の埋め立て地で液状化が激しかった。

	浦安市	千葉市美浜区
土地造成事業方法	公海埋め立て事業	公海埋め立て事業
埋め立て時期	昭和39年～56年	昭和42年～昭和51年
地盤の種類	砂質地盤・粘土地盤	砂質地盤
人口(2011年3月)	161509人 (埋立地96789人)	150,332人(全て埋立地)
埋立面積	37.75km ²	21.16km ²
震度	5強(浦安市猫実)	5強(千葉市美浜区真砂)

浦安の埋立地の地盤

4) 細粒分の効果 細粒分が35%以上と多くても液状化が発生している。浦安: 30-45%

埋め土はポンプ浚渫によるため粘土分が失われた。 $I_p=0$ で非塑性。



東京電気大安田進による

継続時間を考慮する方法

- 液状化判定法では、20回の正弦的繰り返しせん断力を加えたとき、両振幅ひずみが5%になる(液状化に対応)せん断応力で液状化強度を表している。
- 地震波は不規則なので、右図に示すように、加速度波形を各半パルスに分割し、その振幅に対してひずみが5%発生する繰り返し回数 N_c を求め、その半パルスはその逆数 $1/N_c$ だけの効果があるとする。
- すべての半パルスに対する $1/N_c$ の総和 D を求め、それが1.0になった時、両振幅歪が5%すなわち液状化すると考える。実際には、 D は1を超えたり、こえなかったりする。
- その時の波形の最大加速度 A_{max} を R_{20} で割ったもの C_w を20回の正弦波に対する強度に変換するための地震波形の補正係数とする。
- 大きな振幅でも繰り返し回数が少ないと D が小さく液状化しない場合があるので、この時、地盤強度が C_w 倍だけ見かけ大きいとする。

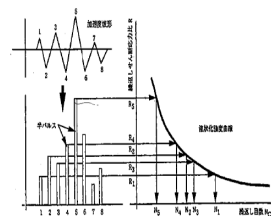


図-1 累積損傷度理論の概要

東、田村、二宮、地震波形の繰り返し特性を考慮した液状化判定法に関する研究、第51回土木学会年次学術講演会講演集、pp.196-197、平成8年

継続時間を考慮する方法

前提:

不規則地震波形を扱う際に、不規則外力を繰り返し回数20回の正弦波力に変換するのは困難なので、外力としては不規則加速度の最大値を用い、対応する地盤の強度を補正する方法が取られている。

東、田村、二宮、地震波形の繰り返し特性を考慮した液状化判定法に関する研究、第51回土木学会年次学術講演会講演集、pp.196-197、平成8年

問題点:この方法だと、地震波形をパルスに分解するので、パルスの履歴が無視されることになる。動的解析ではあればこのような問題はない。

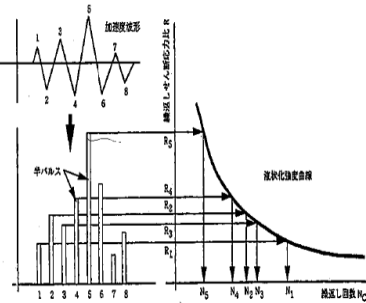


図-1 累積損傷度理論の概要

道路橋示方書・同解説V耐震設計編 平成14年3月

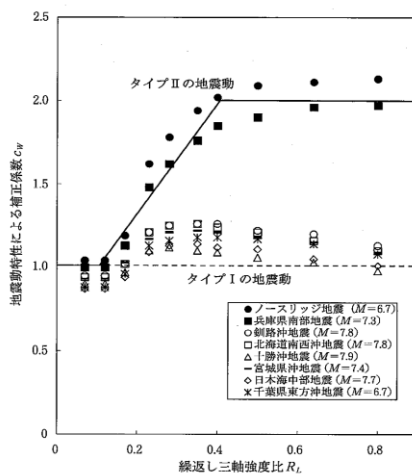


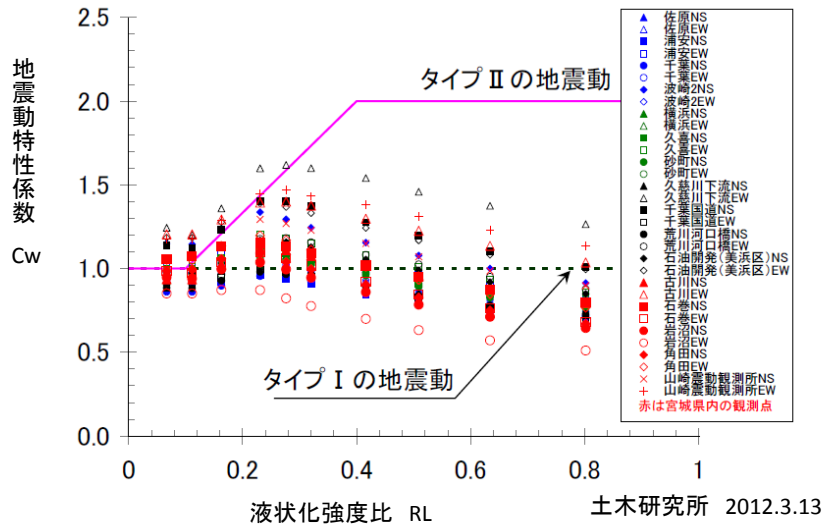
図-参 6.9 地震動特性による補正係数

内陸直下型地震では Cwが1.0を大きく超えている

十勝沖地震(2003年): 50ガル以上が130秒

問題点: C_w が1.0を下回る場合の取り扱い

K-NET古川:液状化に影響する
50ガル以上が178秒
阿武隈川下流の岩沼(約170秒)
では液状化が発生



地震動継続時間に対する考慮

- 継続時間に対する係数 C_w は1.0とされているが、東日本大震災でのデータでは小さい。今後の巨大地震では、下限を用いるべきではないか？
- $C_w=0.55-0.85$ 例えば岩沼市

$$R_N = C_W R_L$$

PL値と被害の関係

阪神大震災での被害との対応で
キャリブレーションを行った結果

大阪府

- PL値0-5 液状化はほとんどなし、被害なし
- PL値5-10 液状化の程度は小さい、構造物への影響はほとんどない
- PL値10-20 液状化は中程度、構造物によっては影響の出る可能性がある
- PL値20-35 激しい液状化、噴砂が多く、直接基礎の建物が傾く場合あり
- PL値35以上 非常に激しい液状化、大規模な噴砂と構造物の被害

千葉県

表 5.3-1 PL 値による液状化危険度判定区分 (岩崎他(1980)に加筆)

	PL=0	0<PL≤5	5<PL≤15	PL>15
PL値による液状化危険度判定	液状化危険度は極めて低い、液状化に関する詳細な調査は不要	液状化危険度は低い。特に重要な構造物に対して、より詳細な調査が必要	液状化危険度がやや高い。重要な構造物に対してはより詳細な調査が必要。液状化対策が一般には必要	液状化危険度が高い。液状化に関する詳細な調査と液状化対策は不可避

- PL > 15 : 液状化の可能性が大
- 5 < PL ≤ 15 : 液状化の可能性が中
- 0 < PL ≤ 5 : 液状化の可能性が小
- PL = 0 : 液状化の可能性なし

中央防災会議2012

千葉県 PLが5程度と小さくても液状化の程度が大きい場所がある ; 継続時間の違い ○ : 2xPL

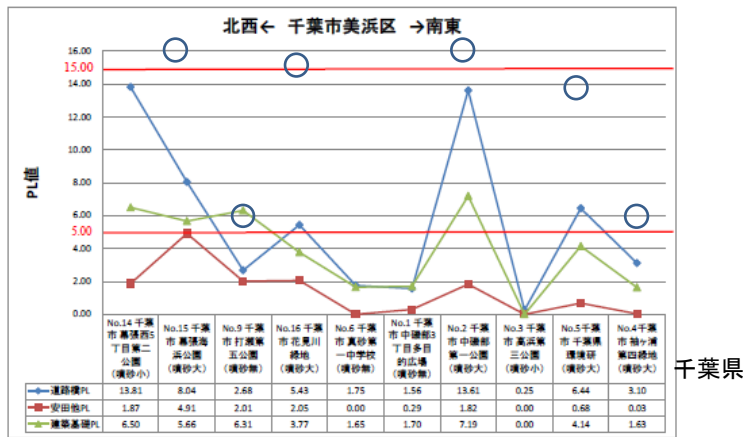
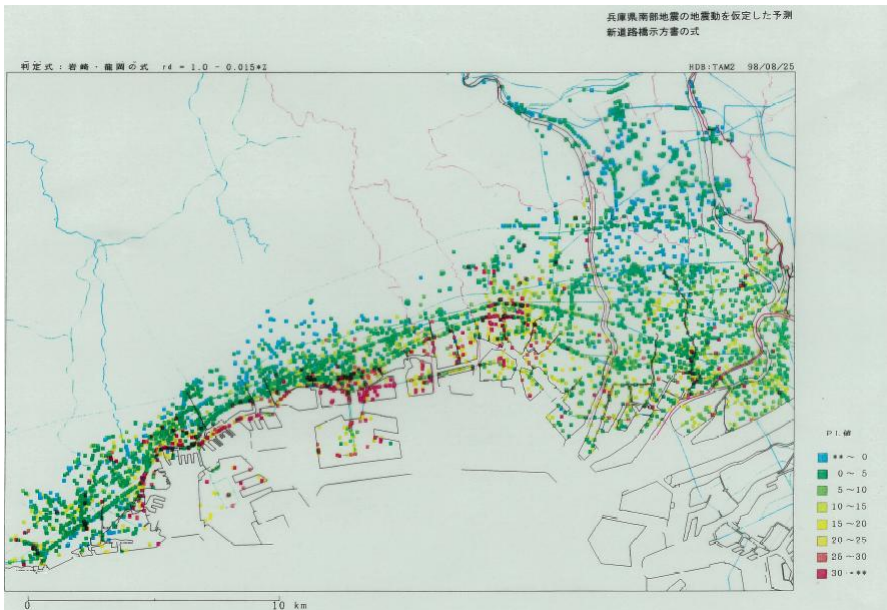


図-3.4.1 千葉市美浜区のボーリング地点(北西-南東)における、道路橋、安田他、建築基礎による PL 値

噴砂地点



液状化予測 道路橋示方書



道路橋示方書 液状化判定法等の改訂と問題点

・ 主な変更点

- 1) レベル2地震動に対して、レベル2タイプ 1の標準加速度スペクトルのみ直し、地盤面での設計水平震度の見直し、地域別補正係数の見直し
- 2) レベル1地震動に対しても液状化判定を行う 土質定数低減係数、設計水平震度の統一
- 3) 液状化判定の高精度化 1mごとの地盤調査
- 4) 地域別補正係数の変更
- 5) 標準加速度スペクトル
- 6) 洪積層は非液状化

問題点

- 1) 地震動継続時間 震動パルスの履歴が考慮されていない 動的解析が必要
- 2) 深さによる低減係数の問題 動的解析が必要
- 3) 年代効果: 江戸時代など古い時代に埋め立てられた地盤では被害が少なかった 物性の研究
- 4) 細粒分の効果 細粒分が多くても液状化が発生している。
「75ミクロン以下の細粒分が35%以上では液状化しない」の見直し
- 5) 発生条件のみでなく被害の指標 ；液状化ポテンシャル PL値
液状化可能性大、中、小、なしとしているが、
液状化の程度と被害；激しい、大きい、ある、なしと程度と被害で表現すべき
- 6) 液状化ポテンシャルPL値が小さめでも大きな液状化の程度が大きかった 継続時間
- 7) 沈下量の予測法に継続時間が考慮されていない。沈下量は傾斜に関連するので重要

液状化による被害 まとめ

- ・ 住宅、1戸建住宅 傾斜、沈下、ライフライン
集合住宅 ライフラインや関連施設
- ・ 道路 住宅地内の道路、集水地形
- ・ 河川堤防、河川施設
- ・ 港湾、海岸堤防
- ・ 農業施設、ため池、ダム
- ・ コンビナート

**巨大地震での液状化に対して被害予測法と対策法の
高度化と具体的なプログラムが必要の確立**