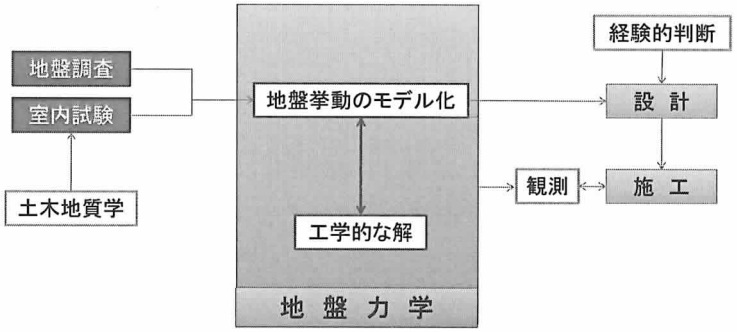
進化する地盤災害
ー地盤力学の役割ー

三 浦 清 一
北海道大学大学院工学研究院

2012/03/12
北海道大学工学部

地盤工学・基礎工学における実務フロー



Karl Terzaghi カール・テルツァギー 地盤力学の父

近代的科学の一分野として地盤力学を確立
「Erdbaumechanik」
「Theoretical Soil Mechanics」
★「有効応力の原理」により土材料や地盤の力学挙動を論じる

Terzaghi先生の発想の原点は、有効応力よりみた土の力学的性質の解明である。

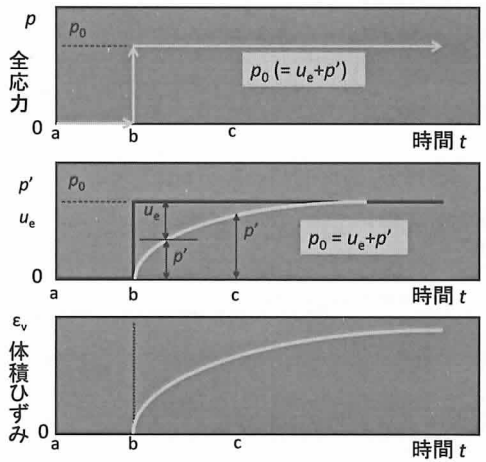
地盤材料のような粒状体は、その構成粒子の大小によらず、
外的作用応力 p_0 は 粒子間力（有効応力）p' と間隙圧の２つで支えられるというアイデアである。

間隙が完全に水で満たされている状態であれば、後者は間隙水圧 u_e となり、中立応力として存在することになる。

$$p_o = u_e + p' \quad \cdots \quad (1)$$

Terzaghi 圧密モデル

$$\frac{\partial u_e}{\partial t} = Cv\frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \quad \cdots \quad (2)$$



有効応力の原理

p_0: 全応力（初期荷重）(total stress)

u_e: 過剰間隙水圧 (excess pore water pressure)

p': 有効応力 (effective stress)

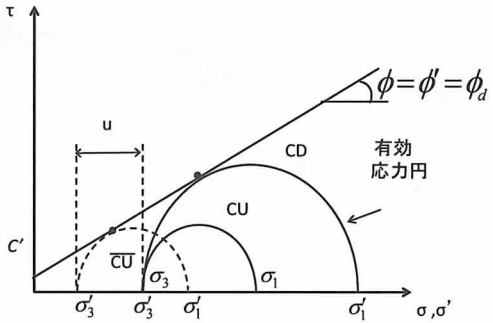
$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V} = -\frac{\Delta e}{1+e}$$

e (間隙比)　Δe
負で 体積ひずみは増加

地盤強度に関しては、Coulombの破壊規準を尊重し、次のような**有効応力表示式**を提示している。

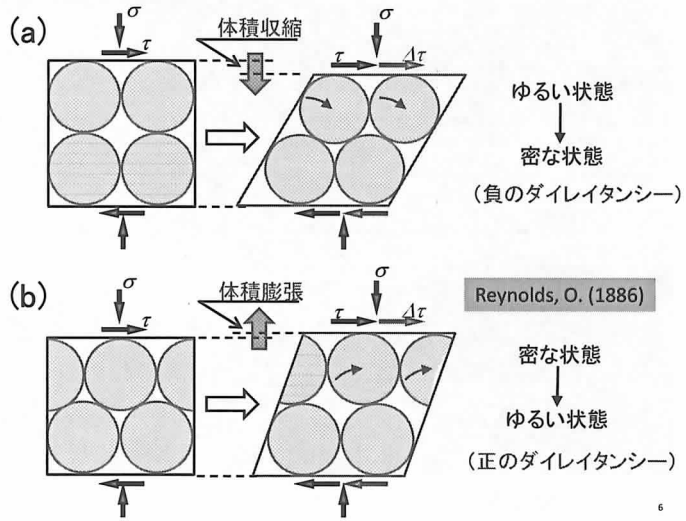
$$\frac{\sigma'_{1f}-\sigma'_{3f}}{2}=c'\cos\phi'+\frac{\sigma'_{1f}+\sigma'_{3f}}{2}\sin\phi' \cdot\cdot\cdot(3)$$

圧密排水・非排水せん断によるMohr応力円解析例



5

せん断に伴う体積の変化現象

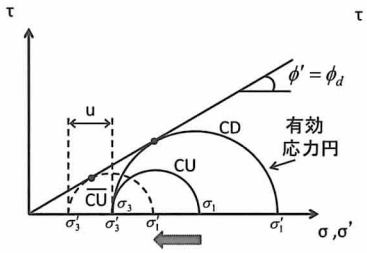


Reynolds, O. (1886)

6

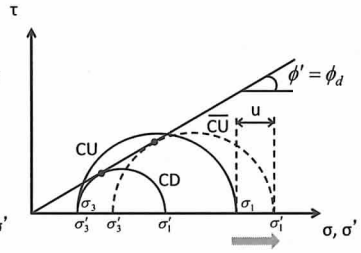
土のせん断強さとダイレイタンシー

正規圧密粘土, ゆるい砂



負のダイレイタンシー

過圧密粘土, 密な砂



正のダイレイタンシー

7

地盤力学発展史

地盤力学の源流をたどると、CoulombとRankineに行き着く？

Coulomb Rankine Darcy Proctor Atterberg 古典土質力学黎明期

Terzaghiが"土の力学"としての基本的枠組みを有効応力の概念で構築

Terzaghi Peck Casagrande Taylor Tschebotarioff・・・原位置挙動把握と力学構成

理論の基礎になる間隙水圧の計測法と工学的意義を明確化

Skempton Henkel Bishop Bjerrum・・・ 試験装置の高度化
イギリス学派による主導的な研究展開

構成式確立研究へ RoscoeらのCambridge学派

Hvorslev Roscoe Schofield Wroth・・・ 構成方程式の開発

引続き弾塑性理論・粒状体力学理論に基づく、理想的な粘土や砂について、多大な研究が生まれてきた
特に日本の若い研究者らの研究成果も注目されるようになってきた
1960年後半から1980年後半にかけて、多くの海外ジャーナルに投稿

地盤動的強度推定法と地盤動力学の発展

Seed Idriss Finn・・・北米・日本などの研究者・技術者

8

近年の地震記録例 （顕著な液状化・土砂災害等、日本）

日 時	地震名	M
1964.06.16	新 潟	7.5
1968.05.16	十 勝 沖	7.9
1973.06.17	根室半島沖	7.4
1978.01.14	伊豆大島近海	7.0
1978.06.12	宮城県沖	7.4
1983.05.26	日本海中部	7.7
1993.01.15	釧 路 沖	7.8
1993.07.12	北海道南西沖	7.8
1994.10.04	北海道東方沖	8.2
1994.12.28	三陸はるか沖	7.6
1995.01.17	兵庫県南部	7.3

日 時	地震名	M
2000.10.06	鳥取県西部	7.3
2001.03.24	芸 予	6.7
2003.05.26	三 陸 南	7.1
2003.07.26	宮城県北部	6.4
2003.09.26	2003十勝沖	8.0
2004.10.23	新潟県中越	6.8
2005.03.20	福岡県西方沖	7.0
2007.03.25	能登半島	6.9
2007.07.16	新潟県中越沖	6.8
2008.06.14	岩手・宮城内陸	7.2
2011.03.11	東北地方太平洋沖	9.0

1964 新潟地震以降
東北域で45%の出現 (10/22)
北海道域で27%の出現(6/22)

9

1964新潟地震　県営アパート群の倒壊

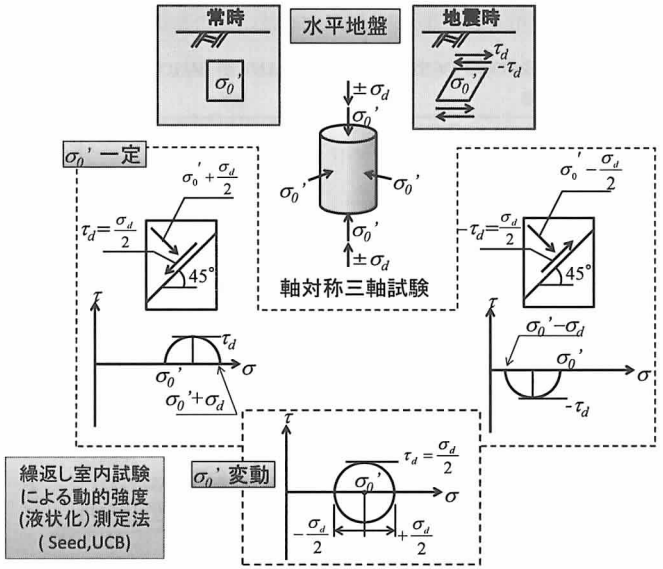
10

1964新潟地震　昭和大橋の落橋

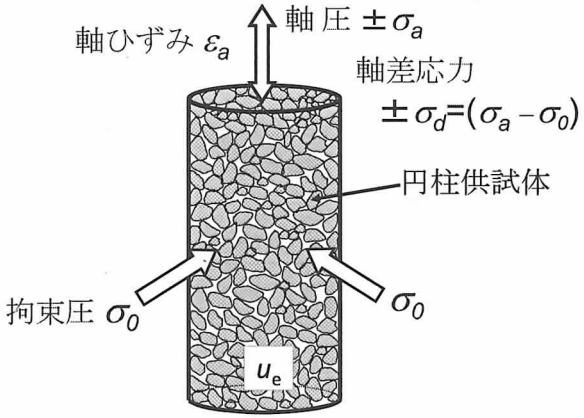
11

1964新潟地震　新潟港 津波による船舶等の被害

12



13



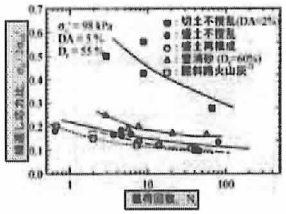
繰返し三軸試験と応力・変位条件

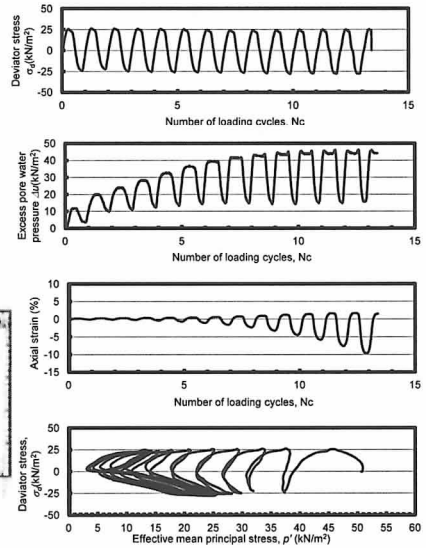
14

繰返し三軸試験の例

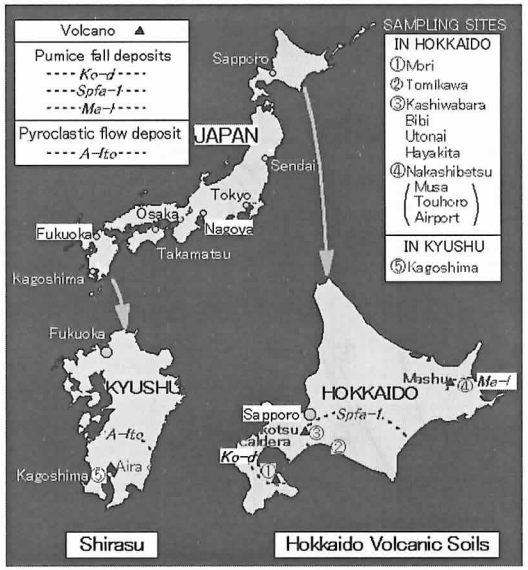
支笏系柏原火山灰土
ρ_s=2.34g/cm^3
ρ_{dc}=0.523g/cm^3
(Dr = 46.5%)

試験条件
σ_0'=49 kPa
σ_d/σ_c'= 0.25

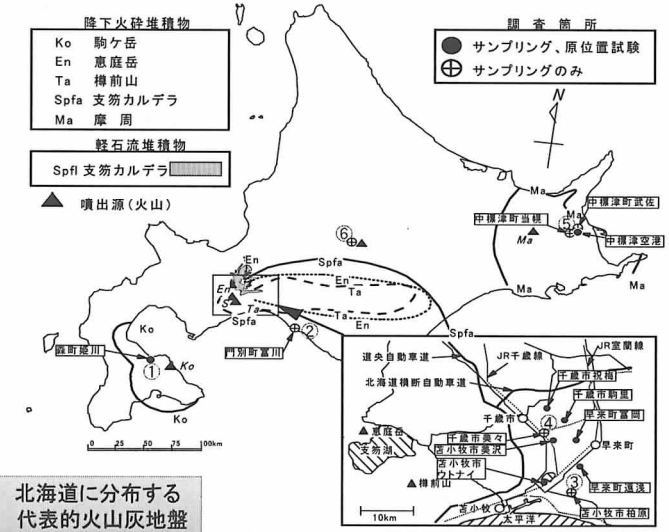




15



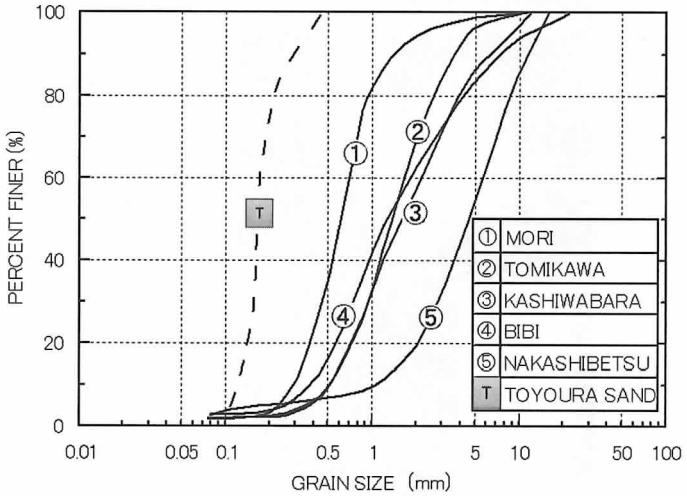
16



北海道に分布する
代表的火山灰地盤

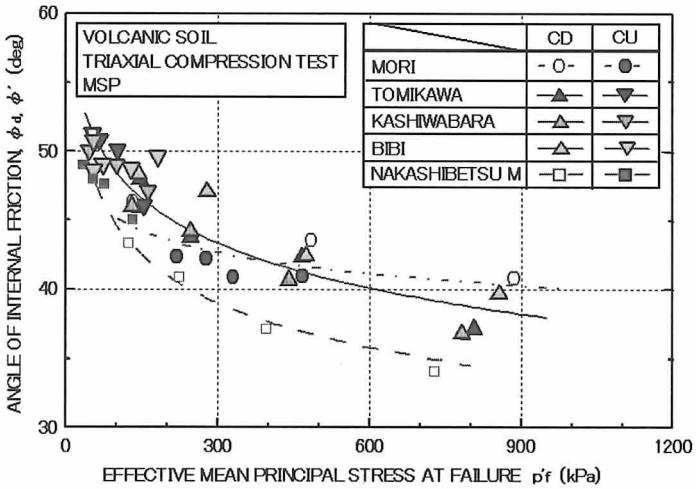
①MORI, ②TOMIKAWA, ③KASHIWABARA
④BIBI, ⑤NAKASHIBETSU, ⑥KAMIFURANO

17



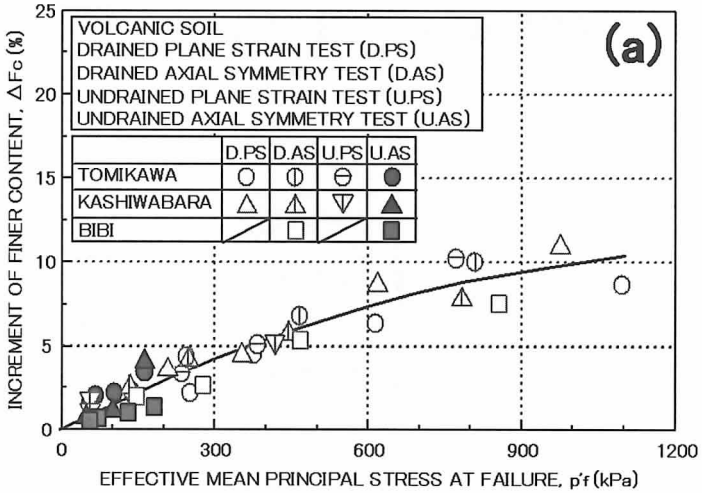
北海道火山灰地盤の代表的な粒度分布

18



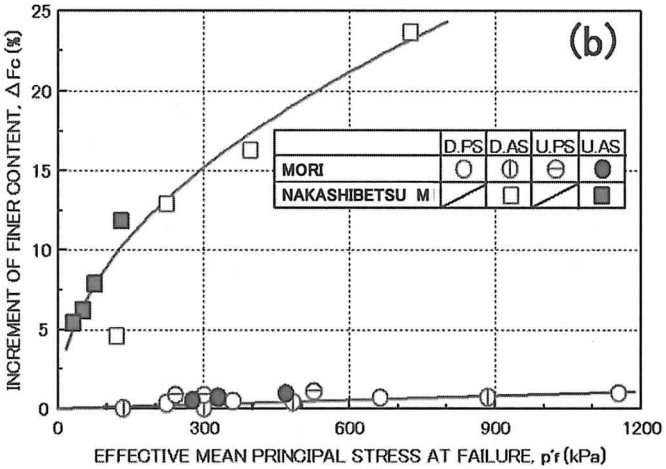
強度定数の有効応力依存性　北海道火山灰土

19



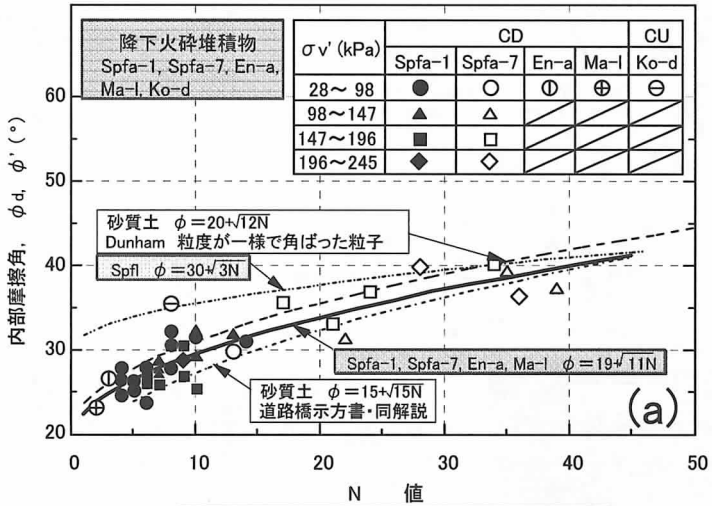
圧密せん断による構成粒子の破砕
支笏樽前系火山灰土

20



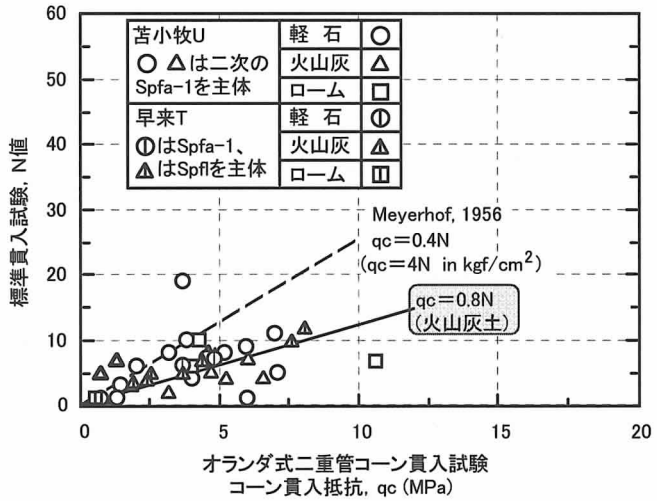
圧密せん断による構成粒子の破砕
駒ヶ岳，摩周系火山灰土

21



北海道火山灰地盤の内部摩擦角とN値の関係
降下火砕流堆積物

22



標準貫入試験N値と静的貫入試験qc値の関係
北海道火山灰地盤

23

地震による我が国の火山灰地盤における崩壊事例

24

年	月日	地震名	M	図中番号	被害発生箇所	震央距離	震度	被害形態	火山灰質土の起源	被害箇所
1968	2.21	えびの地震	6.1	①	宮崎県えびの町	約35km	Ⅳ	斜面崩壊	加久藤火砕流	自然斜面
								液状化		水　田
1968	5.16	十勝沖地震	7.9	②	青森県三戸町	約200km	Ⅴ	斜面崩壊	十和田・八甲田軽石流	道路盛土
				③	青森県五戸町	約200km	Ⅴ	斜面崩壊		自然斜面
				④	北海道札幌市清田	約310km	Ⅳ	液状化	支笏軽石流	宅　地
1970	5.31	ペルー地震	7.8	－	ペルー ワスカラン山	約130km	-	斜面崩壊	未確認	自然斜面
1978	1.14	伊豆大島近海地震	7.0	⑤	静岡県河津町見高入谷	約20km	Ⅴ	斜面崩壊	火山砕屑物	自然斜面
1978	6.12	宮城県沖地震	7.4	⑥	宮城県白石市寿山	約140km	Ⅳ	斜面崩壊	浮石質火砕流	宅地用沢埋め盛土
1984	9.14	長野県西部地震	6.8	⑦	長野県王滝村(御岳山)	約5km	Ⅵ	斜面崩壊	千本松軽石層	自然斜面
					長野県王滝村(松越地区)	約1km	Ⅵ	斜面崩壊	御岳第3軽石層	河岸段丘
1993	1.15	釧路沖地震	7.8	⑧	北海道標茶町	約40km	不明	斜面崩壊	軽石流	宅地用沢埋め盛土
				⑨	北海道釧路市緑ヶ岡	約15km	Ⅵ	斜面崩壊	阿斜路軽石流	宅地用盛土
1993	7.12	北海道南西沖地震	7.8	⑩	北海道奥町	約145km	不明	液状化	駒ケ岳火砕流	宅地 埠頭 岸壁
1994	10.4	北海道東方沖地震	8.2	⑪	北海道標茶町	約250km	Ⅴ	斜面崩壊	軽石流	宅地用盛土
				⑫	北海道中標津町	約220km	Ⅴ	液状化	摩周降下軽石	自然堆積地盤
1994	12.28	三陸はるか沖地震	7.6	⑬	青森県新郷村	約230km	Ⅵ	斜面崩壊	十和田・八甲田軽石流	沢(谷)埋め盛土
1997	3.26	鹿児島県北西部地震	6.2	⑭	鹿児島県入来町	約30km	Ⅳ	斜面崩壊	入戸火砕流	宅地盛土
2001	1.13	エルサルバドル地震	7.6	－	エルサルバドル ラスコリナス	不 明	-	斜面崩壊	軽石、凝灰岩質土	自然斜面
2003	5.26	三陸南地震	7.1	⑮	宮城県鳴瀬町館下	約35km	Ⅴ	斜面崩壊	鬼首火砕流	農地用沢埋め盛土
2003	9.26	十勝沖地震	8.0	⑯	北海道烏野町協和	約230km	Ⅴ	斜面崩壊	阿斜路軽石流	農地用沢埋め盛土
				⑰	北海道札幌市美しが丘	約255km	Ⅳ	液状化	支笏軽石流	宅地盛土
2008	6.14	岩手・宮城内陸地震	7.2	⑱	宮城県栗原市(冷沢上流)	約15km	Ⅵ	斜面崩壊	栗駒火砕流・降下軽石	沢　谷
				⑲	宮城県栗原市鳴館町館下	約35km	Ⅵ	斜面崩壊	鬼首火砕流	農地用沢埋め盛土
2011	3.11	東北地方太平洋沖地震	9.0	—	----	----	(Ⅶ)	斜面崩壊	----	道路盛土
						----		液状化		宅地盛土

我が国の火山灰地盤を襲った地震

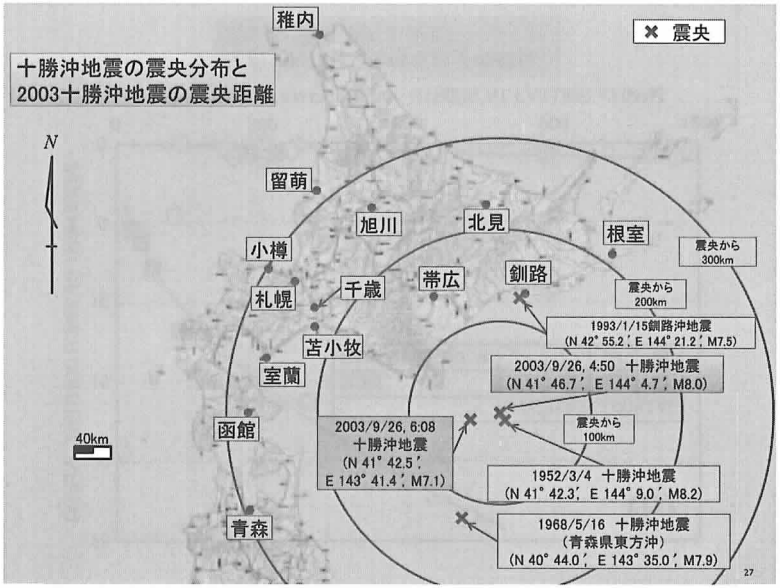
25

2003年 十勝沖地震

【本震】 2003年9月26日4時50分
M=8.0
震央:北緯41° 46′ 東経144° 04′
震源の深さ:約42km

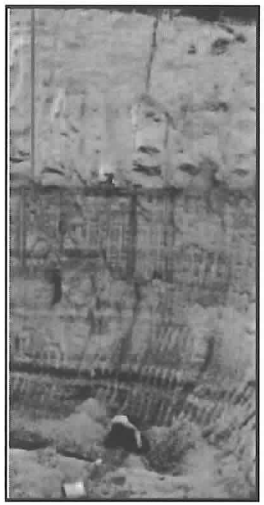
【余震】 2003年9月26日6時08分
M=7.1
震央:北緯41° 42′ 東経143° 41′
震源の深さ:約21km

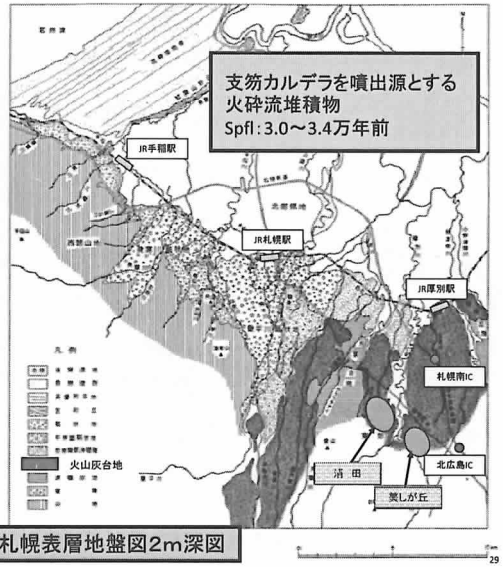
26



27

28





新井・町田：火山灰アトラス より

札幌表層地盤図2m深図

札幌市　美しが丘①　家屋の傾斜と道路の沈下（盛土部）

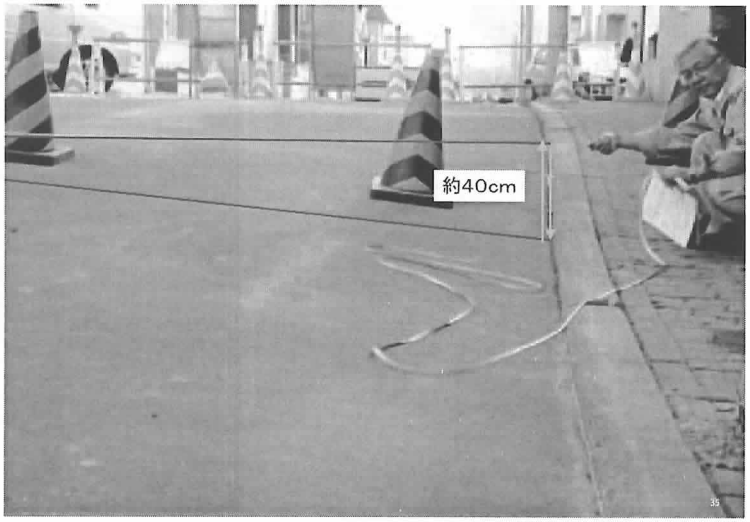
札幌市　美しが丘①　火山灰（Spfl）の噴砂（盛土部）

札幌市美しが丘①　家屋の傾斜（盛土部）

地震直後　道路の沈下とSpflの噴出
（2003年十勝沖地震 美しが丘）

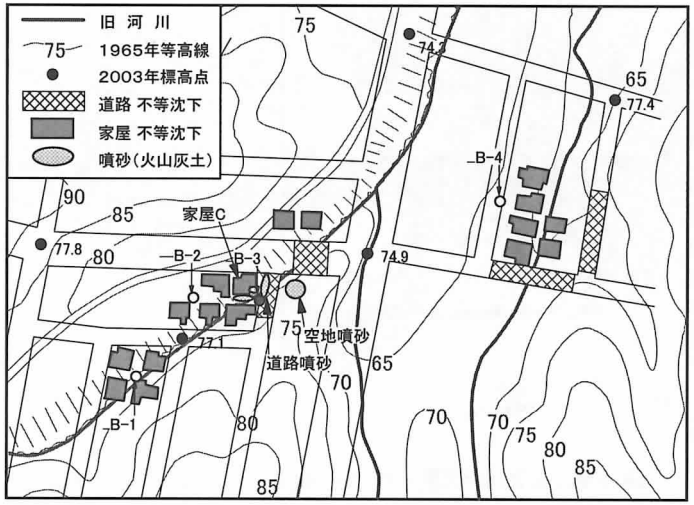
34

札幌市美しが丘① 道路の沈下（盛土部）



35

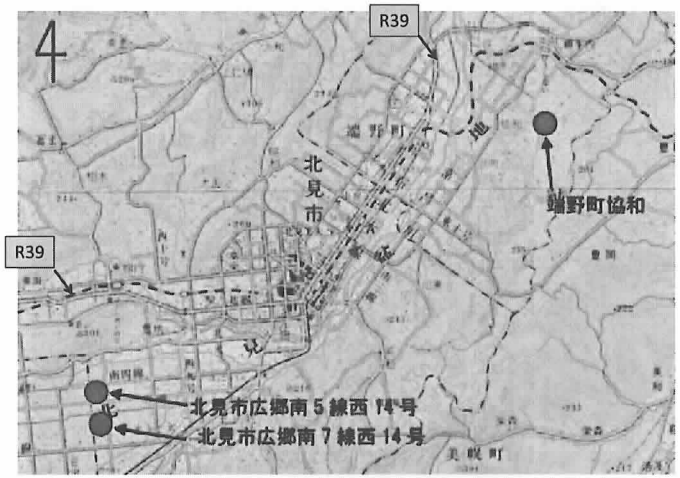
美しが丘地区 旧地形と被災箇所



36

1968年と2003年十勝沖地震による被害の比較と盛土の範囲

37



2003年十勝沖地震
クッチャロ軽石流堆積物の液状化発生箇所

38

(2003年十勝沖地震 端野町協和地区)
Kcflの大規模な液状化・農地変状

39

(2003年十勝沖地震 端野町協和地区)
大規模な液状化・農地変状

40

農地の隆起、地割れ下部火山灰層大規模液状化・流動

41

クッチャロ軽石流堆積物Kcflの噴出跡
（2003年十勝沖地震 端野町協和）

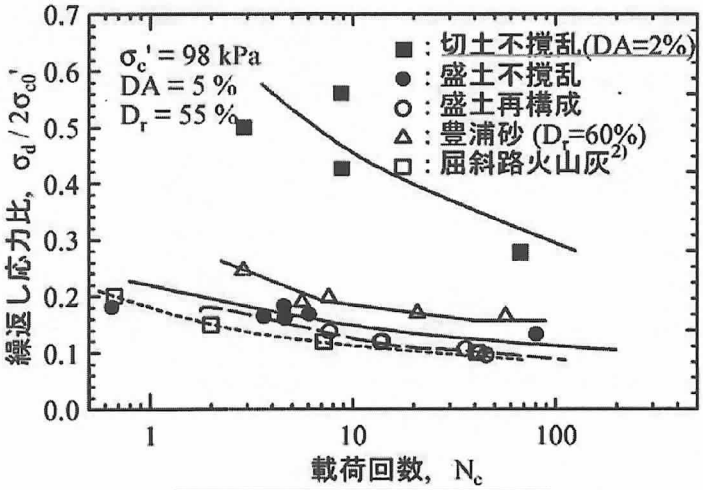
42

クッチャロ軽石流堆積物の盛土崩壊
（2003年十勝沖地震 北見市広郷）

43

空中写真（1971年撮影）判読による地形区分

44



液状化試験結果の比較

45

68年以降の地震による北海道火山灰地盤の液状化

●1968 十勝沖地震 ・・・・・・・・札幌市清田の住宅(火砕流)
M7.9 (5月16日)

●1993 釧路沖地震 ・・・・・・・・釧路市緑ヶ岡の住宅(火砕流)
M7.8 (1月15日) 標茶町茅沼の住宅(火砕流)

●1993 北海道南西沖地震 ・・森町赤井川の住宅(火砕流)
M7.8 (7月12日) 森町森港の埠頭(軽石混り)

●1994 北海道東方沖地震 ・・標茶町茅沼の住宅(火砕流)
M8.2 (10月4日) 中標津市街の住宅
(粗粒な軽石)

●2003 十勝沖地震・・・・・・・・北見市端野農地(火砕流)
M8.0 (9月26日) 札幌市清田の住宅(火砕流)
大規模、遠距離

46

2003年十勝沖地震 十勝川堤防崩壊状況

北海道開発局 提供

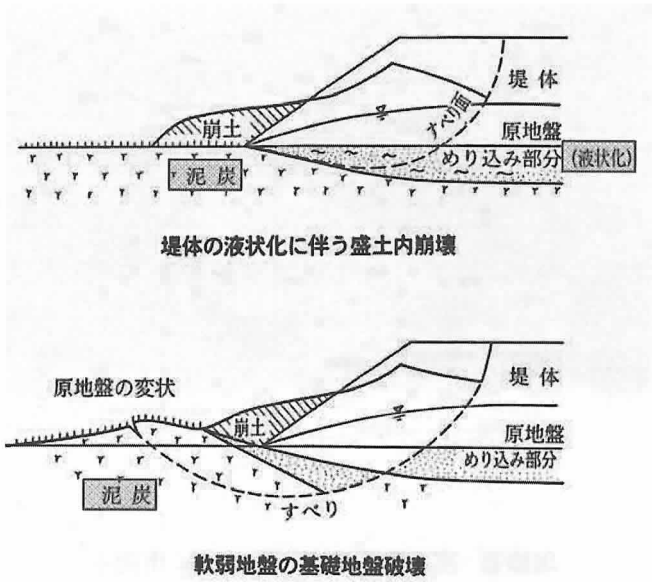
47

十勝川 大津築堤 盛土崩壊状況 豊頃町

48

液状化とみられる堤防のすべり崩壊

49



50

51

押し寄せた瓦礫　仙台東部道路

2011 東北地方太平洋沖地震

52

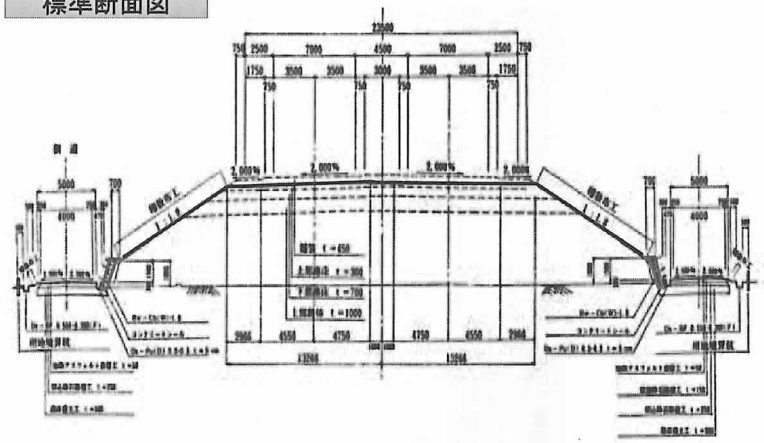
2011 東北地方太平洋沖地震

津波による浸水範囲の概況（国土地理院）

高速道路総合技術研究所（NEXCOネクスコ総研）横田地盤研究室長　他　提供

53

仙台東部道路 標準断面図



仙台東部道路建設誌　日本道路公団仙台建設局仙台工事事務所　H7年8月

54

2011 東北地方太平洋沖地震

調査箇所②　ボックス内の状況　4/22調査

カルバートボックスの津波痕

カルバートボックス巻き込みブロック積み

NEXCOネクスコ総研 土工研究室長　横田　聖哉 氏 他　提供

55

2011 東北地方太平洋沖地震

調査箇所②　盛土のり尻の状況　4/22調査

盛土のり尻部のブロック積み状況

NEXCOネクスコ総研　土工研究室長　横田　聖哉 氏 他　提供

56

平成6年9月22日　宮城県集中豪雨状況：仙台東部（仙台空港～仙台東 間）
連続雨量：271mm　時間最大雨量：68.5mm/時　　仙台東部道路建設誌

57

おわりに

地盤工学の役割は，地震，降雨，急激な気温・環境変化などの自然外力に対して，社会基盤を支える地盤が示す反応を正当に評価し，適切に管理する術を構築することである．

土木工学にとって信頼できる地盤力学が，今求められている．

日本各地にみられる多様な地盤が，多様化する外力に対してどのように応答しているか未知の部分が多々あり，研究上の課題が多い．
★たとえば火山灰質粒状体は従来の動的強度の定義では対応不可能・・・

地盤災害は 荷重規模の増大とともに 多発大規模化している
⇒⇒確実に進化している？

地盤の液状化型被害が顕在化
盛土・埋立て地盤の動的強度の合理的予測法
構成粒子の長期・気候の変化による工学的性質の変状
泥岩、軟岩、火山質土、まさ土・・・
破砕性が問題になる地盤・材料の力学確立
【せん断・圧密による粒子の破砕性の予測法確立】
－破砕粒状体の有効応力原理の検証－

58