

ガス導管の地盤拘束力に関して

1. 高圧ガス導管耐震設計指針での地盤拘束力
2. 1983年の日本海中部地震後に液状化に関して行った実験
3. 1995年阪神・淡路大震災後に流動を対象に設定された高圧ガス導管液状化耐震設計指針
4. 1999年集集地震の断層によるガス導管の被害と関連した小型模型実験
5. 2017年新潟県中越沖地震によるガス導管の長柱座屈被害と小型土槽実験

1

東京電機大学名誉教授 安田 進

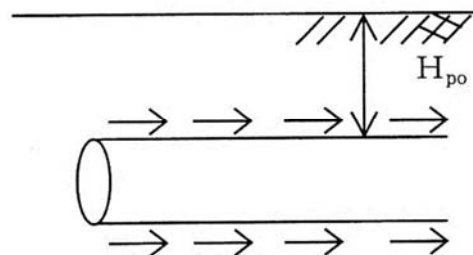
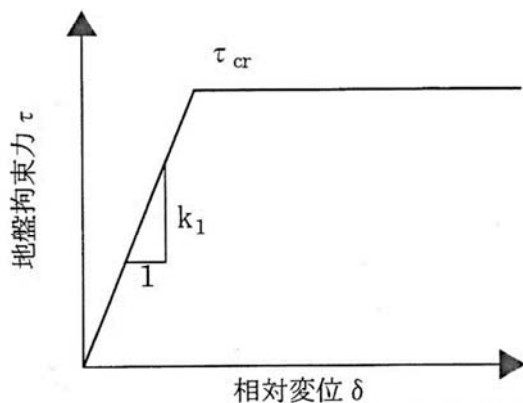
1. 高圧ガス導管耐震設計指針（2013年改訂版）

4.4.1 管軸方向の地盤拘束力

管軸方向の地盤拘束力 τ は、導管単位表面積あたりの限界せん断応力 τ_{cr} 及び地盤ばね係数 k_1 を用いてバイリニアで近似する。あるいは別途実測により求めてもよい。

$$\text{限界せん断応力 } \tau_{cr} = 1.5 \text{ N/cm}^2$$

$$\text{地盤ばね係数 } k_1 = 6.0 \text{ N/cm}^3$$



(高圧ガス導管耐震設計指針)

(1) 限界せん断応力 τ_{cr} の値は、'82指針¹⁾ 作成時に実施された導管加重実験、1995～1996年度にかけて実施された東京ガスの実験²⁾ 及びガスパイプライン保安対策調査の実験³⁾ の3つの実規模実験のほぼ平均値をとったものである。実験データは概ね1.0～2.0N/cm²の範囲にある。また、地盤ばね係数 k_1 の値は、'82指針と同じとした。

表 4.4 解-1 管軸方向の地盤拘束力実験の結果

	データ数等	τ_{cr} の平均値 ^{注1)}
'82 指針の実験 ¹⁾	呼び径150A～600Aの8ケース ^{注2)}	1.9N/cm ²
東京ガスの実験 ²⁾	呼び径150A及び300Aの15ケース	0.9N/cm ²
ガスパイプライン保安対策調査の実験 ³⁾	呼び径600Aの2ケース ^{注3)}	1.4N/cm ²
平均	—	1.4N/cm ²

注1) '82 指針の実験及び東京ガスの実験では $H_{po} = 1.2m$ であるので $H_{po} = 1.8m$ に換算した。

注2) 全部で86 ケースあるうち、呼び径100 A以上のポリエチレンライニング鋼管で締め固め度が95%程度あるものに限定した。

注3) 全部で7ケースあるうち、塗覆装の違いによる影響がないもの(変位速度が低速のもの)に限定した。

(2) 上記の値は埋設深さ1.8mに対するものであり、埋設深さが異なる場合には、限界せん断応力 τ_{cr} の値を以下のように補正することができる。ただし τ_{cr} の値は埋設深さ1.8mまでの実験に基づいているため、埋設深さが特に深い場合は別途適切な方法で定める必要がある。

$$\tau_{cr} \text{ (N/cm}^2\text{)} = 1.5 \text{ (} H_{po} / 1.8 \text{)} \quad \text{(式 4.4 - 1)}$$

H_{po} : 埋設深さ (m)

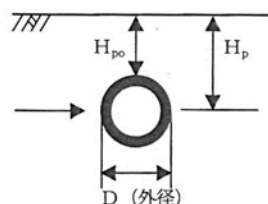
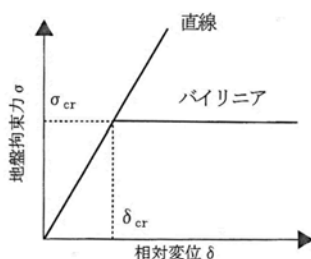
(高圧ガス導管耐震設計指針)

4.4.2 管軸直角方向の地盤拘束力

管軸直角方向の地盤拘束力 σ は、単位投影面積あたりの最大地盤拘束力 σ_{cr} 及び降伏変位 δ_{cr} を用いてバイリニアまたはバイリニアの初期勾配を用いた直線で近似する。あるいは別途実測により求めてもよい。なお、表に示されていない呼び径の場合には、補間より求める。

表 4.4 - 1 呼び径別の管軸直角方向地盤拘束力

呼び径 (mm)	最大地盤拘束力 σ_{cr} (N/cm ²)	降伏変位 δ_{cr} (cm)	地盤ばね係数 $k_2 = \sigma_{cr} / \delta_{cr}$ (N/cm ³)
100	53	2.6	20
150	51	2.6	20
200	48	2.6	18
300	42	2.7	16
400	39	2.8	14
500	36	2.8	13
600	34	2.9	12
650	33	2.9	11
750	32	3.0	11
900	30	3.1	10

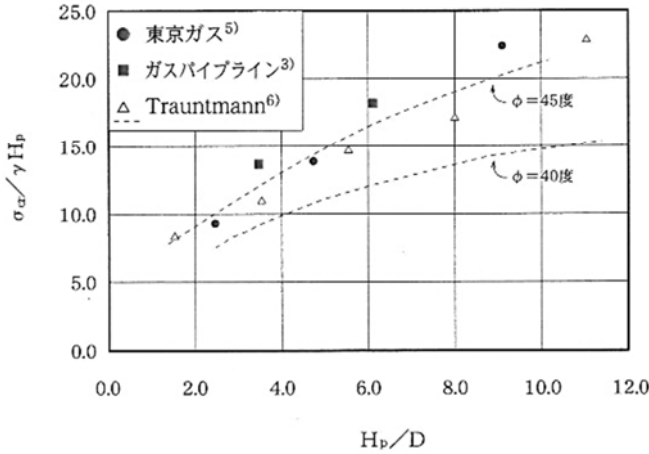


(高圧ガス導管耐震設計指針)

【解説】

(1) 最大地盤拘束力 σ_{cr} の値は、導管の呼び径の他に、埋戻土の締め固め度や埋設深さによっても異なる。実際の埋戻土の締め固め度は、N値や相対密度の調査結果から判断すると密な砂と中密な砂の中間的な範疇に分類でき、内部摩擦角 ϕ は40度相当と考えられる。そこで、 σ_{cr} の値は、Trautmannら⁶⁾ が ϕ をパラメータとして整理した図4.4解-1のうち $\phi = 40$ 度の場合を引用して算定した。なお、土の単位体積重量 $\gamma_t = 17.6 \text{ kN/m}^3$ 、埋設深さ $H_p = 1.8 \text{ m}$ としている。

σ_{cr} を算出するための実規模実験としては東京ガス⁵⁾ 及びガスパイプライン保安対策調査³⁾ があり、非常に密に締め固められた条件 ($\phi = 45$ 度程度) で行われている。これらの結果は図4.4解-1に示すようにTrautmannら⁶⁾ による同程度の締め固め条件での実験結果及び提案曲線とよく一致していることから、Trautmannら⁶⁾ の提案図を利用して σ_{cr} を算定することとした。



(高圧ガス導管耐震設計指針)

図4.4解-1 Trautmannら⁶⁾ の提案による最大地盤拘束力及び実験結果

(2) 地盤拘束力と変位の関係は、東京ガス⁵⁾、ガスパイプライン保安対策調査³⁾、Trautmannら⁶⁾ の実験によると概ね双曲線で近似できる。Trautmannら⁶⁾ の結果を引用すると、その関係は、

$$y = x / (0.17 + 0.83x)$$

(式 4.4-2)

$y = \sigma / \sigma_{cr}$: 正規化された地盤拘束力

$x = \delta / \delta_0$: 正規化された地盤変位

σ : 地盤拘束力

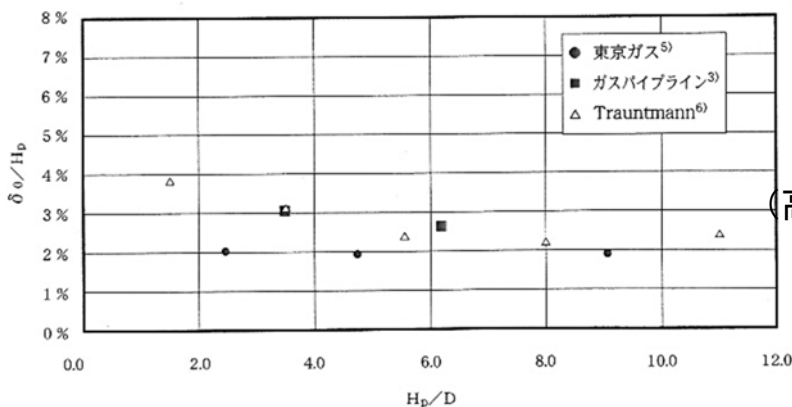
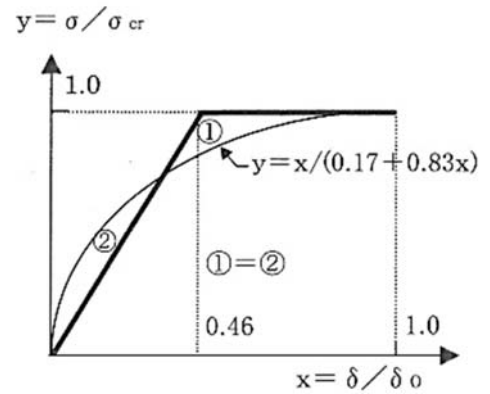
σ_{cr} : 最大地盤拘束力

δ : 地盤変位

δ_0 : 最大地盤拘束力を与える地盤変位

のように表される。

δ_0 の値は、先の実験によると、図4.4解-3に示すように、導管中心までの深さI程度である。

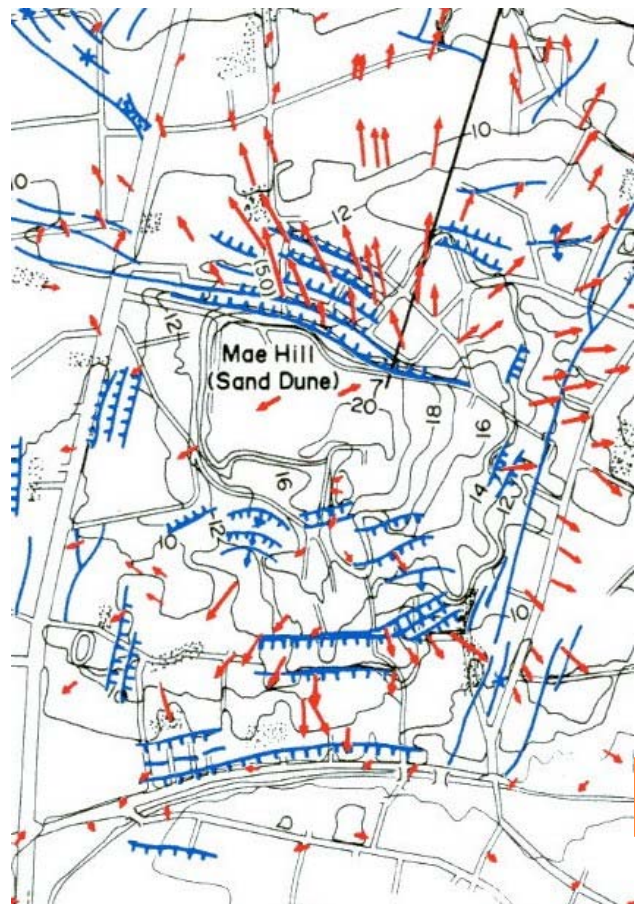
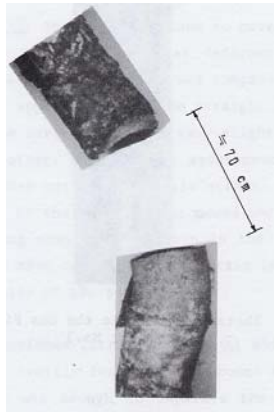


(高圧ガス導管耐震設計指針)

図4.4解-3 最大地盤拘束力を与える地盤変位

2. 1983年に日本海中部地震後に液状化に関して行った実験

1983年日本海中部地震の際に能代の緩やかな傾斜地盤で5mに及ぶ流動が発生し、中圧ガス導管が被害を受けた。

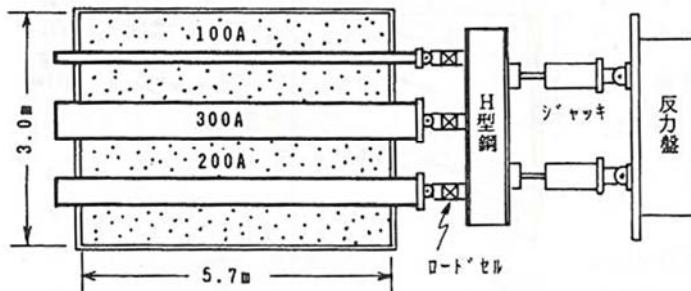


浜田政則・安田進・磯山龍二・恵本克利：
液状化による地盤の永久変位と地震被害に関する研究，土木学会論文集，第376号，
Ⅲ-6，pp. 221-229，1986.

大型土槽での実験

ボイリングにより液状化を発生

(平面図)



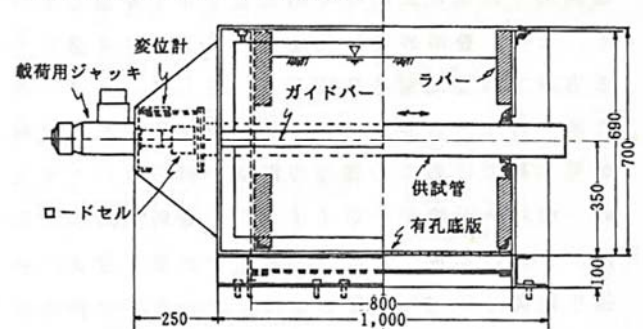
実験内容		土槽	
項目	条件	小型	大型
載荷	管軸方向	○	○
	管軸直角方向	○	
液状化	加振	○	
	ボイリング	○	○
試料	山砂緩詰め	○ ¹⁾	○ ⁴⁾
	〃 超緩詰め	○ ²⁾	
	豊浦砂緩詰め	○ ³⁾	
管径	PLP, 50A	○	
	〃 ,100A	○	○
	〃 ,200A		○
	〃 ,300A		○

1), 2), 3), 4)の相対密度はそれぞれ約70, 0, 50, 10%

小型土槽での実験

加振とボイリングにより液状化を発生

(a)管軸方向実験用(正面図)



単位：mm

(b)管軸直角方向実験用(平面用)

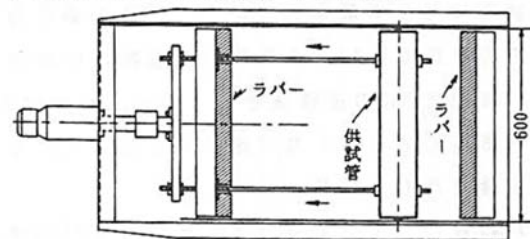


図-1 小型土槽の実験装置

安田進・斉藤公正・鈴木信久：埋設管に対する液状化地盤の拘束力，第19回地震工学研究発表会講演概要，pp. 189-192，1987.

管軸方向载荷試験結果

载荷速度：1~2mm/秒

振幅：±16mm

繰返し回数：3回

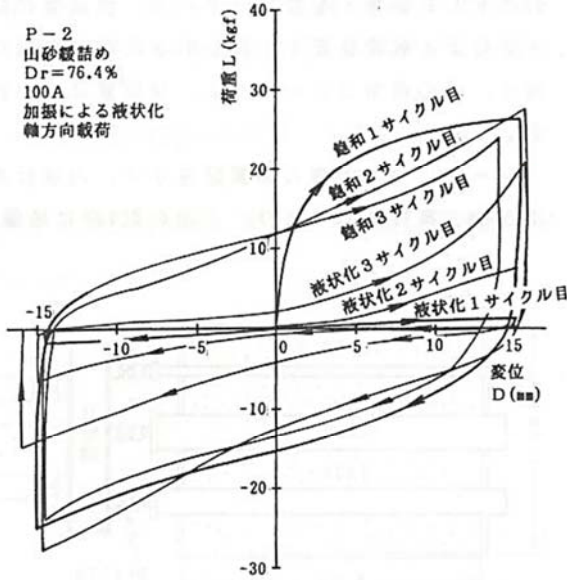


図-4 管軸方向変位～荷重関係例 (小型土槽)

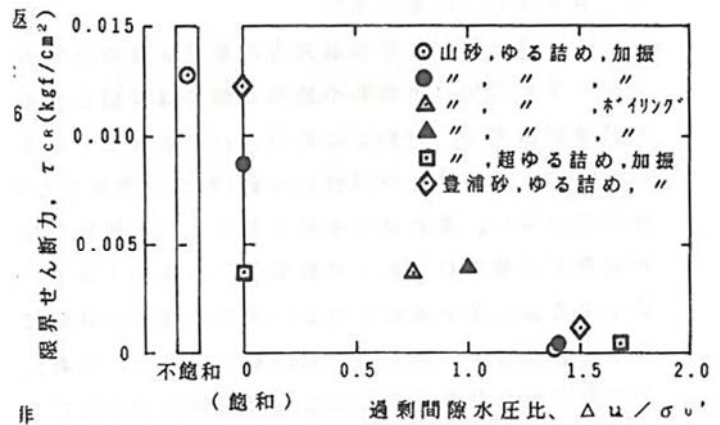


図-5 管軸方向限界せん断力と過剰間隙水圧比 (小型土槽)

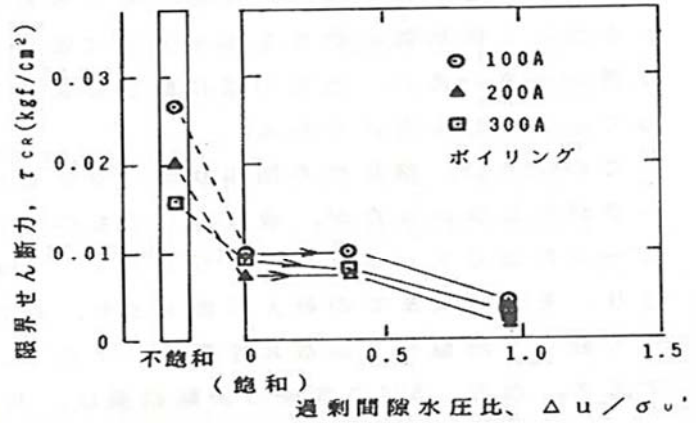


図-6 管軸方向限界せん断力と過剰間隙水圧比 (大型土槽)

管軸直角方向载荷試験結果

载荷速度：1~2mm/秒、20mmまで単調载荷

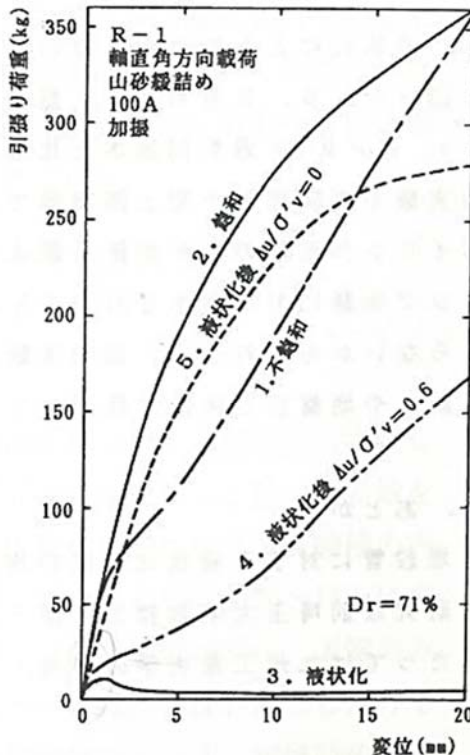


図-7 管軸直角方向変位～荷重関係例 (小型土槽)

5mmの変位を基準にとり、その時点までの最大荷重を投影面積と基準変位で除して地盤反力係数kを算出

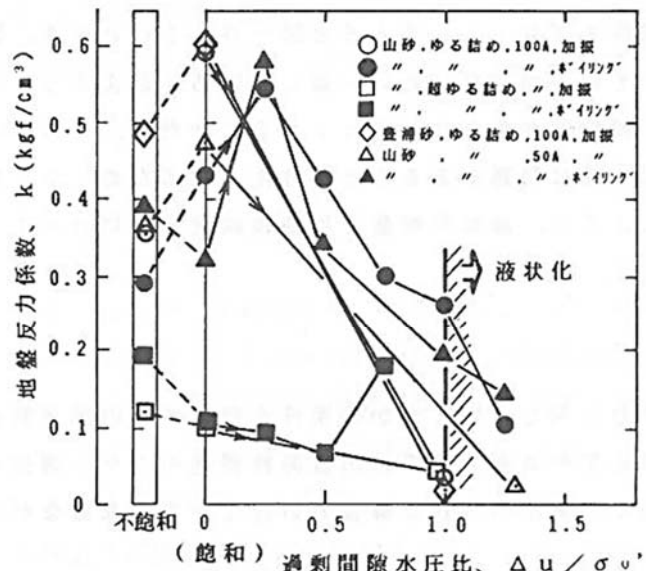


図-8 管軸直角方向地盤反力係数～過剰間隙水圧比 (小型土槽)

飽和状態の限界せん断力を基準にとると

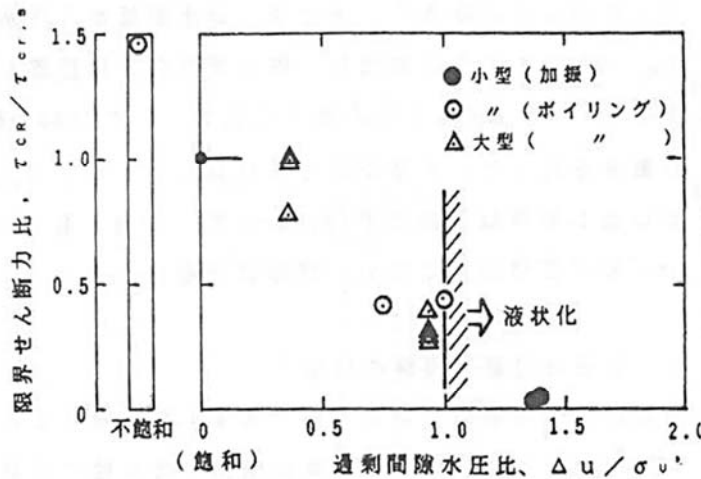


図-9 管軸方向限界せん断力比
過剰間隙水圧比

飽和状態の地盤反力係数を基準にとると

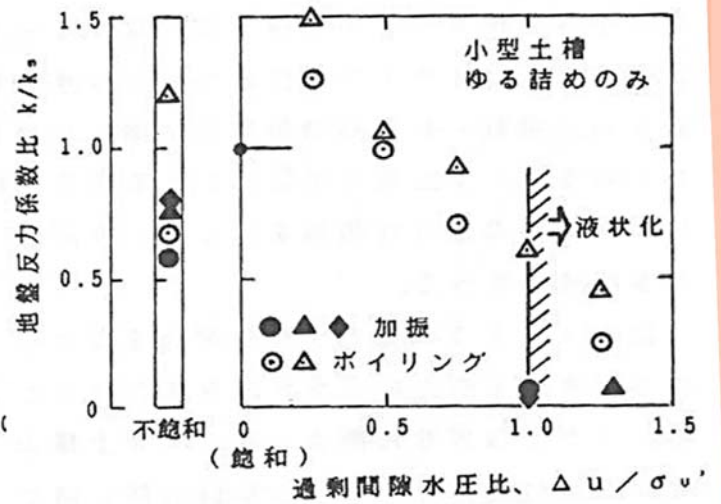
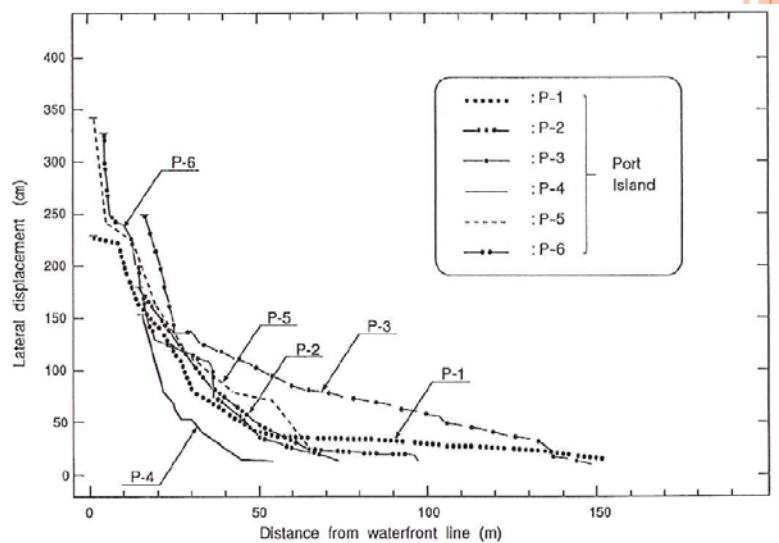


図-10 管軸直角方向地盤反力係数比
と過剰間隙水圧比

3. 1995年阪神・淡路大震災後に流動を対象に設定された高圧ガス導管液状化耐震設計指針

各地の岸壁・護岸背後地盤で流動が発生



流動に対する設計の仕方の開発

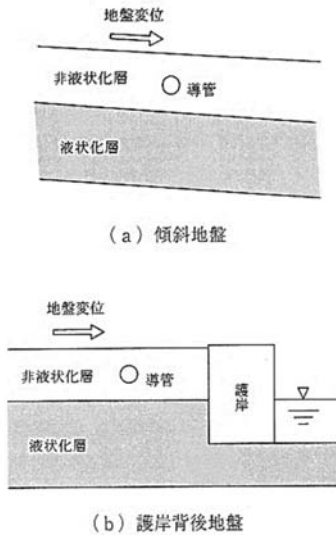
- ①杭基礎：流動力や深さ方向の変位分布を与えて設計する方法
- ②地上配管・埋設管：変位分布で設計する方法

Ishihara, K., Yasuda, S. and Nagase, H. : Soil characteristics and ground damage, *Special Issue of Soils and Foundations*, pp109-118,1996.

高压ガス導管液状化耐震設計指針

6.2 管軸方向の側方流動による地盤拘束力

(2) 液状化による地盤変位によって導管に作用する地盤拘束力は、導管が非液状化層に埋設されている場合と液状化層に埋設されている場合とでは大きく異なる。また、導管の埋設深さ（地表面から導管の管頂までの距離）は、一般的に1.5~1.8m程度であり、表層地盤の非液状化層、液状化層のいずれにも埋設される可能性がある。そこで本指針では、安全側の設計条件を考慮し、解図6-5に示すように、導管は液状化層の上部に存在する非液状化層に埋設されるものとして、導管に作用する地盤拘束力を定めた。



解図6-5 導管の想定埋設位置

(高压ガス導管液状化耐震設計指針)

(1) 管軸方向の側方流動による地盤拘束力は、図6-1に示す地盤と導管の相対変位との関係をバイリニア近似とし、導管単位表面積あたりの限界せん断応力 τ_c 、降伏変位 δ_c 、及び地盤ばね係数 k は、表6-1に示す値とする。

表6-1 管軸方向の限界せん断応力、降伏変位と地盤ばね係数

限界せん断応力 τ_c (N/cm ²)	降伏変位 δ_c (cm)	地盤ばね係数 $k = \tau_c / \delta_c$ (N/cm ³)
1.5	0.25	6.0

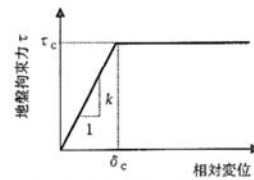


図6-1 地盤拘束力と相対変位の関係

(2) 荷重係数 γ_k は、1.2を標準とする。

【解説】

(1) 本指針を作成するにあたり、導管を液状化層の上部にある非液状化層に埋設し、液状化層に側方流動を発生させ、導管に作用する管軸方向の地盤拘束力を測定する遠心模型実験を実施した。その結果、得られた限界せん断応力 τ_c は、「高压ガス導管耐震設計指針」で定めている非液状化地盤における値とほぼ同じ値であったことから、本指針では限界せん断応力 τ_c は「高压ガス導管耐震設計指針」と同じ値を用いることとし、また降伏変位 δ_c 、地盤ばね係数 k についても同様とした。

6.3 管軸直角方向の側方流動による地盤拘束力

(1) 管軸直角方向の側方流動による地盤拘束力は、図6-2に示す地盤と導管の相対変位との関係をバイリニア近似とし、導管単位投影面積あたりの最大地盤拘束力、降伏変位及び地盤ばね係数は、導管の呼び径に応じて表6-2に示す値とする。なお、表に示されていない呼び径の場合には、補間により求める。

表6-2 管軸直角水平方向の最大地盤拘束力、降伏変位と地盤ばね係数

呼び径	最大地盤拘束力 σ_c (N/cm ²)	降伏変位 δ_c (cm)	地盤ばね係数 $k = \sigma_c / \delta_c$ (N/cm ³)
100A	21	2.6	8.1
150A	20	2.6	7.7
200A	19	2.6	7.3
300A	17	2.7	6.3
400A	16	2.8	5.7
500A	14	2.8	5.0
600A	14	2.9	4.8
650A	13	2.9	4.5
750A	13	3.0	4.3
900A	12	3.1	3.9

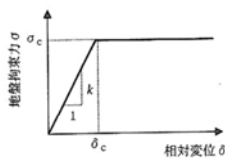


図6-2 地盤拘束力と相対変位の関係

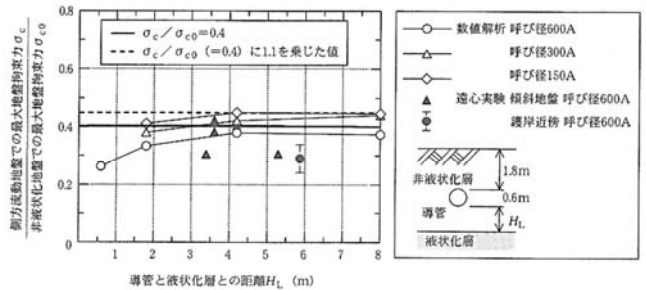
(2) 荷重係数 γ_k は、1.2を標準とする。

【解説】

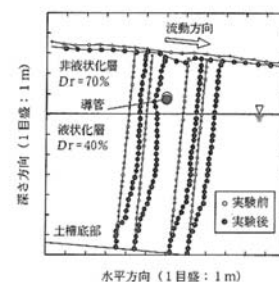
(1) 導管に作用する管軸直角水平方向の地盤拘束力に関しては、導管を液状化層の上部にある非液状化層に埋設し、液状化層に側方流動を発生させる遠心模型実験、振動台実験及び数値解析を実施した。実験及び数値解析により得られた最大地盤拘束力と「高压ガス導管耐震設計指針」に定めている非液状化地盤での最大地盤拘束力の比を解図6-6に示す。これらの実験、数値解析の結果、最大地盤拘束力は「高压ガス導管耐震設計指針」に定めている最大地盤拘束力よりもかなり小さく、その比は平均的には0.4程度となることが明らかとなった。

そこで、「高压ガス導管耐震設計指針」に定める最大地盤拘束力に0.4を乗じた値を液状化耐震設計での管軸直角水平方向の最大地盤拘束力とした。

非液状化地盤に埋設されている場合に比べて、側方流動の影響により導管に作用する管軸直角水平方向の最大地盤拘束力が小さくなる理由として、技術資料-8に示すように、主に2つの点が考えられる。①導管の存在によって地盤の水平変位が妨げられるため、側方流動方向の下流側に地割れが生じ、導管周辺での地盤の水平方向の応力が低下する。②側方流動している地盤では、解図6-7の実験結果が示すように非液状化層の水平方向の動きを導管が拘束するため、導管と表層部との間の水平変位の違い及び導管と下部の液状化層との間の水平変位の違いによって、導管周辺の地盤に大きなせん断ひずみが発生する領域が生じる。このため、導管周辺の地盤の内部摩擦角が当初の40°程度から残留強度に対応する30°程度に低下する。解図6-6の数値解析は、これらの効果を考慮した解析結果を示しており、遠心模型実験より得られた地盤拘束力の結果を良く説明している。



解図6-6 管軸直角方向の最大地盤拘束力比



解図6-7 導管による周辺地盤の水平方向の動きの拘束

(高压ガス導管液状化耐震設計指針)

管軸方向の側方流動実験

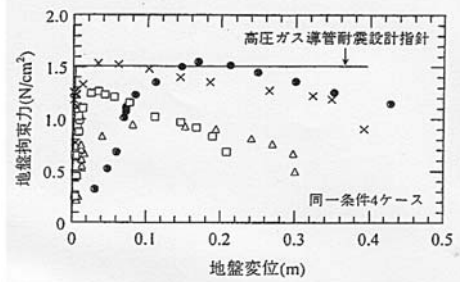
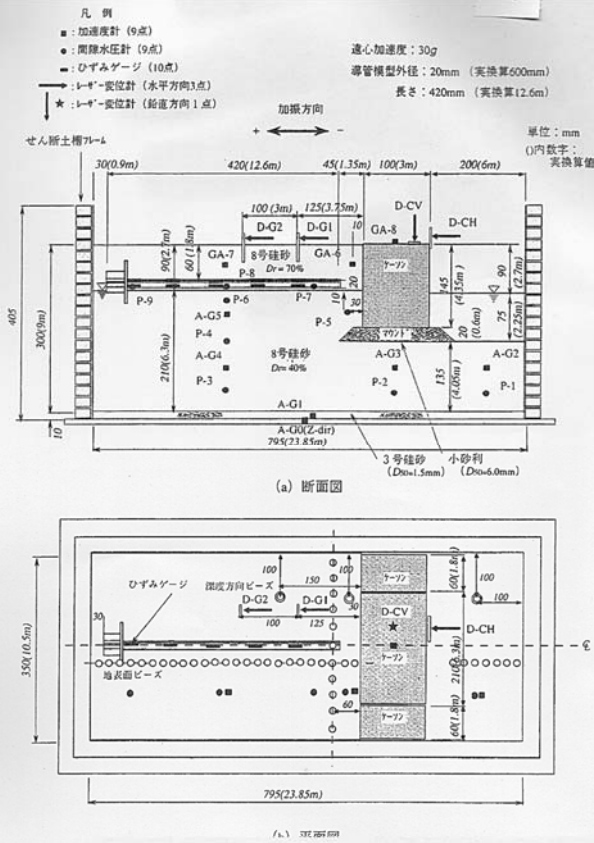


図4-8 地盤拘束力と地盤変位の関係 (呼び径 400A)

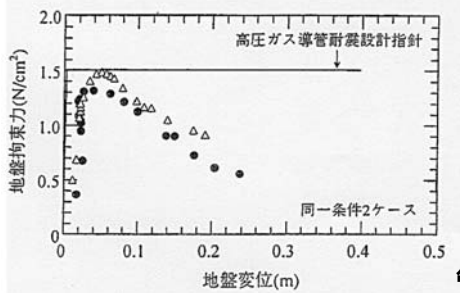


図4-9 地盤拘束力と地盤変位の関係 (呼び径 400A)

(高圧ガス導管液状化耐震設計指針)

地盤拘束力のピーク値である限界せん断応力の値は、1.0~1.5N/cm²である。非液状化地盤の導管移動実験から得られた値に比べるとやや小さいが、導管周辺地盤の相対密度が今回の実験ではほぼ70%であり、導管移動実験ではほぼ100%であったことが、差を生じた要因として考えられる。図4-8および9に示すように、今回の実験での限界せん断応力は、高圧ガス導管耐震設計指針¹⁾で定める非液状化地盤での限界せん断応力にほぼ等しい値であった。限界せん断応力が

管軸直角水平方向の側方流動実験

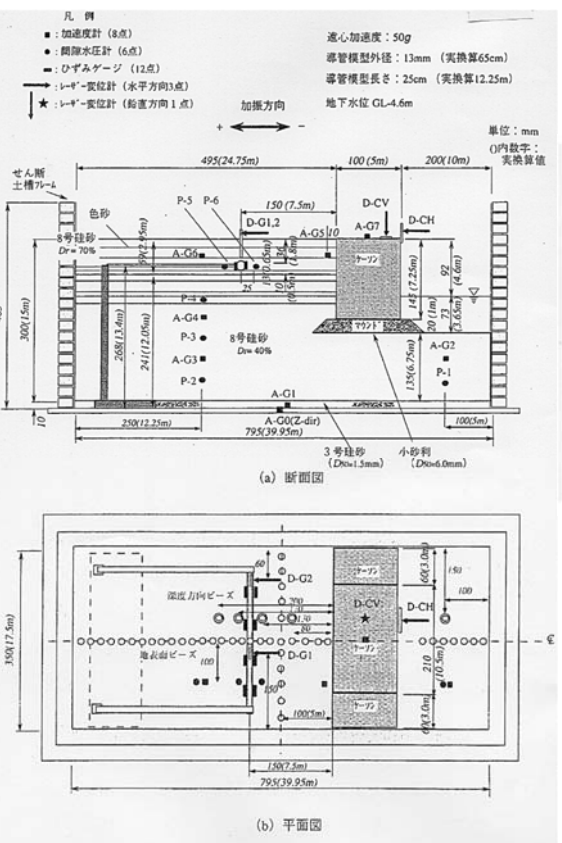


図4-10 管軸直角水平方向の側方流動実験での模型地盤 (Case T5)

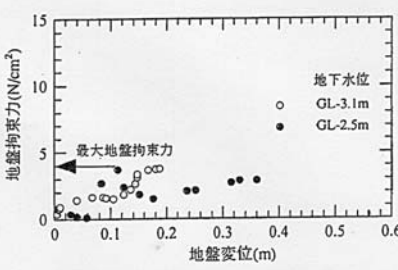


図4-16 地盤拘束力と地盤変位の関係 (呼び径 400A)

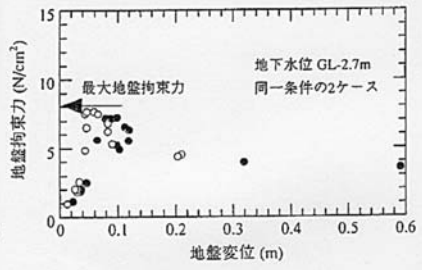


図4-17 地盤拘束力と地盤変位の関係 (呼び径 600A)

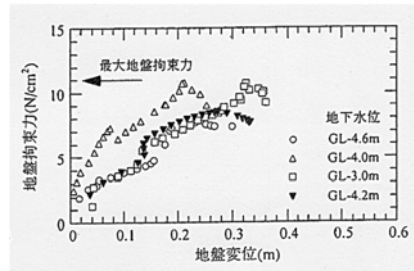


図4-18 地盤拘束力と地盤変位の関係 (呼び径 650A)

(高圧ガス導管液状化耐震設計指針)

図より、最大地盤拘束力は、呼び径 400A で約 4N/cm²、600A で約 8 N/cm²、650A で約 11 N/cm² である。高圧ガス導管耐震設計指針¹⁾で定める非液状化地盤での最大地盤拘束力は、それぞれの呼び径で、39, 34, 33N/cm²なので、その0.10~0.33倍の大きさとなった。また、地下水位の位置による顕著な差異はなかった。

傾斜地盤モデルの側方流動実験

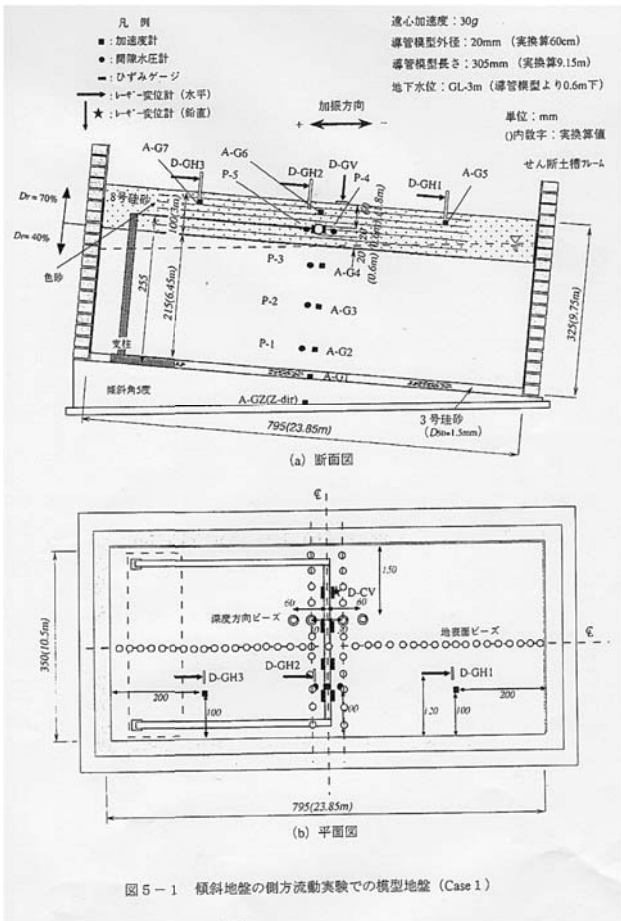


図5-1 傾斜地盤の側方流動実験での模型地盤 (Case 1)

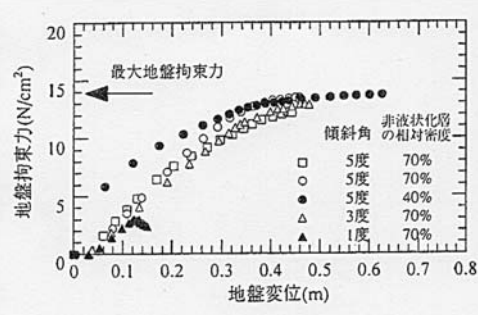


図5-8 地盤拘束力と地盤変位の関係 (呼び径 600A, 地下水位 GL-3.0m)

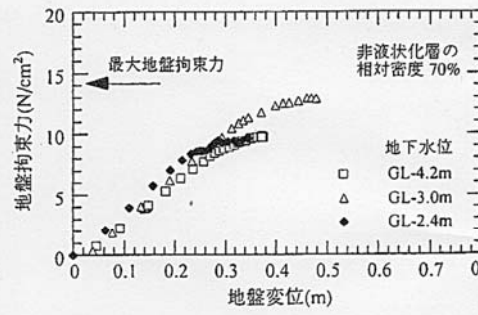


図5-9 地盤拘束力と地盤変位の関係 (呼び径 600A, 傾斜角 3°)

(高圧ガス導管液状化耐震設計指針)

最大地盤拘束力は、図5-8および9より約 14N/cm² であり、高圧ガス導管耐震設計指針で定める非液状化地盤での呼び径 600A の最大地盤拘束力が 34N/cm² なので、その 0.4 倍の大きさ となった。

4. 1999年集集地震の断層によるガス導管の被害と関連した小型模型実験

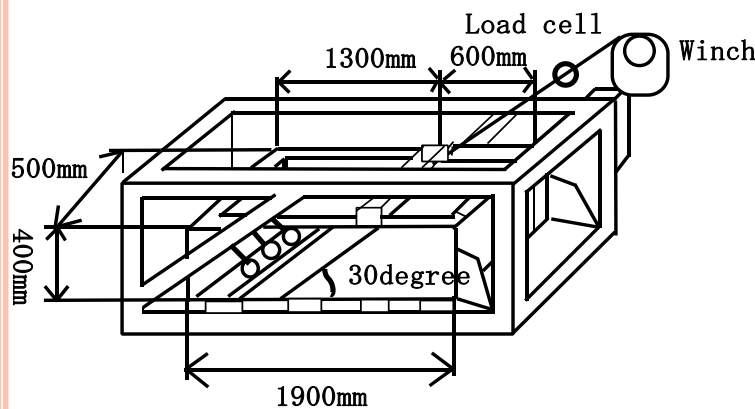
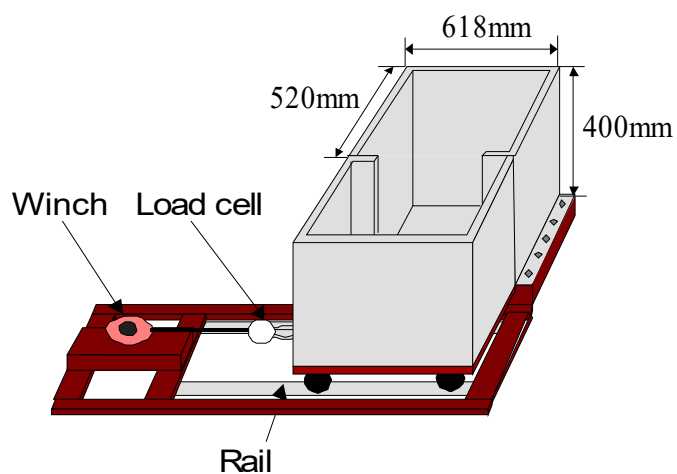


ガス導管被害発生箇所と被害写真

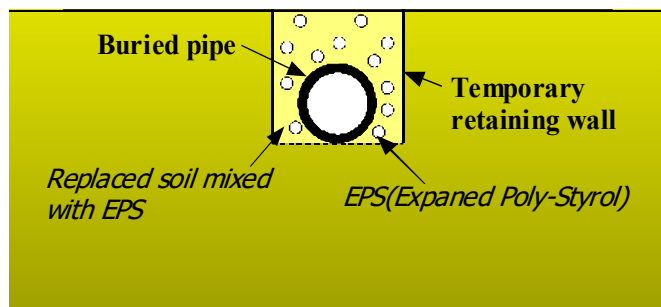
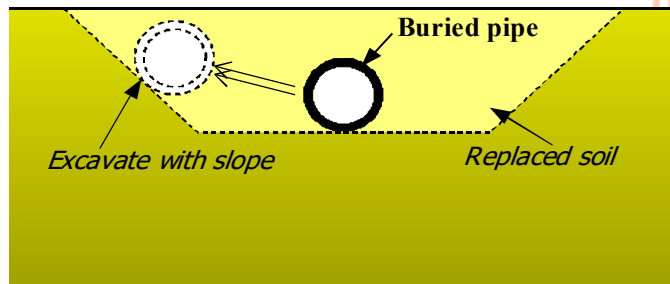
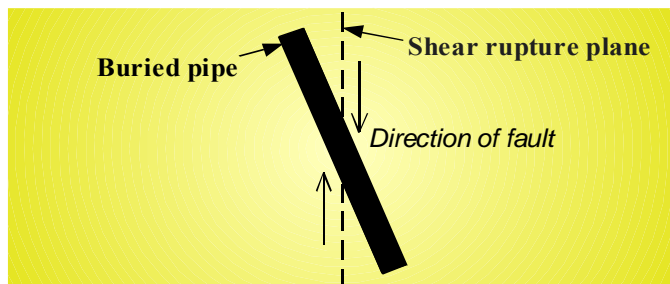


Yasuda, S., Kishino, H., Yoshizaki, K, Suzuki, N. and Isoyama, R.: Countermeasures of buried steel pipes against surface fault raptures, *13th WCEE*, Paper No.916, 2004.

小型模型実験



思いついた対策方法



21

ただし、地盤の拘束力に関しては検討しなかった。

5. 2017年新潟県中越沖地震によるガス導管の長柱座屈被害と小型土槽実験

2007年新潟県中越沖地震におけるガス導管の被害数

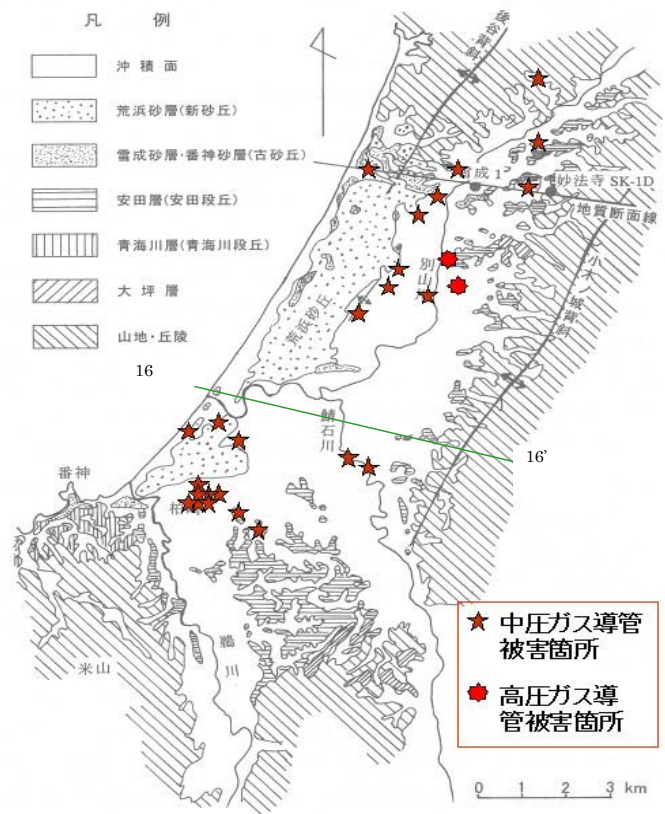
- ・ 高圧ガス導管 (Φ114mm) : 2箇所
- ・ 中圧ガス導管 (Φ50mm~300mm) : 27箇所
- ・ 低圧ガス導管 (本支管) : 166箇所
- ・ 低圧ガス導管 (供給管・内管) : 3086箇所

導管	高圧 ¹⁴	2	・ 小口径管における長柱座屈 (2件とも石油資源開発(株)吉井~妙法寺送ガス栓)	
	中圧 ¹⁵	27 (26件: 柏崎市ガス水道局、1件: 長岡市水道局)	・ 小口径管における長柱座屈 (13箇所) ・ 地盤変状と溶接部品質不良による被害 (12箇所) ・ 水取り器立管 ¹⁶ のねじ部 (2箇所) ・ 更生修理工法 ¹⁷ (反転シール工法 ¹⁸)は被害なし ・ 橋梁管、地区整圧器は被害なし	
	低圧 ^{19a}	本支管 ²⁰	166	・ 被害の大半はねじ継手部からの漏えい
	供給管・内管 ²²	3,086	・ ポリエチレン管 ²¹ は被害なし	
	整圧器 ²³	0	・ 建屋は一部破損	

※ガス導管への水や泥の浸入のあった被害甚大地区では、ガス復旧を優先するために、仮設配管、旧管の残置・新管敷設、両ガス区間の切断などで復旧対応を行ったため、被害箇所数は確認できていない。

(新潟県中越沖地震における都市ガス事業・施設に関する検討会報告書, 経済産業省より)

中圧ガス導管の長柱座屈状況



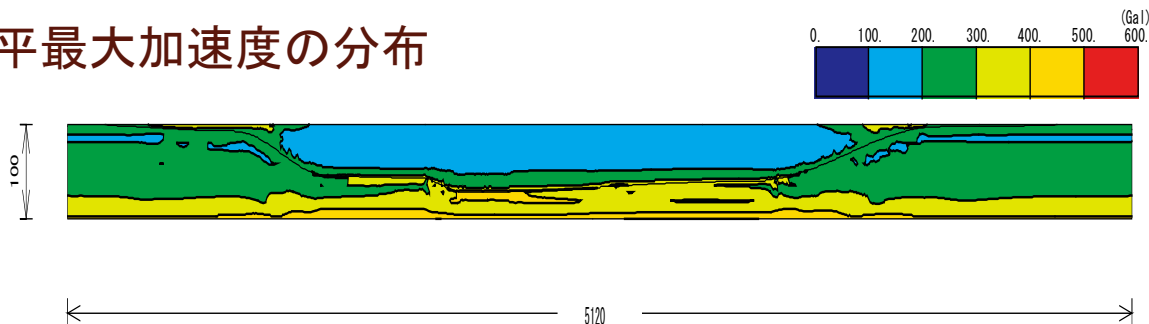
柏崎とその周辺における地形と中圧・高圧ガス導管被害箇所

経済産業省「新潟県中越沖地震における都市ガス事業・施設に関する検討会」による被害要因の分析結果

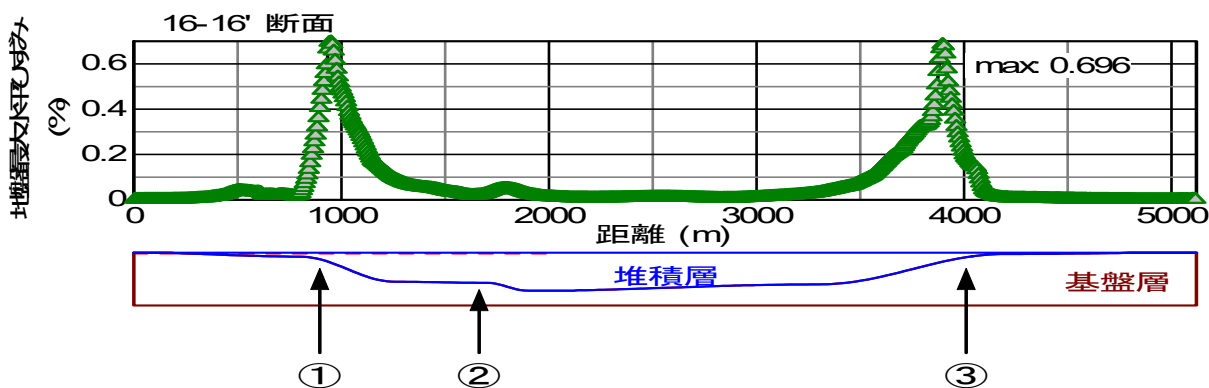
- (1) 高・中圧ガス導管の全体の被害に影響を与えた要因
 - ①震源の特性と深部地盤構造の特性
 - ②盆状の沖積層基盤面、かつ、厚く堆積した軟弱な沖積層の影響
 - ③局所的な地形条件の影響
- (2) 小口径管の長柱座屈被害が発生したことに対するさらなる要因
 - ①ガス導管周囲の柔らかい地盤
 - ②「小口径で長い直線状の配管」のガス導管
- (3) 局所的な大きな揺れや液状化による複雑な地盤変状と部分的な溶接部品質の不良による被害に対し
 - ①沖積層基盤面の急変部
 - ②液状化による地盤変状
 - ③溶接部品質不良のさらなる要因が挙げられた。

柏崎平野の断面に対する地震応答解析

水平最大加速度の分布



ガス導管の一般的な埋設深度であるGL-1.5mにおける地盤の水平方向ひずみの分布



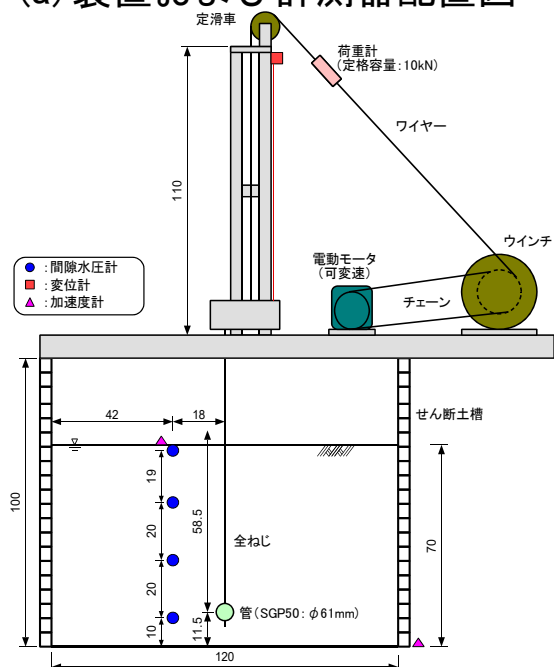
25

安田進・柳田誠・清水謙司・渡辺尚志：新潟県中越沖地震におけるガス導管被害と柏崎平野の地盤特性との関係，第45回地盤工学研究発表会，pp. 1319-1320，2010.

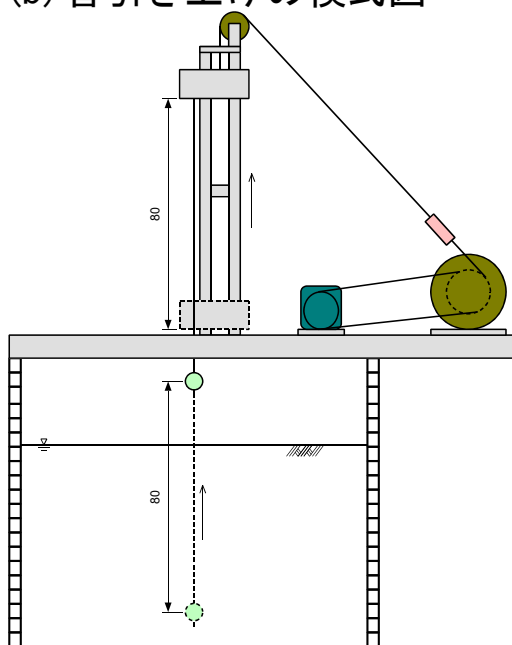
液状化による拘束力の変化を検討する小型振動台実験

目的：地盤拘束力に関してはこれまで静的に引っ張りや引き抜きの実験が行われ、拘束力の値が求められてきた。ところが地震の最中には地震動や液状化の発生などによって、拘束力が変化することが考えられる。そこで、振動台によって加振しながら管を引き上げる実験を行い、拘束力に与える地震動の影響を調べる。

(a) 装置および計測器配置図



(b) 管引き上げの模式図



26

埋設管 (SGP50相当)



Case No.	模型地盤 締固め度 (%)	目標加速度 (Gal)	平均加速度 (Gal)
1	85%	-	-
2		-	-
3		30	25.8
4		30	32.9
5		50	49.5
6		50	59.4
7		100	92.9
8		100	93.7
9		200	182.4
10		250	244
11	95%	-	-
12		100	99.7
13		115	116.6
14		130	135.3
15		150	156.4
16		200	198.6
17		250	245.3
18		300	292.0
19		300	293.9
20		350	360.3
21		400	387.5

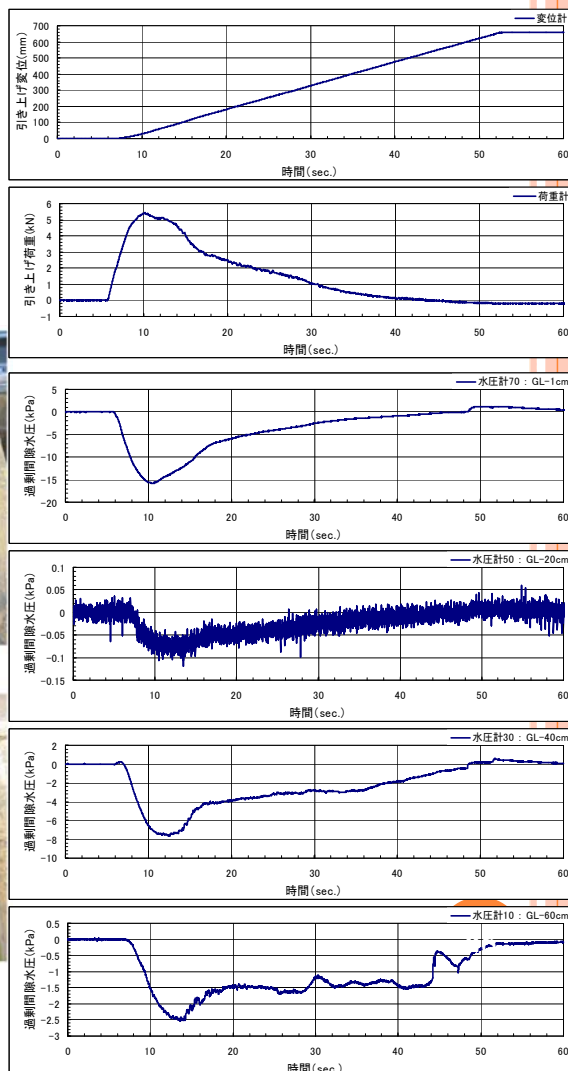
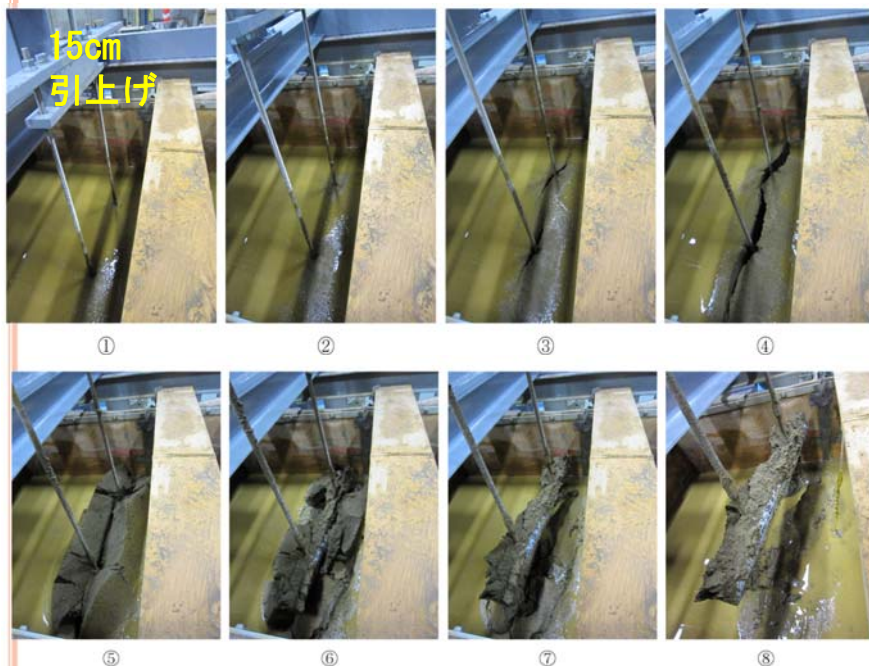
☆地盤の締固め度：85%と95%
 ☆埋設管の引き上げは、加振を20波（10秒間）加えた後、一定速度（13.9mm/s）で引き上げた。

安田進・田中智宏・大保直人・松本真吾・小澤直輝・島岡翔：液状化が埋設管の管軸直角方向の地盤拘束力に与える影響に関する振動台実験，第46回地盤工学研究発表会講演集，pp. 1579-1580，2011.

静的引き上げ時

引き上げ変位，
荷重，間隙水圧
の時刻歴（実験
No.3，静的引き
上げ）

連続写真



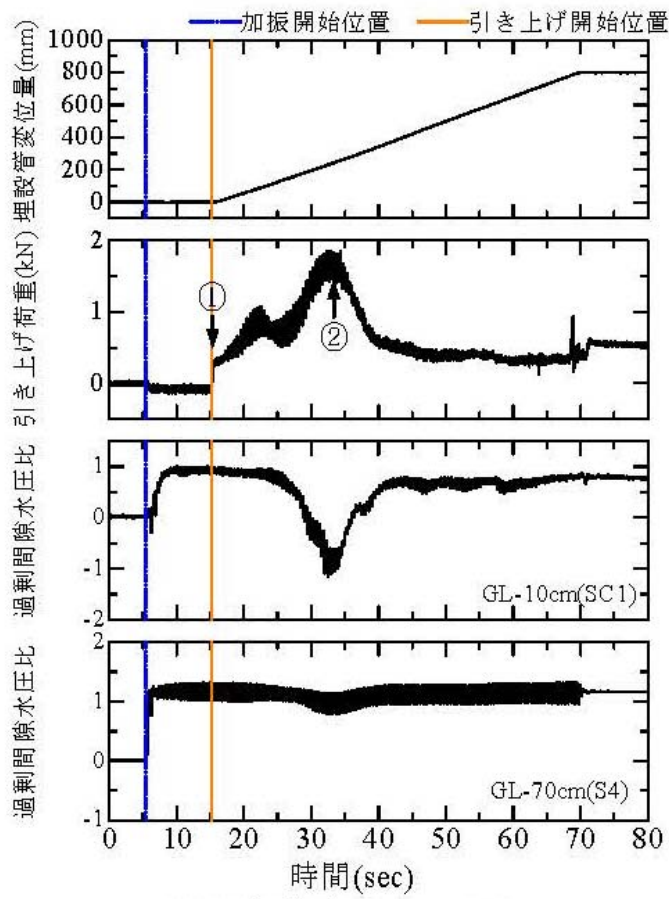


図 2.時刻歴図(Case.10)

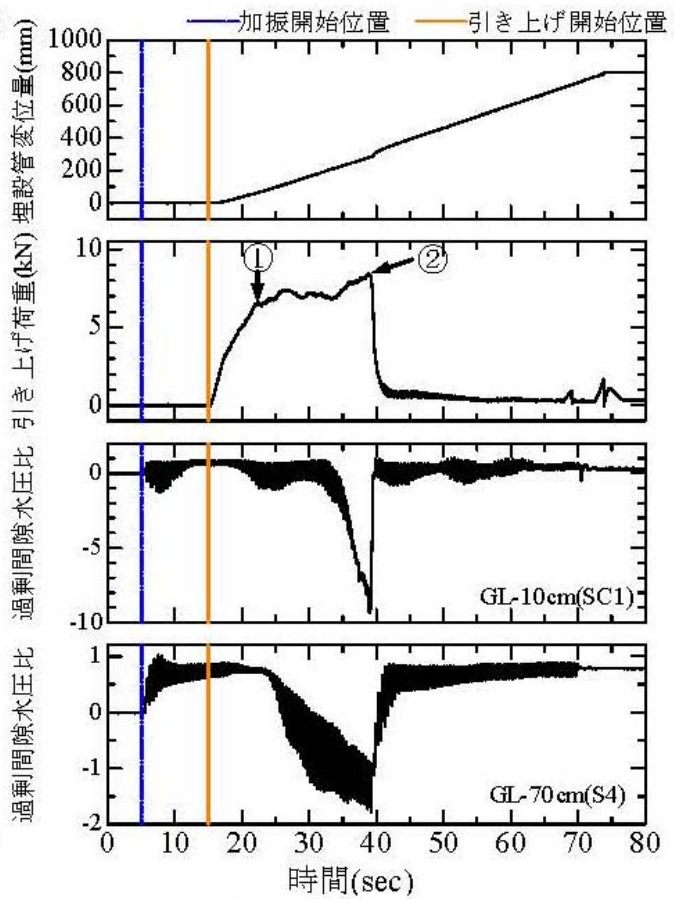


図 3.時刻歴図(Case.16)

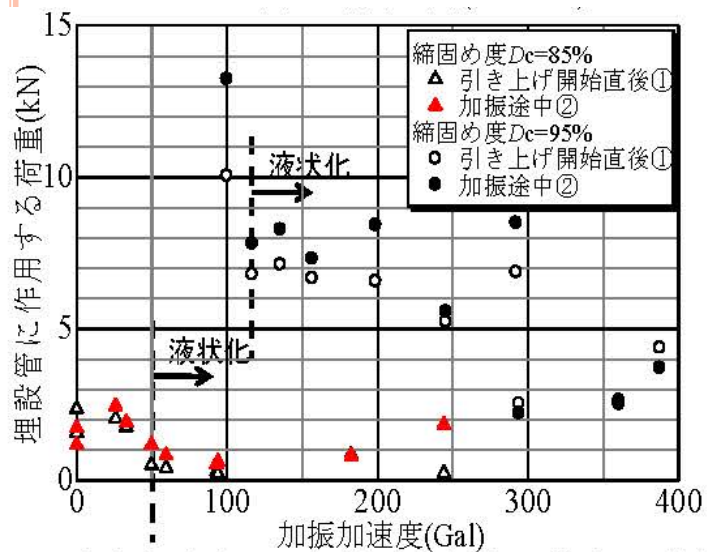


図 4.加振加速度と埋設管に作用する荷重の関係

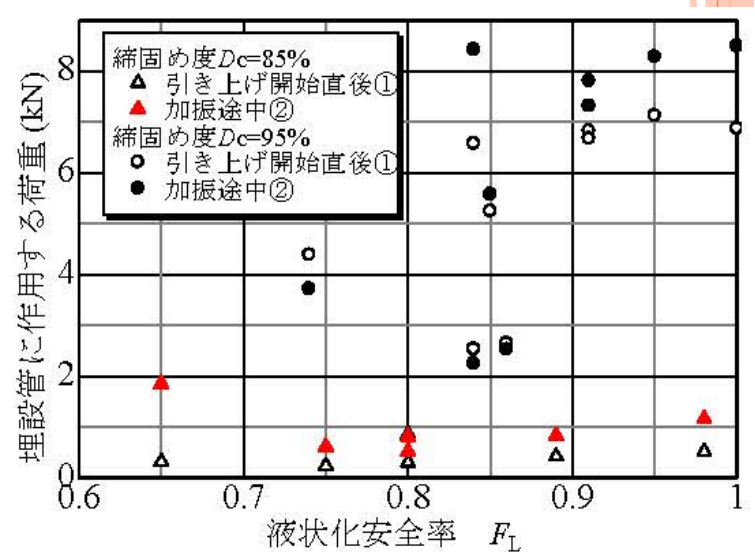


図 5.液状化 F_L と埋設管に作用する荷重の関係