

# 博 士 論 文

高・中圧ガス導管における  
長管座屈防止のための耐震設計法に関する研究

新 海 元

## 目 次

<b>第 1 章 序論</b> . . . . .	1
1.1 本研究の背景 . . . . .	1
1.1.1 ガス事業に大きな被害を与えた代表的な地震 . . . . .	2
1.1.2 ガス事業の地震対策に対する取組み . . . . .	3
1.2 新潟県中越沖地震の概要 . . . . .	4
1.2.1 地震の概要 . . . . .	4
1.2.2 ガス事業に係る被害状況 . . . . .	9
1.3 被害事例の概要 . . . . .	15
1.3.1 調査結果 . . . . .	16
1.3.2 被害状況のまとめ . . . . .	19
1.4 本研究の目的 . . . . .	19
1.5 本論文の構成 . . . . .	19
第 1 章の参考文献 . . . . .	22
<b>第 2 章 鋼管の材料特性</b> . . . . .	24
2.1 概要 . . . . .	24
2.2 鋼管の管種と口径 . . . . .	24
2.3 降伏応力及び引張強さ . . . . .	24
2.4 引張特性 . . . . .	25
2.4.1 降伏棚型の引張特性 . . . . .	25
2.4.2 ラウンドハウス型の引張特性 . . . . .	26
第 2 章の参考文献 . . . . .	27
<b>第 3 章 鋼管の変形過程の解析モデルの構築</b> . . . . .	28
3.1 概要 . . . . .	28
3.2 全体解析モデル . . . . .	28
3.3 部分解析モデル . . . . .	29
3.4 まとめ . . . . .	30

<b>第4章 実管実験による解析モデルの検証</b>	31
4.1 概要	31
4.2 屋内土槽長管座屈実験（土槽実験）	31
4.2.1 実験方法	31
4.2.2 土槽実験結果と部分解析モデルとの比較	32
4.3 屋外長管座屈実験（フィールド実験）	35
4.3.1 実験方法	35
4.3.2 フィールド実験結果と部分解析モデルとの比較	36
4.4 まとめ	38
第4章の参考文献	39
<b>第5章 解析モデルの条件設定</b>	40
5.1 浅層不整形地盤の影響	40
5.1.1 概要	40
5.1.2 浅層不整形地盤ひずみ	40
5.1.3 浅層不整形地盤における地震波形	41
5.1.4 まとめ	44
5.2 管軸直角方向の地盤拘束力	44
5.2.1 概要	44
5.2.2 管軸直角方向の地盤拘束力	45
5.2.3 地盤拘束力の初期勾配	46
5.2.4 管軸直角方向地盤拘束力の初期勾配の影響	47
5.2.5 まとめ	50
第5章の参考文献	52
<b>第6章 座屈開始以降の変形過程の解析</b>	53
6.1 座屈開始判定	53
6.1.1 概要	53
6.1.2 解析方法	53
6.1.3 解析結果	57
6.1.4 座屈開始判定	63
6.1.5 まとめ	68

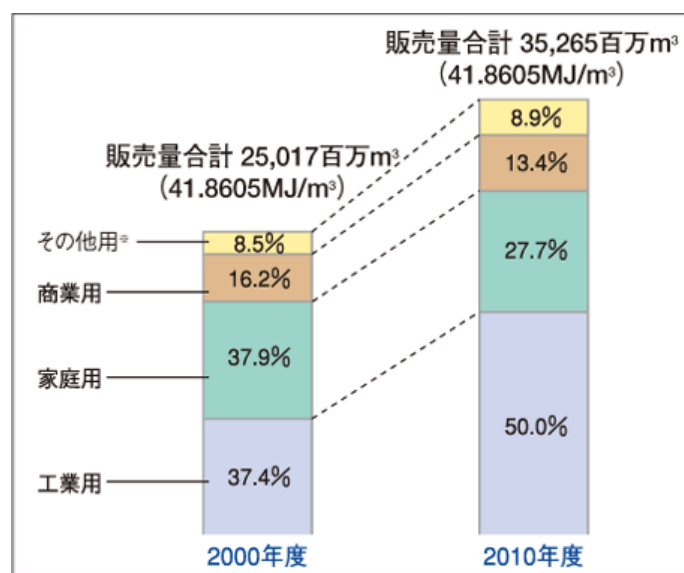
6.2	局部座屈開始判定	69
6.2.1	概要	70
6.2.2	解析方法	70
6.2.3	解析条件	72
6.2.4	解析ケース	75
6.2.5	局部座屈開始の判定方法	76
6.2.6	局部座屈開始判定結果	78
6.2.7	座屈及び局部座屈判定結果の整理	81
6.2.8	まとめ	81
6.3	座屈及び局部座屈が開始しない直線長	82
6.3.1	概要	82
6.3.2	座屈防止のための直線長	82
6.3.3	解析条件	85
6.3.4	座屈及び局部座屈が開始しない直線長の算出方法	90
6.3.5	座屈防止のための直線長の比較	92
6.3.6	まとめ	92
	第6章の参考文献	93
<b>第7章 詳細耐震設計と標準耐震設計</b>		<b>94</b>
7.1	詳細耐震設計	95
7.2	標準耐震設計	95
7.3	標準耐震設計で重要な「直線長の簡易計算式」	95
7.3.1	概要	95
7.3.2	前提条件	96
7.3.3	直線区間端部の配管要素の影響	96
7.3.4	浅層不整形地盤における座屈が開始しない直線長	101
7.3.5	直線長の簡易計算式	104
7.3.6	まとめ	108
	第7章の参考文献	110

<b>第 8 章 耐震設計の具体的手順</b>	111
8.1 設計条件	111
8.2 詳細耐震設計	111
8.2.1 ガス導管の材料特性	111
8.2.2 設計地震動	112
8.2.3 表層地盤変位及び地盤ひずみ	112
8.2.4 浅層不整形地盤	112
8.2.5 地盤拘束力	113
8.2.6 座屈開始ひずみ	113
8.2.7 座屈開始判定	114
8.2.8 座屈防止のための直線長	114
8.2.9 まとめ	115
8.3 標準耐震設計	115
8.3.1 耐震設計が必要な地盤の固有周期	115
8.3.2 直線長の上限值	116
8.3.3 標準耐震設計の手順	118
8.3.4 整合性の検証	119
第 8 章の参考文献	122
<b>第 9 章 結論</b>	123

## 第1章 序論

### 1.1 本研究の背景

現代社会において、ガス、水道、電気等の公共公益設備や、電話やインターネット等の通信設備、各種物品の輸送や人の移動手段としての鉄道等の交通設備は、我々が都市機能を維持し日常生活を送る上でなくてはならないものである。これらの設備はライフラインと称されるものであり、仮に地震等の災害により各種設備がその機能を停止した場合、我々の生活に及ぼす影響は計り知れないものとなる。図-1.1<sup>1)</sup>に示すように、公共公益設備の中でも、特にガスに着目すると、総合熱エネルギー効率の高さや、いつでも必要な時に必要なだけ使えるというガスの利便性から、国民生活や産業分野において広く使用されており、ガス事業におけるガスの安定供給、保安の確保という責務は益々重要なものとなっている。



※その他用： 病院、公共施設等

図-1.1 都市ガス販売量の用途別構成比<sup>1)</sup>

このため、ガス業界では都市ガスを安全に安定供給するための新技術の導入をはじめ、製造工程の合理化、供給体制の整備と強化を進めつつ、都市ガス工場から需要家に至るまで 24 時間体制で安全の確保に努めている。具体的な取組みとして、マイコンメーターをはじめ、ガス管、ガス栓、ガス機器に至るまで、最新鋭の安全設備や機能を提案し、普及促進を図っている。さらに、我が国のガス事業においては、昭和 39 年に発生した新潟地震をはじめとし、過去、地震災害を経験するたびに、調査、原因

究明、災害防止対策の策定と導入が実施されており、各事業団体及び各事業者は設備対策、緊急対策、復旧対策を講じる等、地震対策について積極的に取り組んでいる。

ところが、平成 19 年 7 月 16 日に発生した新潟県中越沖地震では、口径 100A 以下の溶接接合された高・中圧ガス導管で、過去に前例のない座屈による被害が 15 箇所を確認された。こうしたガス導管の地震被害を抑えるためには、今回発生した座屈現象の真相を解明し、大地震の際にも被害が容易に生じることのないよう対応策の検討を行い、今後の設計、施工に適切に反映していくことが重要な課題となっている。

### 1.1.1 ガス事業に大きな被害を与えた代表的な地震

近年、我が国のガス事業に大きな被害を与えた代表的な地震を表-1.1 に示す。

表-1.1 ガス事業に大きな被害を与えた代表的な地震

地震名称 発生年月日	規模 最大震度	震央 震源の深さ	ガス事業の被害概況
新潟地震 1964 年（昭和 39 年）6 月 16 日	M7.5 震度 5	新潟県粟島南方沖 40km 深さ 34km	液状化現象
宮城県沖地震 1978 年（昭和 53 年）6 月 12 日	M7.4 震度 5	宮城県沖 深さ 40km	供給停止 約 160,000 戸
日本海中部地震 1983 年（昭和 58 年）5 月 26 日	M7.7 震度 5	秋田県能代市西方 沖 80km 深さ 14km	液状化現象 供給停止 約 15,000 戸
千葉県東方沖地震 1987 年（昭和 62 年）12 月 17 日	M6.7 震度 5	千葉県房総半島 九十九里浜付近 深さ 58km	供給停止 約 4,700 戸
釧路沖地震 1993 年（平成 5 年）1 月 15 日	M7.5 震度 6	北海道釧路市南方 沖 15km 深さ 101km	供給停止 約 9,300 戸
北海道南西沖地震 1993 年（平成 5 年）7 月 12 日	M7.8 震度 6	北海道奥尻郡奥尻 町北方沖 深さ 35km	液状化現象 供給停止 約 1,400 戸
兵庫県南部地震 1995 年（平成 7 年）1 月 17 日	M7.3 震度 7	淡路島北部、兵庫 県津名郡北淡町 深さ 16km	大都市直下型地震 液状化現象 供給停止 約 860,000 戸 (非裏波溶接鋼管、ネジ支管損傷)
新潟県中越地震 2004 年（平成 16 年）10 月 23 日	M6.8 震度 7	新潟県中越地方 深さ 13km	供給停止 約 57,000 戸 (非裏波溶接鋼管、ネジ支管損傷)
新潟県中越沖地震 2007 年（平成 19 年）7 月 16 日	M6.8 震度 6 強	新潟県上中越沖 深さ 17km	供給停止 約 34,000 戸 (新たな事象である座屈現象 15 件)

### 1.1.2 ガス事業の地震対策に対する取組み

我が国のガス事業においては、過去の大きな地震災害を教訓として、様々な地震対策の取組みを行ってきた。新潟地震から中越地震までの代表的な地震対策の取組みを表-1.2 に示す<sup>2)</sup>。

表-1.2 ガス事業者の地震対策の取組み<sup>2)</sup>

<ul style="list-style-type: none"><li>●新潟地震発生(1964年6月) ガス工作物に対する地震荷重の考え方、災害復旧方法について取り纏めた図書の発行(1965年6月)</li><li>●十勝沖地震発生(1968年5月) 地震・洪水等非常事態におけるガス事業者間の救援措置について考え方を統一(1968年6月)</li><li>●宮城県沖地震発生(1978年6月) ガス業界として予防・緊急・復旧対策を含んだ地震防災対策ガイドラインを発行(1981年12月) ガス導管について耐震設計指針を発行(1982年3月) ガス用ポリエチレン管を技術基準に規定(1982年11月)</li><li>●日本海中部地震発生(1983年5月) 製造設備について耐震設計指針を発行(1985年3月)</li><li>●千葉県東方沖地震発生(1987年12月) ガス導管の早期復旧に向けた地震時ガス導管復旧作業の手引を発行(1990年1月)</li><li>●釧路沖地震・北海道南西沖地震発生(1993年1月、7月) 地震時における広報活動の手引きを発行(1994年2月) 地震時におけるガス導管緊急措置の手引を発行(1995年1月)</li><li>●兵庫県南部地震発生(1995年1月) 大規模災害時における開閉栓標準業務要領を発行(1996年3月) 大規模災害時における避難所等の復旧支援設備を発行(1996年3月) 設備対策計画作成の手引を発行(1996年9月) 予防・緊急・復旧対策を見直し、地震防災対策ガイドラインを改訂(1998年3月) 高圧ガス導管について耐震設計指針を発行(2000年3月)<sup>*</sup> 地震時における広報活動のガイドブックを改訂(2000年2月) 製造設備について耐震設計指針を発行(2001年8月) 高圧ガス導管について液状化耐震設計指針を発行(2001年12月)</li><li>●新潟県中越地震発生(2004年10月) 中越地震を踏まえ、予防・緊急・復旧対策を見直し、地震防災対策ガイドラインを全面改訂(2007年3月)</li><li>●新潟県中越沖地震発生(2007年7月)</li></ul>
--

注) <sup>\*</sup>高圧ガス導管耐震設計は資料編を参照。



## 1.2 新潟県中越沖地震の概要

### 1.2.1 地震の概要

平成 19 年 7 月 16 日（月・祝）10 時 13 分頃、新潟県上中越沖の深さ 17km を震源とするマグニチュード 6.8 の地震が発生し、新潟県柏崎市、長岡市、刈羽村と長野県飯綱町で震度 6 強、新潟県上越市、小千谷市、出雲崎町で震度 6 弱を観測したほか、北陸地方を中心に東北地方から近畿・中国地方にかけて震度 5 強から震度 1 を観測した。地震が発生した新潟県上中越沖は、平成 16 年 10 月 23 日に発生した新潟県中越地震の震源地から西側に位置している。

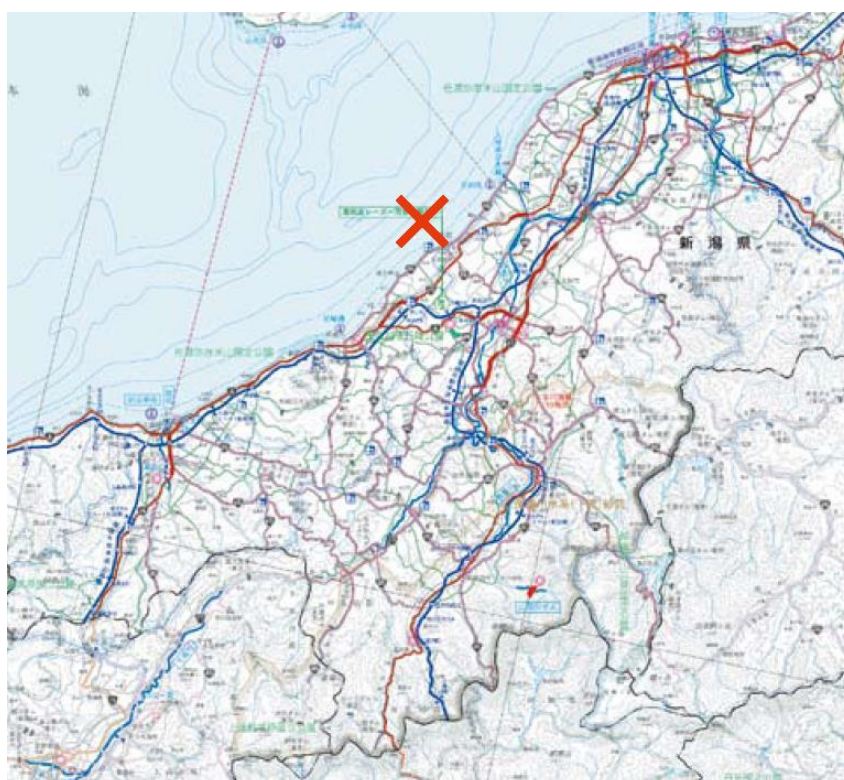


図-1.2 新潟県中越沖地震の震源地（新潟県上中越沖）<sup>3)</sup>

この地震の発震機構は北西－南東方向に圧縮され、断層沿いに上下にずれる「逆断層型」で同年 3 月 25 日に発生した能登半島地震、平成 16 年の新潟県中越地震と同様のメカニズムであった。震度分布を図-1.4、図-1.5 に<sup>4)</sup>、地殻変動ベクトル図を図-1.6、図-1.7 に<sup>5)</sup>、被害状況を図-1.8<sup>3)</sup>、図-1.9<sup>6)</sup>に示す。

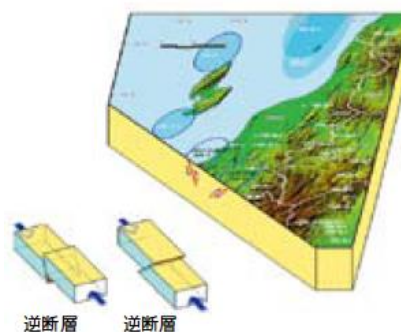


図-1.3 逆断層型の発生メカニズム<sup>3)</sup>

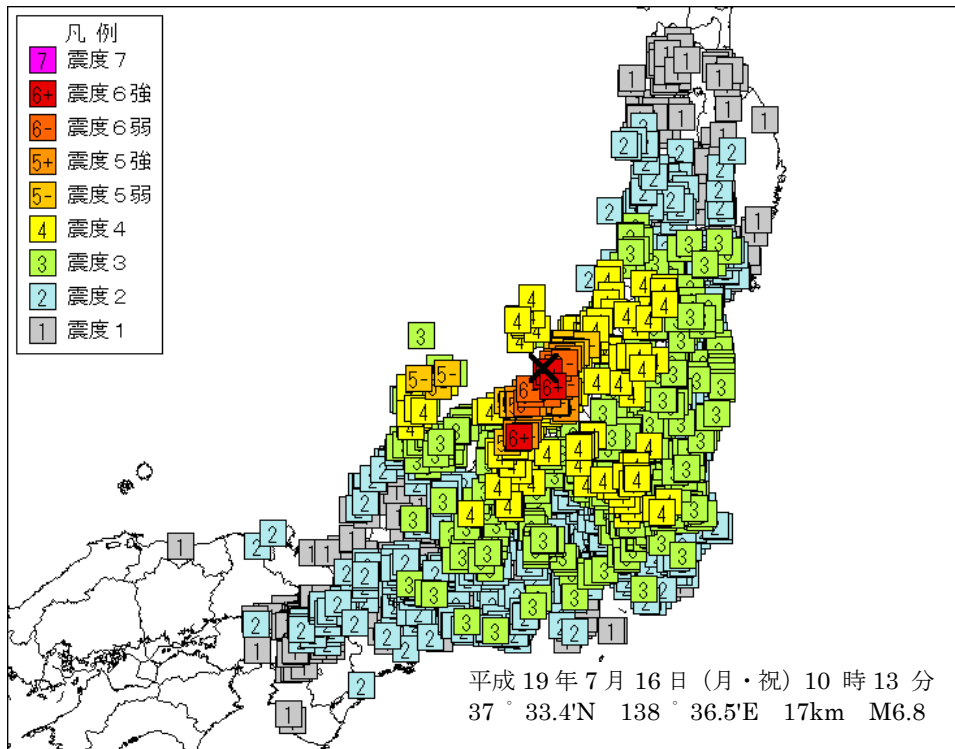


図-1.4 震度分布 (全体) 4)

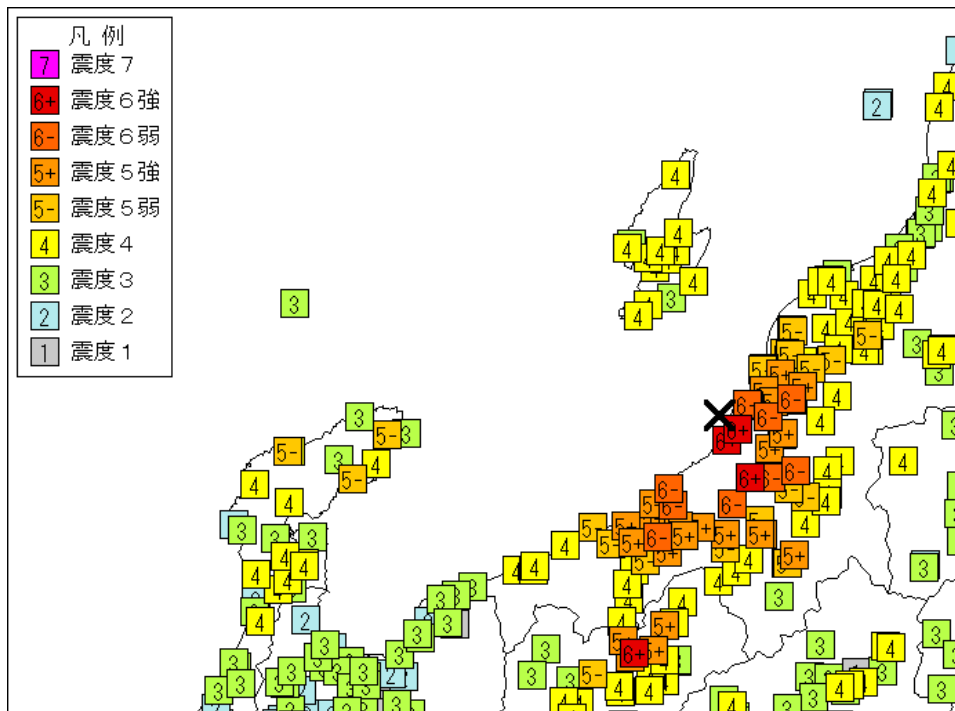


図-1.5 震度分布 (震央周辺拡大) 4)

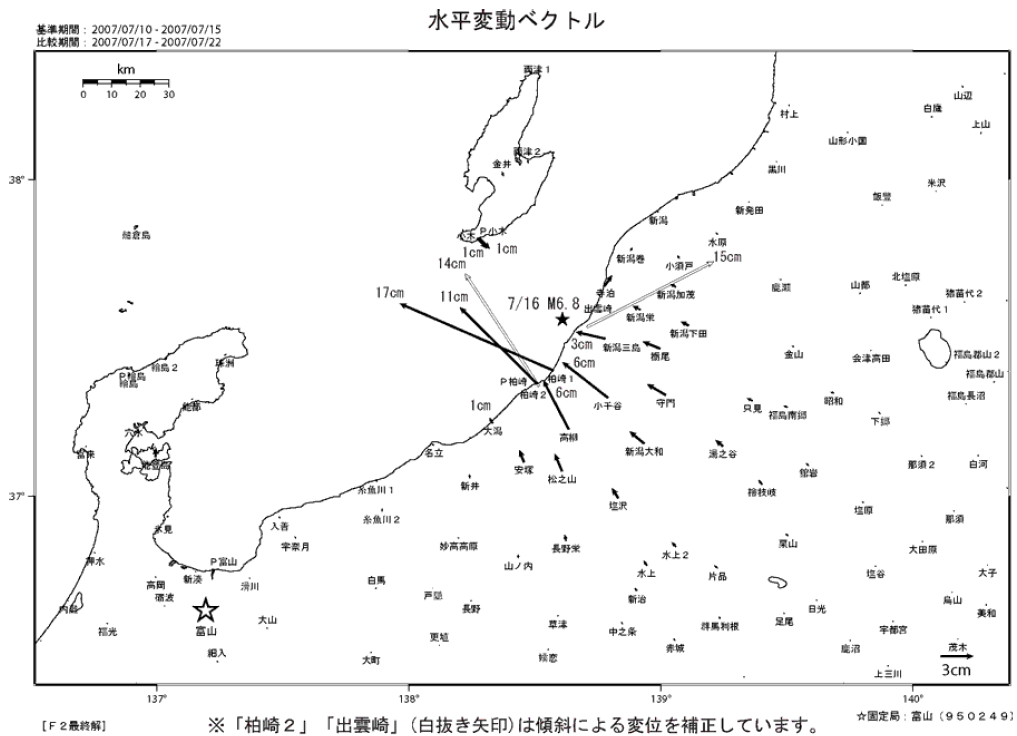


図-1.6 地殻変動ベクトル図 (水平方向) 5)

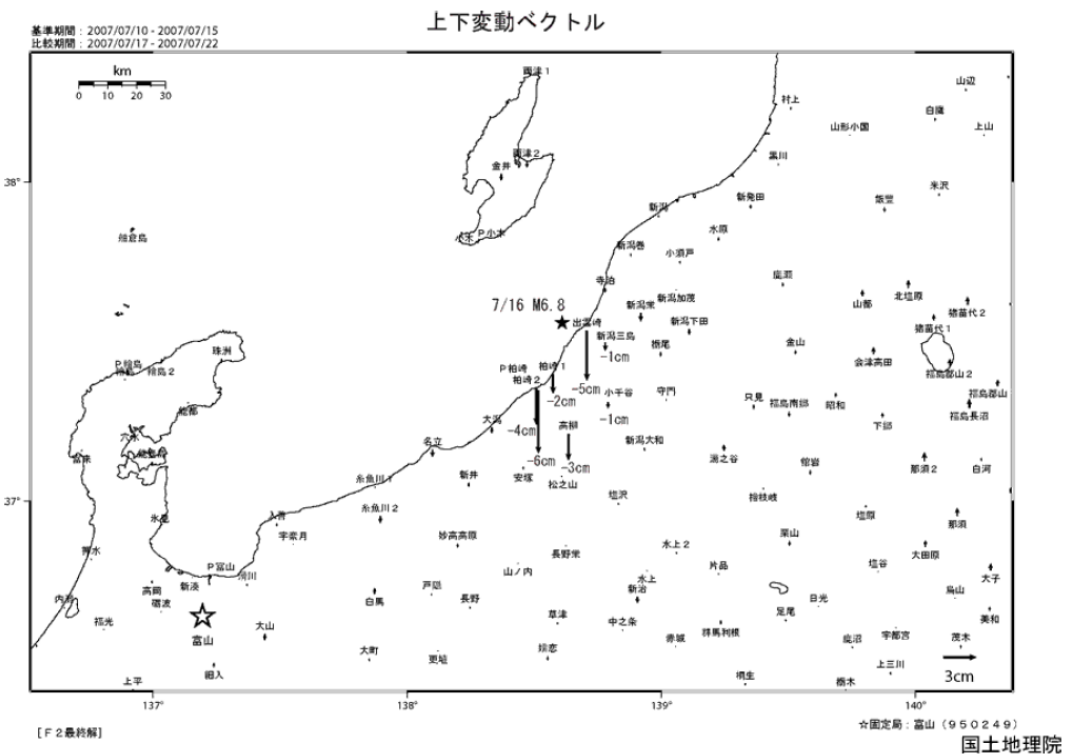


図-1.7 地殻変動ベクトル図 (鉛直方向) 5)

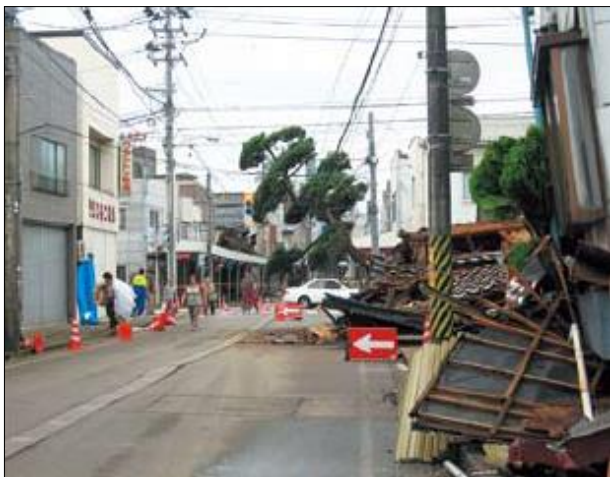


図-1.8 被害状況（家屋倒壊）<sup>3)</sup>



図-1.9 被害状況（斜面崩壊・亀裂）<sup>6)</sup>

## 1.2.2 ガス事業に係る被害状況

### (1) 一般ガス事業者の被害状況<sup>7)</sup>

震度 5 弱以上を観測した地域において都市ガスを供給している一般ガス事業者は 12 事業者であり、地震により供給を停止したガス事業者は、柏崎市ガス水道局のみであった。これら 12 事業者の供給区域内に設置された地震計が示した SI 値、加速度及び被害状況を表-1.3 に示す。また、各事業者の供給区域と震度・SI 値を図-1.10 に示す。

表-1.3 各ガス事業者の被害状況<sup>7)</sup>

震度	事業者	SI 値 (カイン)	加速度 (ガル)	被害状況	(参考) 当該事業者が保有するガス導管全延長
6 強	柏崎市ガス水道局	99 <sup>※1</sup>	鏡町 999 <sup>※1</sup> 藤井 746 刈羽 1,000 <sup>※1</sup>	供給停止 約 34,000 戸	約 778km
6 弱	長岡市水道局 (三島)	50	293	供給支障発生 120 戸	約 424km <sup>※2</sup>
	小千谷市ガス水道局	23	323	被害なし	約 250km
	上越市ガス水道局 (柿崎)	73	444	供給支障発生 81 戸	約 896km
5 強	北陸ガス(株) (長岡支社)	46	527	被害なし	約 4170km <sup>※2</sup>
	蒲原ガス(株)	36	210	被害なし	約 931km
	長岡市水道局 (越路)	28	258	被害なし	約 424km <sup>※2</sup>
	白根ガス(株)	26	165	被害なし	約 745km
	栄ガス消費生活協同組合	24	174	被害なし	約 137km
5 弱	見附市ガス上下水道局	34	254	被害なし	約 255km
	川口町建設企業課	18	217	被害なし	約 76km
	魚沼市ガス水道課	9	145	被害なし	約 291km

注) SI 値は、各ガス事業者が観測した SI 値の最大値とする。

※1 は測定範囲超過を示す。

※2 は全社保有延長を示す。

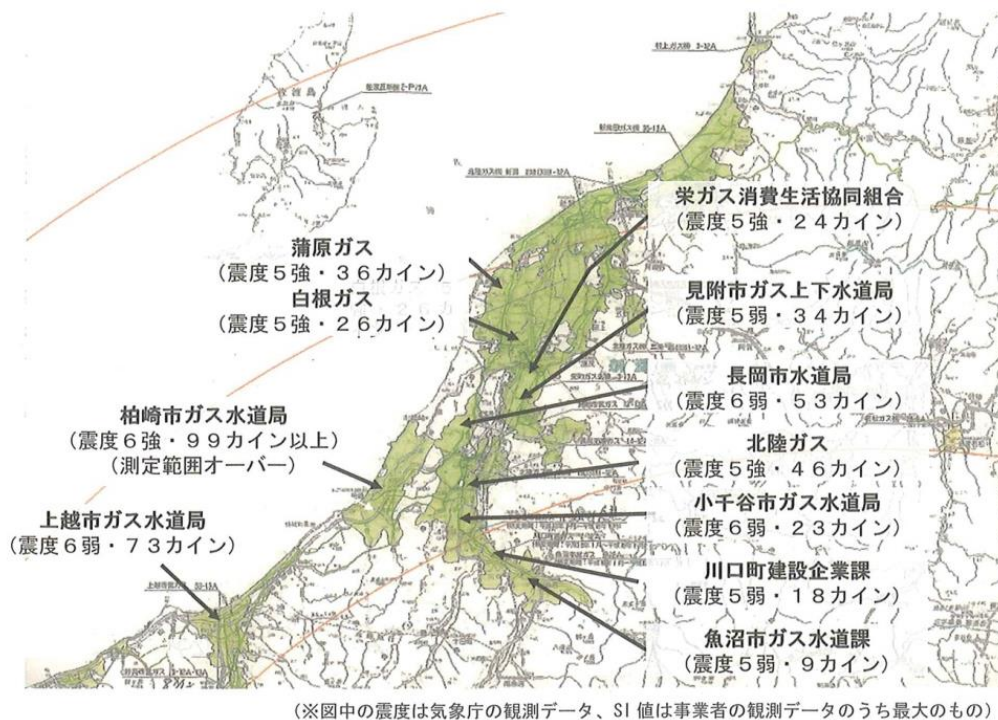


図-1.10 各事業者の供給区域と震度・SI値<sup>7)</sup>

## (2) ガス導管事業者の被害状況<sup>7)</sup>

震度5弱以上を観測した地域には、石油資源開発(株)及び帝国石油(株)（平成20年 国際石油開発帝石(株)に社名変更）のガス導管が存在する。石油資源開発(株)は、新潟県において9箇所のお・ガス田から産出した天然ガスをパイプラインによって、一般ガス事業者及び産業用需要家に供給している。同社が保有するパイプラインのうち、震源に近接した高圧ガス導管（吉井～妙法寺送ガス線）のうち2箇所、導管が座屈変形し亀裂が生じ、ガスが漏えいしたため、柏崎市ガス水道局が供給する柏崎市西山町及び刈羽村向けの卸供給を停止することとなった。帝国石油(株)は、新潟県において南長岡ガス田をはじめとする4箇所のお・ガス田から産出した天然ガスをパイプラインによって、一般ガス事業者及び産業用需要家に供給している。新潟県内には、同社が保有するパイプライン（長岡ライン、新長岡ライン、中通ライン）が敷設されているが、いずれも被害は発生しなかった。石油資源開発(株)のガス導管図を図-1.11<sup>8)</sup>に、帝国石油(株)のガス導管図を図-1.12<sup>8)</sup>に示す。



図-1.11 石油資源開発(株) ガス導管図<sup>8)</sup>

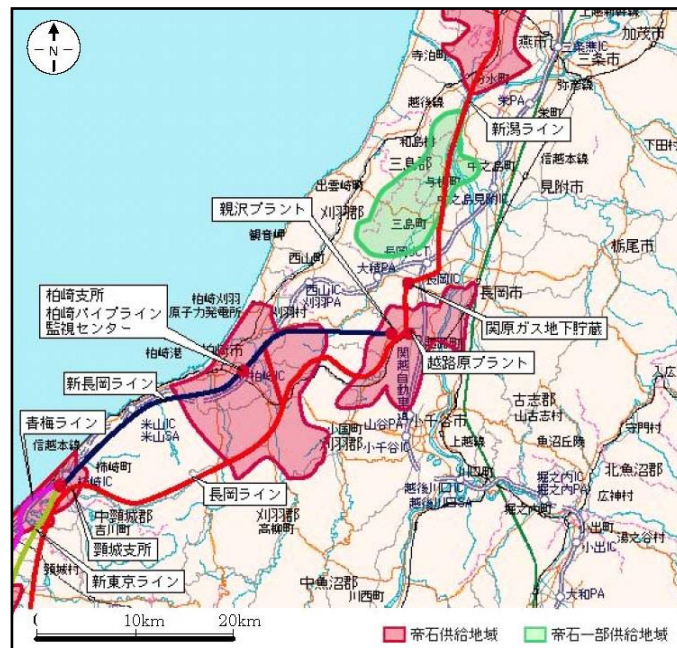


図-1.12 帝国石油(株) ガス導管図<sup>8)</sup>



### (3) ガス工作物の被害状況<sup>7)</sup>

一般ガス事業者及びガス導管事業者の保有するガス工作物の被害概要を表-1.4、図-1.13に示す。また、ガス工作物の被害状況を図-1.14、図-1.15、図-1.16に示す<sup>9)</sup>。

表-1.4 各ガス工作物の保有数と被害箇所<sup>7)</sup>の概要

ガス工作物		保有状況	被害箇所 (件)	被害概要
ガスホルダー		6基	0	・ガス漏えいや供給機能に支障なし (基礎アンカーボルト破損1件)
導管	高圧	96.36km	2	・ <b>新たな事象である座屈現象(2件)</b> (2件とも石油資源開発㈱[吉井～妙法寺送ガス線])
	中圧	135.32km	27	・ <b>新たな事象である座屈現象(13件)</b> ・地盤変状と溶接部品質不良による被害(12件) ・水取り器立管のねじ部(2件) ・更生修理工法(反転シール工法)は被害なし ・橋梁管、地区整圧器は被害なし
	低圧 <sup>*</sup>	本支管	661.92km	166
供給管内管		31,750本	3,086	
整圧器		73基	0	・建屋は一部破損

注) <sup>\*</sup>ガス導管への水や泥の侵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、両ガス区間の切断等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。

表-1.4に示したように、高圧ガス導管では口径100Aで2箇所、中圧ガス導管では口径100Aで3箇所、口径80Aで5箇所、口径50Aで5箇所の合計15箇所で座屈による被害が発生した。なお、被害が発生した管は、全て一般に耐震性に優れるとされる溶接接合された鋼管であった。

この座屈現象は、過去、国内でガス事業に大きな被害を与えた昭和53年の宮城県沖地震、平成7年の兵庫県南部地震、平成16年の新潟県中越地震では発生しておらず、国内のみならず国外においても初めて確認された事象であり、地震動以外の外力でも座屈が生じた例はない。

(社)日本ガス協会、柏崎市ガス水道局、石油資源開発(株)からの経済産業省に対する被害状況報告から作成

○中圧管の損傷状況

No	最高使用圧力	口径	場所
1	MA 0.97MPa	300A	柏崎市半田
2	MA 0.97MPa	300A	柏崎市北斗町
3	MB 0.15MPa	150A	柏崎市桜木町
4	MB 0.15MPa	150A	柏崎市桜木町
5	MB 0.15MPa	150A	柏崎市北園町
6	MB 0.15MPa	150A	柏崎市宝町
7~11	MB 0.15MPa	150A	柏崎市幸町
12	MB 0.23MPa	100A	柏崎市日石町
13	MB 0.23MPa	80A	柏崎市半田
14	MB 0.23MPa	80A	柏崎市中田
15	MB 0.23MPa	80A	柏崎市中田
16	MA 0.65MPa	80A	柏崎市西山町鎌田
17	MB 0.15MPa	100A	刈羽村五十刈
18	MB 0.15MPa	100A	柏崎市西山町黒部
19	MB 0.15MPa	80A	柏崎市大湊
20	MB 0.15MPa	50A	刈羽村滝谷
21	MB 0.15MPa	50A	刈羽村新屋敷
22	MB 0.15MPa	50A	刈羽村割町新田
23	MB 0.15MPa	50A	刈羽村下高町
24	MB 0.15MPa	50A	刈羽村十日市(雪成)
25	MB 0.15MPa	100A	刈羽村刈羽小学校
26	MB 0.15MPa	80A	刈羽村割町新田

● 損傷部位：1~24、は溶接部および溶接部近傍  
25~26は水取器立管ねじ部

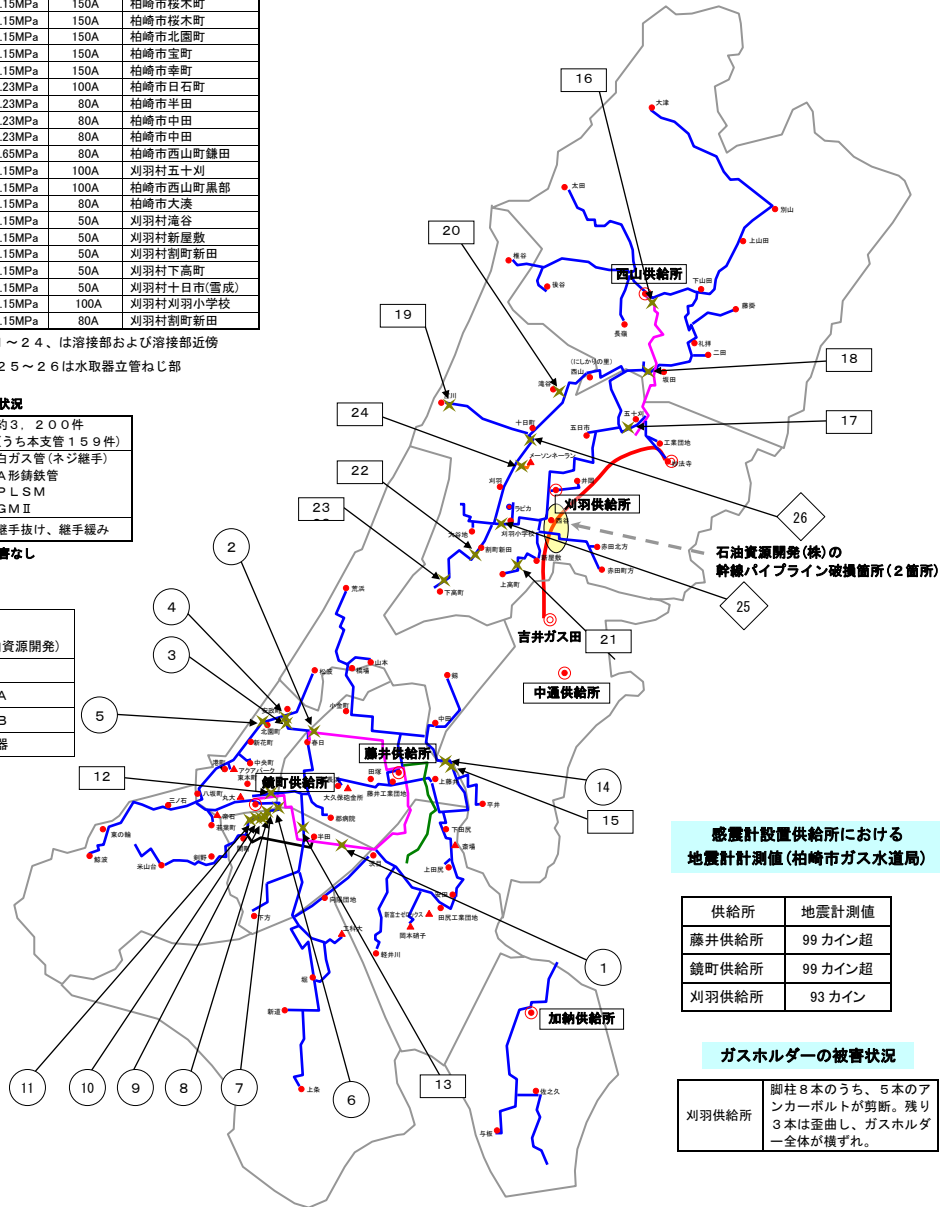
○低圧管の損傷状況

損傷件数	約3,200件 (うち本支管159件)
管種	白ガス管(ネジ継手) A形鍍鉄管 P L S M G M II
損傷の状況	継手抜け、継手緩み

※PE管は、被害なし

凡例

<span style="color:red">—</span>	高圧 (石油資源開発)
<span style="color:green">—</span>	高圧
<span style="color:magenta">—</span>	中圧A
<span style="color:blue">—</span>	中圧B
<span style="color:red">●</span> <span style="color:magenta">●</span> <span style="color:blue">●</span>	変圧器



感震計設置供給所における地震計測値(柏崎市ガス水道局)

供給所	地震計測値
藤井供給所	99 カイン超
鏡町供給所	99 カイン超
刈羽供給所	93 カイン

ガスホルダーの被害状況

刈羽供給所	脚柱8本のうち、5本のアンカーボルトが剪断。残り3本は歪曲し、ガスホルダ全体が横ずれ。
-------	---

図-1.13 柏崎市・刈羽村におけるガス工作物の被害状況<sup>7)</sup>



図-1.14 基礎アンカーボルトの破損状況（刈羽供給所ガスホルダー）<sup>9)</sup>



図-1.15 低圧ねじ管の被害状況<sup>9)</sup>



図-1.16 コンクリート基礎の破損状況<sup>9)</sup>

新潟県中越沖地震においては、被害を受けた口径 100A 以下のガス導管と同様の条件下に埋設された口径 150A 以上のガス導管も存在したが、150A 以上のガス導管に被害はなく、被害は 100A 以下のガス導管のみで確認された。なお、今回の被害は従来想定していた軸圧縮荷重を受けたガス導管の一部が径方向に膨らむ座屈形態である提灯型座屈ではなく、オイラー型座屈に類似していることが特徴的であった。座屈による被害の状況を図-1.17 に示す<sup>10)</sup>。



圧力：中圧 (MB)  
口径：80A



圧力：中圧 (MB)  
口径：100A

図-1.17 座屈被害状況<sup>10)</sup>

### 1.3 被害事例の概要<sup>10)</sup>

新潟県中越沖地震によって発生した座屈被害事例について、配管条件（口径・配管形状）、土質条件等を整理することで、統一的な傾向の有無を調査した結果を示す。

### 1.3.1 調査結果

#### (1) 口径別の被害状況

被害が発生したガス導管の口径は、高・中圧ガス導管ともに 50A、80A、100A のみであり、口径 150A 以上については被害が発生しなかった。

表-1.5 口径別の被害状況

圧力	中圧 (MB)				高圧 (HP)	
	50A	80A	100A	150A 以上	100A	150A 以上
延長 (km)	18	36	33	50	96	数百
被害箇所 (件)	5	5	3	0	2	0
被害率 (件/km)	0.28	0.14	0.09	0	0.02	0

注) 中圧 (MB) : ガスの圧力が 0.1MPa 以上 0.3MPa 未満

高圧 (HP) : ガスの圧力が 1MPa 以上

#### (2) 直線長別の被害状況

被害事例の大多数は、ガス導管の直線長が 100m 以上と比較的長い区間で発生しており、最大直線長は石油資源開発㈱の約 640m (口径 100A) であった。被害発生箇所を図-1.18 に示す。

表-1.6 直線長別の被害状況

直線長	~50m	~100m	~150m	~200m	~250m	~300m	300m~
被害箇所 (件)	1	2	1	4	0	1	6

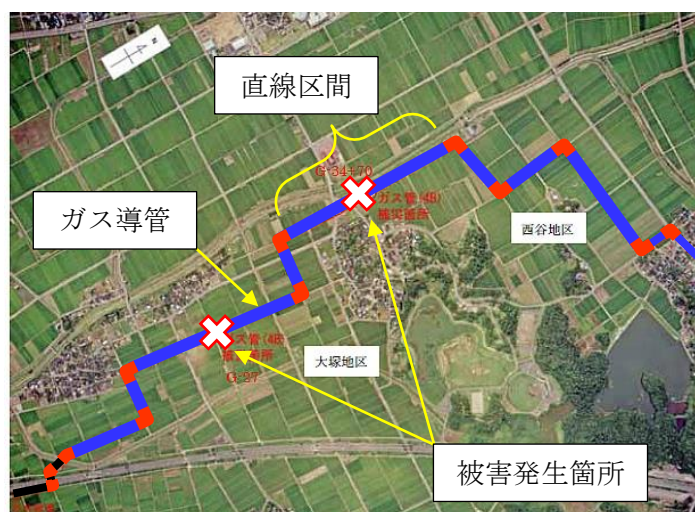


図-1.18 被害発生箇所

### (3) 埋め戻し土別の被害状況

粘性土・砂質土ともに被害事例があり、統一的な傾向は見られなかった。また、周辺地盤では液状化に伴う噴砂が確認された箇所もあったが、ガス導管の路線上で液状化に伴う地盤の変状によって座屈が発生した事例は確認されなかった。なお、建設工事公衆災害防止対策要綱<sup>11)</sup>でも規定されているとおり、一般的にガス導管は砂埋め戻しされるものであり、粘性土で埋め戻される事例は特殊である。

表-1.7 埋め戻し土別の被害状況

埋め戻し土	シルト混砂	シルト質砂	砂混シルト	砂質シルト	粘性土	不明
被害箇所 (件)	6	1	4	1	2	1

### (4) 軟弱地盤層厚別の被害状況

沖積層基盤面が盆状で軟弱な地層が厚く堆積し、基盤面形状と土質物性に起因して周期がやや長めで継続時間の長い振幅の大きな揺れが発生する可能性のあることが柏崎平野の特徴である。図-1.19、図-1.20 に柏崎平野の地質的及び地盤構造的特徴を示す<sup>12)</sup>。

表-1.8 軟弱地盤層厚別の被害状況

軟弱地盤の層厚	～10m	～30m	～50m	～70m	不明
被害箇所 (件)	0	7	7	0	1

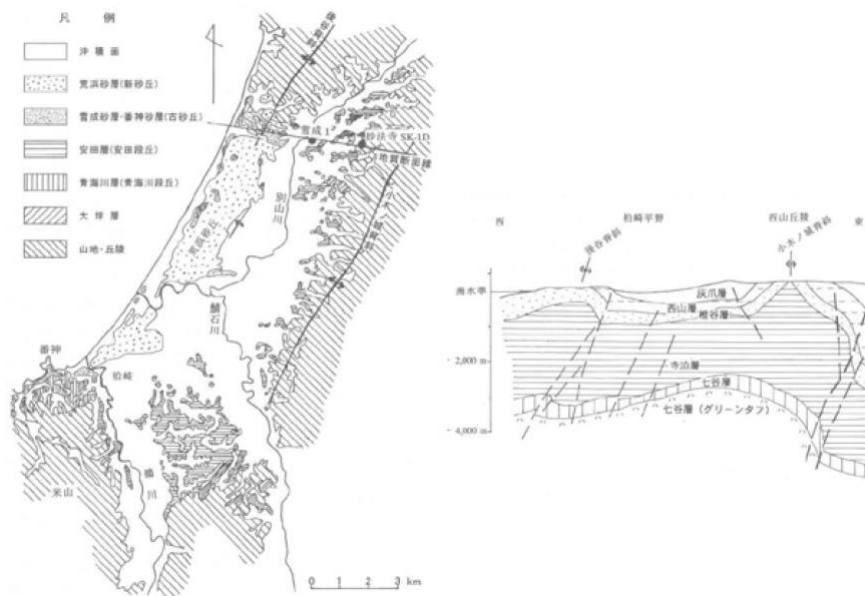
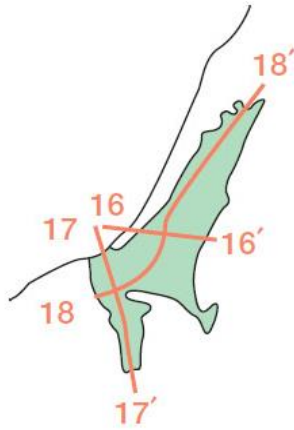
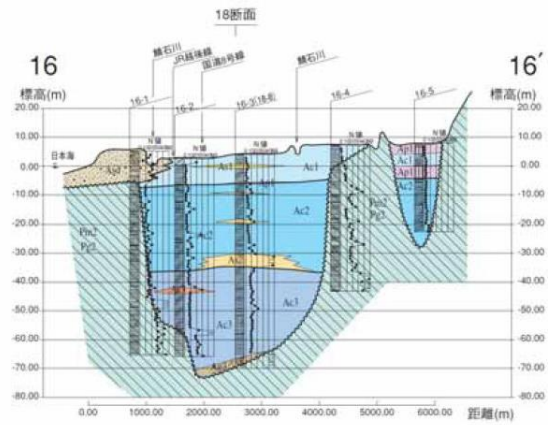


図-1.19 柏崎平野の地質的特徴<sup>12)</sup>

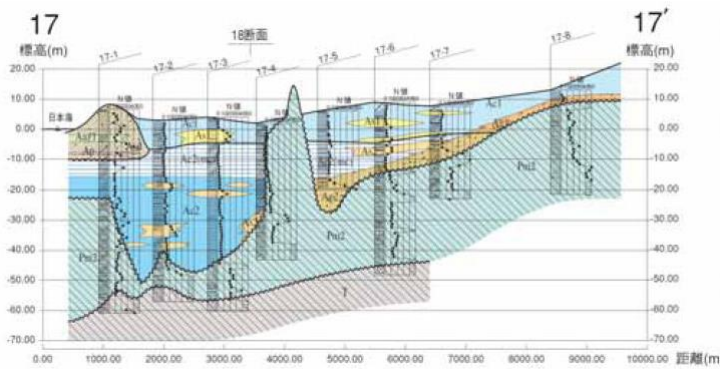


(断面位置)

16-16' 断面 (柏崎東西)



17-17' 断面 (鵜川沿い)



凡 例

地質年代	地層区分	記号	
新第三紀	沖積層	堆積堆積物	堆
		泥炭(ヘドロ層)	Ac0
		砂丘砂層	As0
		粘性土層	Ac1
		泥炭層	Ap1
		砂質土層	As1
		海成砂層	As1(m)
		砂質粘土層	As1
		砂層	As1
		粘土層	Ac2
		海成シルト層	Ac2(m)
		海成粘土層	Ac2(m)
		泥炭層	Ap2
		砂質土層	As2
海成砂層	As2(m)		
粘性土層	Ac3		
砂質土層	As3		
粘性土層	Ac3		
砂層	As3		
新第三紀	沖積層	砂層	Ps1
		粘性土層	Pc1
		泥炭層	Pa1
		砂質土層	Ps1
		粘性土層	Pc1
		砂質土層	Ps1
		粘性土層	Pc1
		砂質土層	Ps1
		粘性土層	Pc1
		砂質土層	Ps1
新第三紀	沖積層	泥岩	Pm2
		礫岩・砂岩	Pm2
		泥岩	Pm3
		礫岩・砂岩	Pm3
		砂質土層	Ps3
新第三紀	沖積層	砂岩・泥岩	T
		礫岩・砂岩	T

18-18' 断面 (柏崎バイパス-西山)

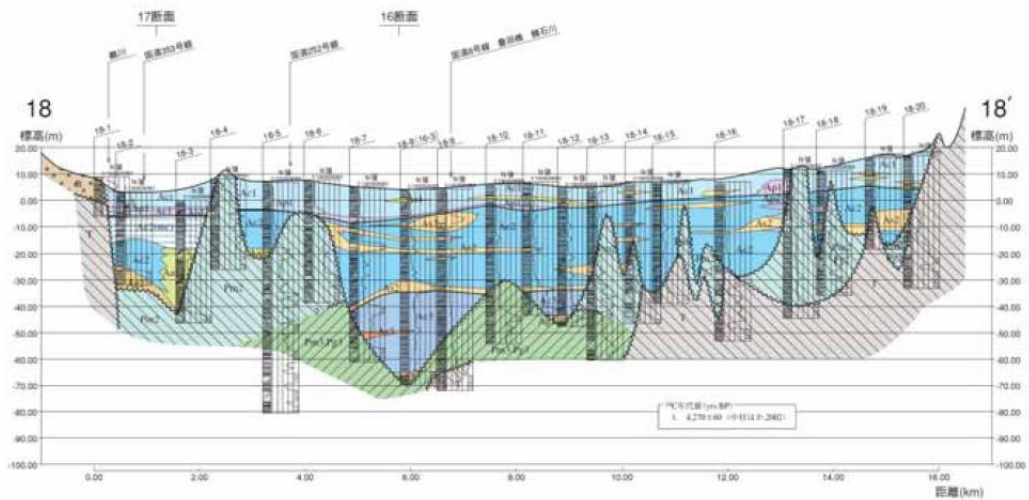


図-1.20 柏崎平野の地盤構造的特徴<sup>12)</sup>

### 1.3.2 被害状況のまとめ

15箇所の事例には小口径（50A～100A）、比較的長延長、地盤の固有周期が長いという共通の傾向があり、この3つの因子が座屈現象等に大きく影響を与えるものと考えられる。

## 1.4 本研究の目的

従来のガス導管耐震設計では、軸圧縮荷重を受けたガス導管の一部が径方向に膨らむ座屈形態である提灯座屈について検討してきたが、1.3より、新潟県中越沖地震では、過去に前例のない座屈による漏えい被害が発生したことが分かった。以下、本研究では、座屈から漏えいに至る現象を長管座屈と呼ぶものとする。

本研究は、新たな事象として確認された長管座屈のメカニズムについて真相を解明し、大地震の際にも長管座屈が容易に生じることのないよう対応策の検討を行い、ガス導管耐震設計の方法について提案することを目的とする。なお、高・中圧ガス導管における長管座屈のメカニズムを解明するための解析モデルの構築、実管実験による解析モデルの検証、鋼管の変形過程の解析、簡易計算式の開発、詳細耐震設計及び標準耐震設計の方法についての研究は国内外においてもいずれも過去に例がなく、また既往の研究文献も存在しない<sup>13)</sup>。

## 1.5 本論文の構成

本論文は、序論と結論を含めた全9章からなり、構成を図-1.21に示す。

「第1章 序論」では、本研究を行うに至った背景、新潟県中越沖地震の概要、被害事例の概要、本研究の目的、本論文の構成について示している。

「第2章 鋼管の材料特性」では、一般的に小口径のガス導管として用いられるSGP（配管用炭素鋼鋼管 JIS G 3452）とSTPG370（圧力配管用炭素鋼鋼管 JIS G 3454）について、被害が集中している口径100A以下の鋼管に限定し、鋼管の寸法、強度、引張特性等の材料特性について示している。

「第3章 鋼管の変形過程の解析モデルの構築」では、大地震の際にも長管座屈が容易に生じることのない設計法を提案するためには、高・中圧ガス導管における長管座屈のメカニズムを解明する必要があると考え、鋼管の座屈開始以降の変形過程を解析するためモデルの検討を行っている。



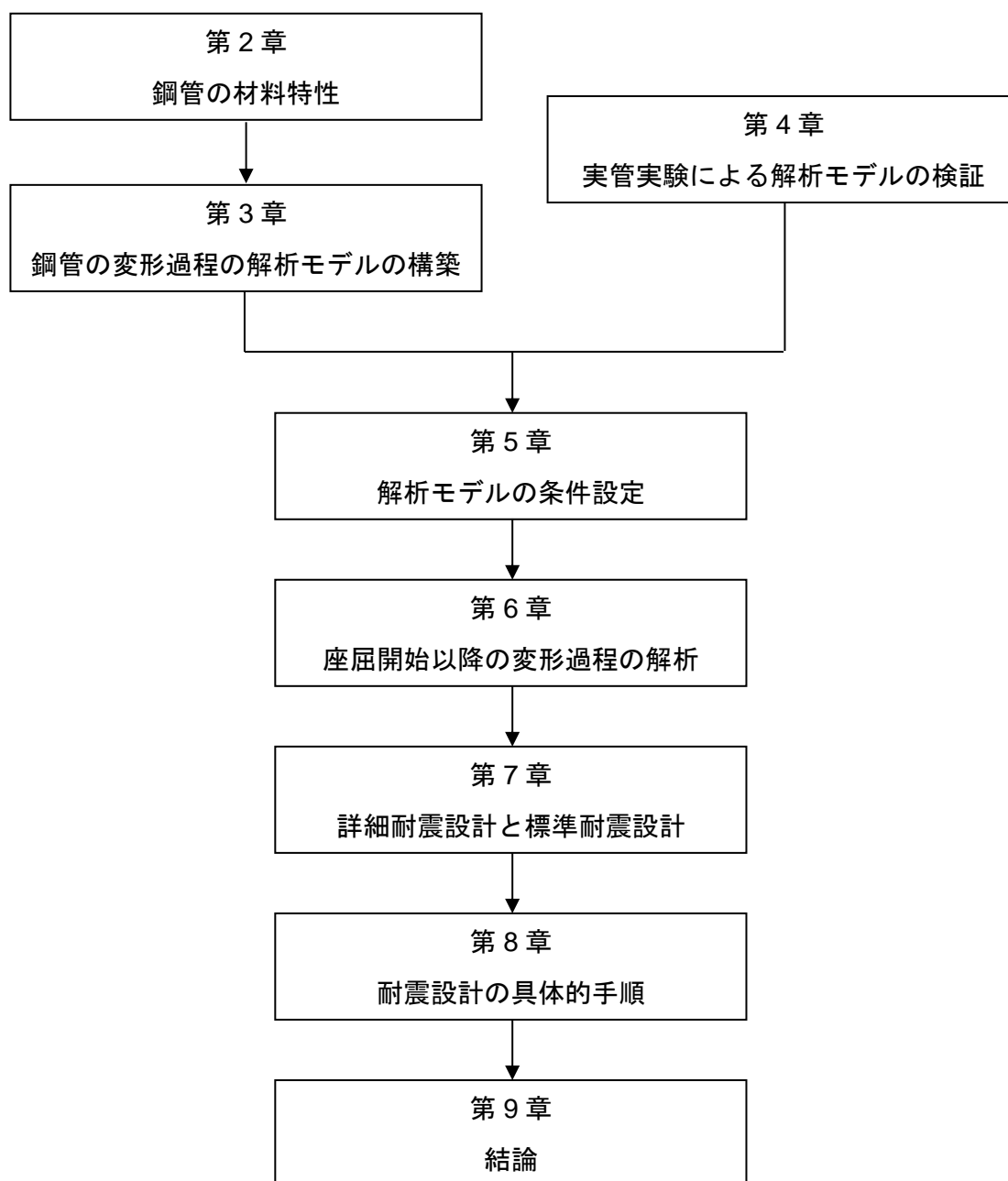


図-1.21 本論文の構成

「第4章 実管実験による解析モデルの検証」では、部分解析モデルが実際の座屈開始以降の変形過程を模擬できているかを確認するために、実管実験（土槽実験及びフィールド実験）との比較を実施している。実管実験では埋設された管に軸圧縮力を加え長管座屈させ、変形過程の応力とひずみの計測を行い、この実管実験から得られた結果と、部分解析モデルから得られる座屈開始点と局部座屈開始点における解析値（応力とひずみ）を比較し、部分解析モデルが実管実験を十分模擬でき得るかを確認

している。

「第5章 解析モデルの条件設定」では、管ひずみを求めることを目的とした部分解析モデルに対し、適切な解析条件の設定を行っている。特に、本章では地盤ひずみと地盤拘束力の影響について検討している。

「第6章 座屈開始以降の変形過程の解析」では、部分解析モデルを用いた有限要素解析を行い、各管種・口径における座屈開始ひずみ及び局部座屈開始ひずみを求め、レベル2地震動で生じる管ひずみと座屈開始ひずみを比較することにより、座屈の開始判定を行っている。また、座屈開始以降の変形過程を求める非線形解法として、座屈部の変形特性を線形とした解析モデルで繰返し計算を行う方法を用い、得られた解析結果から管が座屈開始以降に局部座屈開始に到るか否かについて判定を行っている。更に、ガス導管の直線区間が短い場合は座屈又は局部座屈が開始しないと考えられることから、座屈及び局部座屈が開始しない直線長の上限值を求める方法についても検討を行っている。

「第7章 詳細耐震設計と標準耐震設計」では、第1章～第6章までの研究結果を踏まえ、材料費や溶接等の費用で高価となる曲管を極力用いず、直管の接続で構成される長延長配管（以下、直線長と呼ぶ）をできるだけ長くする経済的合理性のある詳細耐震設計を提案している。また、詳細耐震設計に比べ直線長は短くなるが、実務に携わる多くの技術者が利便性良く耐震設計を実施できるよう、標準耐震設計を提案している。

「第8章 耐震設計の具体的手順」では、第1章～第7章までの研究結果を踏まえ、長管座屈防止のための詳細耐震設計及び標準耐震設計について具体的な設計手順を示している。また、今回新たに提案する設計手法によって導かれる直線長を、新潟中越沖地震のガス管被害箇所における直線長との対比を行うことによって検証を行っている。

「第9章 結論」では、各章で得られた知見を総括し、本論文の結論とともに今後の課題提起を行っている。

## 第 1 章の参考文献

- 1) 一般社団法人 日本ガス協会 (2011) 『都市ガス事業の現況 2011』 p.1
- 2) 経済産業省原子力安全・保安院ガス安全課 (2008) 『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』一般社団法人 日本ガス協会 pp.36-37
- 3) 国土交通省北陸地方整備局 『能登半島地震・新潟県中越沖地震 北陸地方整備局の取り組みと地域支援 【新潟県中越沖地震】 第 1 章 新潟県中越沖地震の概要』平成 20 年 4 月発表 pp.105-109  
国土交通省北陸地方整備局ホームページ (2012 年 7 月現在)  
[http://www.hrr.mlit.go.jp/bosai/noto-chuetsuoki\\_jishin/kirokushi\\_pdf/hp\\_103-110\\_chuetsuoki\\_1.pdf](http://www.hrr.mlit.go.jp/bosai/noto-chuetsuoki_jishin/kirokushi_pdf/hp_103-110_chuetsuoki_1.pdf)
- 4) 気象庁 『平成 19 年 (2007 年) 新潟県中越沖地震の特集』  
気象庁ホームページ (2012 年 7 月現在)  
[http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/2007\\_07\\_16\\_chuetu-oki/data.html](http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/2007_07_16_chuetu-oki/data.html)
- 5) 国土地理院 『平成 19 年(2007 年)新潟県中越沖地震関連 中越沖地震に伴う GPS 連続観測結果 (最終解)』  
国土地理院ホームページ (2012 年 7 月現在)  
<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H19-nigata-chikaku.htm>
- 6) 国土地理院 『平成 19 年(2007 年)新潟県中越沖地震関連 地理地殻活動研究センター地理情報解析研究室 平成 19 年 (2007 年) 新潟県中越沖地震の現地調査報告』  
国土地理院ホームページ (2012 年 7 月現在)  
[http://cais.gsi.go.jp/Research/geoinfo/field\\_Chuet-su-oki.pdf](http://cais.gsi.go.jp/Research/geoinfo/field_Chuet-su-oki.pdf)
- 7) 経済産業省原子力安全・保安院ガス安全課 (2008) 『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』一般社団法人 日本ガス協会 pp.3-5
- 8) 経済産業省原子力安全・保安院ガス安全課 (2008) 『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』一般社団法人 日本ガス協会 pp.32-33
- 9) 経済産業省原子力安全・保安院ガス安全課 (2008) 『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』一般社団法人 日本ガス協会 pp.169-171

- 10) 一般社団法人 日本ガス協会 (2008) 『平成 20 年度地方都市ガス事業 天然ガス  
化促進対策調査 次世代保安向上技術調査 地震対策技術調査(委員会の運営等)  
調査報告書』 pp.4-16
- 11) 建設省 (1993) 『建設工事公衆災害防止対策要綱 (平成 5 年 1 月 12 日)』
- 12) 経済産業省『平成 20 年 1 月 31 日 日本ガス協会 新潟県中越沖地震における一  
般ガス事業者のガス設備の状況』  
経済産業省ホームページ (2012 年 10 月現在)  
<http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g80131a03j.pdf>
- 13) 国際地震工学会 IAEE 『WCEE ONLINE PROCEEDINGS』  
国際地震工学会 IAEE ホームページ (2012 年 7 月現在)  
<http://www.nicee.org/wcee/>

## 第2章 鋼管の材料特性

### 2.1 概要

ガス業界では、一般的に小口径のガス導管は、汎用性の高い材料として知られるSGP（配管用炭素鋼鋼管 JIS G 3452）<sup>1)</sup>及びSTPG370（圧力配管用炭素鋼鋼管 JIS G 3454）<sup>2)</sup>を用いるため、研究対象をこれらの鋼管材料に限定し、本研究を行うものとした。

第1章 1.3 に示したように、小口径（50A～100A）のみで長管座屈による被害が発生しており、口径 100A 以下の鋼管の寸法、強度、引張特性等の材料特性についてまとめた。

### 2.2 鋼管の管種と口径

小口径のガス導管として、一般的に使用されるSGP及びSTPG370について、各管種・口径の公称寸法を表-2.1 に示す。なお、STPG370の管厚は、使用頻度の高いSch40とした。

表-2.1 鋼管の公称寸法

管種	呼び径	外径 (mm)	管厚 (mm)
SGP	50A	60.5	3.8
	80A	89.1	4.2
	100A	114.3	4.5
STPG370	100A	114.3	6.0

### 2.3 降伏応力及び引張強さ

日本工業規格（以下、JIS と呼ぶ）では、鋼管の降伏応力及び引張強さの最小値を規定しており、ガス業界で採用している鋼管はJISが規定する最小値以上の強さを有するものである。2.4の図-2.1に示すように、一般的にはガス導管の降伏応力及び引張強さはJIS規定値より相当程度高い値を示すが、本研究においては、より安全側の設計を行うことができるよう降伏応力及び引張強さはJISに示されている規格最小値を用いることにした。ただし、SGPの降伏点はJISに規定されていないため、「ガス工作物の技術上の基準の細目を定める告示」第13条（つり支持具等の間隔）の別表第4における「降伏点又は耐力が日本工業規格に定められていないものにあつては同

規格に定められた引張強さの 3/5」の記述<sup>3)</sup>にしたがい、引張強さの 3/5 となる値を用いた。各管種の降伏応力及び引張強さを表-2.2 に示す。

表-2.2 鋼管の降伏応力と引張強さ

管種	降伏応力(MPa)	引張強さ(MPa)
SGP	174	290
STPG370	215	370

## 2.4 引張特性

一般的に、軸圧縮荷重を受けたガス導管の一部が径方向に膨らむ座屈形態である提灯座屈のように塑性変形を伴う局部座屈の挙動は材料の応力-ひずみ関係に依存する。このため、鋼管の引張特性（応力-ひずみ関係又は SS カーブ）を材料の降伏直後に応力の増加を伴わずにひずみが増加する領域、すなわち、明確な降伏棚を有する降伏棚型（以下、LE 型（Luders Elongation））と、連続的な加工硬化が生じるラウンドハウス型（以下、RH 型（Round House））に分類した。

### 2.4.1 降伏棚型の引張特性

2.3 に示したように、本研究においては安全側の設計として JIS 規格最小値を用いることにしたため、降伏棚型の引張特性は、図-2.1 に示す実際の試験片引張試験結果をもとに、降伏応力を表-2.2 に示す JIS 規格最小値に調整した材料モデルとして設定した。

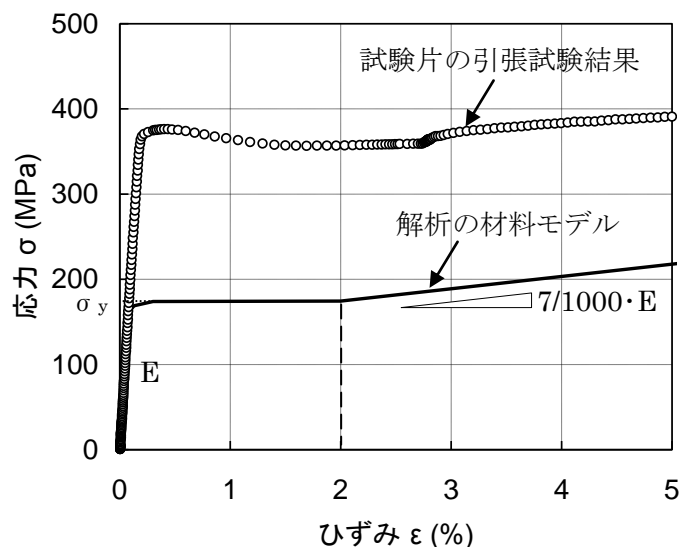


図-2.1 LE 型材料の引張特性 (SGP)

この材料モデルにおける降伏棚の終点はひずみ 2%とし、ひずみ 2%以降のひずみ硬化係数は、「中低圧ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-209-03)「2.5 基準ひずみ及び基準変位」<sup>4)</sup>にしたがい、鋼の弾性係数の 7/1000 倍とした。

## 2.4.2 ラウンドハウス型の引張特性

ラウンドハウス型の引張特性は、「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-206-03)「資料-15 導管の圧縮座屈開始ひずみの算定式と安全率」<sup>5)</sup>にしたがい、下記の関係式を用いた。

$$\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y}\right)^{0.11} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right) \quad (2.1)$$

ここで、

$\varepsilon_y$  : 降伏ひずみ ( $=\sigma_y/E+0.002$ )

$\sigma_y$  : 降伏応力 (MPa) = 0.2% オフセット耐力

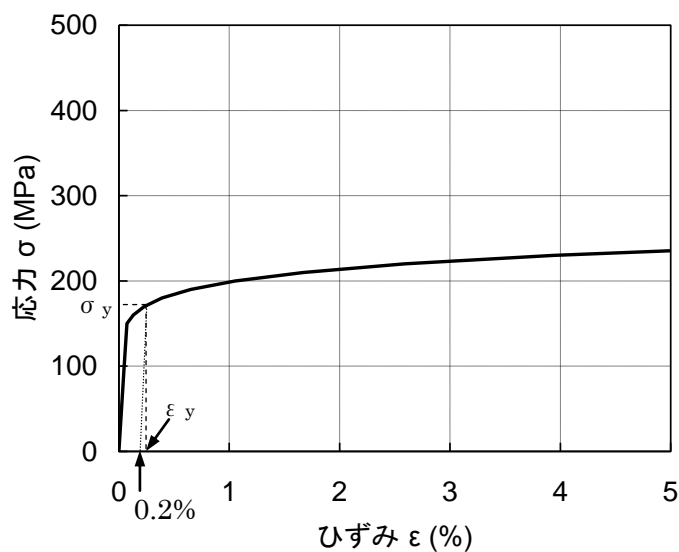


図-2.2 RH 型材料の引張特性 (SGP)

## 第 2 章の参考文献

- 1) 日本工業規格 (2010) 『JIS G 3452 配管用炭素鋼鋼管』
- 2) 日本工業規格 (2012) 『JIS G 3454 圧力配管用炭素鋼鋼管』
- 3) 平成 12 年 5 月 31 日 通商産業省告示第 355 号『ガス工作物の技術上の基準の細目を定める告示』
- 4) 一般社団法人 日本ガス協会 (2004) 『中低圧ガス導管耐震設計指針』 p.34
- 5) 一般社団法人 日本ガス協会 (2004) 『高圧ガス導管耐震設計指針』 pp.233-242



### 第3章 鋼管の変形過程の解析モデルの構築

#### 3.1 概要

大地震の際にも長管座屈が容易に生じることのない設計法を提案するためには、高・中圧ガス導管における長管座屈のメカニズムを解明する必要がある。そこで、鋼管の座屈開始以降の変形過程を解析するためモデルの検討を行った。

#### 3.2 全体解析モデル

ガス導管は地中に埋設された線上で細い構造物である。第1章1.3に示したように、被害事例の大多数は、ガス導管の直線長が100m以上と比較的長い区間で発生している。このようなガス導管の地震解析を実施する際に一般的に用いられる地震波の1波長区間を対象とする全体解析モデルで検討を実施した。

鋼管の座屈開始以降の変形過程を解析するための全体解析モデルを図-3.1に示す。全体解析モデルは、地震波の1波長の区間を解析の対象とし、塑性変形が生じる地震波の節近傍を3次元シェル要素、それ以外の鋼管をビーム要素でモデル化した。また、このモデルでは管軸方向及び管軸直角方向を地盤ばねで支持し、連続する地震波を考慮するため解析モデルの両端は対称条件とした。

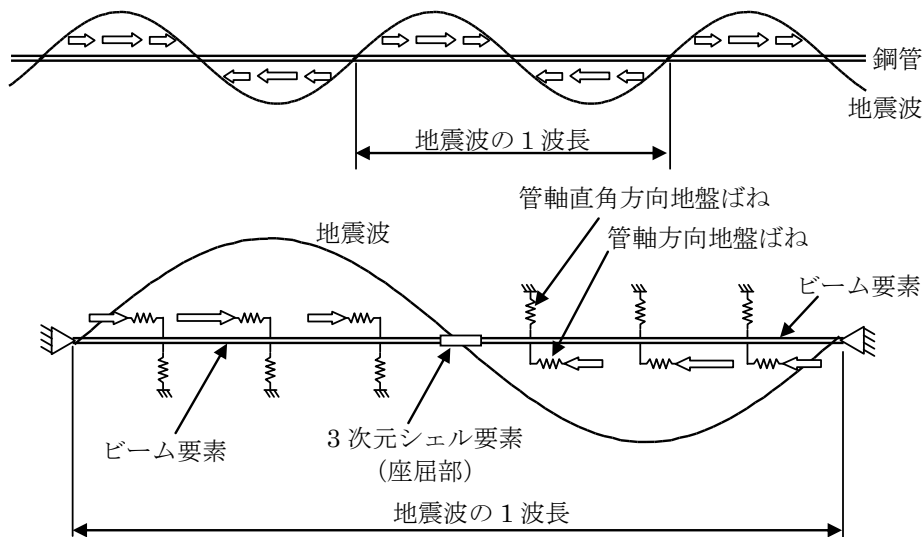


図-3.1 全体解析モデル

解析結果より、地盤の変位とともに鋼管の軸応力、軸ひずみが徐々に増加する変形過程については解析することが可能であり、座屈が開始する直前の最大軸圧縮応力あ

るいは最大軸圧縮ひずみが発生する段階までの計算が可能なが分かった。しかし、座屈の開始以降は鋼管の軸方向変位が増加し、それに伴って座屈部以外の軸応力や軸ひずみが急速に低減する。すなわち、圧縮軸応力、圧縮軸ひずみが急速に除荷されることになる。この除荷段階において、鋼管は蓄積された圧縮ひずみエネルギーを急速に解放して座屈の変形を成長させる。このような準静的過程である座屈現象を有限要素解析で求めることは数値的に不安定に進むことから難しいことが分かった。したがって、より詳細な解析技術を要すると判断した。

### 3.3 部分解析モデル

部分解析モデルは、図-3.2 に示すように全体解析モデルのうち、最大圧縮荷重が生じる地震波の節を中心とした 15m 区間を抽出したモデルとした。

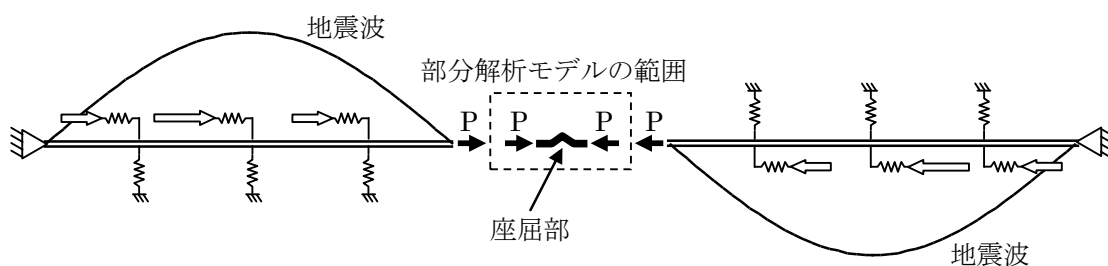


図-3.2 全体解析モデルと部分解析モデルの関係

鋼管の座屈開始以降の変形過程を解析するための部分解析モデルを図-3.3 に示す。部分解析モデルでは、15m 区間のうち中央の 11m を 3 次元シェル要素、両端のそれぞれ 2m をビーム要素でモデル化した。また、このモデルでは管軸直角方向を地盤ばねで支持し、鋼管の両端を自由支持条件として強制変位を入力した。この強制変位を与えたモデルの両端に反力として発生する軸圧縮力は、地震波 1 波長に対して節の部分に発生する最大軸圧縮力と対応している。

このように、部分解析モデルでは変位制御で入力条件を与えるため、鋼管の一部が座屈して軸力が急速に低下する場合であっても、安定した変形計算が可能である。したがって、部分解析モデルは、鋼管の座屈開始以降の変形過程を解析するためのモデルとして適切であると判断した。

ただし、有限要素解析において、真っ直ぐな鋼管に軸圧縮力を作用させても、圧縮変形が進行するのみで座屈が開始しないため、座屈を誘起するための一般的な手法として知られる解析モデルに初期不整を与える手法を用いることにした。なお、本検討

においては、不安定解である座屈を起こすために必要な微小な初期形状として解析モデルの中央 5m に三角関数で山形の初期形状を持たせている。

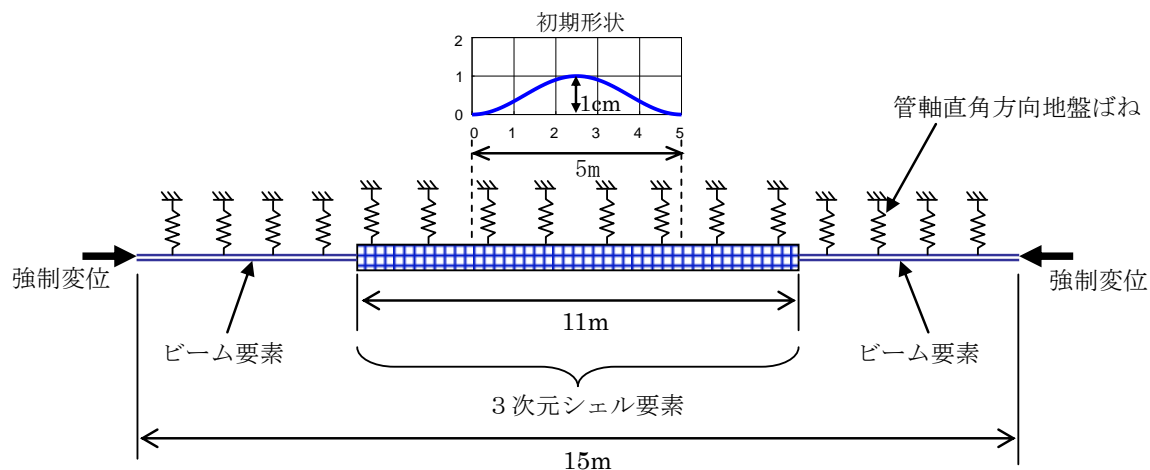


図-3.3 部分解析モデル

### 3.4 まとめ

座屈の開始以降は鋼管の軸方向変位が増加し、それに伴って座屈部以外の軸応力や軸ひずみが急速に低減する。このような準静的過程である座屈現象を有限要素解析で求めることは数値的に不安定に進むことから全体解析モデルは、鋼管の座屈開始以降の変形過程を求めるための解析モデルとして適さないと判断した。

一方、鋼管の一部が座屈して軸力が急速に低下する場合であっても、安定した変形計算を行うことができる部分解析モデルは、鋼管の座屈開始以降の変形過程を求めるための解析モデルに適していると判断した。

座屈が開始する直前の最大軸圧縮応力、あるいは最大軸圧縮ひずみを求めることは重要であるが、座屈開始以降の鋼管の変形過程についても真相を解明することが研究目的であるため、これ以降本研究で行う全ての有限要素解析として、一連の座屈過程の計算を行うことができる部分解析モデルを用いることにした。

## 第4章 実管実験による解析モデルの検証

### 4.1 概要

部分解析モデルが実際の座屈開始以降の変形過程を模擬できているかを確認するために、実管実験（土槽実験及びフィールド実験）との比較を実施した。実管実験では埋設された管に軸圧縮力を加え長管座屈させ、変形過程の応力とひずみの計測を行った。この実管実験から得られた結果と、部分解析モデルから得られる座屈開始点と局部座屈開始点における解析値（応力とひずみ）を比較し、部分解析モデルが実管実験を十分模擬でき得るかを確認した。

### 4.2 屋内土槽長管座屈実験（土槽実験）

#### 4.2.1 実験方法

図-4.1 に示す土槽及び機器で構成される実験装置をテストベッド上に組み、図-4.2 に示す SGP の試験体を土槽内に埋設し、油圧シリンダにより試験体に軸圧縮力を加えて長管座屈させる屋内土槽長管座屈実験（以下、土槽実験）を行った。実際の土槽実験装置を図-4.3 に示す。

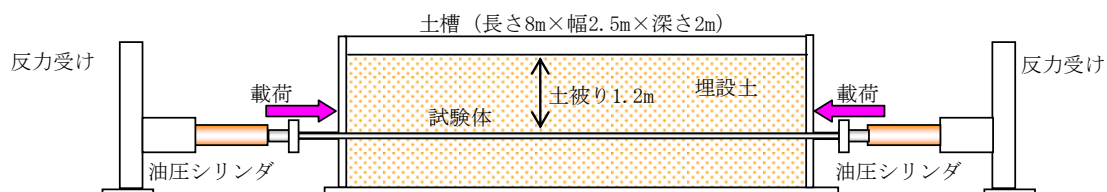


図-4.1 土槽実験の装置構成

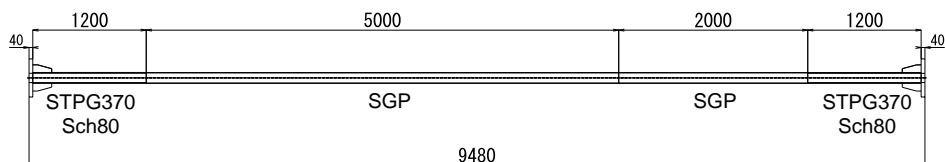


図-4.2 土槽実験の試験体



図-4.3 土槽実験装置

#### 4.2.2 土槽実験結果と部分解析モデルとの比較

小口径のガス導管として一般的に使用される SGP について、呼び径、引張特性、埋め戻し条件の組み合わせより、表-4.1 に示す 6 ケースについて土槽実験を行った。実験の結果、試験体の長管座屈変形状況を図-4.4、図-4.5 に示す。なお、試験体は土槽のほぼ中央部で鉛直上向きの座屈変形を生じ、曲げの生じている部分では局部座屈が発生した。

表-4.1 土槽実験ケース

ケース	管種	呼び径	引張特性	埋め戻し条件（地盤拘束力設定※）
1	SGP	80A	RH 型	高圧ガス導管耐震設計指針相当 <sup>1)</sup>
2	SGP	100A	RH 型	高圧ガス導管耐震設計指針相当
3	SGP	80A	LE 型	高圧ガス導管耐震設計指針相当
4	SGP	100A	RH 型	高圧ガス導管耐震設計指針×1/2 相当
5	SGP	100A	LE 型	高圧ガス導管耐震設計指針相当
6	SGP	100A	LE 型	高圧ガス導管耐震設計指針×1/2 相当

注) ※地盤拘束力設定の詳細は第 5 章 5.2 を参照。



図-4.4 土槽実験での長管座屈変形状況（座屈部拡大）



図-4.5 土槽実験での長管座屈変形状況（全体）

土槽実験の結果と、同条件の部分解析モデルにより得られた公称応力と公称ひずみの関係を表-4.2 に示す。また、土槽実験ケース 5 を代表例に、座屈が開始するまでの変形過程及び座屈開始以降の変形過程についての比較を図-4.6 に示す。

表-4.2 土槽実験結果と部分解析モデルによる解析値の関係

No.	呼び径	材料特性	座屈開始点			局部座屈開始点		
			公称ひずみ(%)		精度(%)	公称ひずみ(%)		精度(%)
			土槽実験	部分解析モデル		土槽実験	部分解析モデル	
1	80A	RH型	0.44	0.43	2.3	0.84	0.65	22.6
2	100A	RH型	0.44	0.45	-2.3	0.79	0.66	16.5
3	80A	LE型	0.24	0.18	25.0	0.57	0.56	1.8
4	100A	RH型	0.25	0.27	-8.0	0.60	0.58	3.3
5	100A	LE型	0.25	0.25	±0	0.46	0.41	10.9
6	100A	LE型	0.25	0.21	16.0	0.45	0.41	8.9

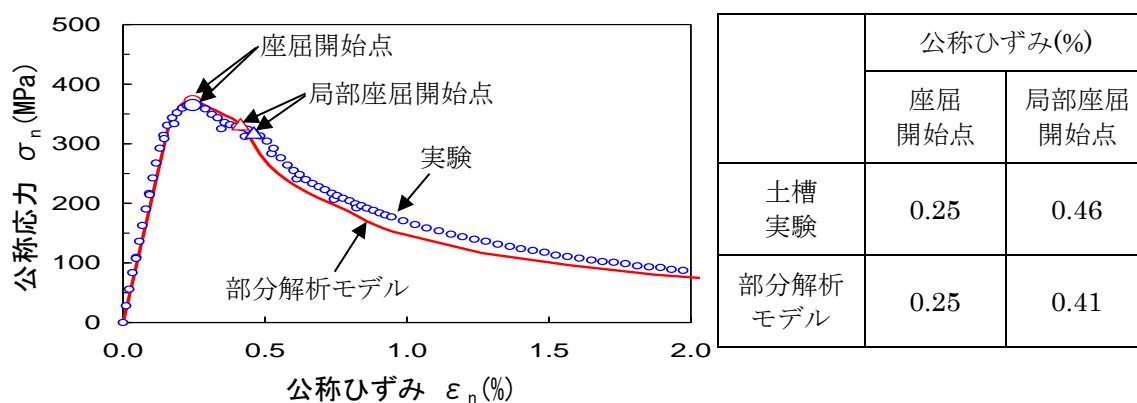


図-4.6 土槽実験結果と部分解析モデルの長管座屈変形過程 (ケース 5)

表-4.2 で示した座屈開始点と局部座屈開始点のひずみについて実験値と部分解析モデル値を比較した結果、精度は-8.0%~25.0%となった。ガス工作物の工事、維持及び運用の各段階において、実務に携わる多くの技術者に具体的な基準として広く活用されている「高圧導管指針」(JGA 指-204-06)によれば、ガス導管の許容応力の安全率は 2.0 倍<sup>2)</sup>であることから、上記結果の-8.0%~25.0%は実用上、許容できる差であると判断した。

従って、座屈が開始するまでの変形過程、及び座屈開始以降の変形過程についても、部分解析モデルが実管実験を十分模擬でき得ると判断した。

### 4.3 屋外長管座屈実験（フィールド実験）

#### 4.3.1 実験方法

図-4.7 に示すように、実際の原地盤に構築した実験装置に、図-4.8 に示す SGP の試験体を埋設し、油圧シリンダにより試験体に軸圧縮力を加えて長管座屈させる屋外長管座屈実験（以下、フィールド実験）を行った。実際のフィールド実験装置を図-4.9、図-4.10 に示す。

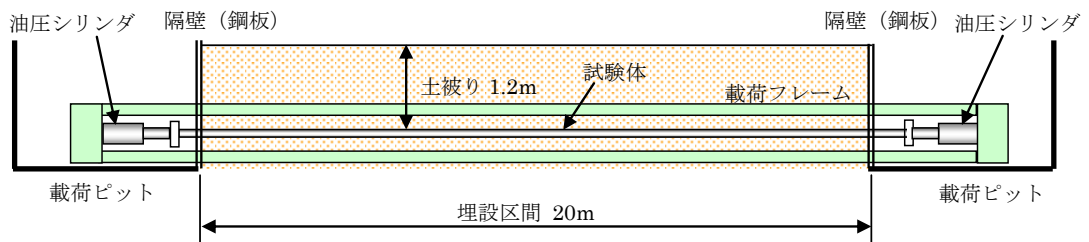


図-4.7 フィールド実験の装置構成

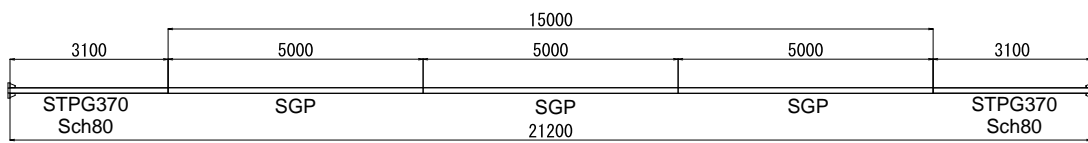


図-4.8 フィールド実験の試験体



図-4.9 フィールド実験装置（全体）





図-4.10 フィールド実験装置（拡大）

#### 4.3.2 フィールド実験結果と部分解析モデルとの比較

表-4.3 に示す 2 ケースについてフィールド実験を行った。実験の結果、試験体の長管座屈変形状況を図-4.11 に示す。なお、試験体は全長の中央近傍で鉛直方向に座屈変形を生じ、曲げの生じている部分では局部座屈が発生した。

表-4.3 フィールド実験ケース

ケース	管種	呼び径	引張特性	埋め戻し条件（地盤拘束力設定※）
1	SGP	100A	LE 型	高圧ガス導管耐震設計指針 <sup>1)</sup> 相当
2	SGP	100A	LE 型	高圧ガス導管耐震設計指針×1/2 相当

注) ※地盤拘束力設定の詳細は第 5 章 5.2 を参照。

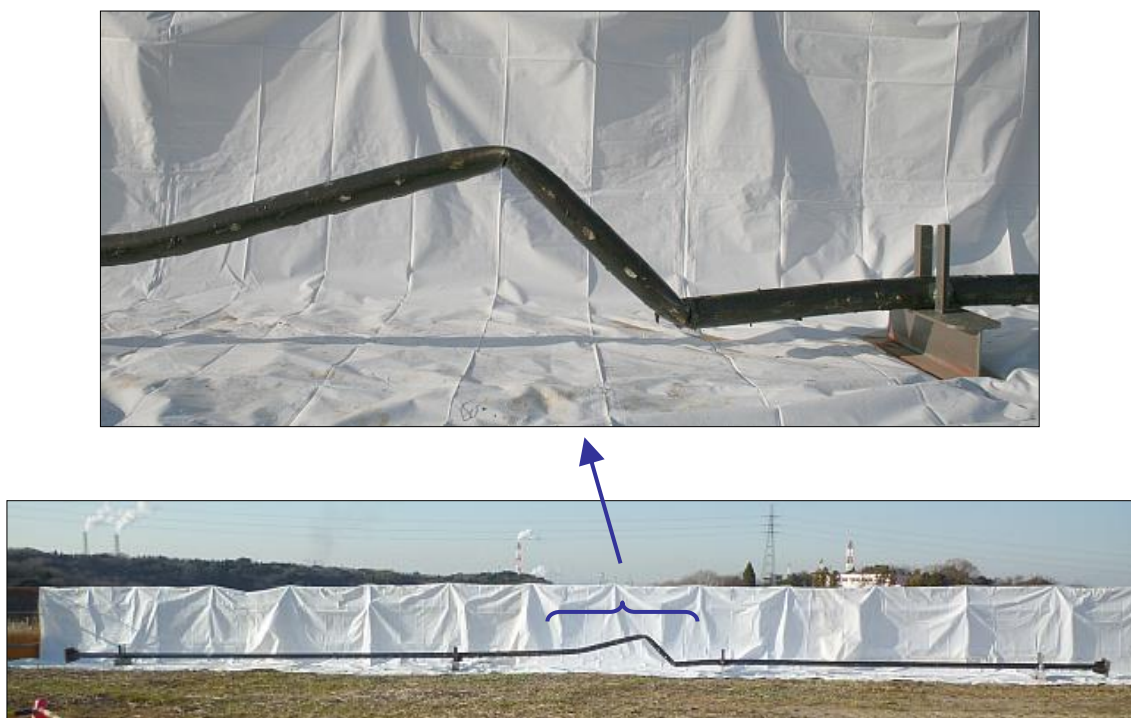


図-4.11 フィールド実験での長管座屈変形状況

フィールド実験の結果と、同条件の部分解析モデルにより得られた公称応力と公称ひずみの関係を表-4.4に示す。また、フィールド実験ケース1を代表例に、座屈が開始するまでの変形過程及び座屈開始以降の変形過程についての比較を図-4.12に示す。

表-4.4 フィールド実験結果と部分解析モデルによる解析値の関係

No.	呼び径	材料 特性	座屈開始点			局部座屈開始点		
			公称ひずみ(%)		精度 (%)	公称ひずみ(%)		精度 (%)
			フィールド 実験	部分解析 モデル		フィールド 実験	部分解析 モデル	
1	100A	LE型	0.27	0.24	11.1	0.46	0.50	-8.7
2	100A	LE型	0.25	0.22	12.0	0.71	0.63	11.3

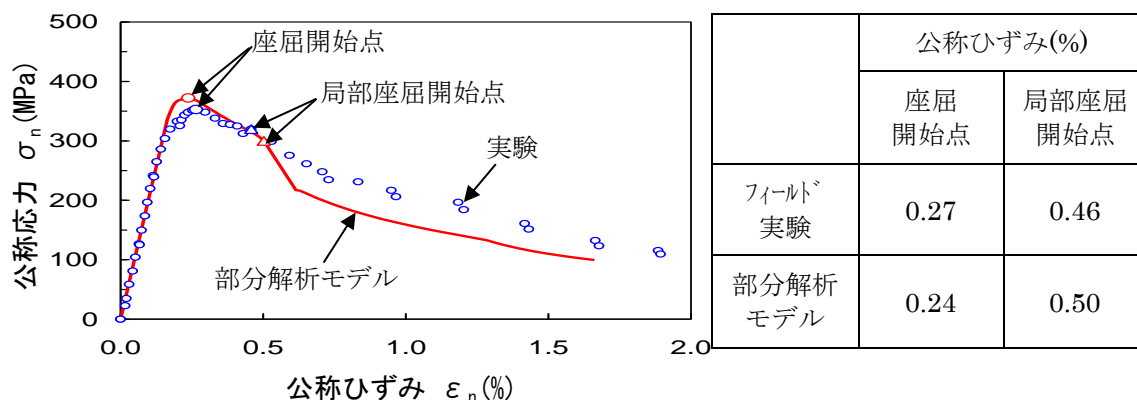


図-4.12 フィールド実験結果と部分解析モデルの長管座屈変形過程（ケース1）

表-4.4 で示した座屈開始点と局部座屈開始点のひずみについて実験値と部分解析モデル値を比較した結果、精度は-8.7%~12.0%となった。ガス工作物の工事、維持及び運用の各段階において、実務に携わる多くの技術者に具体的な基準として広く活用されている「高圧導管指針」（JGA 指-204-06）によれば、ガス導管の許容応力の安全率は 2.0 倍<sup>2)</sup>であることから、上記結果の-8.7%~12.0%は実用上、許容できる差であると判断した。

局部座屈開始以降の挙動についても土槽実験ほどの一致は見られないものの両者は同様の傾向を示していることから、座屈が開始するまでの変形過程、及び座屈開始以降の変形過程については、部分解析モデルが実管実験の代替えとなり得ると判断した。

#### 4.4 まとめ

実管を使った土槽実験及びフィールド実験を行ったことで、小口径管の座屈開始以降の変形過程を把握することができた。また、実験の結果と部分解析モデルによる解析結果は良好な一致を示すことが分かり、このことから部分解析モデルが実管実験の代替えとなり得ると判断した。

したがって、本研究で行う小口径管の座屈開始ひずみ及び局部座屈開始ひずみの解析においては、部分解析モデルを用いることにした。

#### 第 4 章の参考文献

- 1) 一般社団法人 日本ガス協会 (2004) 『高圧ガス導管耐震設計指針』 pp.26-30
- 2) 一般社団法人 日本ガス協会 (2006) 『高圧導管指針』 pp.88-89

## 第5章 解析モデルの条件設定

耐震設計において、地震動は地盤ひずみとして評価され、この地盤ひずみは地盤拘束力となってガス管に作用する。この結果、ガス管に生じる管ひずみが耐震設計の応答であり、強度に対応する許容ひずみとの大小で設計の不適を評価することになる。この考え方に従って、管ひずみを求めることを目的とした部分解析モデルに対し、適切な解析条件を設定する。特に本章では地盤ひずみと地盤拘束力の影響について検討を行った。

一般に、ガス事業者は、地震基盤面の揺れからガス導管埋設位置での表層地盤変位を算出する方法と東京ガス(株)及びガスパイプライン保安対策調査で実施した実規模実験の結果<sup>1)</sup>を踏まえて考案された地盤拘束力の算出方法等が明示されている「高圧ガス導管耐震設計指針」に準じ設計を行っている。なお、「高圧ガス導管耐震設計指針」は、兵庫県南部地震で観測された地震動を高レベル地震動（以下、レベル2地震動<sup>2)</sup>と呼ぶ）によるガス導管の耐震性評価を可能としたものである。また、地震基盤面が傾斜しており表層地盤の厚さが変化しているような、いわゆる浅層不整形地盤<sup>2)</sup>における耐震設計も可能にしたものである。そこで、本研究は、ガス事業者が安全側の評価かつ簡易に検討する方法として一般に用いる既存の耐震設計法を踏襲し、「高圧ガス導管耐震設計指針」の考え方を基本とした上で行うものとした。

### 5.1 浅層不整形地盤の影響

#### 5.1.1 概要

浅層不整形地盤に発生する地盤ひずみは、一様地盤ひずみ<sup>2)</sup>に地震基盤面が傾斜していることによって生じる地盤ひずみを重ね合わせることで求められるため、一般的には一様地盤ひずみに比べ、浅層不整形地盤ひずみ<sup>2)</sup>が大きくなる。このため、安全側の設計が実施できるよう浅層不整形地盤ひずみの影響を検討した。

#### 5.1.2 浅層不整形地盤ひずみ

「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-206-03)「5.3 浅層不整形地盤」によれば、浅層不整形地盤ひずみは、一様地盤ひずみに地震基盤面が傾斜していることによって生じる地盤ひずみを重ね合わせることで求められ、式(5.1)で表される。

$$\varepsilon_{G2} = \sqrt{\varepsilon_{G1}^2 + \varepsilon_{G3}^2} \quad (5.1)$$

ここで、

$\varepsilon_{G1}$  : 浅層不整形地盤の各地点での表層厚さにおける一様地盤ひずみ

$\varepsilon_{G2}$  : 浅層不整形地盤に発生する地盤ひずみ

$\varepsilon_{G3}$  : 地震基盤面が傾斜していることによって生じる地盤ひずみ (=0.3%)

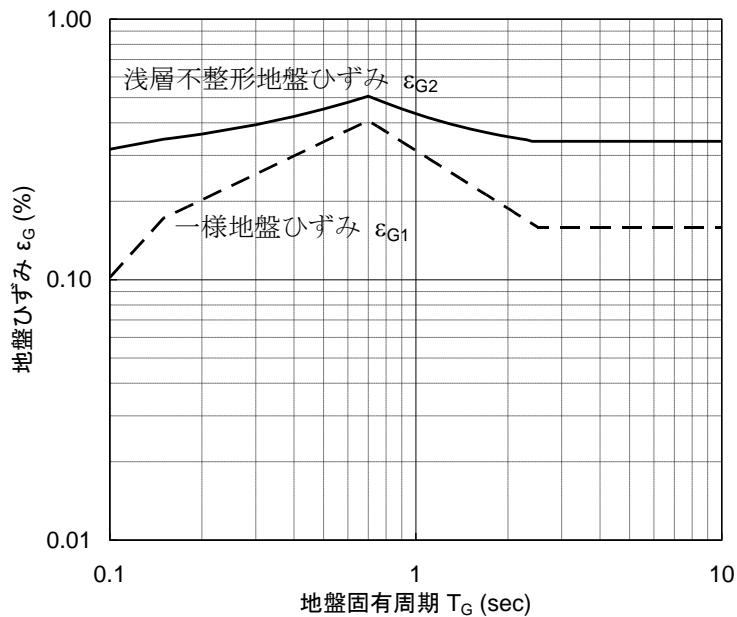


図-5.1 レベル2地震動による浅層不整形地盤ひずみ

### 5.1.3 浅層不整形地盤における地震波形

地震の影響によってガス導管に発生する管ひずみを求めるためには、地震波による地盤変位分布を設定する必要がある。この際、最大地盤ひずみが 5.1.2 に示した浅層不整形地盤ひずみと等しくなる地震波形としては、

- ① 地震波長を固定し、変位振幅を増やす
- ② 変位振幅を固定し、地震波長を減らす

の2つが考えられる。

#### (1) 地震波長を固定する場合

地震波の節に生じる最大地盤ひずみを浅層不整形地盤ひずみと等しくするために、図-5.2 に示すように、地震波長  $L_w$  は一様地盤と同じものとし、変位振幅を  $U_h$  から  $U_h'$  に増加させた。

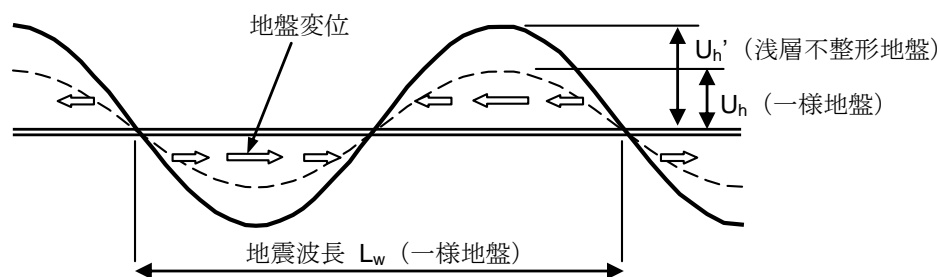


図-5.2 浅層不整形地盤における地震波形（地震波長固定）

「高圧ガス導管耐震設計指針」（JGA 指-206-03）によれば、一様地盤での地盤ひずみ  $\varepsilon_{G1}$  は、式(5.2)で表される。

$$\varepsilon_{G1} = \frac{2\pi \cdot U_h}{L_w} \quad (5.2)$$

ここで、

$U_h$  : 表層地盤変位 (cm)

$L_w$  : 地震動の見かけの波長 (cm)

また、浅層不整形地盤における地盤ひずみ  $\varepsilon_{G2}$  は、式(5.1)を用いて、式(5.3)のように表される。

$$\varepsilon_{G2} = \frac{2\pi \cdot U'_h}{L_w} = \sqrt{\left(\frac{2\pi \cdot U_h}{L_w}\right)^2 + 0.003^2} \quad (5.3)$$

ここで、

$U'_h$  : 浅層不整形地盤での表層地盤変位 (cm)

式(5.3)を  $U'_h$  について解くことで、式(5.4)を得ることができる。

$$U'_h = \sqrt{U_h^2 + \left(\frac{L_w \cdot 0.003}{2\pi}\right)^2} \quad (5.4)$$

(2) 変位振幅を固定する場合

地震波の節に生じる最大地盤ひずみを浅層不整形地盤ひずみと等しくするために、  
 図-5.3 に示すように、変位振幅  $U_h$  は一様地盤と同じものとし、地震波長を減少させた。

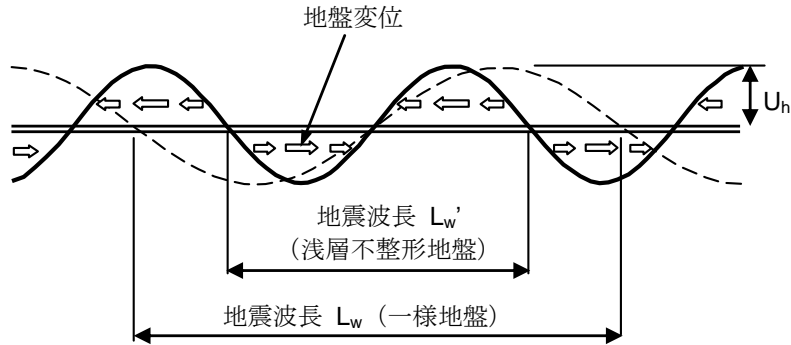


図-5.3 浅層不整形地盤における地震波形（変位振幅固定）

浅層不整形地盤における地盤ひずみ  $\varepsilon_{G2}$  は、式(5.1)を用いて、式(5.5)のように表される。

$$\varepsilon_{G2} = \frac{2\pi \cdot U_h}{L'_w} = \sqrt{\left(\frac{2\pi \cdot U_h}{L_w}\right)^2 + 0.003^2} \quad (5.5)$$

ここで、

$L'_w$  : 浅層不整形地盤での地震動の見かけの波長 (cm)

式(5.5)を  $L'_w$  について解くことで、式(5.6) を得ることができる。

$$L'_w = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{L_w}\right)^2 + \left(\frac{0.003}{2\pi \cdot U_h}\right)^2}} \quad (5.6)$$



### (3) 浅層不整形地盤における管ひずみ

SGP 100A を例に、浅層不整形地盤における地震波モデルが地震波長固定及び変位振幅固定のそれぞれについて、「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-206-03)「5.5.1 直管の地震時ひずみ」<sup>2)</sup>にしたがい、管に生じるひずみを求めた結果を図-5.4 に示す。この結果から、地震波長固定の地震波モデルの方が、管に生じるひずみが大きくなることを確認できた。なお、管ひずみの算出は応答変位法によるものとし、浅層不整形地盤に埋設された直管については、管ひずみの算出方法が定式化されている。応答変位法とは、地盤から地中埋設物へ作用する荷重が地盤と地中埋設物の相対変位に依存するものとし、対象とする地中埋設物の周辺に静的な地盤変位分布を仮定する手法である。

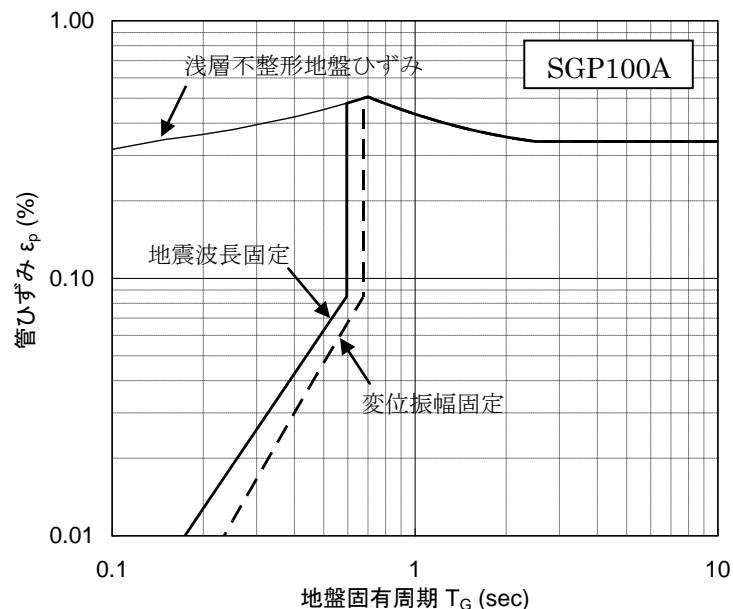


図-5.4 浅層不整形地盤の地震波モデルによる管ひずみの比較

#### 5.1.4 まとめ

浅層不整形地盤における地震波として、簡易的に地震波長を一様地盤と同じものとして固定し、表層地盤変位を増幅させた地盤変位分布を用いることにした。

## 5.2 管軸直角方向の地盤拘束力

### 5.2.1 概要

第6章 6.1 に示すように、部分解析モデルを用いて座屈開始ひずみ及び局部座屈開始ひずみを求める際、座屈開始は地盤拘束力に強く依存していると考えられる。この

ため、「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-206-03)「4.4 地盤拘束力」の解説  
りにしたが、双曲線に近似された管軸直角方向地盤拘束力を用いた。

一般的に地盤の拘束力は、砂質土あるいは粘性土等の土の種類やその締め固まり具  
合によって決まることが知られている。通常、ガス導管の埋め戻しには砂が使われて  
おり、「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-206-03)「4.4 地盤拘束力」の解説に  
よれば、実際の埋め戻し土の締め固め度は、密な砂と中密な砂の中間的な範疇に分類  
される。管の座屈開始と地盤拘束力の関係を把握するために、まずは、現在の指針で  
推奨されている密な砂と中密な砂の中間程度の拘束力を持つ地盤に埋設されたガス導  
管を想定した場合と、これに対して第 1 章 1.3.1 に示したように、今回の被害は田園  
地帯の軟弱地盤で多く発生している傾向があることから、地盤の拘束力がおおよそ半  
分程度となる中密な砂の場合、また、両者の中間値を採用した場合の 3 通りについて  
検討を行うことにした。

### 5.2.2 管軸直角方向の地盤拘束力

「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-206-03)「4.4 地盤拘束力」の解説によ  
れば、双曲線近似された地盤拘束力は、式(5.7)、式(5.8)で表される。

$$\frac{\sigma}{\sigma_{cr}} = \frac{\delta/\delta_0}{0.17 + 0.83 \cdot \delta/\delta_0} \quad (\delta \leq \delta_0) \quad (5.7)$$

$$\sigma = \sigma_{cr} \quad (\delta > \delta_0) \quad (5.8)$$

ここで、

$\sigma$  : 地盤拘束力 (N/cm<sup>2</sup>)

$\delta$  : 地盤変位 (cm)

$\sigma_{cr}$  : 最大地盤拘束力 (N/cm<sup>2</sup>)

$\delta_0$  : 最大地盤拘束力を与える地盤変位 (=0.03・H<sub>p</sub> cm)

H<sub>p</sub> : 導管中心までの深さ (=H<sub>p0</sub>+D/2 cm)

H<sub>p0</sub> : 土被り (=150 cm)

D : 管の外径 (cm)

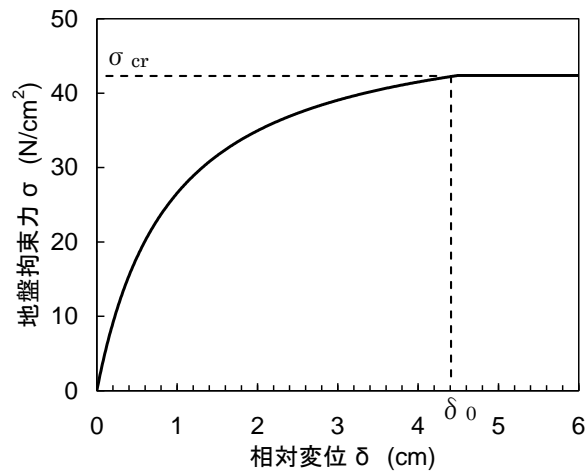


図-5.5 管軸直角方向の地盤拘束力 (SGP 100A)

### 5.2.3 地盤拘束力の初期勾配

地盤拘束力の初期勾配は、式(5.9)で定義した。

$$k_{ini} = \sigma_{ini} / \delta_{ini} \quad (5.9)$$

ここで、

$k_{ini}$  : 地盤拘束力の初期勾配 (N/cm<sup>3</sup>)

$\sigma_{ini}$  : 相対変位  $\delta_{ini}$  時の地盤拘束力 (N/cm<sup>2</sup>)

$\delta_{ini}$  : 初期勾配を設定する相対変位 (=0.1 cm)

第6章6.1に示す部分解析モデルを用いた座屈開始以降の変形過程の解析において、表-5.1に示すように、管軸直角方向地盤ばねの相対変位は、座屈開始時で概ね0.1cmであったことから、初期勾配を設定するための相対変位には0.1cmを用いた。

表-5.1 座屈開始時の管軸直角方向地盤ばねの相対変位

管種・呼び径	座屈開始時の管軸直角方向地盤ばねの相対変位 (cm)
SGP 50A	0.07
SGP 80A	0.08
SGP 100A	0.09
STPG370 100A	0.14

SGP 100A を例として、初期勾配を求めると図-5.6 に示すように双曲線近似では  $50.0\text{N/cm}^3$  となった。

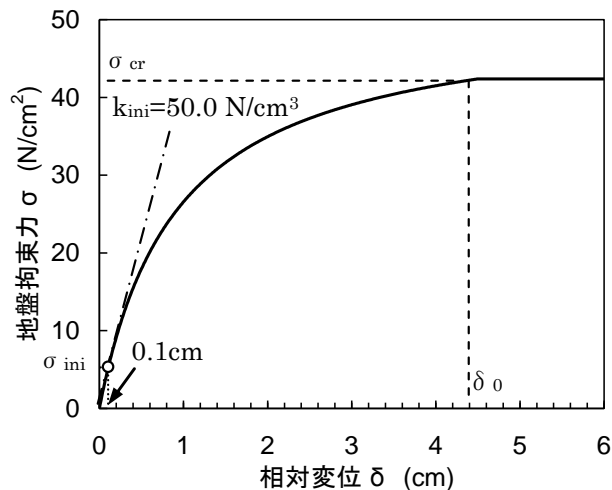


図-5.6 管軸直角方向の地盤拘束力（双曲線近似：SGP 100A）

#### 5.2.4 管軸直角方向地盤拘束力の初期勾配の影響

SGP 100A を例として、5.2.3 に示した管軸直角方向地盤拘束力の初期勾配を変化させた場合に、座屈開始ひずみがどの程度変動するかについて確認した。

##### (1) 解析モデル

解析モデルは、第3章 3.3 に示した部分解析モデルを用いた。

##### (2) 管の材料特性

管種・呼び径は SGP 100A とし、引張特性は LE 型とした。なお、材料特性の詳細は第2章に示したものとする。

##### (3) 地盤拘束力特性

5.2.1 に示したように、実際のガス導管の埋め戻しの状態を想定した 3 通りの地盤拘束力について検討を行うことにした。解析ケースを表-5.2 に、参考として「建築基礎構造設計指針」に示されている砂地盤の水平地盤反力係数を表-5.3<sup>3)</sup>に、また、それぞれのケースについて管軸直角方向の地盤拘束力を図-5.7 に示す。

表-5.2 解析ケース（初期勾配）

ケース	初期勾配 $k_{ini}$ (N/cm <sup>3</sup> )	備 考
1	50.0	密な砂と中密な砂の中間程度の場合 「高圧ガス導管耐震設計指針」に準拠
2	37.5	ケース 1 と 3 の中間の場合 「高圧ガス導管耐震設計指針」の 0.75 倍
3	25.0	中密な砂の場合 「高圧ガス導管耐震設計指針」の 0.5 倍

表-5.3 砂地盤の水平地盤反力係数  $n_h$  (kg/cm<sup>3</sup>)<sup>3)</sup>

砂の相対密度	緩い	中密	密
地下水位より上	0.22	0.67	1.8
地下水位より下	0.13	0.45	1.1

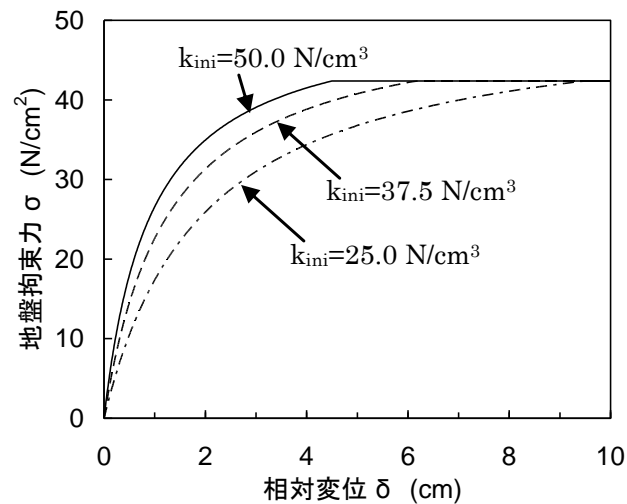


図-5.7 解析における管軸直角方向の地盤拘束力

#### (4) 解析結果

初期勾配を変化させた解析結果として、公称応力と公称ひずみの関係を図-5.8 に示す。座屈開始点（応力が最大となる点）は、地盤拘束力の初期勾配が小さくなるにつれて低ひずみ側に移り、表-5.4 に示すように座屈開始ひずみが小さくなることが確認

できた。

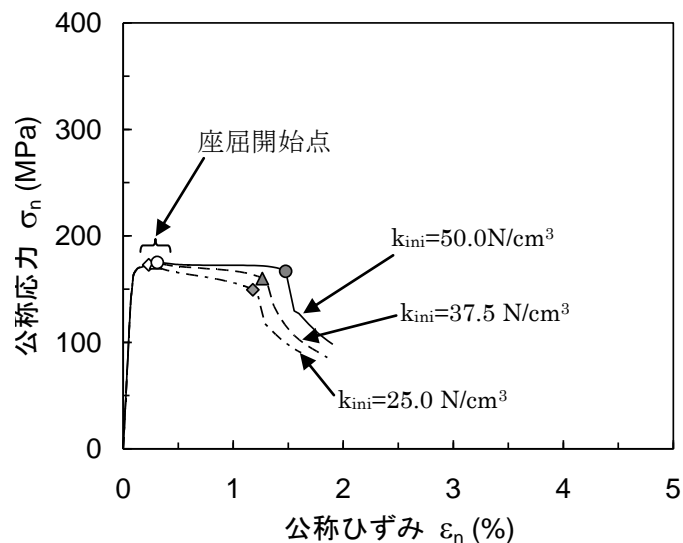


図-5.8 座屈開始点に与える地盤拘束力の初期勾配の影響

表-5.4 地盤拘束力の初期勾配と座屈開始ひずみ

ケース	初期勾配 $k_{ini}$ (N/cm <sup>3</sup> )	座屈開始ひずみ $\varepsilon_{cr1}$ (%)
1	50.0	0.31
2	37.5	0.29
3	25.0	0.23

#### (5) 座屈開始判定への影響

第8章 8.2.7(1)に示すように、座屈の開始判定では、レベル2地震動で発生する管ひずみが、部分解析モデルにより求めた座屈開始ひずみ以上となる場合に、座屈が開始するものとして判定する。表-5.2に示したケース1及びケース3における座屈開始判定図を図-5.9に示す。また、各ケースの座屈開始判定結果を表-5.5に示す。

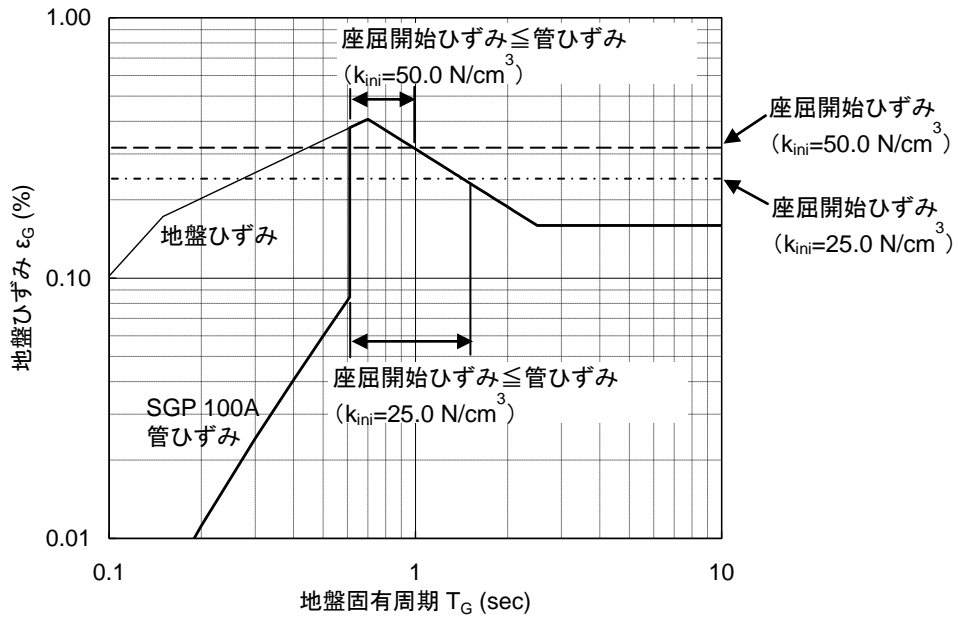


図-5.9 座屈開始判定に与える地盤拘束力の初期勾配の影響

表-5.5 地盤拘束力の初期勾配と座屈開始判定結果 (SGP 100A)

ケース	初期勾配 $k_{ini}$ (N/cm <sup>3</sup> )	座屈開始 ひずみ $\varepsilon_{cr1}$ (%)	座屈が開始する可能性のある 地盤固有周期の範囲 (sec)
1	50.0	0.31	0.6 ~ 1.0
2	37.5	0.29	0.6 ~ 1.1
3	25.0	0.23	0.6 ~ 1.5

### 5.2.5 まとめ

管軸直角方向地盤拘束力の初期勾配が小さくなるにつれて、座屈開始ひずみも小さくなり、その結果、長周期側の地盤固有周期を有する地盤において座屈が開始し易くなることが確認できた。図-5.10 に示す双曲線近似とバイリニア近似<sup>1)</sup>による管軸直角方向の地盤拘束力の比較を見ると、地盤拘束力をバイリニアで近似した場合は、双曲線で近似した場合に比べ、明らかに初期勾配が小さくなり、その結果、座屈開始ひずみを過小に評価してしまう可能性がある。

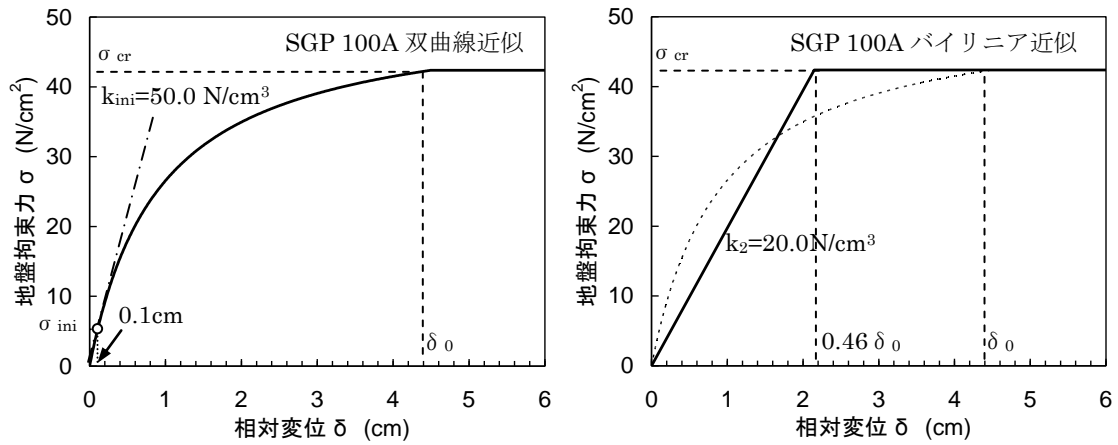


図-5.10 管軸直角方向の地盤拘束力の比較（双曲線近似とバイリニア近似）

したがって、地盤の拘束力は「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-206-03)「4.4 地盤拘束力」の解説にしたがい、双曲線に近似された管軸直角方向地盤拘束力を用いることにした。本章の結果から、施工時に管周りを適切に締め固めることは、管軸直角方向の地盤拘束力の初期勾配を確保することに繋がり、長管座屈の防止に有効であることが確認できた。



## 第 5 章の参考文献

- 1) 一般社団法人 日本ガス協会 (2004) 『高圧ガス導管耐震設計指針』 pp.26-30
- 2) 一般社団法人 日本ガス協会 (2004) 『高圧ガス導管耐震設計指針』 pp.50-84
- 3) 一般社団法人 日本建築学会 (1999) 『建築基礎構造設計指針』 pp.255

## 第6章 座屈開始以降の変形過程の解析

部分解析モデルを用いた有限要素解析を行い、各管種・口径における座屈開始ひずみ及び局部座屈開始ひずみを求め、レベル2地震動で生じる管ひずみと座屈開始ひずみを比較することにより、座屈の開始判定を行った。また、座屈開始以降の変形過程を求める非線形解法として、座屈部の変形特性を線形とした解析モデルで繰り返し計算を行う方法を用い、得られた解析結果から管が座屈開始以降に局部座屈開始に到るか否かについて判定を行った。更に、ガス導管の直線区間が短い場合は座屈又は局部座屈が開始しないと考えられることから、座屈及び局部座屈が開始しない直線長の上限值を求める方法についても検討した。

### 6.1 座屈開始判定

#### 6.1.1 概要

部分解析モデルを用いた有限要素解析を行い、各管種・口径における座屈開始ひずみ及び局部座屈開始ひずみを求めた。また、レベル2地震動で生じる管ひずみと座屈開始ひずみを比較することにより、座屈の開始判定を行った。

#### 6.1.2 解析方法

##### (1) 解析モデル

座屈開始以降の変形過程の解析を行うための部分解析モデルを図-6.1に示す。また、部分解析モデルにおける解析条件を表-6.1に示す。

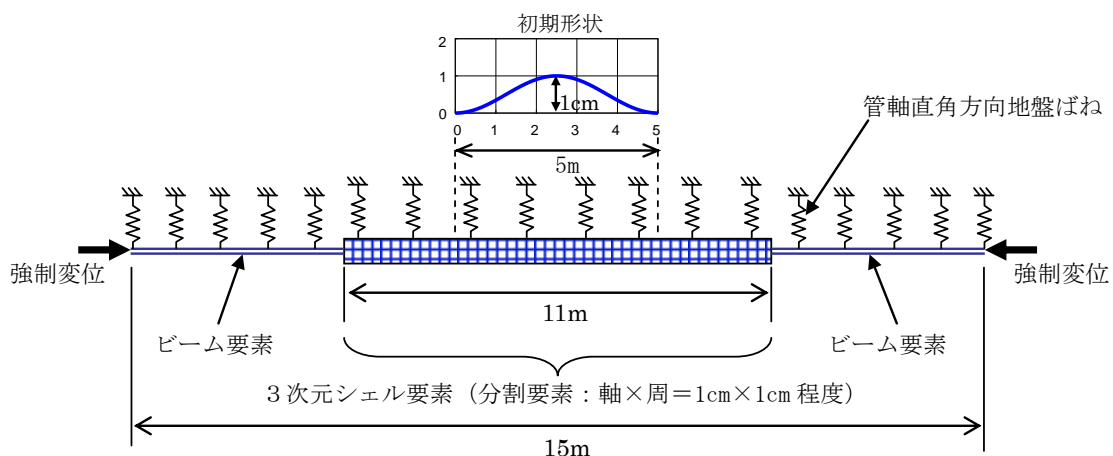


図-6.1 部分解析モデル

表-6.1 部分解析モデルの解析条件

項目	解析条件	備考
要素モデル	中央部：4 節点シェル要素 両端部：ビーム要素 地盤ばね：トラス要素	
管材料特性	弾塑性多直線モデル	6.1.2(2)参照
地盤拘束力特性	双曲線モデル	管軸直角方向に適用 6.1.2 (3)参照
外力	軸圧縮強制変位	強制変位点の反力が軸圧縮荷重
初期形状	5m で最大 1cm	正弦波形

(2) 管の材料特性

材料特性の詳細は、第 2 章に示したものとする。

(a) 降伏応力及び引張強さ

小口径のガス導管として、一般的に使用される SGP 及び STPG370 について、降伏応力及び引張強さを表-6.2 に示す。

表-6.2 各管種の降伏応力と引張強さ

管種	降伏応力(MPa)	引張強さ(MPa)
SGP	174	290
STPG370	215	370

(b) 降伏棚型の引張特性

SGP 及び STPG370 について、降伏棚型（以下、LE 型）の引張特性を図-6.2 に示す。

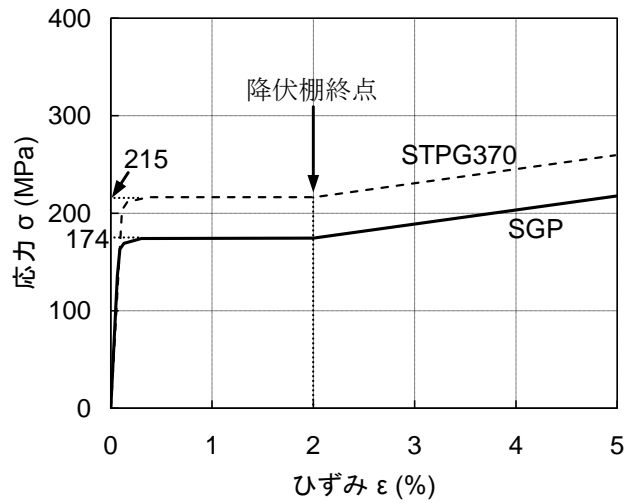


図-6.2 LE型材料の引張特性

(c) ラウンドハウス型の引張特性

SGP 及び STPG370 について、ラウンドハウス型（以下、RH 型）の引張特性を図-6.3 に示す。

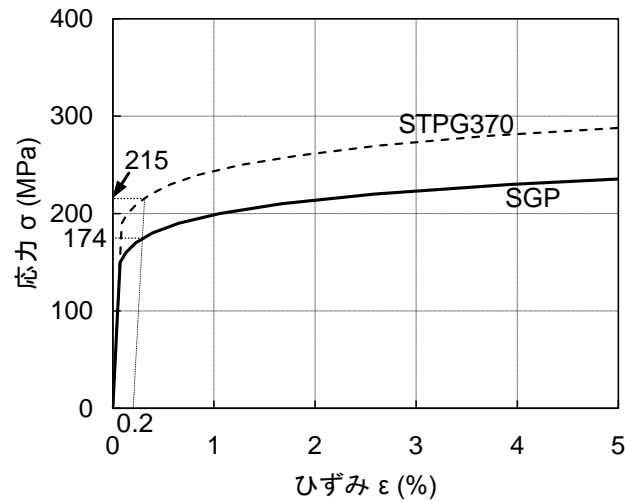


図-6.3 RH型材料の引張特性

(3) 地盤拘束力特性

部分解析モデルでは、「高圧ガス導管耐震設計指針」（JGA 指-206-03）「4.4 地盤拘束力」の解説 ①に示されている双曲線近似式にしたがい、図-6.4 に示す管軸直角方向地盤拘束力を用いた。

$$\frac{\sigma}{\sigma_{cr}} = \frac{\delta/\delta_0}{0.17 + 0.83 \cdot \delta/\delta_0} \quad (\delta \leq \delta_0) \quad (6.1)$$

$$\sigma = \sigma_{cr} \quad (\delta > \delta_0) \quad (6.2)$$

ここで、

$\sigma$  : 地盤拘束力 (N/cm<sup>2</sup>)

$\delta$  : 地盤変位 (cm)

$\sigma_{cr}$  : 最大地盤拘束力 (N/cm<sup>2</sup>)

$\delta_0$  : 最大地盤拘束力を与える地盤変位 (=0.03・H<sub>p</sub> cm)

H<sub>p</sub> : 導管中心までの深さ (=H<sub>p0</sub>+D/2 cm)

H<sub>p0</sub> : 土被り (=150 cm)

D : 管の外径 (cm)

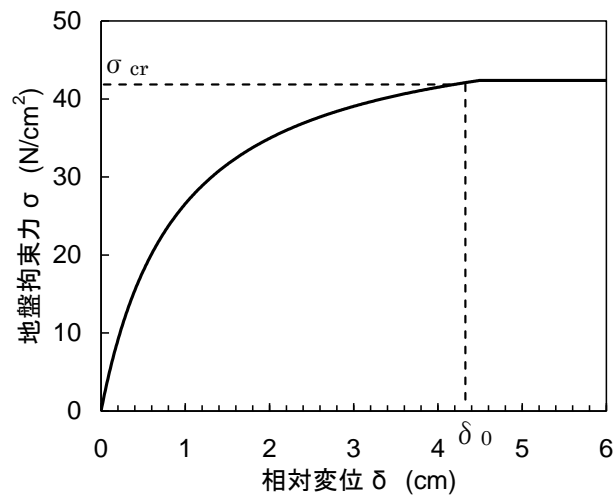


図-6.4 管軸直角方向の地盤拘束力 (SGP 100A)

#### (4) 解析ケース

現在、新規埋設時に使用される小口径管 50A と 80A の管種は SGP であり、100A は SGP 及び STPG370 の 2 種類を使用している。また、第 2 章 2.4 で検討した引張特性から使用する材料は降伏棚をもたない RH 型と降伏棚をもつ LH 型の 2 種類あることが確認できている。以上から、表-6.3 に示すように実用上使用する 8 ケースを設定した。

表-6.3 座屈開始以降の変形過程の解析ケース

ケース	管種	呼び径	外径 (mm)	管厚 (mm)	引張特性	降伏応力 (MPa)	引張強さ (MPa)
1	SGP	50A	60.5	3.8	RH 型	174	290
2	SGP	80A	89.1	4.2	RH 型	174	290
3	SGP	100A	114.3	4.5	RH 型	174	290
4	STPG370	100A	114.3	6.0	RH 型	215	370
5	SGP	50A	60.5	3.8	LE 型	174	290
6	SGP	80A	89.1	4.2	LE 型	174	290
7	SGP	100A	114.3	4.5	LE 型	174	290
8	STPG370	100A	114.3	6.0	LE 型	215	370

### 6.1.3 解析結果

#### (1) 座屈開始点、局部座屈開始点及び座屈開始ひずみ

部分解析モデルの解析結果より、座屈開始点、局部座屈開始点及び座屈開始ひずみを求めた。図-6.5 に示すように、公称応力と公称ひずみの関係、及び曲げモーメントと公称ひずみの関係から、公称応力が最大となる点を座屈開始点、曲げモーメントが最大となる点を局部座屈開始点とした。また、座屈開始点における公称ひずみを座屈開始ひずみ  $\epsilon_{cr1}$  とした。

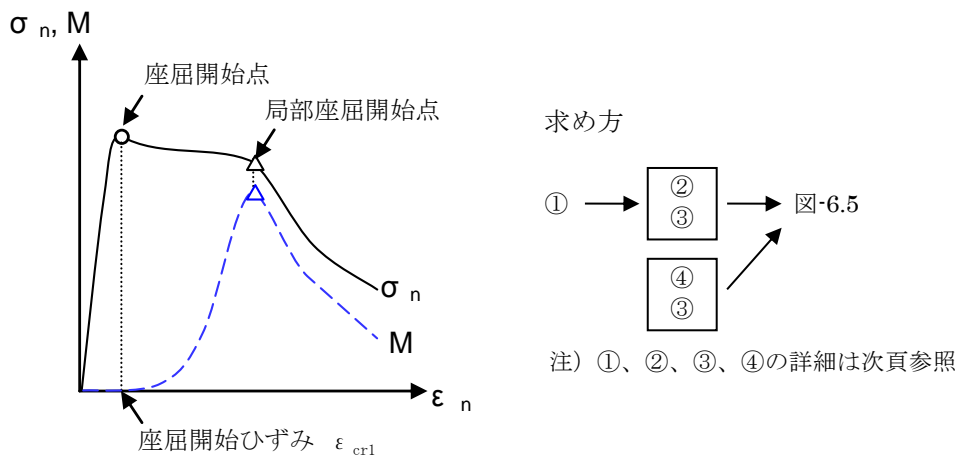


図-6.5 座屈開始点、局部座屈開始点及び座屈開始ひずみ

#### ① 軸圧縮荷重

軸圧縮荷重は、部分解析モデルの強制変位点における反力を用いる。

## ② 公称応力

公称応力は、軸圧縮荷重を管の公称断面積で除した値とする。

## ③ 公称ひずみ

座屈部を中心とした 5m の区間における平均軸ひずみを公称ひずみと見なし、5m 区間の収縮変位をゲージ長 5m で除した値を用いる。

## ④ 曲げモーメント

図-6.6 に示すように、曲げモーメントは座屈部の断面 S において、軸方向応力によるモーメントを積分して求める。

$$M = \int_0^{2\pi} \sigma(\theta) \cdot z(\theta) \cdot r(\theta) \cdot t d\theta \quad (6.3)$$

ここで、

M : 断面 S の曲げモーメント

$\theta$  : 断面 S 内の角度

$\sigma(\theta)$  : 角度  $\theta$  の位置での軸方向応力

$z(\theta)$  : 角度  $\theta$  の位置での中立軸からの z 方向距離

$r(\theta)$  : 角度  $\theta$  の位置での半径 (管厚中心)

t : 管厚

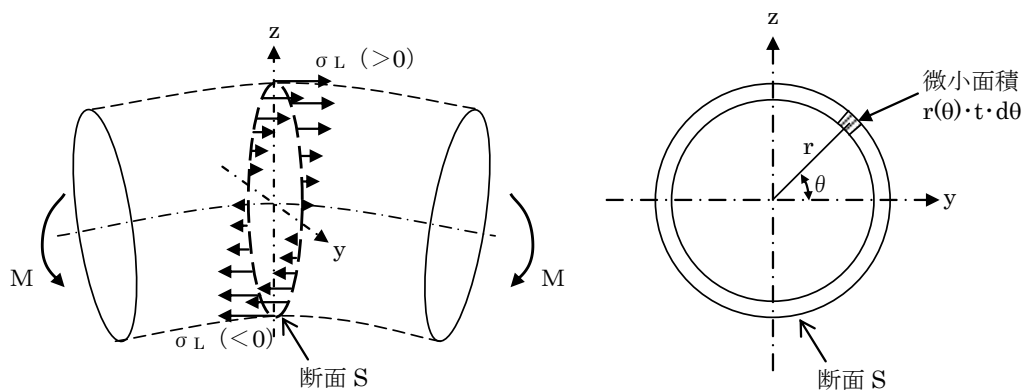


図-6.6 曲げモーメントの計算

## (2) 局部座屈開始ひずみ

部分解析モデルの解析結果より、局部開始ひずみを求めた。この際、局部座屈は局所部の変形に依存すると考え、局所部の変形を簡易的に表すことができる 2D 平均圧

縮ひずみを用いることとした。図-6.7 に示すように、公称応力と 2D 平均圧縮ひずみの関係及び曲げモーメントと 2D 平均圧縮ひずみの関係から、曲げモーメントが最大となる局部座屈開始点における 2D 平均圧縮ひずみを局部座屈開始ひずみ  $\epsilon_{cr2}$  とした。

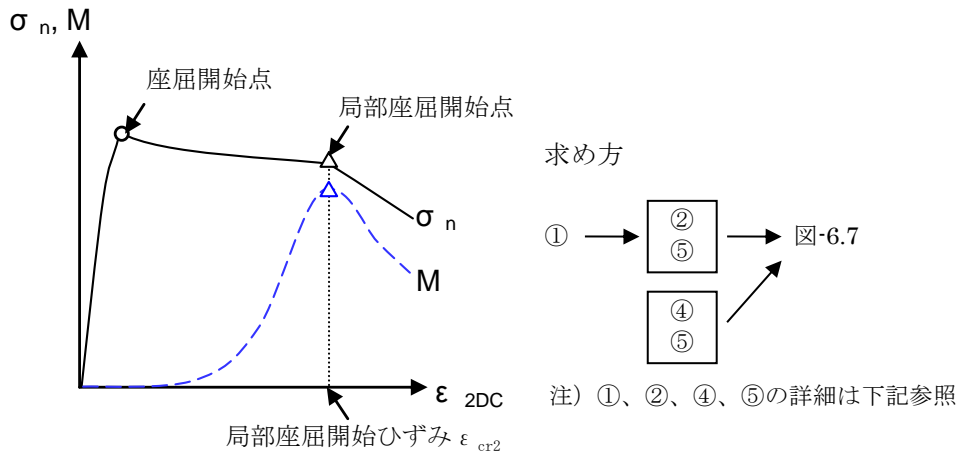


図-6.7 局部座屈開始ひずみ

① 軸圧縮荷重

軸圧縮荷重は、部分解析モデルの強制変位点における反力を用いる。

② 公称応力

公称応力は、軸圧縮荷重を管の公称断面積で除した値とする。

④ 曲げモーメント

図-6.6 に示したように、曲げモーメントは座屈部の断面 S において、軸方向応力によるモーメントを積分して求める。

⑤ 2D 平均圧縮ひずみ

図-6.8 に示すように、座屈部を中心とした長さ 2D (外径の 2 倍) の区間における、圧縮側 (曲がった管の曲率中心側) の軸方向圧縮ひずみの平均値を 2D 平均圧縮ひずみ  $\epsilon_{2DC}$  とする。

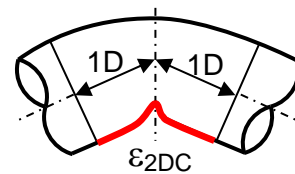


図-6.8 2D 平均圧縮ひずみ

(3) 解析結果

解析結果から得られた座屈開始ひずみと局部座屈開始ひずみを表-6.4 に示す。また、RH 型材料に対する公称応力と公称ひずみ、及び公称応力と 2D 平均圧縮ひずみの関係を図-6.9～図-6.12 に、LE 型材料に対する公称応力と公称ひずみ、及び公称応力と



2D 平均圧縮ひずみの関係を図-6.13～図-6.16 に示す。

表-6.4 座屈開始以降の変形過程の解析結果

ケース	管種	呼び径	外径 (mm)	管厚 (mm)	引張 特性	座屈 開始ひずみ $\varepsilon_{cr1}$ (%)	局部座屈 開始ひずみ $\varepsilon_{cr2}$ (%)
1	SGP	50A	60.5	3.8	RH 型	0.64	8.85
2	SGP	80A	89.1	4.2	RH 型	1.29	6.99
3	SGP	100A	114.3	4.5	RH 型	2.29	7.04
4	STPG370	100A	114.3	6.0	RH 型	0.96	7.63
5	SGP	50A	60.5	3.8	LE 型	0.19	8.75
6	SGP	80A	89.1	4.2	LE 型	0.28	7.54
7	SGP	100A	114.3	4.5	LE 型	0.31	6.48
8	STPG370	100A	114.3	6.0	LE 型	0.31	8.48

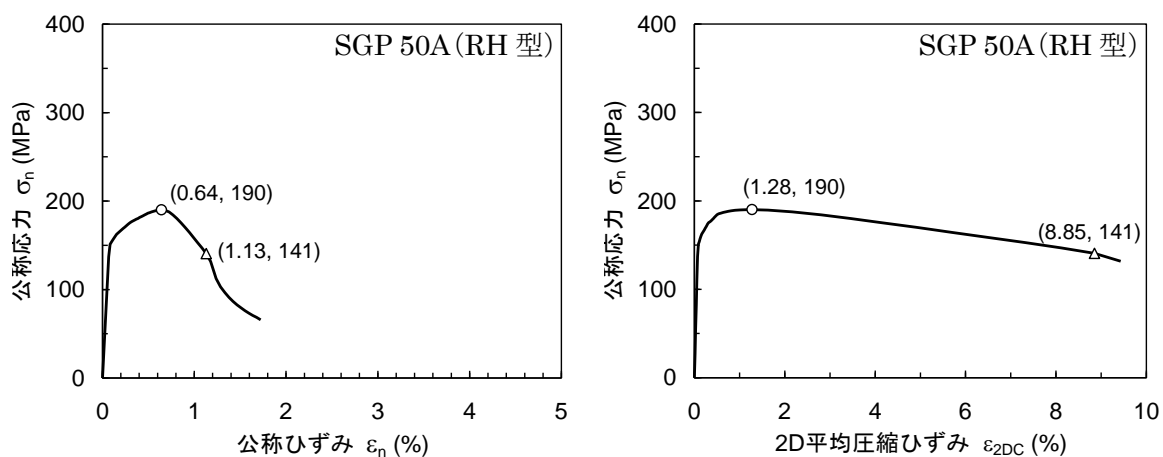


図-6.9 公称応力と公称ひずみ、公称応力と 2D 平均圧縮ひずみの関係  
(ケース 1、RH 型)

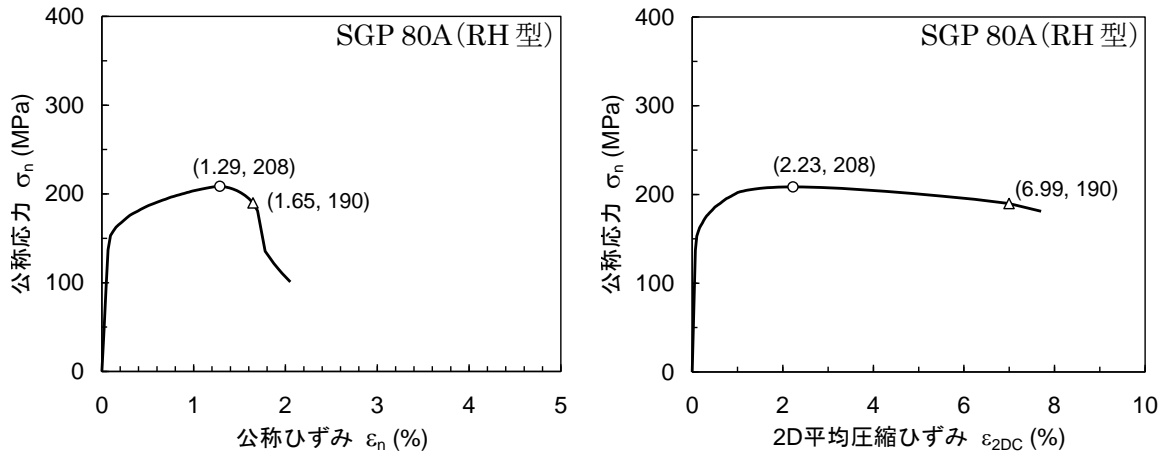


図-6.10 公称応力と公称ひずみ、公称応力と 2D 平均圧縮ひずみの関係

(ケース 2、RH 型)

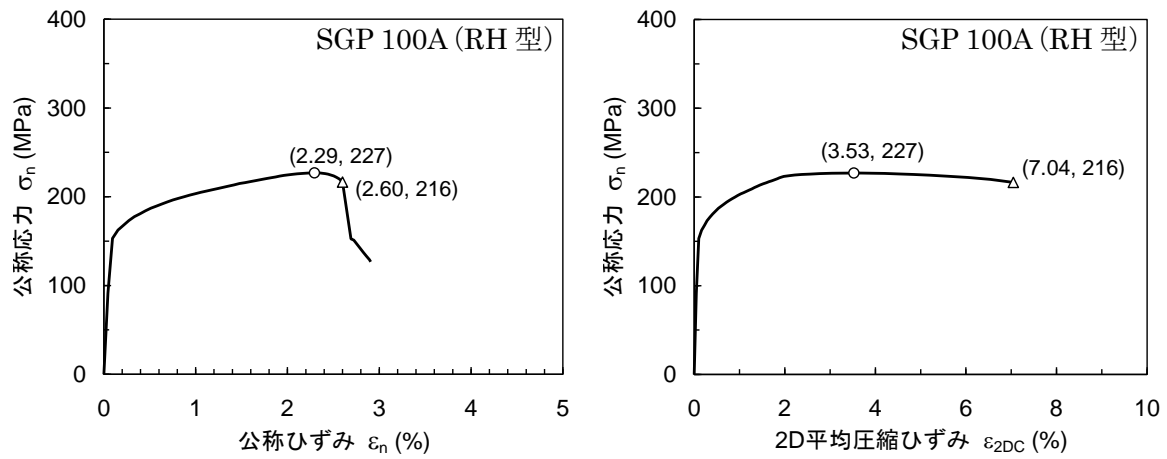


図-6.11 公称応力と公称ひずみ、公称応力と 2D 平均圧縮ひずみの関係

(ケース 3、RH 型)

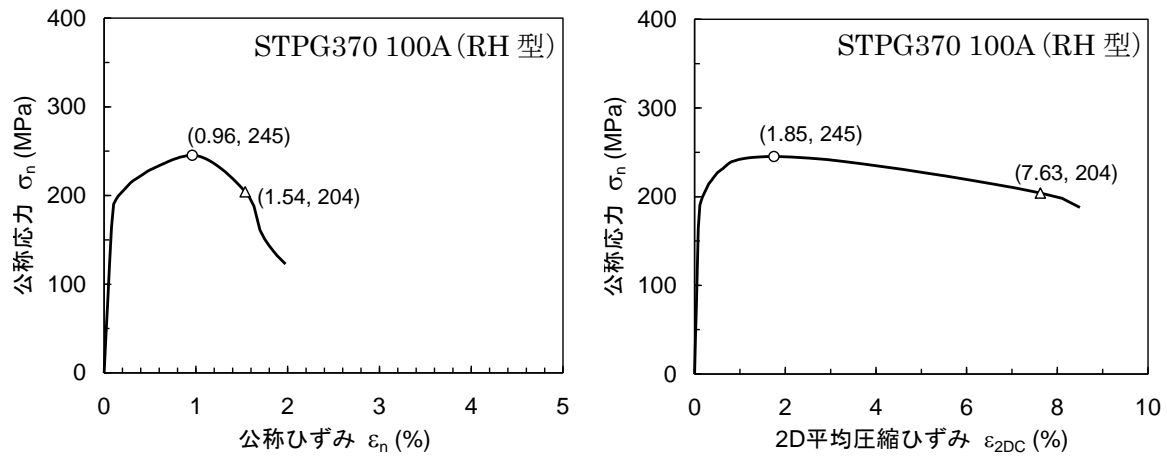


図-6.12 公称応力と公称ひずみ、公称応力と 2D 平均圧縮ひずみの関係

(ケース 4、RH 型)

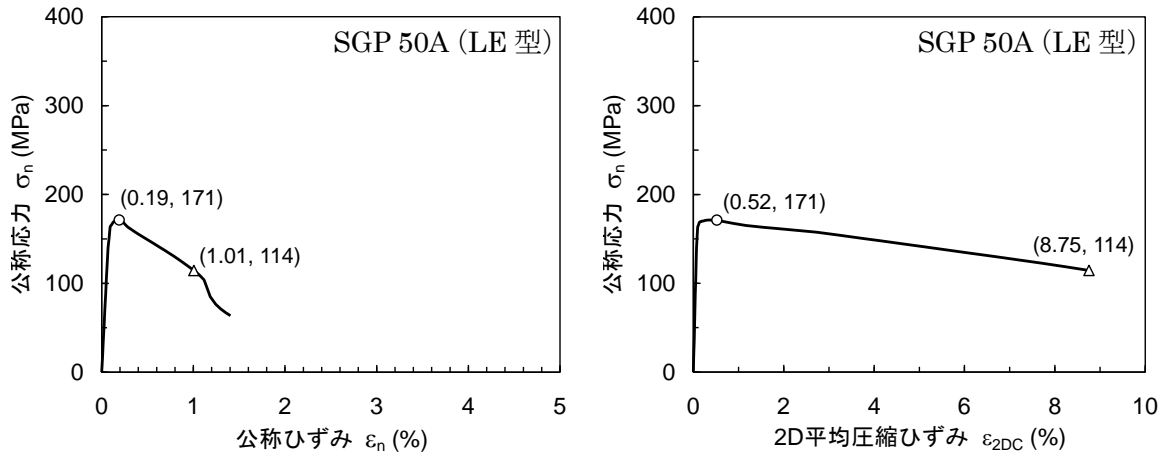


図-6.13 公称応力と公称ひずみ、公称応力と 2D 平均圧縮ひずみの関係

(ケース 5、LE 型)

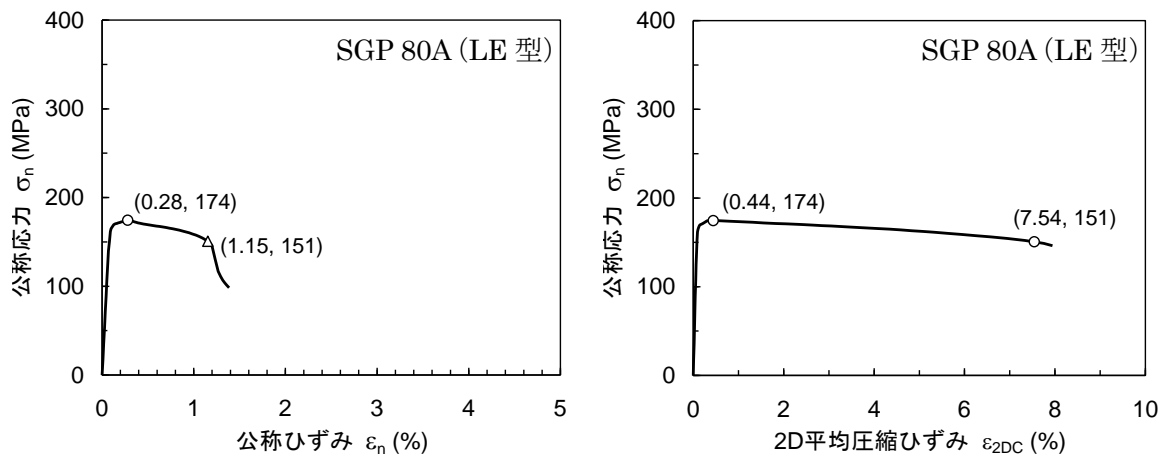


図-6.14 公称応力と公称ひずみ、公称応力と 2D 平均圧縮ひずみの関係

(ケース 6、LE 型)

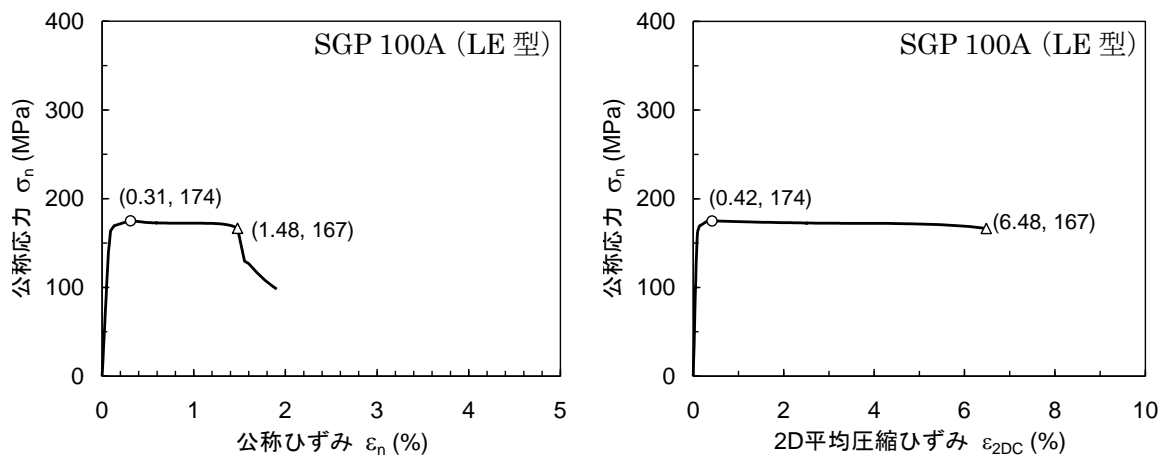


図-6.15 公称応力と公称ひずみ、公称応力と 2D 平均圧縮ひずみの関係

(ケース 7、LE 型)

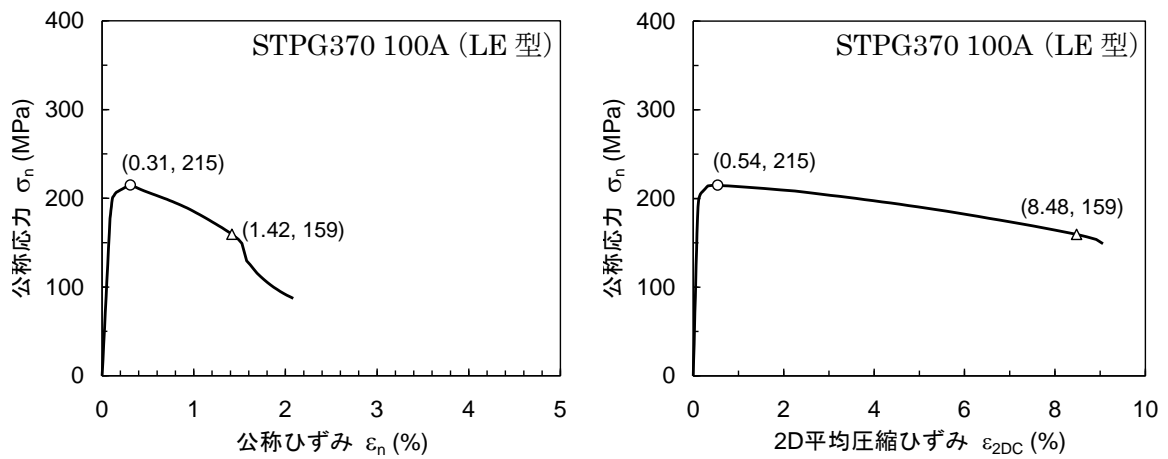


図-6.16 公称応力と公称ひずみ、公称応力と 2D 平均圧縮ひずみの関係

(ケース 8、LE 型)

#### 6.1.4 座屈開始判定

##### (1) 判定方法

座屈開始点以前での管の変形は単純軸圧縮変形であり、管ひずみは「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-206-03) によって求めることができる<sup>2)</sup>。「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA-206-03) のレベル 2 地震動で生じる管ひずみが、部分解析モデルにより求めた座屈開始ひずみ以上となる場合に、座屈が開始するものとして判定する。一様地盤における SGP 50A (LE 型) について、判定方法の例を図-6.17 に示す。

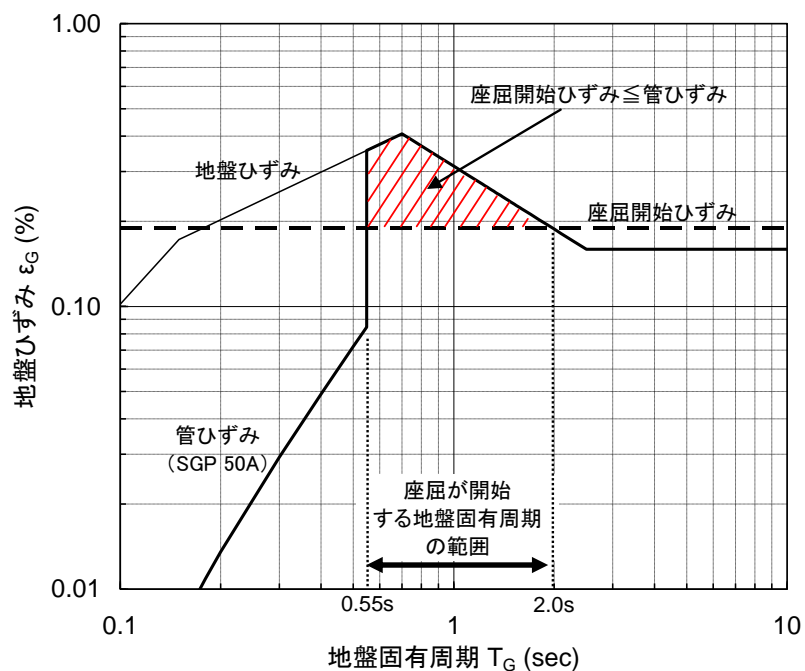


図-6.17 一様地盤における SGP 50A (LE 型) の座屈判定例

図-6.17において、地盤固有周期 0.55sec~2.0sec の範囲では、管ひずみが座屈開始ひずみ以上となるため、座屈が開始すると判定した。

また、「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-206-03)によれば、管が降伏した場合、管ひずみは地盤ひずみと等しくなり、地盤ひずみを超えることはない<sup>2)</sup>とされている。したがって、座屈開始ひずみが地盤ひずみの最大値を上回っている場合には、管ひずみが座屈開始ひずみに達することは無く、レベル 2 地震動において座屈は開始しないことになる。

## (2) 座屈開始判定結果 (一様地盤)

一様地盤における各管種・口径について、座屈開始判定を行った結果を表-6.5 に示す。また、「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-206-03)「5.2.4 一様地盤の表層地盤ひずみ」に示された縦軸を地盤ひずみ、横軸を地盤の固有周期とした両対数グラフ<sup>2)</sup>を用いて作成した各ケースの座屈開始判定図を図-6.18~図-6.25 に示す。

判定結果から RH 型の引張特性については、いずれの地盤固有周期であっても座屈が開始しないことを確認できた。

表-6.5 座屈開始判定結果 (一様地盤)

ケース	管種	呼び径	外径 (mm)	管厚 (mm)	引張 特性	座屈開始 ひずみ $\varepsilon_{cr1}$ (%)	座屈が 開始する 地盤固有 周期の範囲 $T_G$ (sec)
1	SGP	50A	60.5	3.8	RH 型	0.64	開始しない
2	SGP	80A	89.1	4.2	RH 型	1.29	開始しない
3	SGP	100A	114.3	4.5	RH 型	2.29	開始しない
4	STPG370	100A	114.3	6.0	RH 型	0.96	開始しない
5	SGP	50A	60.5	3.8	LE 型	0.19	0.55 ~ 2.0
6	SGP	80A	89.1	4.2	LE 型	0.28	0.59 ~ 1.2
7	SGP	100A	114.3	4.5	LE 型	0.31	0.61 ~ 1.0
8	STPG370	100A	114.3	6.0	LE 型	0.31	0.81 ~ 1.0

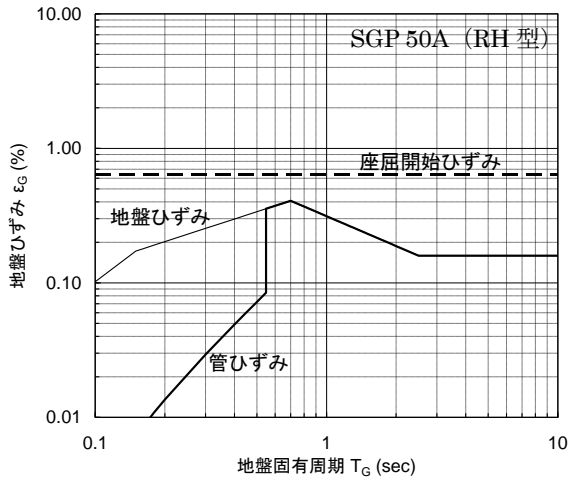


図-6.18 座屈開始判定図  
(一様地盤、ケース 1)

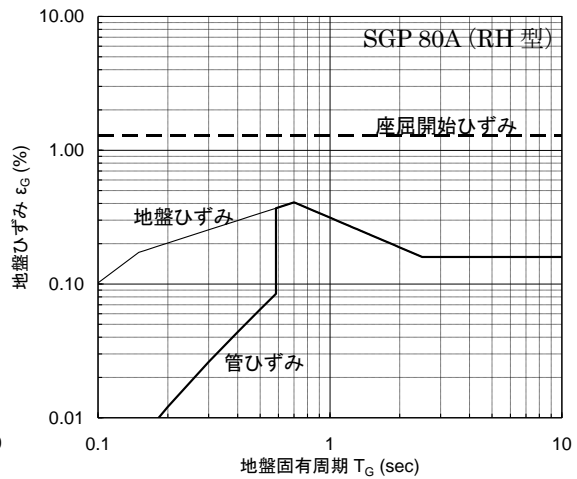


図-6.19 座屈開始判定図  
(一様地盤、ケース 2)

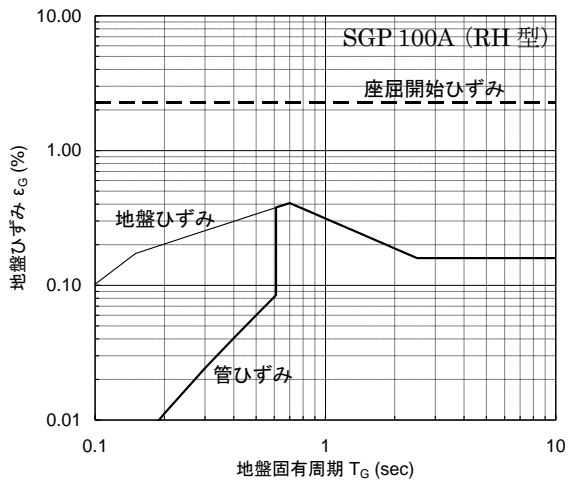


図-6.20 座屈開始判定図  
(一様地盤、ケース 3)

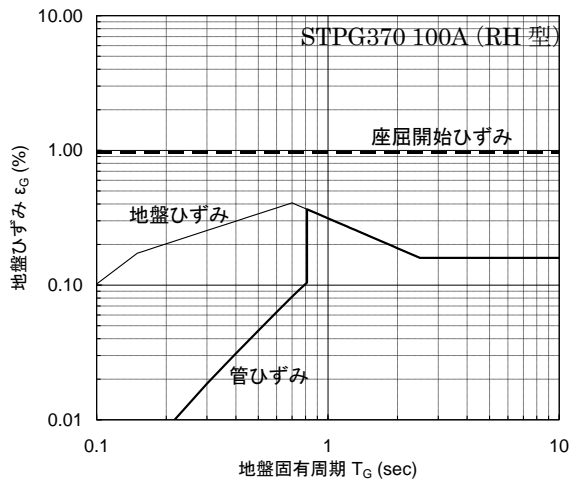


図-6.21 座屈開始判定図  
(一様地盤、ケース 4)

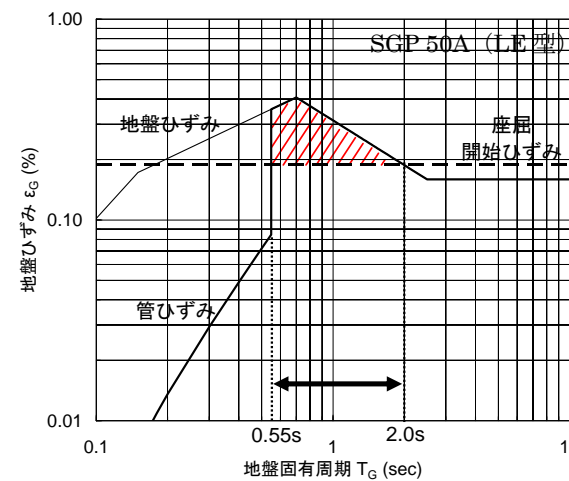


図-6.22 座屈開始判定図  
(一様地盤、ケース 5)

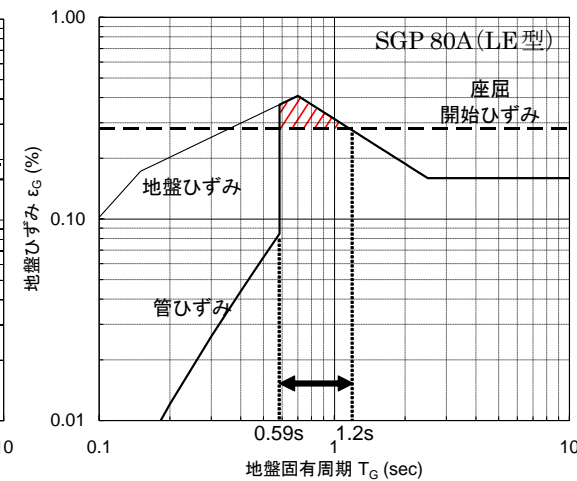


図-6.23 座屈開始判定図  
(一様地盤、ケース 6)

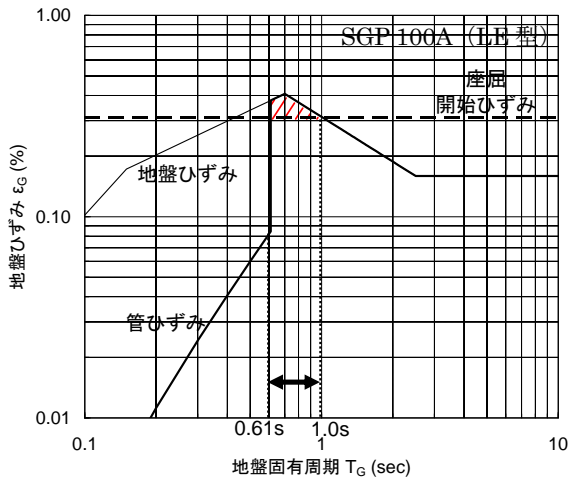


図-6.24 座屈開始判定図

(一様地盤、ケース 7)

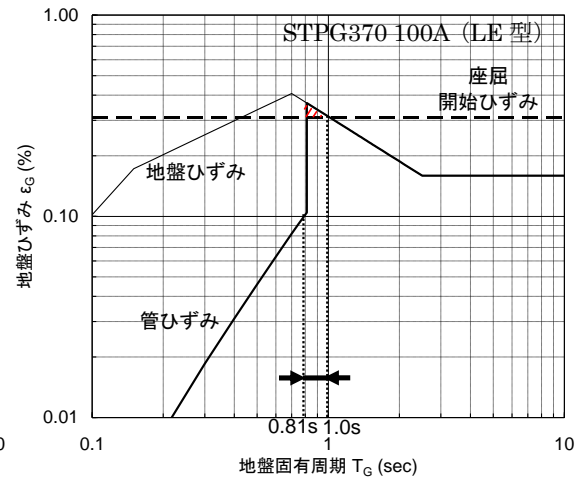


図-6.25 座屈開始判定図

(一様地盤、ケース 8)

### (3) 座屈開始判定結果 (浅層不整形地盤)

浅層不整形地盤における各管種・口径について、座屈開始判定を行った結果を表-6.6に示す。また、各ケースの座屈開始判定図を図-6.26～図-6.33に示す。

判定結果から RH 型の引張特性については、いずれの地盤固有周期であっても座屈が開始しないことを確認できた。

表-6.6 座屈開始判定結果 (浅層不整形地盤)

ケース	管種	呼び径	外径 (mm)	管厚 (mm)	引張 特性	座屈開始 ひずみ $\varepsilon_{cr1}$ (%)	座屈が 開始する 地盤固有 周期の範囲 $T_G$ (sec)
1	SGP	50A	60.5	3.8	RH 型	0.64	開始しない
2	SGP	80A	89.1	4.2	RH 型	1.29	開始しない
3	SGP	100A	114.3	4.5	RH 型	2.29	開始しない
4	STPG370	100A	114.3	6.0	RH 型	0.96	開始しない
5	SGP	50A	60.5	3.8	LE 型	0.19	0.55 以上
6	SGP	80A	89.1	4.2	LE 型	0.28	0.59 以上
7	SGP	100A	114.3	4.5	LE 型	0.31	0.61 以上
8	STPG370	100A	114.3	6.0	LE 型	0.31	0.81 以上

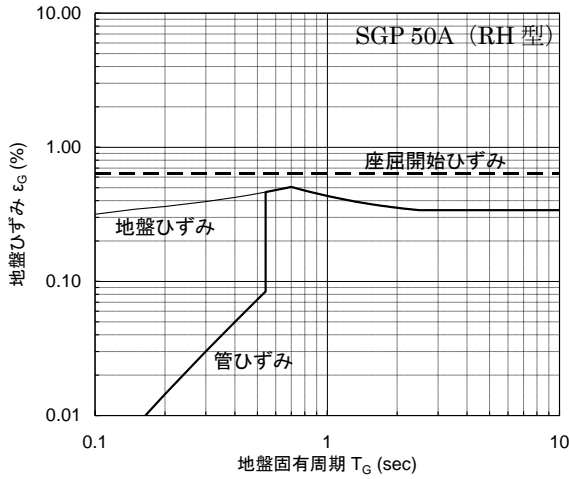


図-6.26 座屈開始判定図

(浅層不整形地盤、ケース 1)

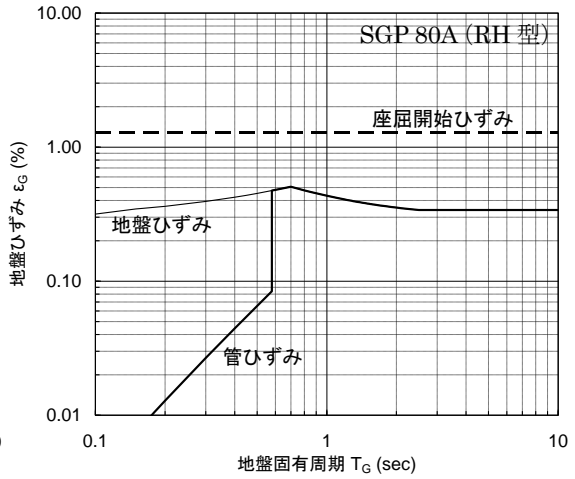


図-6.27 座屈開始判定図

(浅層不整形地盤、ケース 2)

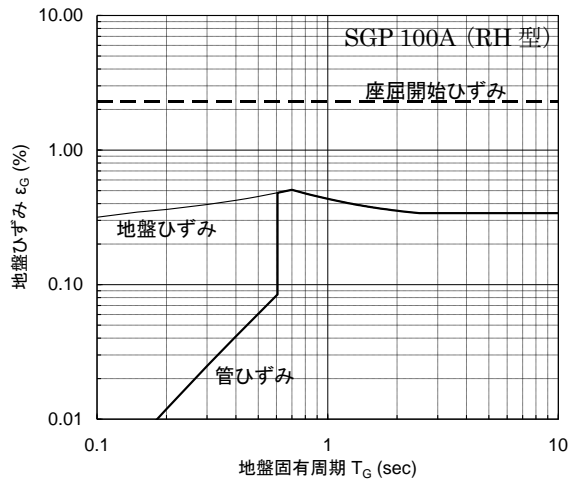


図-6.28 座屈開始判定図

(浅層不整形地盤、ケース 3)

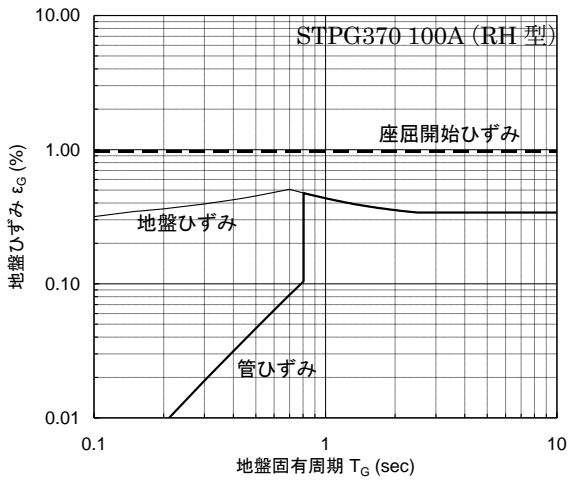


図-6.29 座屈開始判定図

(浅層不整形地盤、ケース 4)

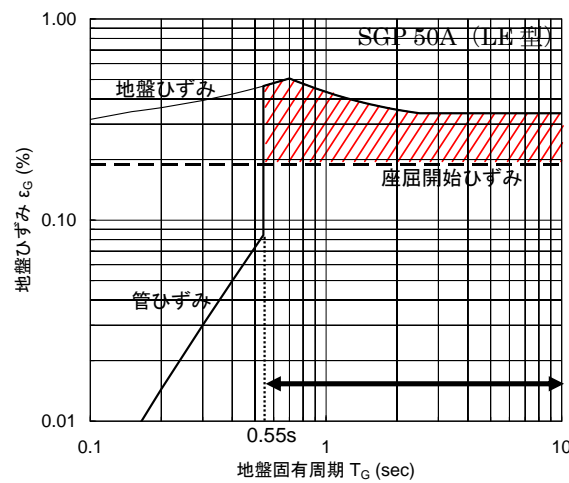


図-6.30 座屈開始判定図

(浅層不整形地盤、ケース 5)

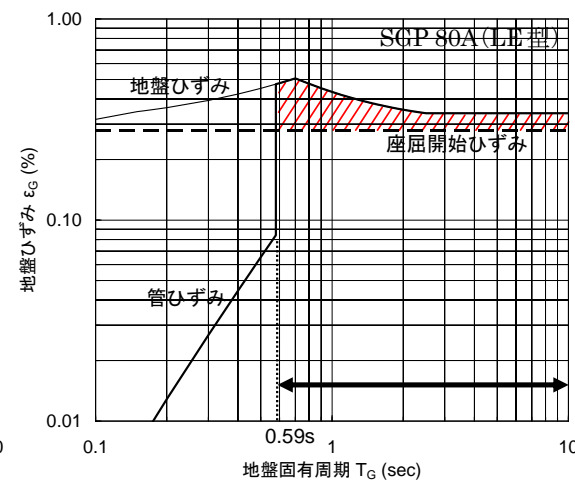


図-6.31 座屈開始判定図

(浅層不整形地盤、ケース 6)



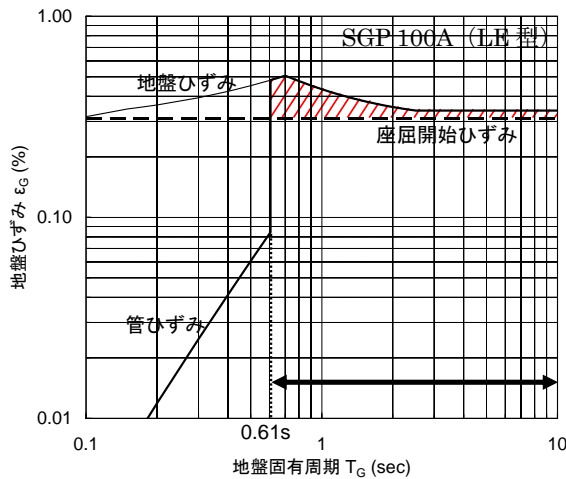


図-6.32 座屈開始判定図

(浅層不整形地盤、ケース 7)

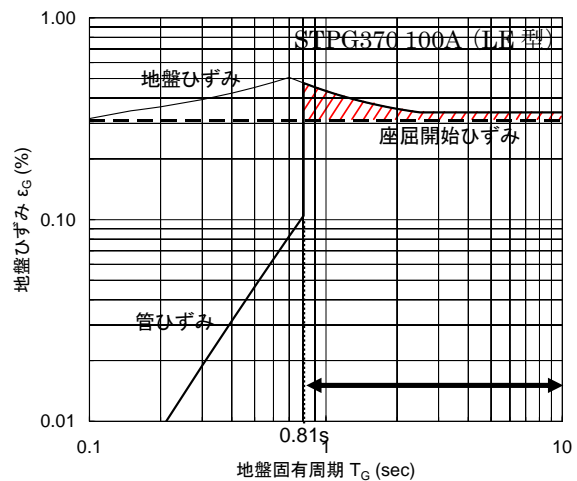


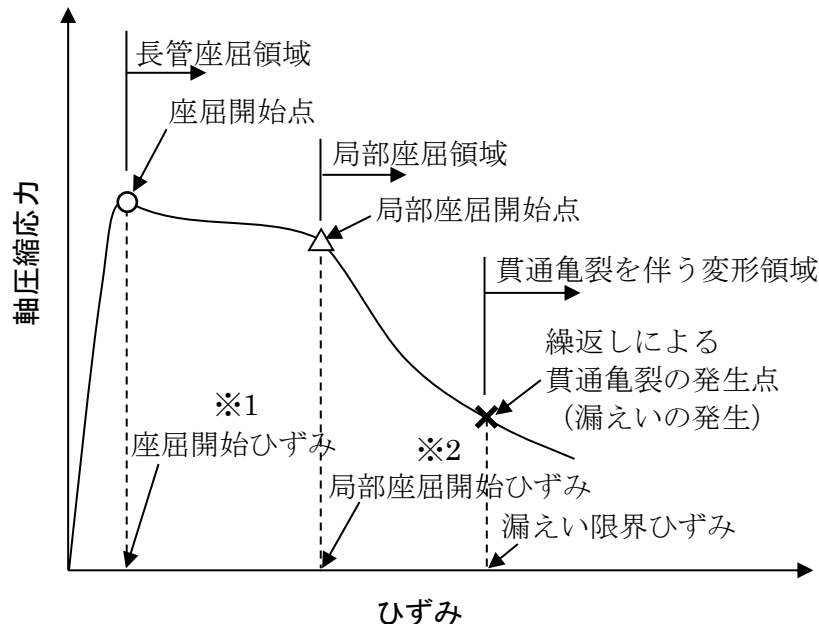
図-6.33 座屈開始判定図

(浅層不整形地盤、ケース 8)

### 6.1.5 まとめ

部分解析モデルを用いた有限要素解析から求めた座屈開始ひずみと、「高压ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-206-03)により求めたレベル 2 地震動で生じる管ひずみを比較することで、座屈の開始判定を行った結果、以下の知見を得た。また、本研究によって明らかとなった鋼管の座屈開始以降の変形過程を図-6.34 に示す。

- ① RH 型の引張特性を有する管は、いずれのケースも座屈開始ひずみが「高压ガス導管耐震設計指針」のレベル 2 地震動で生じる管ひずみの最大値よりも大きく、座屈は開始しない。
- ② LE 型の引張特性を有する管は、いずれのケースも座屈開始ひずみが「高压ガス導管耐震設計指針」のレベル 2 地震動で生じる管ひずみの最大値よりも小さく、地盤の固有周期によっては座屈が開始する可能性がある。
- ③ LE 型の引張特性を有する管について、座屈が開始する可能性のある地盤固有周期の範囲を確認することができた。



※1 座屈開始ひずみ：

管に生じる軸圧縮応力が最大に達し、軸直角方向の曲げ変形が生じ始める軸ひずみ

※2 局部座屈開始ひずみ：

座屈変形が進行し、座屈部に生じる曲げモーメントが最大となる軸ひずみ

図-6.34 鋼管の座屈開始以降の変形過程

## 6.2 局部座屈開始判定

「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-206-03)によれば、レベル 2 地震動に対して要求される耐震性能は「ガス導管に変形は生じるが、漏えいは生じない」<sup>3)</sup>とされている。また、レベル 2 地震動によって発生する管ひずみに対する許容ひずみは、レベル 2 地震動の繰り返し回数である 3~5 回に対して約 10%であり、一方向の変位に対しては 30%以上のひずみが発生するまで実管に漏えいは生じないことが示されている<sup>2)</sup>。ただし、実際の耐震設計においては、十分な安全率を考慮した許容ひずみとして 3%<sup>2)</sup>を採用することとなっている。

6.1.3 の表-6.4 に示したように、局部座屈開始ひずみは概ね 6~9%の範囲にあることが分かった。しかし、地震波による繰り返し負荷等を考慮した場合、局部座屈開始以降の管の限界状態を正確に把握することは困難なため、本研究においては安全側の設計が実施できるよう「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-206-03)のレベル 2 地震動に対する耐震設計と同じく、許容ひずみを 3%として局部座屈の開始判定を行った。

### 6.2.1 概要

座屈開始以降の変形過程を求める非線形解法として、座屈部の変形特性を線形とした解析モデルで繰り返し計算を行う方法を用い、得られた解析結果から管が座屈開始以降に局部座屈開始に到るか否かについて判定を行った。

### 6.2.2 解析方法

座屈が開始すると、座屈部は軸直角方向への曲げ変形の増加にしたがい、座屈部の軸力に対する強度が低下するため、より変形し易くなる。このとき、周辺の管に蓄積された圧縮ひずみエネルギーが強度の低下した座屈部へと解放されるため、その結果、座屈部の変形が急激に進行する。しかし、ある程度変形が進行すれば、周辺の管に蓄積された圧縮ひずみエネルギーが解放されるため、座屈部の変形は停止する。このような変形停止状態を求める上で、例えば、図-6.35 に示すように、6.1 に示した部分解析モデルから得られた座屈部の変形特性（ $P-\delta$  特性）を有する要素（以下、座屈部要素と呼ぶ）を、地震波 1 波長の中央に配置したモデルでは、座屈部要素がピーク荷重を超えた後、計算が不安定に進んでしまう。

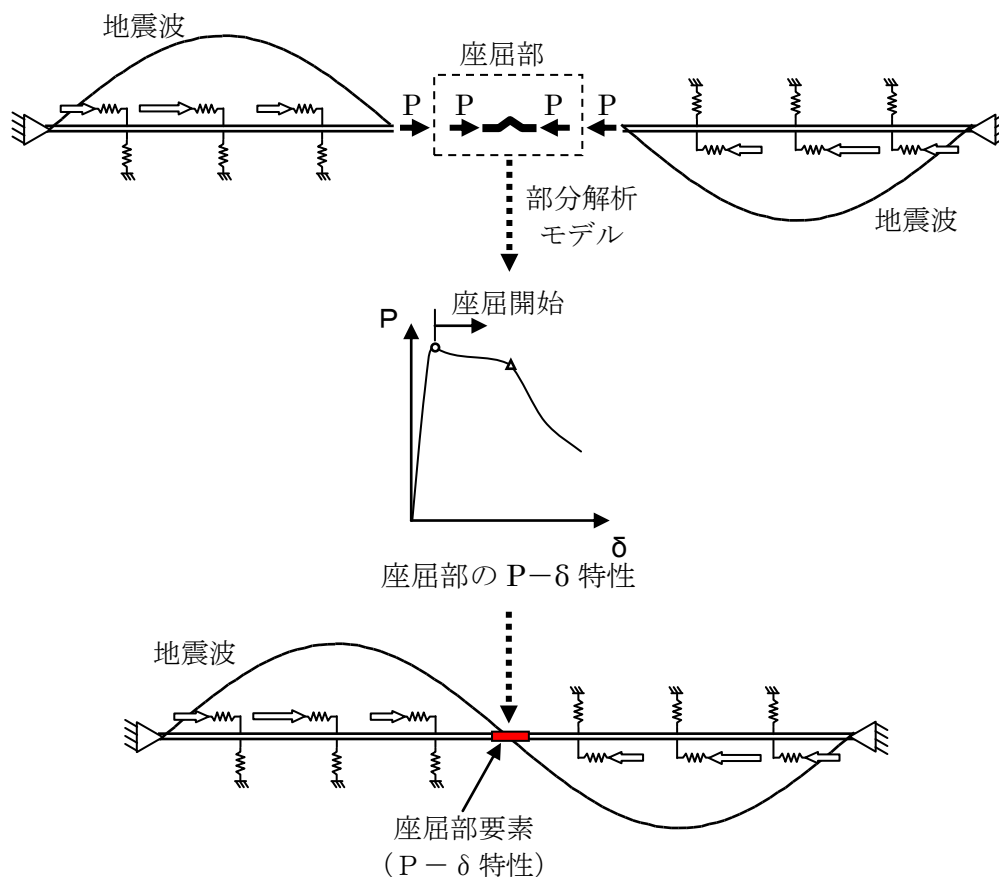


図-6.35 座屈部の変形特性と座屈部要素を用いたモデル

そこで、図-6.36 に示すように座屈部要素の特性については、負の勾配を有する非線形  $P-\delta$  特性を線形に置き換えた解析モデルを用い、座屈部要素（線形）の弾性係数をパラメータとした係数低減法を実施することで、変形状態（座屈部要素の軸圧縮荷重と収縮量）が本来の  $P-\delta$  特性と一致する条件を探索する簡便な方法を用いることとした。

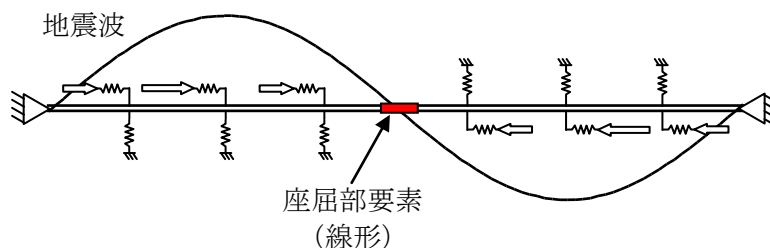


図-6.36 座屈部要素を線形特性としたモデル

図-6.37 に示すように、座屈部要素（線形）の弾性係数として座屈の開始点である①の割線係数を用いて解析した結果が、部分解析モデルの  $P-\delta$  特性の内側に入る場合には座屈は開始しない。逆に、①で  $P-\delta$  特性の外側となる場合には、座屈が開始するので、座屈部要素（線形）の弾性係数として、より変形が進行した状態（例えば②）の割線係数を用いて解析を行い、 $P-\delta$  特性と交わるかを確認する。このように、弾性係数を調整しながら  $P-\delta$  特性との交点を求めていき、この  $P-\delta$  特性との交点が座屈変形の停止点と定めた。

局部座屈開始判定については、この変形停止点での管ひずみ（2D 平均圧縮ひずみ）が許容ひずみの 3%を超えるか否かを判定する。

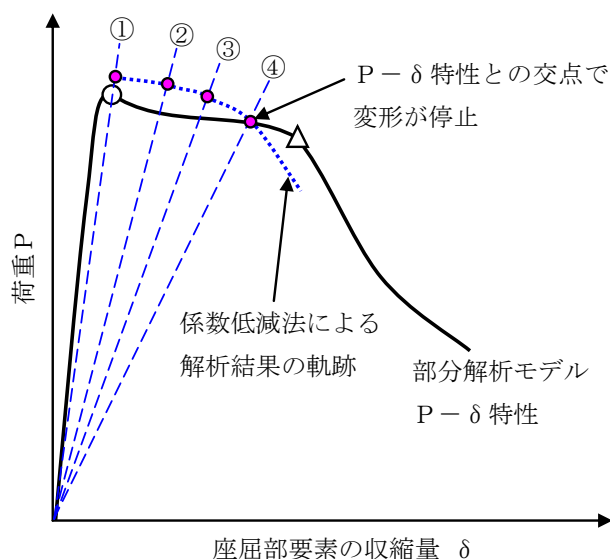


図-6.37 座屈開始後の変形停止点の探索

## 6.2.3 解析条件

### (1) 解析モデル

座屈が開始する地震波 1 波長の鋼管の中央に、5m の座屈部要素（線形）を配置した解析モデルを図-6.38 に示す。なお、解析モデルは、鋼管の管軸方向及び管軸直角方向を地盤ばねで支持し、その端部に地震波の地盤変位を作用させた。

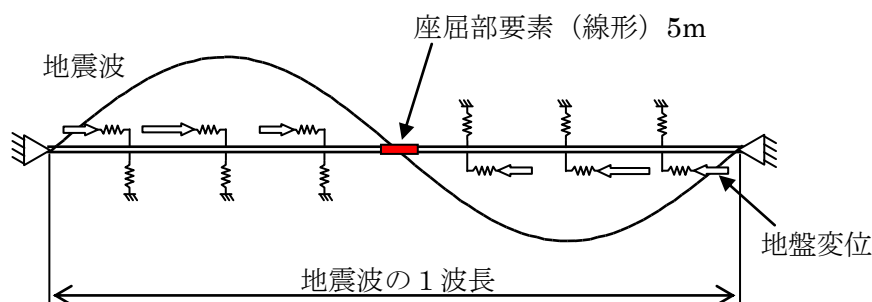


図-6.38 解析モデル

表-6.7 局部座屈開始判定の解析条件

項目	解析条件	備考
要素モデル	直管部（座屈部要素含む）：パイプ要素 地盤ばね：トラス要素	
管材料特性	座屈部要素：線形弾性モデル それ以外の直管：弾塑性多直線モデル	
地盤拘束力特性	弾塑性バイリニアモデル	管軸方向及び 管軸直角方向に適用
外力	強制変位（地盤変位）	地盤ばね端部に負荷

### (2) 管の材料特性

材料特性の詳細は、第 2 章に示したものとする。

#### (a) 降伏応力及び引張強さ

小口径のガス導管として、一般的に使用される SGP 及び STPG370 について、降伏応力及び引張強さを表-6.8 に示す。

表-6.8 各管種の降伏応力と引張強さ

管種	降伏応力(MPa)	引張強さ(MPa)
SGP	174	290
STPG370	215	370

(b) 引張特性

イ. 鋼管（座屈部要素を除く）

RH 型材料では座屈が開始しないことから、引張特性は図-6.39 に示す LE 型のみを用いた。

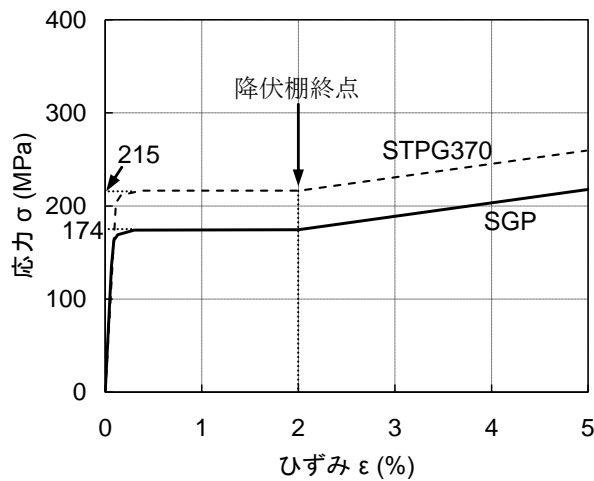


図-6.39 LE 型材料の引張特性

ロ. 座屈部要素

座屈部要素には弾性材料モデルを用い、使用する弾性係数は部分解析モデルで得られた P-δ 特性の割線係数で与え、解析結果が P-δ 特性と交差するように逐次調整した。

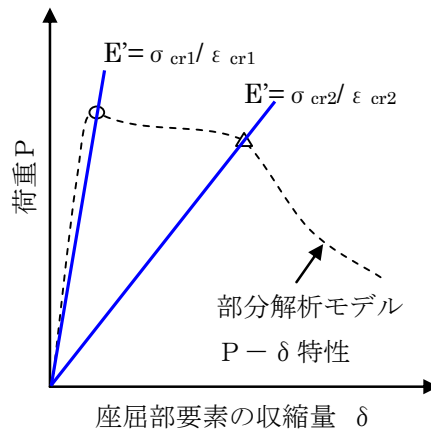
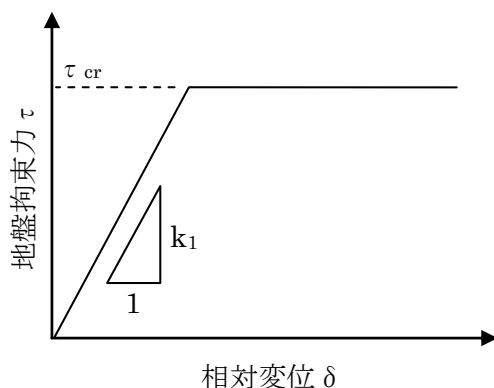


図-6.40 割線係数

### (3) 地盤拘束力特性

#### イ. 管軸方向の地盤拘束力特性

管軸方向の地盤拘束力特性は、図-6.41 に示すように「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-206-03) に示されている管軸方向の地盤拘束力<sup>1)</sup>とした。



$\tau_{cr}$  : 限界せん断応力 ( $=1.5 \times (H_{po}/1.8) \text{ N/cm}^2$ )

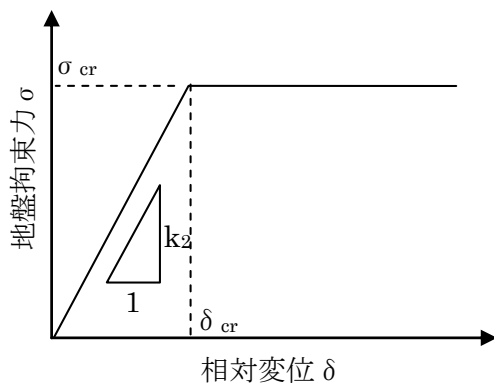
$H_{po}$  : 土被り ( $=1.5 \text{ m}$ )

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

図-6.41 管軸方向の地盤拘束力特性

#### ロ. 管軸直角方向の地盤拘束力特性

管軸直角方向の地盤拘束力特性は、図-6.42 に示すように「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-206-03) に示されている管軸直角方向の地盤拘束力(バイリニア近似)<sup>1)</sup>とした。



$\sigma_{cr}$  : 最大地盤拘束力 ( $\text{N/cm}^2$ )

$\delta_{cr}$  : 降伏変位 ( $=0.03 \cdot H_p \cdot 0.46 \text{ cm}$ )

$H_p$  : 導管中心までの深さ ( $=150 + D/2 \text{ cm}$ )

$D$  : 導管の外径 ( $\text{cm}$ )

図-6.42 管軸直角方向の地盤拘束力特性

## 6.2.4 解析ケース

6.1.5にて、RH型の材料では座屈が開始しないことが判明したことから、解析の対象をLE型の材料に限定した上で、小口径のガス導管として一般的に使用されるSGP及びSTPG370について、呼び径、引張特性、地盤条件の組み合わせをもとに、局部座屈開始判定の解析ケースを設定した。表-6.9、表-6.10に解析ケースを示す。

表-6.9 解析ケース（地盤条件：一様地盤）

ケース	管種	呼び径	外径 (mm)	管厚 (mm)	引張 特性	部分解析モデル による解析結果	
						座屈 開始ひずみ $\epsilon_{cr1}$ (%)	座屈が 開始する 地盤固有 周期の範囲 (sec)
1	SGP	50A	60.5	3.8	LE型	0.19	0.55 ~ 2.0
2	SGP	80A	89.1	4.2	LE型	0.28	0.59 ~ 1.2
3	SGP	100A	114.3	4.5	LE型	0.31	0.61 ~ 1.0
4	STPG370	100A	114.3	6.0	LE型	0.31	0.81 ~ 1.0

表-6.10 解析ケース（地盤条件：浅層不整形地盤）

ケース	管種	呼び径	外径 (mm)	管厚 (mm)	引張 特性	部分解析モデル による解析結果	
						座屈 開始ひずみ $\epsilon_{cr1}$ (%)	座屈が 開始する 地盤固有 周期の範囲 (sec)
5	SGP	50A	60.5	3.8	LE型	0.19	0.55 以上
6	SGP	80A	89.1	4.2	LE型	0.28	0.59 以上
7	SGP	100A	114.3	4.5	LE型	0.31	0.61 以上
8	STPG370	100A	114.3	6.0	LE型	0.31	0.81 以上



## 6.2.5 局部座屈開始の判定方法

局部座屈開始の判定方法を図-6.43 に示す。

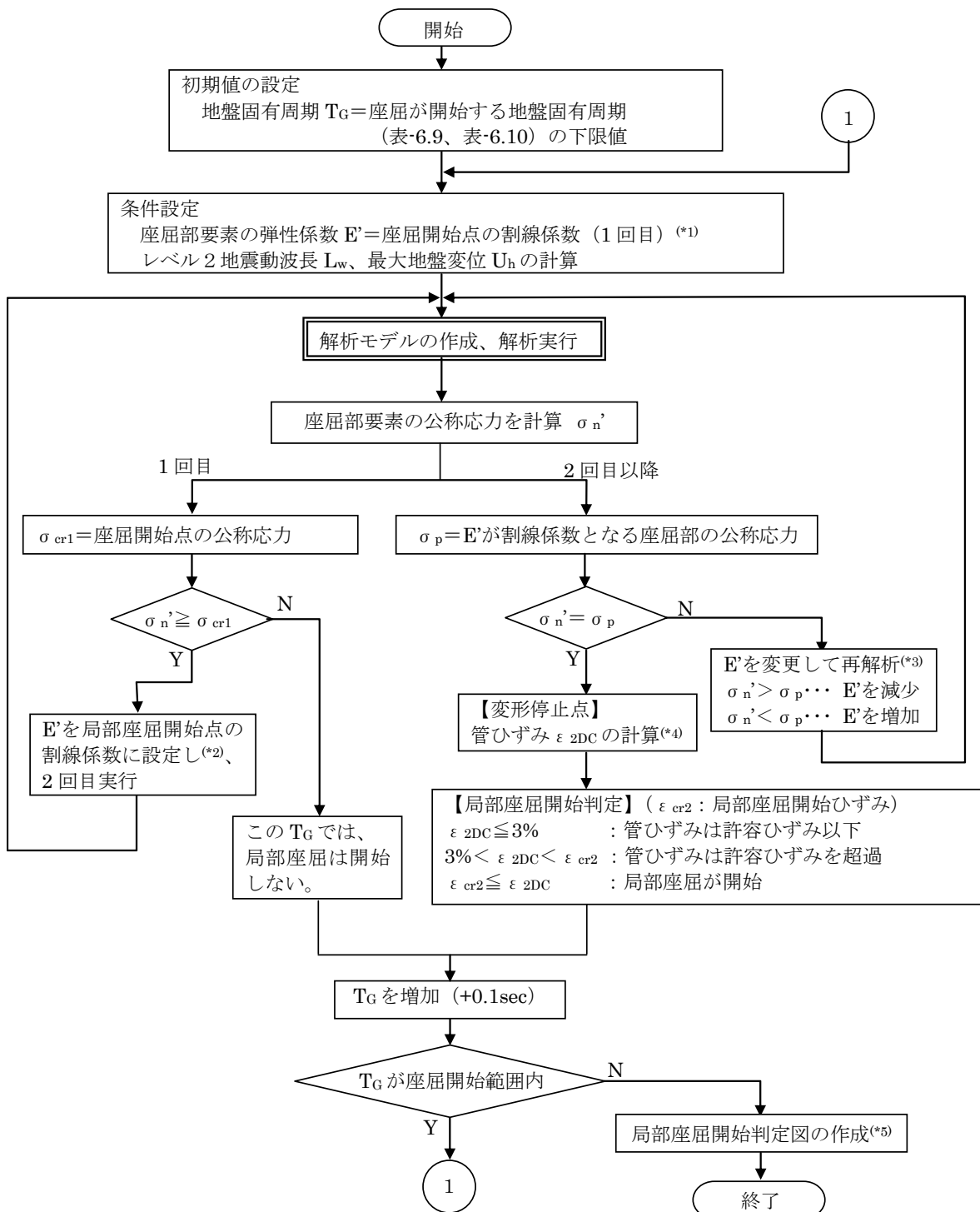


図-6.43 局部座屈開始の判定方法

(\*1) 1回目の計算では、座屈部要素の弾性係数  $E'$  を座屈開始点での割線係数とする。

図-6.44 に示すように、座屈開始点での割線係数  $E'$  は、座屈開始点の公称応力と公称ひずみより、 $E' = \sigma_{cr1} / \epsilon_{cr1}$  で求めることができる。

(\*2) 2回目の計算では、座屈部要素の弾性係数  $E'$  を局部座屈開始点での割線係数とする。図-6.45 に示すように、局部座屈開始点での割線係数  $E'$  は、局部座屈開始点の公称応力と公称ひずみより、 $E' = \sigma_{cr2} / \epsilon_{cr2}$  で求めることができる。

(\*3) 3回目以降の計算では、座屈部要素の弾性係数  $E'$  を公称応力と公称ひずみの関係における任意の点 ( $\sigma_p, \epsilon_p$ ) での割線係数とする。図-6.46 に示すように、割線係数  $E'$  は  $E' = \sigma_p / \epsilon_p$  で求めることができる。

(\*4) 局部座屈開始判定に用いる 2D 平均圧縮ひずみ  $\epsilon_{2DC}$  の値は、図-6.47 に示すように、6.1 に示した部分解析モデルで得られた公称応力と 2D 平均圧縮ひずみの関係から求めることができる。

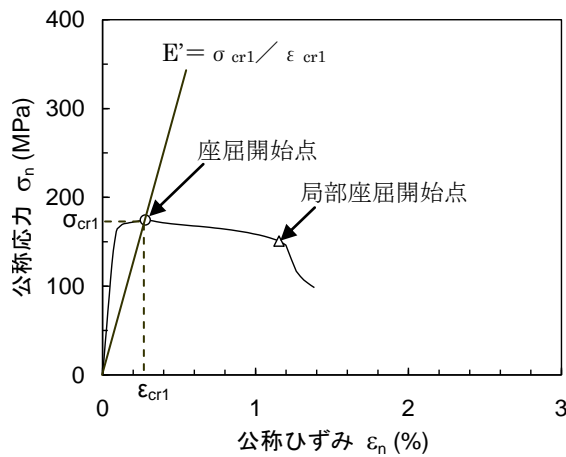


図-6.44 座屈開始点の割線係数  $E'$

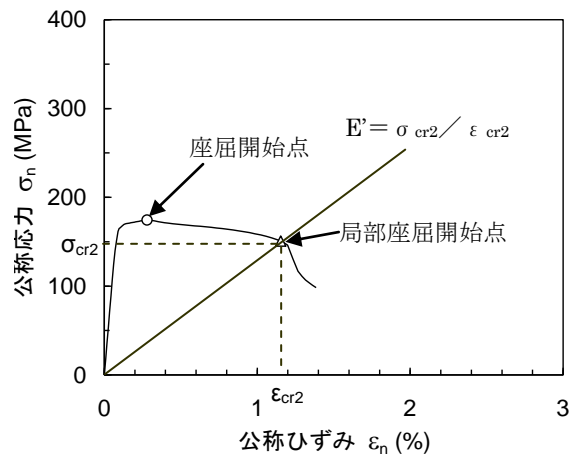


図-6.45 局部座屈開始点の割線係数  $E'$

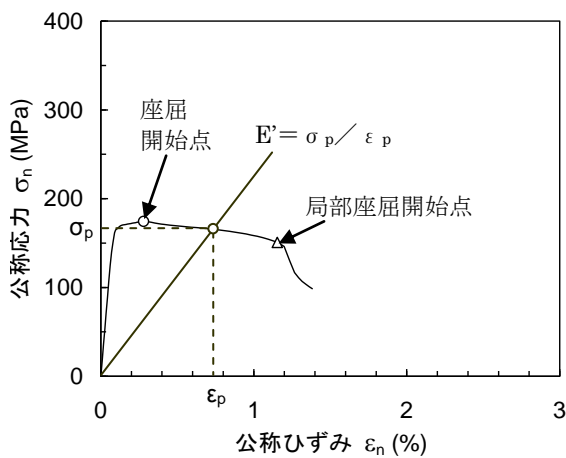


図-6.46 任意の点での割線係数  $E'$

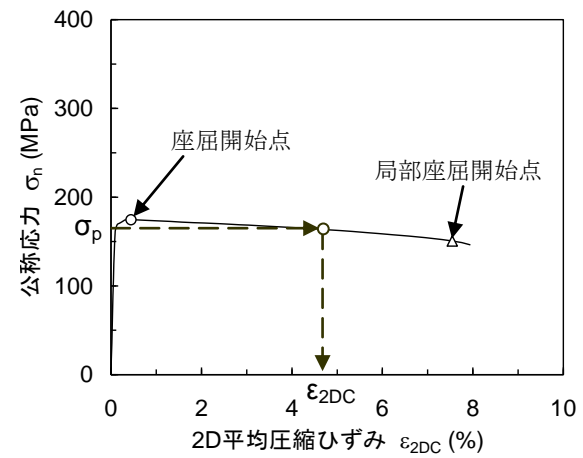


図-6.47  $\epsilon_{2DC}$  値の計算

(\*5) 局部座屈開始判定図

縦軸に座屈部の管ひずみ(2D 平均圧縮ひずみ)、横軸に地盤の固有周期をとり、図-6.43 の手順にしたがって計算した結果を図-6.48 に示す。座屈部の管ひずみが局部座屈開始ひずみに達していなくても、許容ひずみの 3%を超える場合は局部座屈が開始するものとして安全側の判定を行い、局部座屈開始と判定される地盤固有周期の範囲を求めることとする。

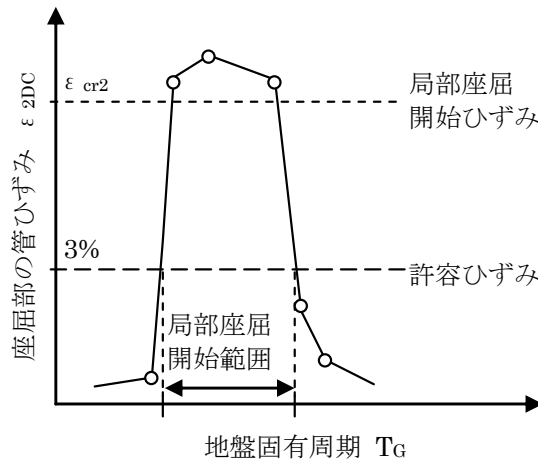


図-6.48 局部座屈開始判定図 (座屈部の管ひずみと地盤固有周期の関係)

6.2.6 局部座屈開始判定結果

(1) 一様地盤の場合

一様地盤における局部座屈開始判定の結果を表-6.11 に、局部座屈開始判定図を図-6.49～図-6.52 に示す。なお、座屈部の管ひずみが局部座屈開始ひずみに達していなくても、許容ひずみの 3%を超える場合は、局部座屈が開始するものとして安全側の判定を行った。

表-6.11 局部座屈開始判定結果 (地盤条件：一様地盤)

ケース	管種	呼び径	外径 (mm)	管厚 (mm)	引張特性	許容ひずみ (%)	座屈開始後の管ひずみ $\epsilon_{2DC}$ が許容ひずみを超える地盤固有周期 (sec)
1	SGP	50A	60.5	3.8	LE 型	3.0	0.7 ~ 1.8
2	SGP	80A	89.1	4.2	LE 型	3.0	0.8 ~ 1.1
3	SGP	100A	114.3	4.5	LE 型	3.0	0.8 ~ 0.9
4	STPG370	100A	114.3	6.0	LE 型	3.0	0.9 ~ 1.0

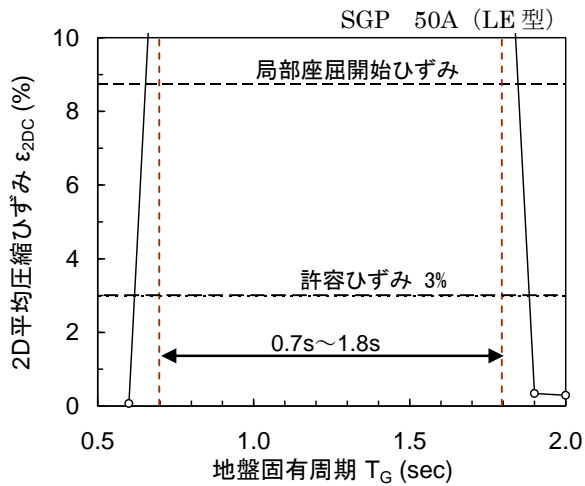


図-6.49 局部座屈開始判定図

(一様地盤、ケース 1)

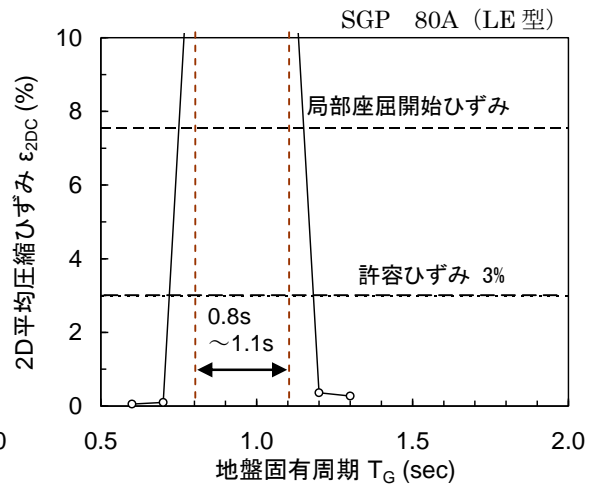


図-6.50 局部座屈開始判定図

(一様地盤、ケース 2)

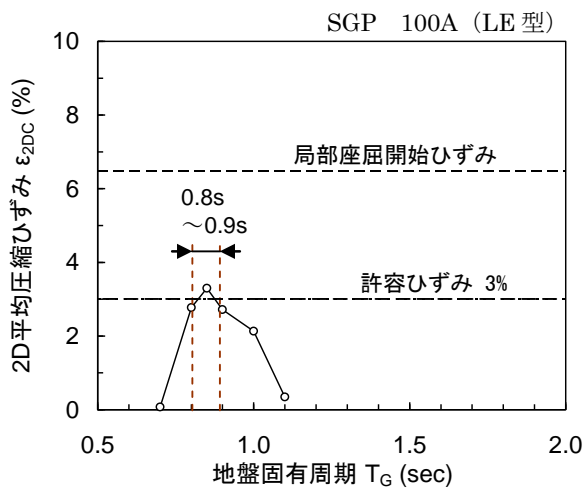


図-6.51 局部座屈開始判定図

(一様地盤、ケース 3)

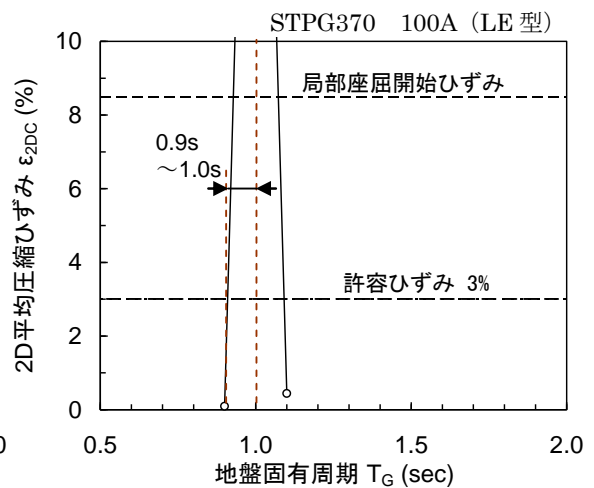


図-6.52 局部座屈開始判定図

(一様地盤、ケース 4)

## (2) 浅層不整形地盤の場合

浅層不整形地盤における局部座屈開始判定の結果を表-6.12 に、局部座屈開始判定図を図-6.53～図-6.56 に示す。なお、座屈部の管ひずみが局部座屈開始ひずみに達していなくても、許容ひずみの 3%を超える場合は、局部座屈が開始するものとして安全側の判定を行った。

表-6.12 局部座屈開始判定結果（地盤条件：浅層不整形地盤）

ケース	管種	呼び径	外径 (mm)	管厚 (mm)	引張特性	許容ひずみ (%)	座屈開始後の管ひずみ $\epsilon_{2DC}$ が許容ひずみを超える地盤固有周期 (sec)							
5	SGP	50A	60.5	3.8	LE型	3.0	0.7 以上							
6	SGP	80A	89.1	4.2	LE型	3.0	0.8 ~ 2.0							
7	SGP	100A	114.3	LE型	3.0	0.8 ~ 1.4	8	STPG370	100A	114.3	6.0	LE型	3.0	0.9 ~ 1.8
8	STPG370	100A	114.3	6.0	LE型	3.0	0.9 ~ 1.8							

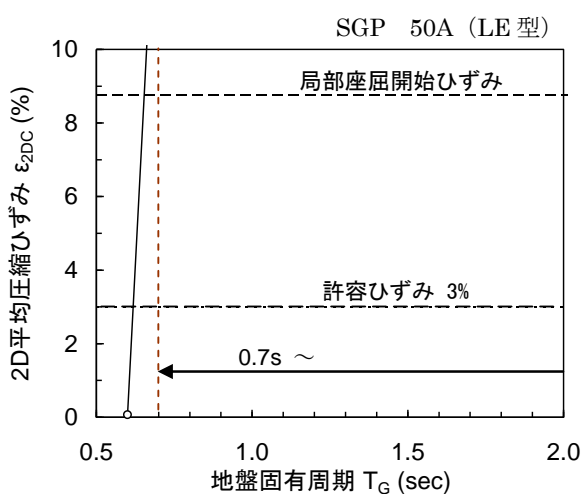


図-6.53 局部座屈開始判定図

(浅層不整形地盤、ケース 5)

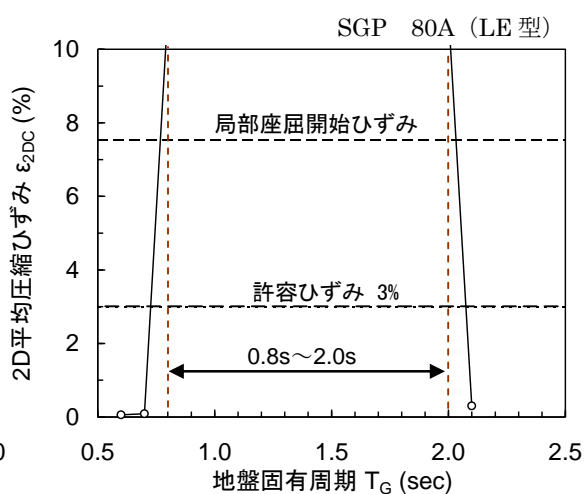


図-6.54 局部座屈開始判定図

(浅層不整形地盤、ケース 6)

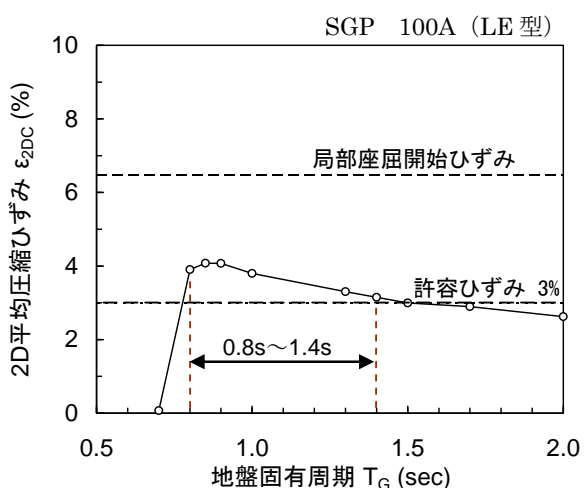


図-6.55 局部座屈開始判定図

(浅層不整形地盤、ケース 7)

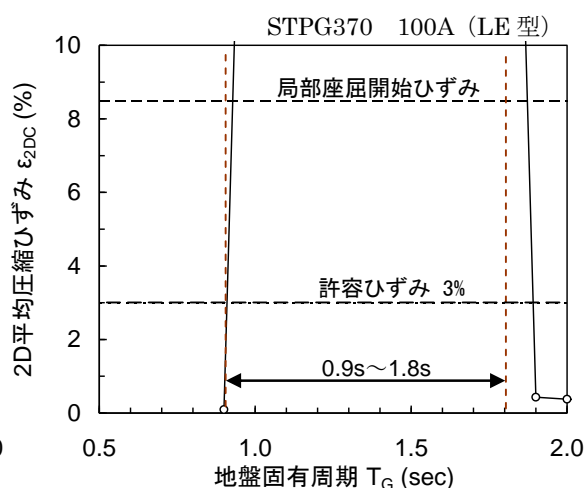


図-6.56 局部座屈開始判定図

(浅層不整形地盤、ケース 8)

### 6.2.7 座屈及び局部座屈判定結果の整理

LE 型の引張特性を対象に、6.1.4 に示した座屈開始判定結果及び 6.2.6 の局部座屈開始判定結果を、一様地盤と浅層不整形地盤の地盤条件別に整理したものを表-6.13、表-6.14 に示す。

表-6.13 座屈及び局部座屈の判定結果 (LE 型引張特性、一様地盤)

管種	呼び径	外径 (mm)	管厚 (mm)	地盤固有周期 $T_G$ (sec)																		
				0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	
SGP	50A	60.5	3.8	0.55		0.7												1.8		2.0		
	80A	89.1	4.2	0.59			0.8			1.1		1.2										
	100A	114.3	4.5	0.61			0.8	0.9	1.0													
STPG370	100A	114.3	6.0				0.81		0.9	1.0												

表-6.14 座屈及び局部座屈の判定結果 (LE 型引張特性、浅層不整形地盤)

管種	呼び径	外径 (mm)	管厚 (mm)	地盤固有周期 $T_G$ (sec)																		
				0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	
SGP	50A	60.5	3.8	0.55		0.7																
	80A	89.1	4.2	0.59			0.8												2.0			
	100A	114.3	4.5	0.61			0.8					1.4										
STPG370	100A	114.3	6.0				0.81		0.9									1.8				

凡例

- 座屈は開始しない。
- 座屈は開始するが、座屈部の管ひずみは許容ひずみの 3%以下となる。
- 座屈の開始後、座屈部の管ひずみが許容ひずみの 3%を超える。

### 6.2.8 まとめ

座屈開始以降の座屈部の変形状態を、座屈部の変形特性を線形とした解析モデルで繰り返し計算を行う方法を用い、得られた変形状態での管ひずみと許容ひずみを比較することで局部座屈開始判定を行った結果、管ひずみが許容ひずみを超える地盤固有周期の範囲を確認することができた。

### 6.3 座屈及び局部座屈が開始しない直線長

#### 6.3.1 概要

ガス導管の直線区間が短い場合は座屈又は局部座屈が開始しないと考えられることから、座屈及び局部座屈が開始しない直線長の上限値を求める方法について検討を行った。

#### 6.3.2 座屈防止のための直線長

##### (1) 座屈が開始しない直線長

地震波により管に軸圧縮力が生じて、その力が限界値を超えることによって座屈が開始するが、この軸圧縮力は主に直線区間における管と地盤間の摩擦力によるものである。したがって、直線長が短い場合は管に発生する軸圧縮力が小さくなり、座屈が開始しないと考えられる。

直線区間が地震波の1波長よりも長い場合は、図-6.57に示すように、地盤変位=0となる地震波の節の点で検討範囲を区切ることができ、第8章8.2.7(1)にしたがって座屈開始の判定を行うことができる。すなわち、「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA指-206-03)によって求められる管ひずみ $\epsilon_0$ が、座屈開始ひずみ $\epsilon_{cr1}$ 以上となった場合に座屈が開始するものとして判定を行うこととした。

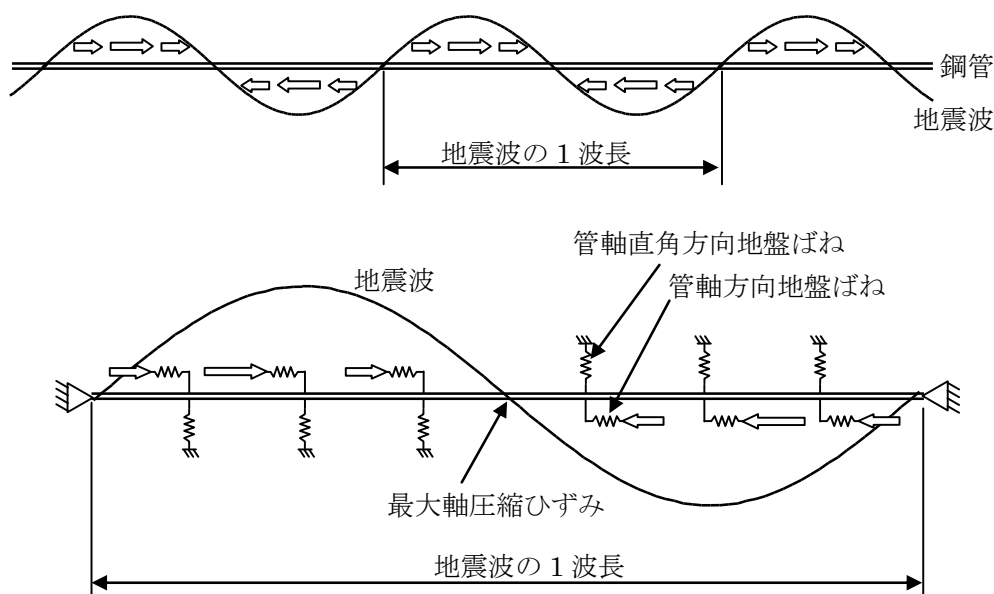


図-6.57 直線区間が無限長の場合

図-6.58に示すように、直線区間が地震波の1波長よりも短い場合、最大軸圧縮力

の発生位置における管ひずみは、直線長だけでなく直線区間の端部形状の影響を受ける。通常、ガス導管の直線区間の端部には曲管等があり、更に、その先に別の直線区間がつながっている。この曲管等から先にある別の直線区間に作用する荷重の一部が、検討対象の直線区間の管ひずみに影響を及ぼす。したがって、直線長の上限值を求めするためには、直線長に加えて端部の配管要素も考慮する必要がある。

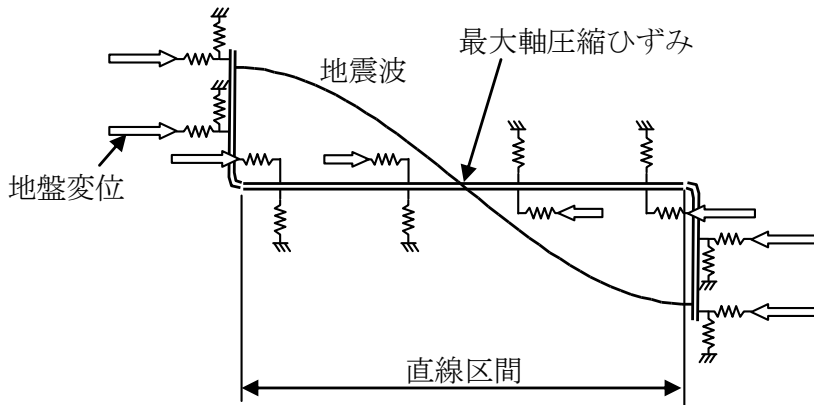


図-6.58 直線区間が短い場合 (90°曲管の例)

図-6.59 に示す管の最大軸圧縮ひずみと直線長の関係より、管の最大軸圧縮ひずみが座屈開始ひずみ  $\epsilon_{cr1}$  と等しくなる直線長を、座屈が開始しない直線長とした。直線区間が管に降伏ひずみが発生する直線長よりも長い場合は、管が降伏し最大軸圧縮ひずみはレベル2地震動の地盤ひずみと等しくなる。座屈が開始するほとんどのケースでは、この時に管ひずみが座屈開始ひずみを超えるため、座屈が開始しない直線長  $L_{bcr}$  は、管の最大軸圧縮ひずみが降伏ひずみと等しくなる直線長になる。

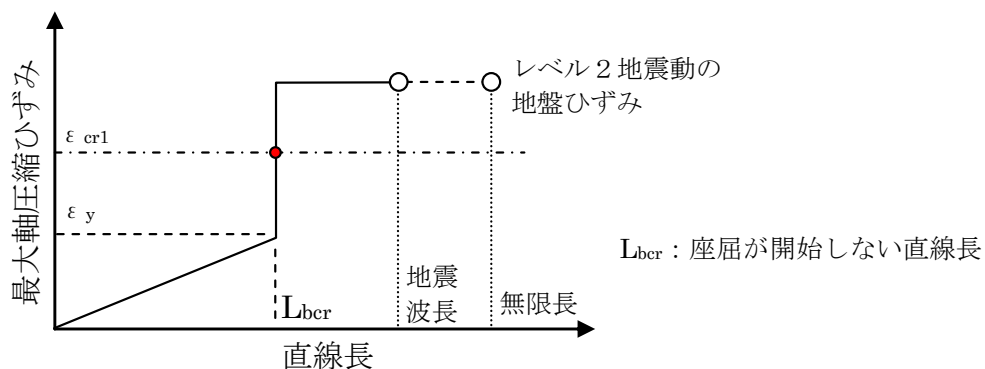


図-6.59 管の最大軸圧縮ひずみと直線長の関係



## (2) 局部座屈が開始しない直線長

座屈が開始した場合、その後の座屈変形の程度は、周辺の管に蓄積された圧縮ひずみエネルギーの大小によって異なる。同一の管及び地盤であれば、直線長が短いほど圧縮ひずみエネルギーの蓄積は少なく、局部座屈開始に到る可能性は低くなる。局部座屈が開始しない直線長は、座屈開始後の管ひずみが許容ひずみの 3%を超える場合と、3%以下で変形が停止する場合の境界となる直線長と定める。

図-6.60 に示すように、地震波の 1 波長よりも短い直線区間について、6.2 に示した座屈部要素（線形）を地震波の節に配置した解析モデルを用いて、直線長をパラメータとした繰り返し計算を行い、座屈部の管ひずみが許容ひずみの 3%と等しい状態で変形が停止する直線長を求め、これを局部座屈が開始しない直線長  $L_{lcr}$  とした。なお、座屈が開始しない直線長と同じく、直線区間端部の配管形状は座屈部の変形量に影響を及ぼすため、端部の配管要素を考慮した。

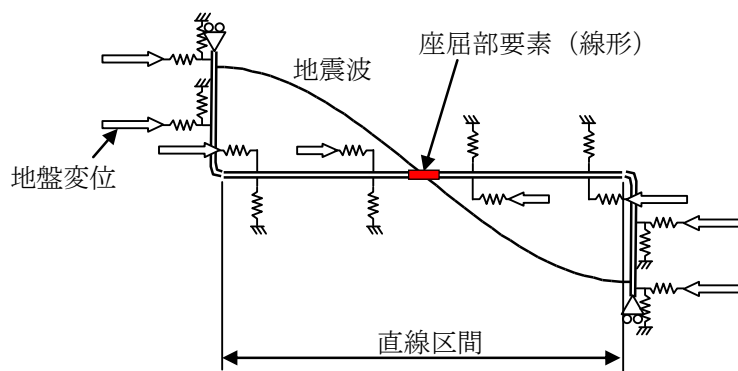


図-6.60 直線区間が短い場合（90°曲管の例）

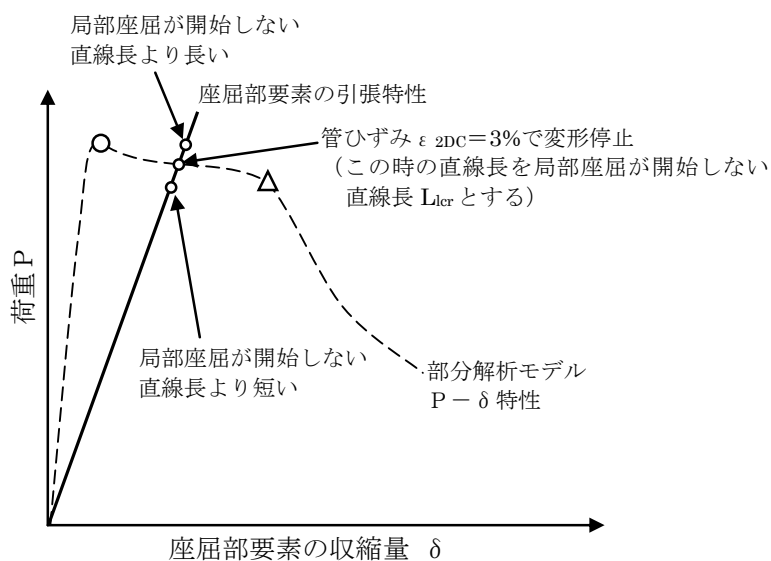


図-6.61 局部座屈が開始しない直線長の探索

### 6.3.3 解析条件

#### (1) 解析モデル

##### (a) 端部が 90 度曲管の場合

図-6.62 に示すように、解析モデルは直線区間に、曲管とその先の直線配管を組み合わせたものとし、管は管軸方向及び管軸直角方向の地盤ばねで支持した。曲管から先の直線配管の長さは、地盤変位による変形が十分減衰する長さとし、目安としては曲げモーメントが 0 となる長さ  $L (= \pi / \beta)$  以上とした。

$$L = \frac{\pi}{\beta} \quad (6.4)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{kD}{4EI}} \quad (6.5)$$

ここで、 $L$  : 地盤変位による変形が十分減衰する長さ (cm)

(曲げモーメントが 0 となる長さが目安)

$k$  : 地盤反力係数 (N/cm<sup>3</sup>)

$D$  : 管の外径 (cm)

$E$  : 管の弾性係数 (N/cm<sup>2</sup>)

なお、局部座屈が開始しない直線長は、地震波の節を中心とした 5m 区間を線形の座屈部要素に置き換えたモデルを用いて求めた。

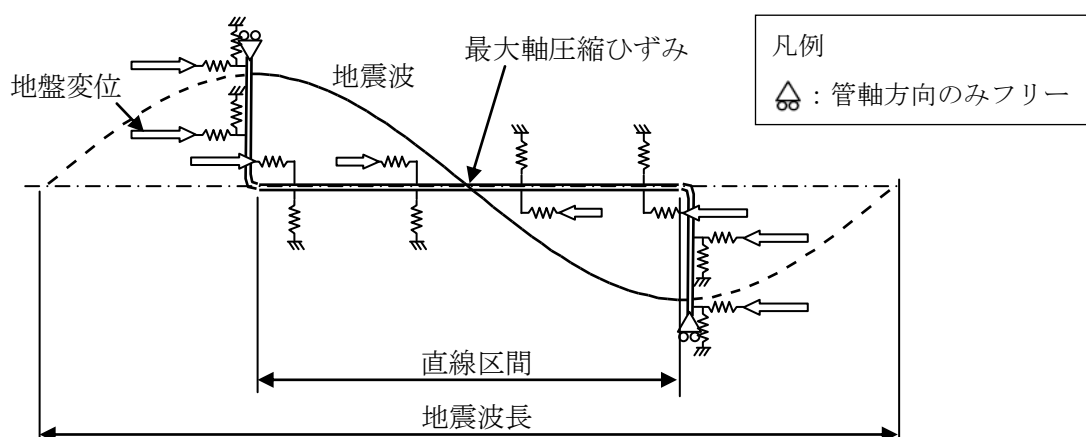


図-6.62 解析モデル (90° 曲管)

(b) 90度未満の曲管、伏せ越し配管の場合

図-6.63 に示すように、解析モデルは直線区間に、曲管又は伏せ越し配管とその先の直線配管を組み合わせたものとした。曲管又は伏せ越し配管から先の直線配管は、地盤変位=0 となる長さまでモデル化し、その端部の境界条件は座屈部に対して安全側となるよう管軸方向のみ自由とし、管は管軸方向及び管軸直角方向の地盤ばねで支持した。なお、局部座屈が開始しない直線長は、地震波の節を中心とした 5m 区間を線形の座屈部要素に置き換えたモデルを用いて求めた。

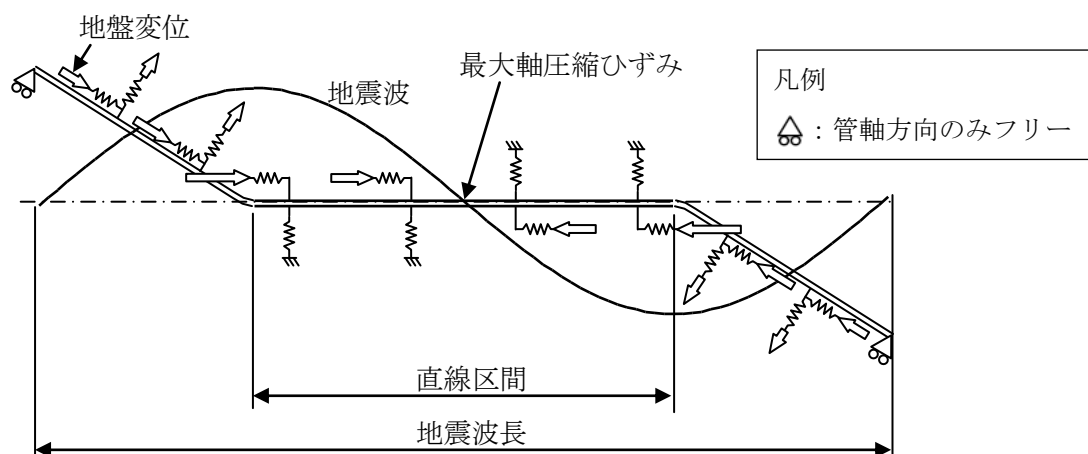


図-6.63 解析モデル (90° 未満の曲管)

表-6.15 座屈防止のための直線長を求める解析モデルの解析条件

項目	解析条件	備考
要素モデル	直管部 (座屈部要素含む) : パイプ要素 地盤ばね : トラス要素	
管材料特性	座屈部要素 : 線形弾性モデル その他の直管 : 弾塑性多直線モデル	
地盤拘束力特性	弾塑性バイリニアモデル	管軸方向及び 管軸直角方向に適用
外力	強制変位 (地盤変位)	地盤ばね端部に負荷

(2) 管の材料特性

材料特性の詳細は、第2章に示したものとする。

(a) 降伏応力及び引張強さ

小口径のガス導管として、一般的に使用される SGP 及び STPG370 について、各管種の降伏応力及び引張強さを表-6.16 に示す。

表-6.16 各管種の降伏応力と引張強さ

管種	降伏応力(MPa)	引張強さ(MPa)
SGP	174	290
STPG370	215	370

(b) 引張特性

イ. 鋼管（座屈部要素を除く）

RH 型材料では座屈が開始しないことから、引張特性は図-6.64 に示す LE 型のみを用いた。

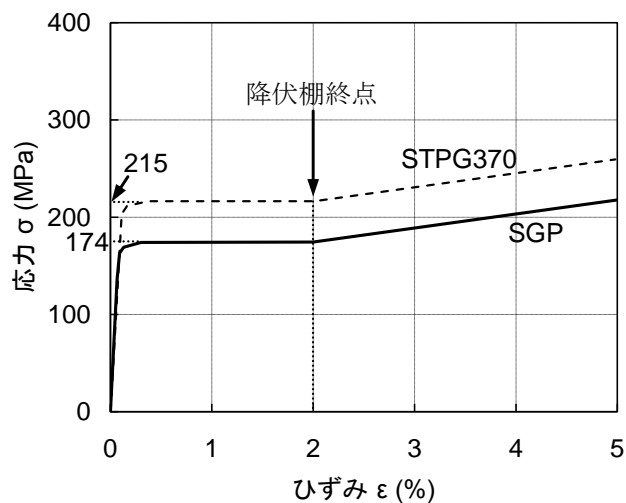


図-6.64 LE 型材料の引張特性

ロ. 座屈部要素

局部座屈が開始しない直線長を求めるための座屈部要素には、弾性材料モデルを用いた。使用する弾性係数は、部分解析モデルで得られた P- $\delta$  特性の割線係数で与え、図-6.65 に示すように、管ひずみ  $\epsilon_{2DC}$  が許容ひずみ 3%となる点の割線係数及び参考として局部座屈開始点の割線係数を設定した。

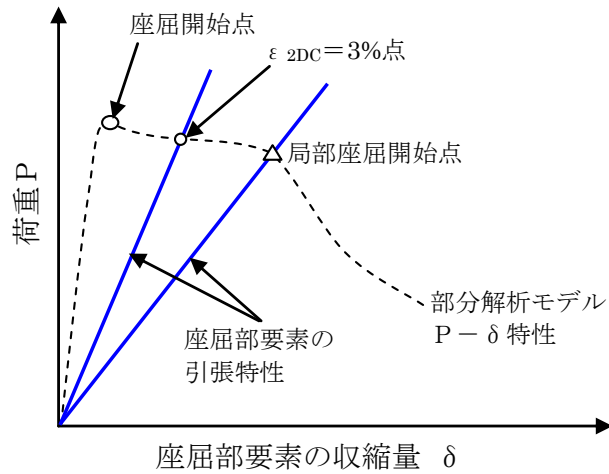
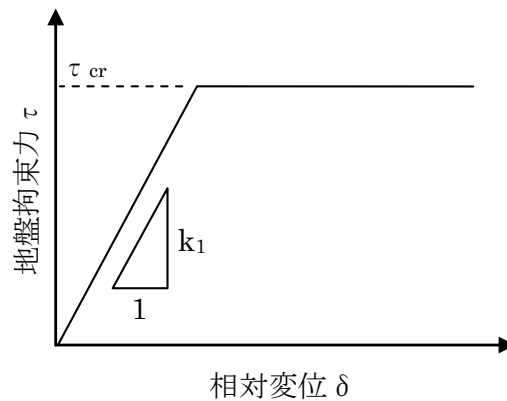


図-6.65 座屈部要素の引張特性

### (3) 地盤拘束力特性

#### イ. 管軸方向の地盤拘束力特性

管軸方向の地盤拘束力特性は、図-6.66 に示すように「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-206-03) に示されている管軸方向の地盤拘束力<sup>1)</sup>とした。



$\tau_{cr}$  : 限界せん断応力 ( $=1.5 \times (H_{po}/1.8) \text{ N/cm}^2$ )

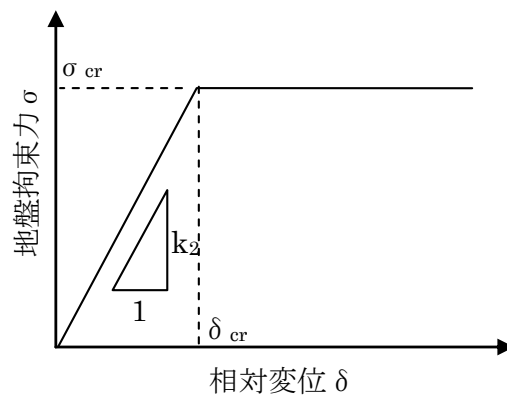
$H_{po}$  : 土被り ( $=1.5 \text{ m}$ )

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

図-6.66 管軸方向の地盤拘束力特性

## ロ. 管軸直角方向の地盤拘束力特性

管軸直角方向の地盤拘束力特性は、図-6.67 に示すように「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-206-03) に示されている管軸直角方向の地盤拘束力(バイリニア近似)<sup>1)</sup>とした。



$\sigma_{cr}$  : 最大地盤拘束力 (N/cm<sup>2</sup>)

$\delta_{cr}$  : 降伏変位 (=0.03・H<sub>p</sub>・0.46 cm)

H<sub>p</sub> : 導管中心までの深さ (=150+D/2 cm)

D : 導管の外径 (cm)

図-6.67 管軸直角方向の地盤拘束力特性

### 6.3.4 座屈及び局部座屈が開始しない直線長の算出方法

#### (1) 座屈が開始しない直線長の算出方法

座屈が開始しない直線長の算出方法を図-6.68 に示す。

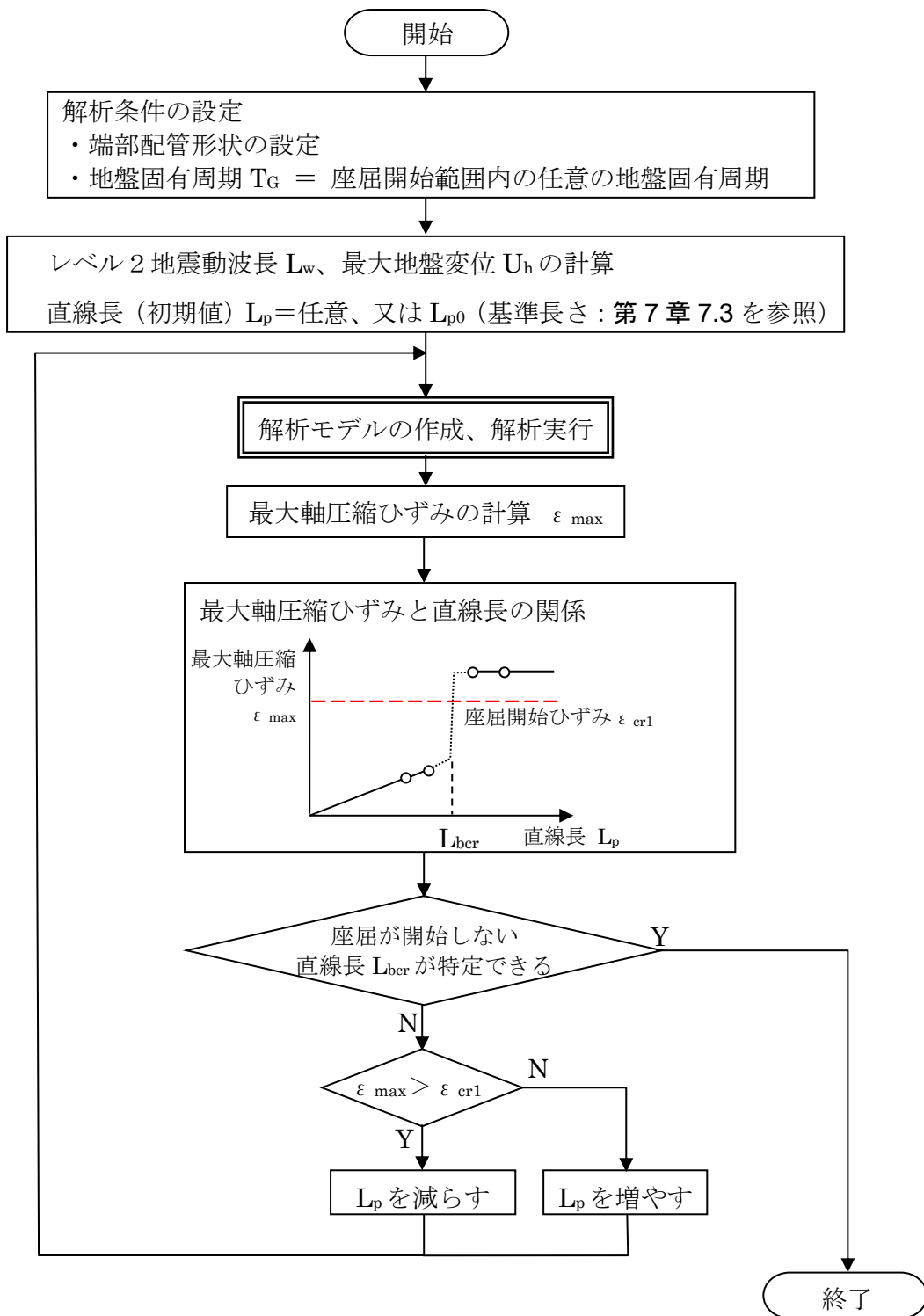


図-6.68 座屈が開始しない直線長の算出方法

## (2) 局部座屈が開始しない直線長の算出方法

局部座屈が開始しない直線長の算出方法を図-6.69 に示す。

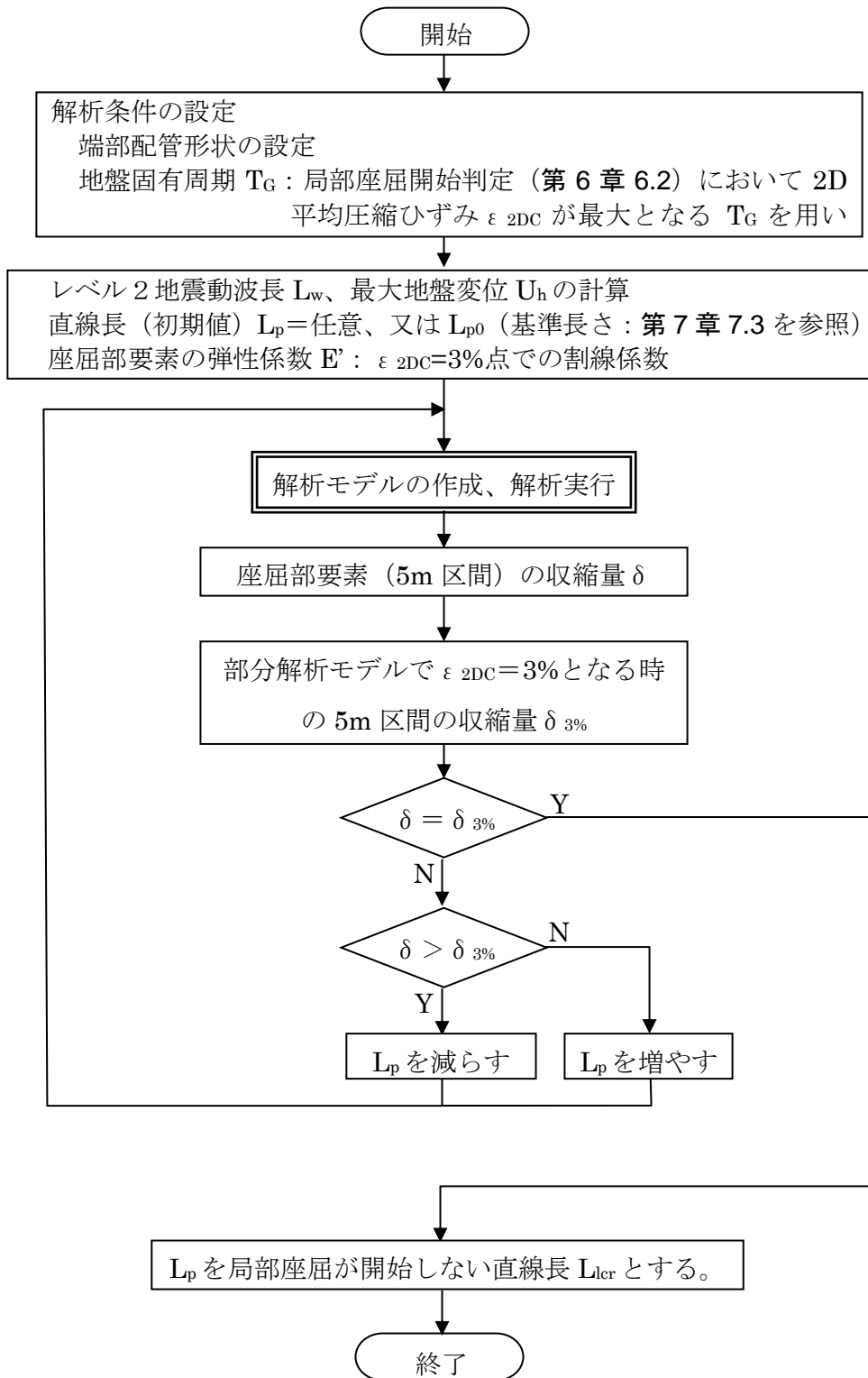


図-6.69 局部座屈が開始しない直線長の算出方法



### 6.3.5 座屈防止のための直線長の比較

SGP 80A を例に、座屈が開始しない直線長と局部座屈が開始しない直線長、及び参考として局部座屈開始点で変形が停止する直線長の比較を表-6.17 に示す。

これより、座屈が開始しない直線長に対して、 $\varepsilon_{2DC}=3\%$ までの座屈変形を許容した局部座屈が開始しない直線長は3~4m程度の増加であることが確認できた。また、座屈が開始しない直線長に対して、局部座屈開始点で変形が停止する直線長は6~8m程度の増加であることが確認できた。

表-6.17 直線長の比較 (SGP 80A)

直線長の基準	直線長 (m)	
	端部 90° 曲管	端部 45° 曲管
座屈が開始しない	94	73
局部座屈が開始しない	97	77
局部座屈開始点で変形停止	100	81

### 6.3.6 まとめ

座屈が開始しない直線長及び局部座屈が開始しない直線長の上限值を求める方法について検討を行った。両者を比較したところ、座屈が開始しない直線長に対して、 $\varepsilon_{2DC}=3\%$ までの座屈変形を許容した局部座屈が開始しない直線長は3~4m程度の増加であることが確認できた。したがって、耐震設計に用いる直線長の上限值には、安全側の設計を行うことが可能となる座屈が開始しない直線長を用いることとした。

## 第 6 章の参考文献

- 1) 一般社団法人 日本ガス協会 (2004) 『高圧ガス導管耐震設計指針』 pp.26-30
- 2) 一般社団法人 日本ガス協会 (2004) 『高圧ガス導管耐震設計指針』 pp.50-84
- 3) 一般社団法人 日本ガス協会 (2004) 『高圧ガス導管耐震設計指針』 pp.10

## 第7章 詳細耐震設計と標準耐震設計

第1章～第6章までの研究結果を踏まえ、材料費や溶接等の費用で高価となる曲管を極力用いず、直管の接続で構成される長延長配管（以下、直線長と呼ぶ）をできるだけ長くする経済的合理性のある詳細耐震設計を提案する。また、詳細耐震設計に比べ直線長は短くなるが、実務に携わる多くの技術者が利便性良く耐震設計を実施できるよう、標準耐震設計を提案する。

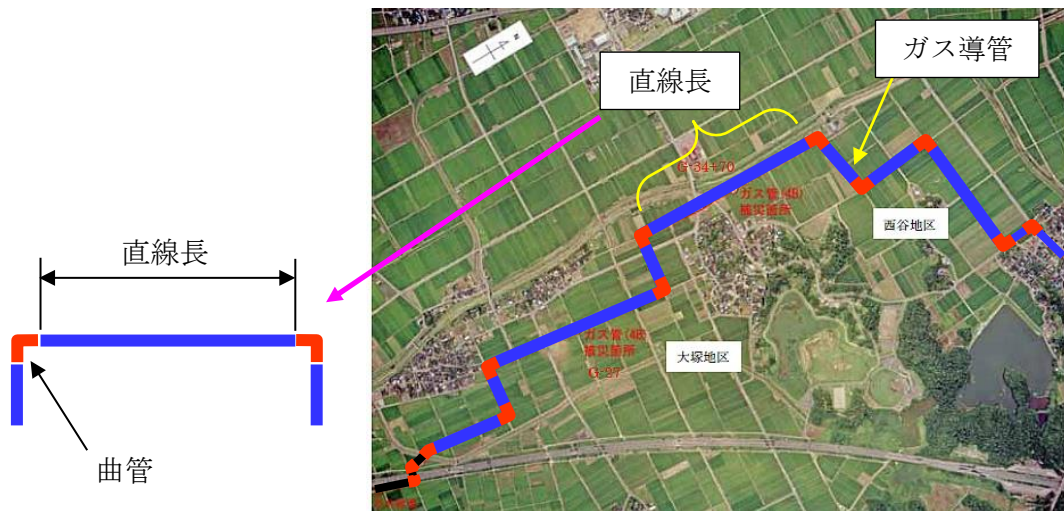


図-7.1 直線長

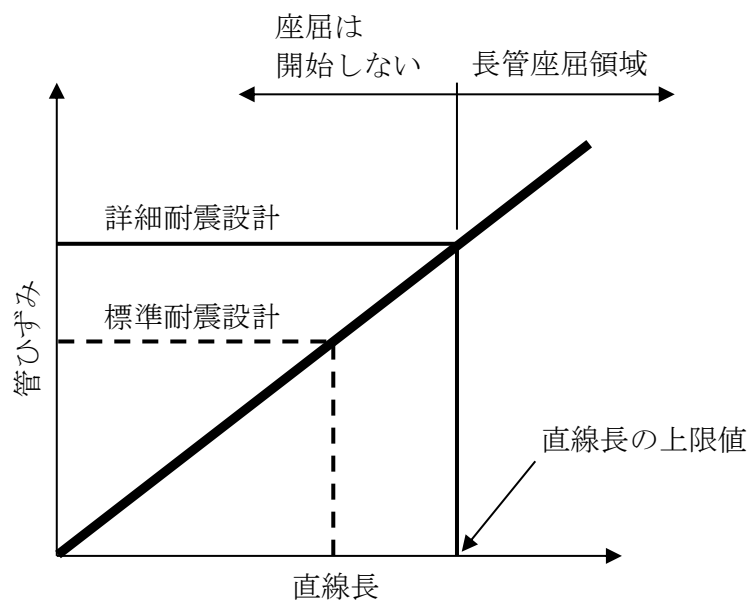


図-7.2 直線長の上限值（イメージ図）

## 7.1 詳細耐震設計

詳細耐震設計は、鋼管の材料特性、地盤ひずみ、地盤拘束力等の設計条件を適切に設定した部分解析モデルを用いた有限要素解析を行うことで、ガス導管の座屈開始以降の変形過程をより現実に近い形で評価することができる設計方法である。詳細耐震設計を行うことで、大地震の際にも長管座屈が容易に生じることのないよう対策を講じることが可能となり、高価な曲管を用いず、より真直ぐな長い配管として経済的合理性のある設計を行うことができる。

ただし、詳細耐震設計を実践するためには、鋼管の材料特性、既存の耐震設計、有限要素解析等の高度な知識と技術の習得が不可欠であり、都市ガス業界における各事業団体及び各事業者が、必ずしも十分に、これらの耐震設計を実践できるとは限らない。したがって、より簡易的に耐震設計を行うことが可能な「標準耐震設計の方法」について検討することが課題となる。

## 7.2 標準耐震設計

標準耐震設計は、詳細耐震設計で要求される鋼管の材料特性、地盤ひずみ、地盤拘束力等の設計条件及び高度な有限要素解析等の専門的な知識を必要とせず、ある一定の知識と技術を持った実務に携わる多くの技術者が利便性良く耐震評価を行うことができるものである。具体的には、新たにガス導管を埋設する地盤の固有周期がある一定の範囲に該当する場合、ガス導管の直線長に上限を設けることで耐震設計を可能とするものである。

実用的には、7.3 に示す安全に配慮して考案された直線長の上限を簡易に求めることができる「直線長の簡易計算式」を用い、耐震設計を行うものである。

## 7.3 標準耐震設計で重要な「直線長の簡易計算式」

### 7.3.1 概要

座屈が開始しない直線長に対する直線区間端部の配管要素（曲管）の影響、及び浅層不整形地盤の影響について検討を行い、その結果を整理することで、座屈が開始しない直線長を簡易に求めることができる計算式を考案した。

現在、新規埋設時に使用される小口径管 50A と 80A の管種は SGP であり、100A は SGP 及び STPG370 の 2 種類を使用している。第 1 章～第 6 章までの研究結果より、RH 型の引張特性を有する管では座屈は開始せず、LE 型の引張特性を有する管で座屈が開始する可能性があることが分かっている。また、実際のガス導管は無限長ま

で真直ぐに埋設されるわけではなく、他の構造物との接触を避けるためや、埋設する道路の形状に合わせた線形とするため、直管の他に曲管(伏越しで用いる 90°、45°、22.5° の 3 種類に限定) を接続することが一般的であり、埋設する地盤も一様地盤と浅層不整形地盤の 2 種類が考えられる。以上から、実用上の組合せを考慮し、全ての数値を安全側とした上で、仮想直線モデルで求めた基準長さに、接続する曲管を考慮した低減係数を乗じる簡易計算式を導出することにした。

### 7.3.2 前提条件

簡易計算式を作成するための前提条件を表-7.1 に示す。

表-7.1 前提条件

項目	条件	備考
管種	SGP、STPG370 sch40	第 2 章を参照
引張特性	降伏棚型 (終点 2%)	第 2 章を参照
降伏応力	規格最小降伏点	第 2 章を参照
土被り	1.5m	
座屈開始ひずみ	部分解析モデルで計算	第 6 章 6.1 を参照
設計地震動 <sup>1)</sup>	設計地震動 I	「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-206-03)
地盤拘束力特性 <sup>2)</sup>	管軸方向地盤拘束力 (バイリニア) 管軸直角方向地盤拘束力(バイリニア)	「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-206-03)
直線長の基準	座屈が開始しない	第 6 章 6.3 を参照

### 7.3.3 直線区間端部の配管要素の影響

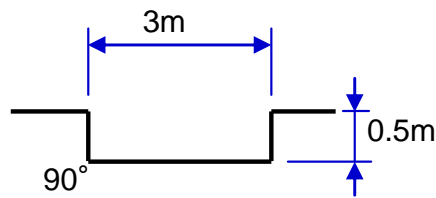
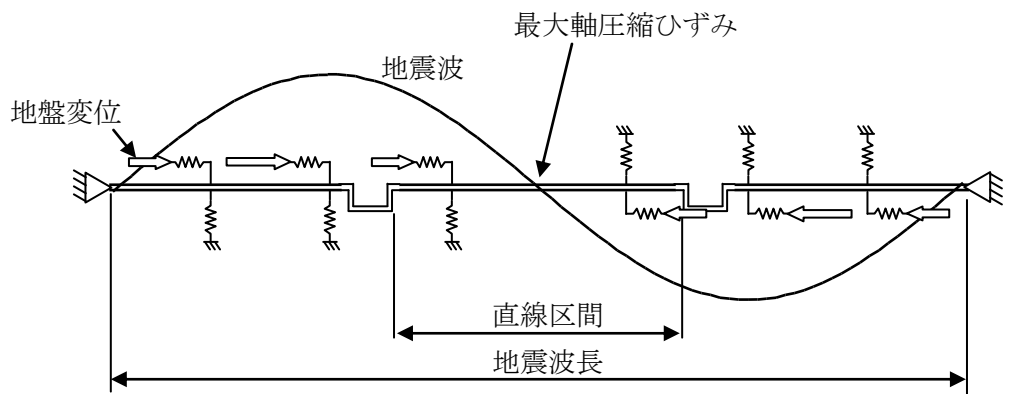
直線区間端部の配管要素が、座屈が開始しない直線長に及ぼす影響について検討を行った。

#### (1) 解析ケース

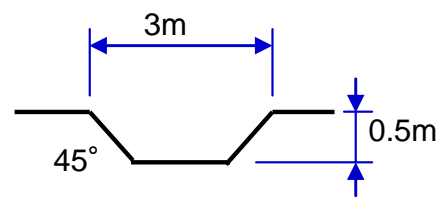
端部配管要素に関する解析ケースを表-7.2 に、解析に用いた伏せ越しの形状を図-7.3 に示す。なお、いずれの角度も伏せ越し区間 3m、振り幅 0.5m とした。

表-7.2 端部配管要素の解析ケース

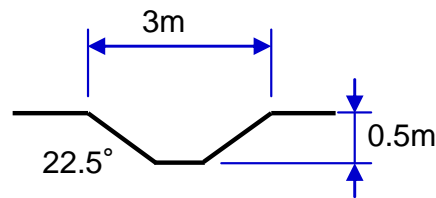
ケース	管種・呼び径	端部配管要素
1	SGP 100A	90° 伏せ越し
2	SGP 100A	90° 曲管
3	SGP 100A	45° 伏せ越し
4	SGP 100A	45° 曲管
5	SGP 100A	22.5° 伏せ越し
6	SGP 100A	22.5° 曲管



(a) 90° 伏せ越しの形状



(b) 45° 伏せ越しの形状



(c) 22.5° 伏せ越しの形状

図-7.3 解析モデル (伏せ越し配管の例)

## (2) 解析結果

解析結果を表-7.3 及び図-7.4～図-7.6 に示す。

表-7.3 解析結果

ケース	管種・呼び径	端部要素	座屈が開始しない直線長 (m)
1	SGP 100A	90° 伏せ越し	107
2	SGP 100A	90° 曲管	105
3	SGP 100A	45° 伏せ越し	80
4	SGP 100A	45° 曲管	78
5	SGP 100A	22.5° 伏せ越し	58
6	SGP 100A	22.5° 曲管	40

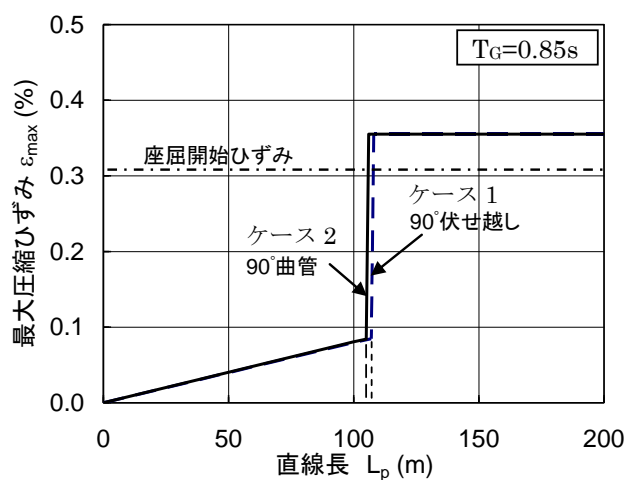


図-7.4 曲管と伏せ越しの座屈が開始しない直線長 (ケース 1、2)

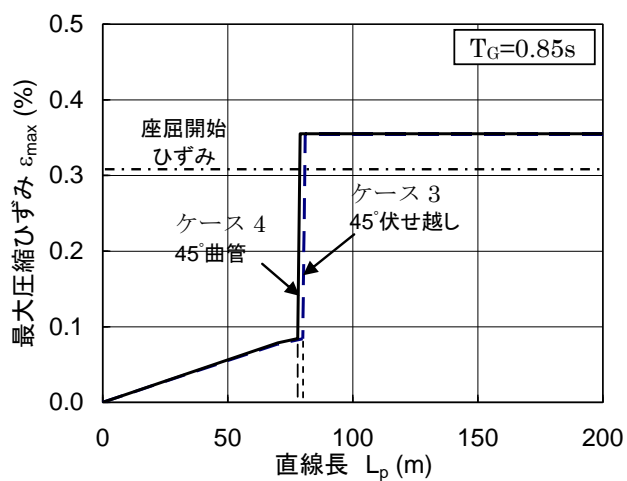


図-7.5 曲管と伏せ越しの座屈が開始しない直線長 (ケース 3、4)

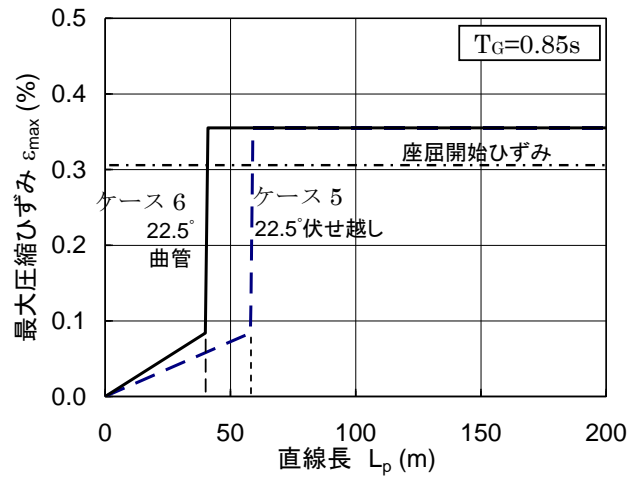


図-7.6 曲管と伏せ越しの座屈が開始しない直線長（ケース 5、6）

(3) 直線区間の両端で角度が異なる場合

(a) 解析ケースとモデル

直線区間の両端に異なる角度の配管要素が接続されている場合について、表-7.4 に示す解析ケースで座屈が開始しない直線長を求めた。また、ケース 8 を例に、解析モデルを図-7.7 に示す。

表-7.4 解析ケース

ケース	管種・呼び径	端部要素（左）	端部要素（右）
7	SGP 100A	45° 曲管	90° 曲管
8	SGP 100A	22.5° 曲管	90° 曲管

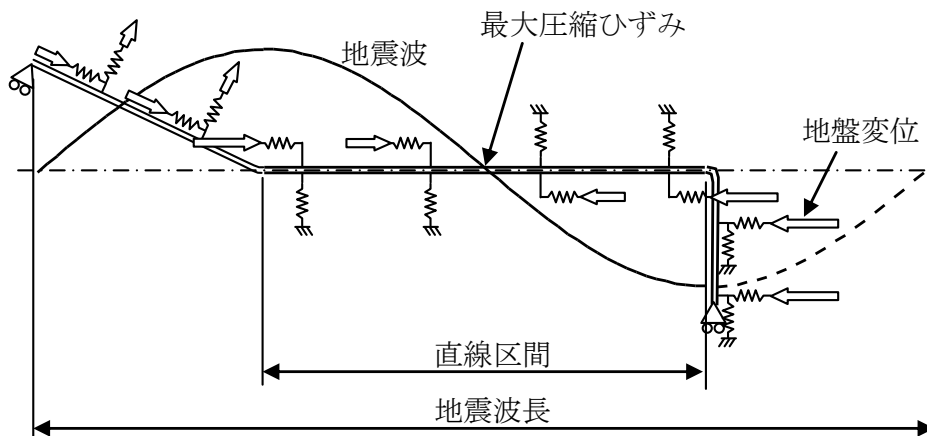


図-7.7 両端の角度が異なる場合の解析モデル（ケース 8 の例）



(b) 解析結果

解析結果を表-7.5、表-7.6 及び図-7.8、図-7.9 に示す。解析の結果、90 度と 45 度の組合せは、90 度同士、45 度同士の直線長の平均値となった。また、90 度と 22.5 度の組合せについても同様に両者の平均値となった。

表-7.5 解析結果 (90 度と 45 度の組合せ)

ケース	管種・呼び径	端部要素 (左)	端部要素 (右)	座屈が開始しない直線長 (m)
2	SGP 100A	90° 曲管	90° 曲管	105
7	SGP 100A	45° 曲管	90° 曲管	92
4	SGP 100A	45° 曲管	45° 曲管	78

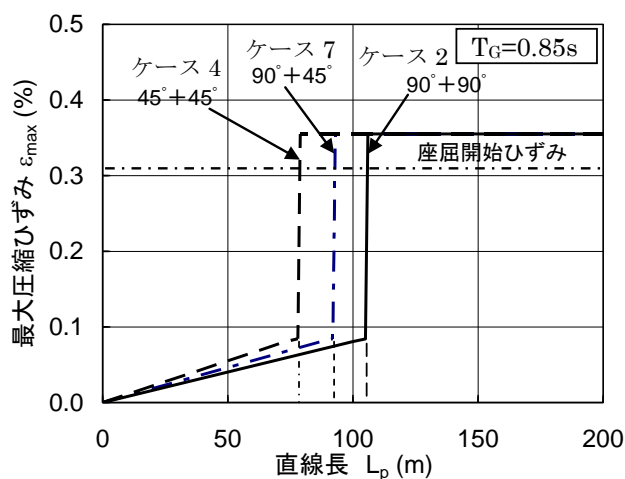


図-7.8 両端の角度が異なる場合の座屈が開始しない直線長 (90 度と 45 度の組合せ) (ケース 2、7、4)

表-7.6 解析結果 (90 度と 22.5 度の組合せ)

ケース	管種・呼び径	端部要素 (左)	端部要素 (右)	座屈が開始しない直線長 (m)
2	SGP 100A	90° 曲管	90° 曲管	105
8	SGP 100A	22.5° 曲管	90° 曲管	73
6	SGP 100A	22.5° 曲管	22.5° 曲管	40

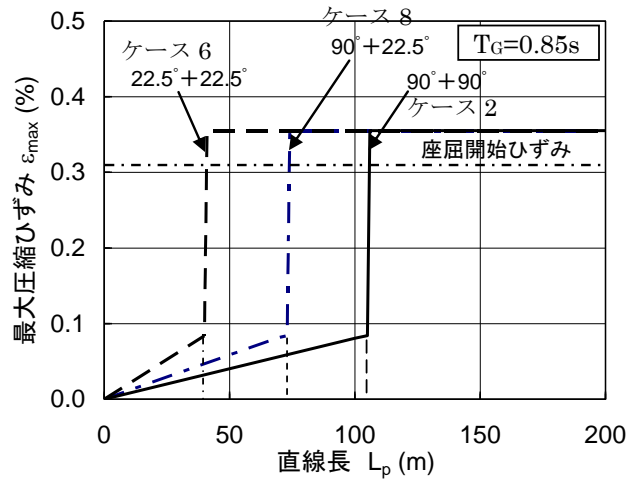


図-7.9 両端の角度が異なる場合の座屈が開始しない直線長  
(90度と22.5度の組合せ)(ケース2、8、6)

#### (4) 端部配管要素の影響のまとめ

##### ① 伏せ越しと単独曲管の座屈が開始しない直線長

曲管角度の90度と45度においては、伏せ越しと単独曲管では座屈が開始しない直線長にほとんど差が現れないが、22.5度においては、単独曲管の方が伏せ越しより座屈が開始しない直線長が短くなった。全体的に単独曲管の方が安全側の値であった。

##### ② 角度に関する座屈が開始しない直線長の比較

座屈が開始しない直線長は90度が最も長く、角度が浅くなるほど短くなった。

##### ③ 両端の角度が異なる場合の座屈が開始しない直線長

それぞれの角度について、両端が同じ角度とした場合に得られる座屈が開始しない直線長の平均値が、角度が異なる場合の座屈が開始しない直線長となった。

#### 7.3.4 浅層不整形地盤における座屈が開始しない直線長

浅層不整形地盤における座屈が開始しない直線長を求め、一様地盤と比較した。

##### (1) 解析ケース

解析ケースを表-7.7に、両端が90度曲管の解析モデルを図-7.10に示す。

表-7.7 解析ケース

ケース	管種・呼び径	端部要素	地盤条件
1	SGP 50A	90° 曲管	一様地盤
2	SGP 80A	90° 曲管	一様地盤
3	SGP 100A	90° 曲管	一様地盤
4	STPG370 100A	90° 曲管	一様地盤
5	SGP 50A	90° 曲管	浅層不整形地盤
6	SGP 80A	90° 曲管	浅層不整形地盤
7	SGP 100A	90° 曲管	浅層不整形地盤
8	STPG370 100A	90° 曲管	浅層不整形地盤

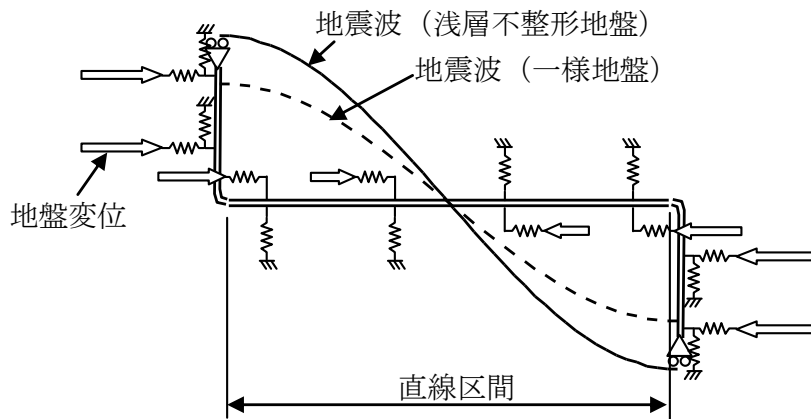


図-7.10 解析モデル (両端 90° 曲管)

## (2) 解析結果

一様地盤と浅層不整形地盤で、座屈が開始しない直線長を比較した結果を表-7.8 及び図-7.11～図-7.14 に示す。

浅層不整形地盤では、一様地盤よりも座屈が開始しない直線長が短いですが、その差は 1m であり、座屈が開始しない直線長の設定では、浅層不整形地盤の値で統一することが安全側となる。

表-7.8 一様地盤と浅層不整形地盤での座屈が開始しない直線長の比較

ケース	管種・呼び径	端部要素	座屈が開始しない直線長 (m)	
			一様地盤	浅層不整形地盤
1, 5	SGP 50A	90° 曲管	85	84
2, 6	SGP 80A	90° 曲管	94	93
3, 7	SGP 100A	90° 曲管	105	104
4, 8	STPG370 100A	90° 曲管	172	171

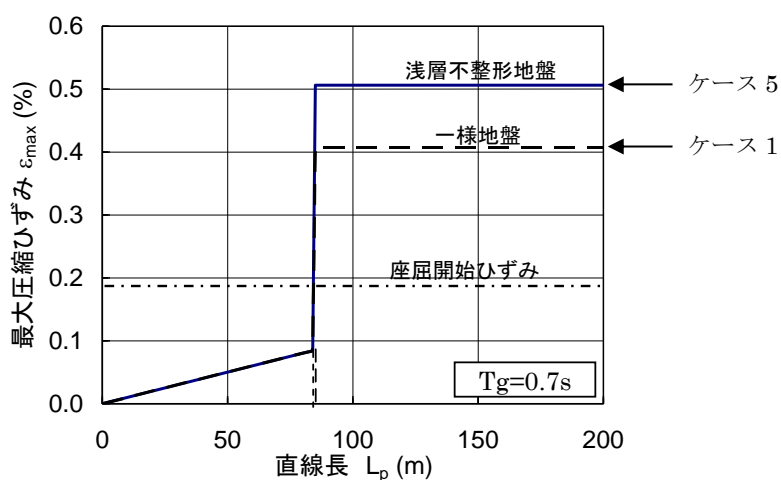


図-7.11 一様地盤と浅層不整形地盤の座屈が開始しない直線長の比較  
(SGP 50A ケース 1、5)

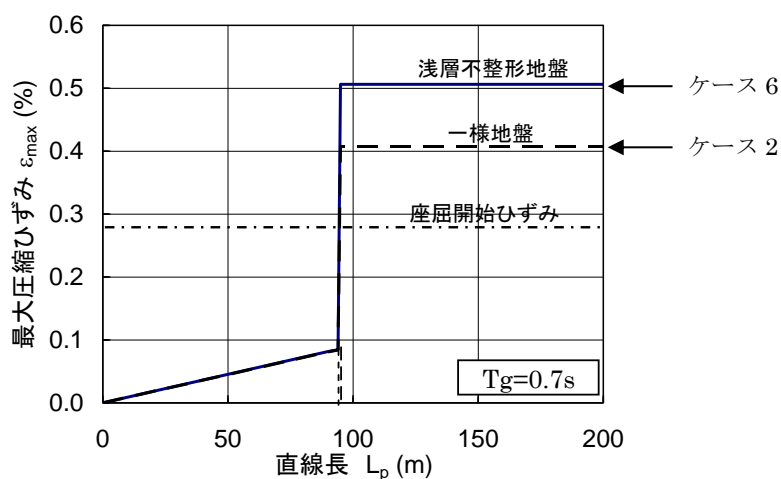


図-7.12 一様地盤と浅層不整形地盤の座屈が開始しない直線長の比較  
(SGP 80A ケース 2、6)

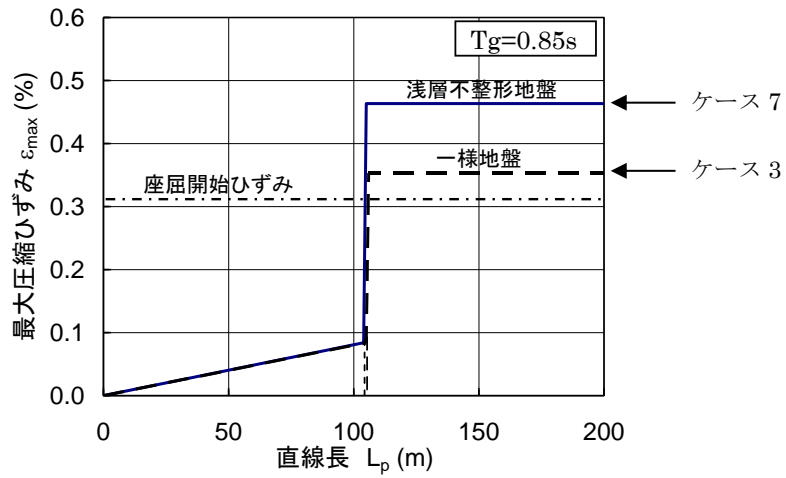


図-7.13 一様地盤と浅層不整形地盤の座屈が開始しない直線長の比較  
(SGP 100A ケース 3、7)

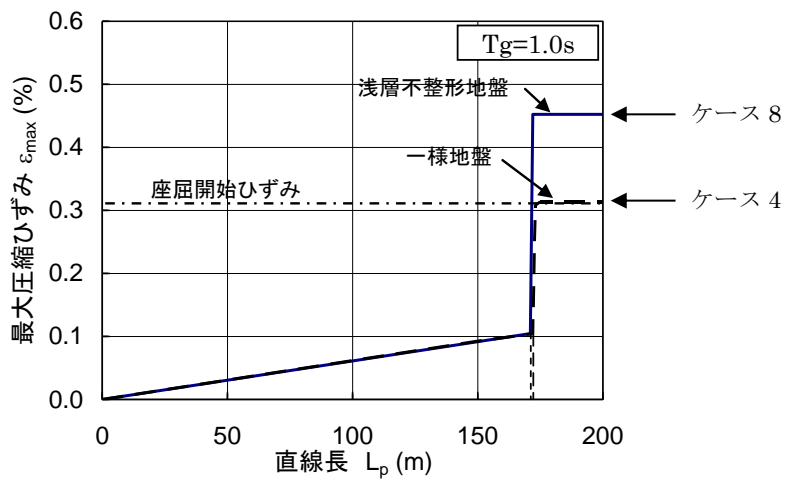


図-7.14 一様地盤と浅層不整形地盤の座屈が開始しない直線長の比較  
(STPG370 100A ケース 4、8)

### 7.3.5 直線長の簡易計算式

#### (1) 簡易計算式の構成

簡易計算式は、直線区間端部要素の影響を除いた仮定で求めた基準長さに、端部の角度に応じて設定した低減係数を乗じることで、座屈が開始しない直線長が求められる形とした。

(a) 基準長さ

基準長さは、図-7.15 に示す両端自由（端部で縁が切れている状態）で埋設された仮定の直線区間の中央に降伏応力が発生する直線区間長さとし、式(7.1)で表される。

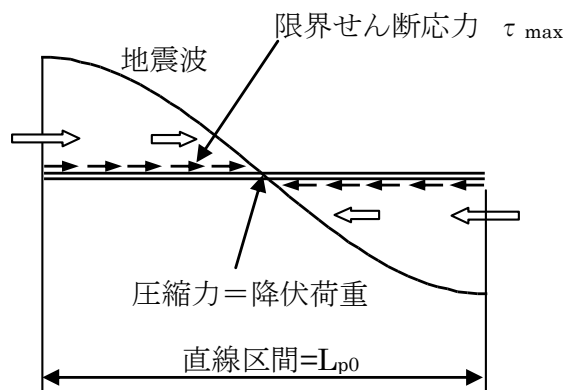


図-7.15 両端自由の仮想直線モデルによる基準長さ

$$\pi \cdot D \cdot \tau_{\max} \cdot \frac{100 \cdot L_{p0}}{2} = 100 \cdot \sigma_y \cdot A \quad (7.1)$$

ここで、 $L_{p0}$  : 基準長さ (m)

$D$  : 管の公称外径 (cm)

$\tau_{\max}$  : 管軸方向の限界せん断応力 (N/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_y$  : 管の降伏応力 (MPa)

$A$  : 管の断面積 (cm<sup>2</sup>)

式(7.1)の左辺は、直線区間の片側半分の管表面に作用する地盤の摩擦力であり、単位面積当たりの摩擦力を一定の管軸方向限界せん断応力  $\tau_{\max}$  と仮定したものである。一方、右辺は管の降伏荷重である。

式(7.1)を変形すると、式(7.2)となる。

$$L_{p0} = \frac{2 \cdot \sigma_y \cdot A}{\pi \cdot D \cdot \tau_{\max}} \quad (7.2)$$

(b) 低減係数

管種・口径、曲管角度別に、直管端部を単独曲管とした解析より得られた座屈が開始しない直線長と 7.3.5(1) (a)の基準長さの比を求め、同一の曲管角度に対して管種・口径を変化させた時に最も小さい値を低減係数として用いた。なお、解析の直線長は、わずかであるが短くなる浅層不整形地盤での直線長を用いた。

各管種・口径別の解析による座屈が開始しない直線長と、基準長さの比を表-7.9 に示す。この結果から曲管角度別の最小値を低減係数とし、表-7.10 に示す。

表-7.9 解析による座屈が開始しない直線長と基準長さの比

管種・呼び径	基準長さ L <sub>p0</sub> (m)	端部の 曲管角度	解析による座屈が 開始しない直線長 (浅層不整形地盤) (m)	基準長さ との比
SGP 50A	99.15	90°	84	0.85
		45°	64	0.65
		22.5°	33	0.33
SGP 80A	111.42	90°	93	<b>0.83</b>
		45°	72	0.65
		22.5°	37	0.33
SGP 100A	120.35	90°	104	0.86
		45°	77	<b>0.64</b>
		22.5°	38	<b>0.31</b>
STPG370 100A	195.57	90°	171	0.87
		45°	138	0.71
		22.5°	82	0.42

表-7.10 簡易計算式で用いる低減係数

端部の曲管角度	低減係数
90°	0.83
45°	0.64
22.5°	0.31

曲管角度が 22.5 度より浅い場合については、その曲管以降の直線区間に作用する軸

力が、ほとんどそのまま検討対象の直線区間の端部に作用すると考えられるため、22.5度より浅い曲管を直線区間の区切りとすることは適切ではないと判断した。したがって、直線区間端部の曲管が22.5度より浅い場合には、その曲管を直線区間の端部とはせず、直管とみなしてその先に続く直線区間と組み合わせて直線長を評価する。

## (2) 座屈が開始しない直線長の簡易計算式

座屈が開始しない直線長の簡易計算式は、式(7.3)で表される。また、式(7.3)で求めた直線長の小数点以下を切り捨てた値を、第8章8.3に示す標準耐震設計における座屈が開始しない直線長の上限值とし、表-7.11に示す。

$$L_{bcr} = a \cdot L_{p0} \quad (7.3)$$

ここで、 $L_{bcr}$  : 座屈が開始しない直線長 (m)

$a$  : 端部の曲管角度による低減係数<sup>※1</sup> <sup>※2</sup> (表-7.10を参照)

ただし、※1) 両側の角度が異なる場合は、双方の係数の平均値を用いる。

※2) 22.5度未満の角度は直線区間の端部とみなさず、その次の端部角度を用いる。

$L_{p0}$  : 式(7.4)による基準長さ (m)

$$L_{p0} = \frac{2 \cdot \sigma_y \cdot A}{\pi \cdot D \cdot \tau_{max}} \quad (7.4)$$

ここで、 $\sigma_y$  : 管の降伏応力 (MPa)

$A$  : 管の断面積 (cm<sup>2</sup>)

$D$  : 管の外径 (cm)

$\tau_{max}$  : 地盤の管軸方向限界せん断応力 (N/cm<sup>2</sup>)



表-7.11 簡易計算式による座屈が開始しない直線長と  
標準耐震設計における座屈が開始しない直線長の上限值

管種 呼び径	基準長さ $L_{p0}$ (m)	端部の 曲管角度	低減 係数 $a$	座屈が 開始しない 直線長 $L_{ber}$ (m)	標準耐震設計に おける直線長の 上限值 (m)
SGP 50A	99.15	90°	0.83	82.29	82
		45°	0.64	63.45	63
		22.5°	0.31	30.74	30
SGP 80A	111.42	90°	0.83	92.48	92
		45°	0.64	71.31	71
		22.5°	0.31	34.54	34
SGP 100A	120.35	90°	0.83	99.89	99
		45°	0.64	77.02	77
		22.5°	0.31	37.31	37
STPG370 100A	195.57	90°	0.83	162.32	162
		45°	0.64	125.16	125
		22.5°	0.31	60.63	60

### 7.3.6 まとめ

座屈が開始しない直線長に対する直線区間端部の曲管の影響、及び浅層不整形地盤の影響について検討を行った結果、以下の知見を得た。

#### ① 伏せ越しと単独曲管の比較

曲管角度の90度と45度では、伏せ越しと単独曲管での座屈が開始しない直線長にはほとんど差が現れない。しかし、22.5度では、単独曲管の方が伏せ越しより座屈が開始しない直線長が短くなった。全体的に単独曲管の方が安全側の値であった。

#### ② 角度に関する比較

座屈が開始しない直線長は90度が最も長く、角度が浅くなるほど短くなった。

#### ③ 両端の角度が異なる場合の座屈が開始しない直線長

それぞれの角度について、両端が同じ角度とした場合に得られる座屈が開始しない直線長の平均値が、両端の角度が異なる場合の座屈が開始しない直線長となった。

#### ④ 浅層不整形地盤の影響

浅層不整形地盤では、一様地盤よりも座屈が開始しない直線長が短いですが、その差は1mであり、座屈が開始しない直線長の設定では、浅層不整形地盤の値で統一することが安全側となる。

以上の結果から、直線区間端部要素の影響を除いた仮定で求めた基準長さに、端部の角度に応じて設定した低減係数を乗じることで、座屈が開始しない直線長を求めることができる簡易計算式を提案することができ、その結果、管種・口径、曲管角度別の標準耐震設計における座屈が開始しない直線長の上限值を求めることができた。

## 第7章の参考文献

- 1) 一般社団法人 日本ガス協会 (2004) 『高圧ガス導管耐震設計指針』 pp.50-84
- 2) 一般社団法人 日本ガス協会 (2004) 『高圧ガス導管耐震設計指針』 pp.26-30

## 第 8 章 耐震設計の具体的手順

### 8.1 設計条件

ガス事業者に要求されるガス導管の性能について一般的な条件を定めた「高圧ガス導管耐震設計指針」に基づき、長管座屈防止のための耐震設計における設計条件を以下のように設定する。

- ① 耐震設計で想定する地震動は、「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-2006-03) のレベル 2 地震動<sup>1)</sup>とする。
- ② 導管の耐震性能を「変形は生じるが、漏えいは生じない」<sup>2)</sup>ものとする。
- ③ 「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-2006-03) のレベル 2 地震動に対する耐震設計と同様に、許容ひずみを 3%<sup>1)</sup>とする。
- ④ 想定する地震動により座屈が開始し、その後の変形により管に発生するひずみが許容ひずみを超える可能性がある場合には、ガス導管の直線長に上限を設けることを基本として、耐震性能を満足する設計を行う。

### 8.2 詳細耐震設計

#### 8.2.1 ガス導管の材料特性

##### (1) 降伏応力及び引張強さ

第 2 章に示したように、より安全側の設計を行うことができるよう鋼管の降伏応力及び引張強さは日本工業規格（以下、JIS と呼ぶ）に示されている規格最小値を用いる。ただし、SGP の降伏点は JIS に規定されていないため、「ガス工作物の技術上の基準の細目を定める告示」第 13 条（つり支持具等の間隔）の別表第 4 における「降伏点又は耐力が日本工業規格に定められていないものにあつては同規格に定められた引張強さの 3/5」の記述<sup>3)</sup>にしたがい、引張強さの 3/5 となる値を用いる。各管種の降伏応力及び引張強さを表-8.1 に示す。なお、使用する材料の降伏応力が既知の場合は、その降伏応力を使用することができる。

表-8.1 鋼管の降伏応力と引張強さ

管種	降伏応力(MPa)	引張強さ(MPa)
SGP	174	290
STPG370	215	370

## (2) 引張特性

鋼管の引張特性は、座屈開始ひずみに大きな影響を与えるため、使用する材料に応じて適切に設定する。一般的に降伏棚型（終点 2%）の引張特性を有する材料は座屈開始ひずみが小さく、ラウンドハウス型の引張特性を有する材料は座屈開始ひずみが大きくなる傾向にある。引張特性は JIS に定められていないため、個別に引張試験を実施しなければ不明である。したがって、引張特性が不明な場合については、安全側の評価として降伏棚型（終点 2%）の引張特性の材料と仮定して設計を行うものとする。第 6 章 6.1 に示したように、ラウンドハウス型の引張特性を有する材料は座屈開始ひずみが十分に大きいため、レベル 2 地震動によって発生する管ひずみが座屈開始ひずみに達することはない。なお、使用する材料の引張特性が既知の場合は、その引張特性を使用することができる。

### 8.2.2 設計地震動

設計地震動は、「高圧ガス導管耐震設計指針」（JGA 指-206-03）「5.1 設計地震動」<sup>1)</sup>に基づき設定する。

### 8.2.3 表層地盤変位及び地盤ひずみ

表層地盤変位及び地盤ひずみは、「高圧ガス導管耐震設計指針」（JGA 指-206-03）「5.2 表層地盤変位及び地盤ひずみ」<sup>1)</sup>に基づき求める。

### 8.2.4 浅層不整形地盤

浅層不整形地盤においては、一様地盤中よりも大きなひずみが発生する場合があるので、「高圧ガス導管耐震設計指針」（JGA 指-206-03）「5.3 浅層不整形地盤」<sup>1)</sup>に基づき、耐震設計を行うこととする。

- ① 第 5 章 5.1 に示したように、浅層不整形地盤に発生する地盤ひずみを地盤変位分布に換算する方法には、地震波長を固定し最大地盤変位を増加させる方法と、地震波長を減少させ最大地盤変位を固定する方法がある。両者を比較した場合、ガス導管に発生する管ひずみは前者の方が大きくなるため、地震波長を固定し最大地盤変位を増加させる方法を用い、安全側の評価を行うこととする。
- ② せん断波を用いた 2 次元地震応答解析により、浅層不整形地盤に発生する地盤ひずみを詳細評価することもできる。

## 8.2.5 地盤拘束力

管軸方向の地盤拘束力は、「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-206-03)「4.4.1 管軸方向の地盤拘束力」に記載の値<sup>4)</sup>を用いることとし、管軸直角方向の地盤拘束力は、「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-206-03)「4.4.2 管軸直角方向の地盤拘束力」に記載された式<sup>4)</sup>(8.1)を用いることとする。

- ① 座屈開始ひずみは、管軸直角方向の地盤拘束力の初期勾配の大きさに影響を受け、初期勾配が大きいほど座屈開始ひずみが大きくなる。したがって、第5章5.2に示したように、「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-206-03)「4.4.2 管軸直角方向の地盤拘束力」のバイリニアで近似された地盤拘束力<sup>4)</sup>を用いた場合、座屈開始ひずみを過小に評価してしまうため、式(8.1)を用いて双曲線で近似するものとする。
- ② 別途実測等により管軸直角方向の地盤拘束力を求めることもできる。

$$y = \frac{x}{0.17 + 0.83 \cdot x} \quad (8.1)$$

ここで、 $y = \sigma / \sigma_{cr}$  : 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

$\sigma$  : 地盤拘束力

$\sigma_{cr}$  : 最大地盤拘束力

$\delta$  : 地盤変位

$\delta_0$  : 最大地盤拘束力を与える地盤変位

## 8.2.6 座屈開始ひずみ

座屈開始ひずみは、部分解析モデルを用いて求めるものとする。

- ① 座屈開始ひずみは、地震波1波長の中央部15mをモデル化した部分解析モデルに、変位制御による入力を与えて求めるものとする。第3章、第4章、第6章6.1に示したように、部分解析モデルを用いた解析結果は、実管実験の結果と良好な一致を示すことが確認されている。なお、地震波1波長の範囲をモデル化し解析を行う全体解析モデルでは、座屈開始後の高速の変形に追従できず計算が収束しない場合が多く、座屈変形特性を求めるための解析モデルには適さない。
- ② 全体解析モデルで計算が収束する場合には、全体解析モデルを用いて座屈開始

ひずみを求めることもできる。

## 8.2.7 座屈開始判定

### (1) 座屈開始判定

第6章6.1に示したように、座屈開始判定ではレベル2地震動で生じる管ひずみ<sup>1)</sup>が、部分解析モデルにより求めた座屈開始ひずみ以上となる場合に、座屈が開始するものとして判定する。なお、管ひずみが座屈開始ひずみに達しない場合には、8.2.7(2)及び8.2.8についての検討は不要とする。

### (2) 局部座屈開始判定

8.2.7(1)により、座屈が開始すると判定された場合には、第6章6.2に示したように、座屈部に発生する管ひずみと許容ひずみ(3%)を比較することで、局部座屈開始判定を行うものとする。なお、管ひずみが許容ひずみよりも大きい場合には、局部座屈が開始するものと判定し、逆に、管ひずみが許容ひずみを超えない場合には、8.2.8の検討は不要とする。

- ① 第6章6.2に示したように、座屈が開始した部分を線形バネ要素に置き換え、バネ係数を変化させた解析を行い、繰返し計算により座屈区間の収縮量と地盤変位による外力入力バランスする条件を求めることで、座屈開始後の座屈部の管に発生するひずみを求める。
- ② 座屈が開始した部分を部分解析モデル等で得られた軸圧縮力と変位の関係に置き換え、座屈区間の収縮量と地盤変位による外力入力バランスする条件を求めることで、座屈開始後の座屈部の管に発生するひずみを求める方法を用いることもできる。ただし、この方法は、条件によっては計算が収束しない場合も多い。

## 8.2.8 座屈防止のための直線長

8.2.7(2)により、局部座屈が開始すると判定された場合には、直線部の両端に曲管等を配置して直線長を減少させることにより、発生する管ひずみが許容ひずみ(3%)以下となる直線長の上限を求め、実際の直線長が上限以下となるよう耐震設計を行う。

- ① 第6章6.3に示したように、座屈が開始した部分を線形バネ要素に置き換え、ひずみ3%となるバネ係数に設定した上で直線長を変化させた解析を行い、座屈区間の収縮量と地盤変位による外力入力バランスする直線長を求める。

- ② 第6章6.3に示したように、直線区間の端部における曲管の接続条件については、曲管の数、角度等実態に合わせて適切に設定する。
- ③ 座屈が開始した部分を、部分解析モデル等で得られた軸圧縮力と変位の関係に置き換え、直線長を変化させた解析を行い、座屈部に発生する管のひずみが許容ひずみ（3%）となる直線長を求める方法を用いることもできる。ただし、この方法は、条件によっては計算が収束しない場合も多い。
- ④ 局部座屈防止よりも安全側の評価として、発生する管ひずみが座屈開始ひずみとなる直線長を求め、実際の直線長がその長さに達しないよう耐震設計を行うこともできる。

### 8.2.9 まとめ

8.1の設計条件のもと、8.2.1～8.2.8に示した方法により、長管座屈防止のための詳細耐震設計を行うことができる。ただし、これらの方法を実践するためには、鋼管の材料特性、既存の耐震設計、有限要素解析等の高度な知識と技術の習得が不可欠であり、都市ガス業界における各事業団体及び各事業者が、必ずしも十分に、これらの耐震設計を実践できるとは限らない。

したがって、より簡易的に耐震設計を行うことが可能な「標準耐震設計の方法」について検討することが課題となる。

標準耐震設計の方法については、後述の8.3に示す。

## 8.3 標準耐震設計

新たにガス導管を埋設する地盤の固有周期が、表-8.2に示す範囲に該当する場合は、ガス導管の直線長が表-8.4に示す値以下となるように標準耐震設計を行う。なお、地盤の固有周期が、表-8.2に示す範囲に該当しない場合は、ガス導管の直線長に制限はない。また、地盤の固有周期が不明な場合には、ガス導管の直線長が表-8.4の値以下となるように設計を行う。

### 8.3.1 耐震設計が必要な地盤の固有周期

表-8.2において、一様地盤とは、表層地盤の厚さがほぼ一定の地盤とし、浅層不整形地盤とは、地震基盤面が傾斜しており、表層地盤の厚さが変化している地盤とする。地震時に地盤に発生するひずみは、浅層不整形地盤の方が大きくなるため、一様地盤と比較した場合、浅層不整形地盤の方が耐震設計を必要とする地盤の固有周期の範囲



が広がっている。なお、地盤の固有周期は、「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-2006-03)「5.2.1 表層地盤の固有周期」<sup>1)</sup>にしたがい求めるものとする。

表-8.2 耐震設計が必要な地盤の固有周期

管種	呼び径	地盤の固有周期	
		一様地盤 (s)	浅層不整形地盤 (s)
SGP	50A	0.7~1.8	0.7 以上
	80A	0.8~1.1	0.8~2.0
	100A	0.8~0.9	0.8~1.4
STPG370	100A	0.9~1.0	0.9~1.8

### 8.3.2 直線長の上限值

第6章6.2に示したように、地盤の固有周期が表-8.2に示した範囲の地盤に埋設される直線長の長い口径100A以下のガス導管に対して、表-8.3の前提条件のもとで、「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-2006-03)のレベル2地震動で想定する地震外力<sup>1)</sup>を作用させた場合、座屈が開始し、その後の変形による発生ひずみは許容ひずみの3%を超える結果となった。したがって、新たにガス導管を埋設する地盤の固有周期が表-8.2に示す範囲に該当する場合は、表-8.4に示すように、ガス導管の直線長に上限を設けることによって標準耐震設計を行う。

表-8.3 標準耐震設計の前提条件

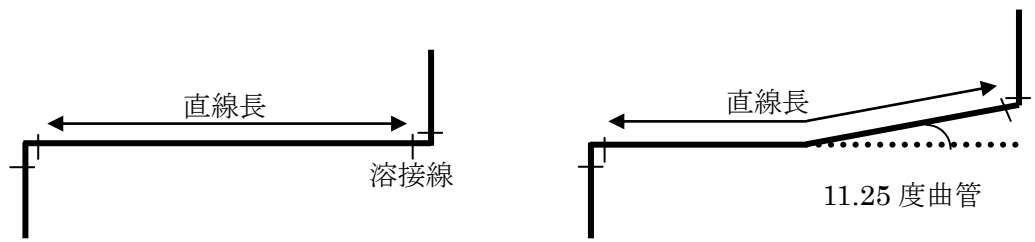
項目	内容	備考
管種	SGP STPG370 sch40	
引張特性	降伏棚型(終点2%)	第2章参照
降伏応力	規格最小降伏点	SGPは引張り強さの3/5
土被り	1.5m	
座屈開始ひずみ	部分解析モデルで計算	第6章6.1参照
設計地震動	設計地震動 I <sup>1)</sup>	「高圧ガス導管耐震設計指針」 (JGA 指-2006-03)参照
管軸直角方向の地盤拘束力	双曲線近似 <sup>4)</sup>	「高圧ガス導管耐震設計指針」 (JGA 指-2006-03)参照

表-8.4 直線長の上限値

管種	呼び径	直線端部の曲管の曲げ角度				備考
		90°	45°	22.5°	22.5° 未満	
SGP	50A	82m	63m	30m	直管とみなし、続く直線区間と合計して評価する。	端部の角度が両側で異なる場合は、両者の平均とする。
	80A	92m	71m	34m		
	100A	99m	77m	37m		
STPG370	100A	162m	125m	60m		

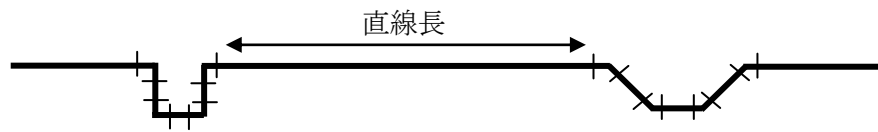
表-8.2 は、ガス導管の直線長を無限大として管ひずみを計算したものであるが、直線長を徐々に短くしていった場合、ある直線長で座屈開始後の変形による発生ひずみが許容ひずみの 3% に等しくなり、この直線長を超えない限り、局部座屈は開始しなくなる。更に、直線長を短くしていくと、ある直線長で発生ひずみが座屈開始ひずみと等しくなり、この直線長がちょうど座屈が開始する直線長となる。すなわち、この直線長に達しない限り、座屈は開始しない。第 6 章 6.3 に示したように、局部座屈が開始しない直線長と座屈が開始しない直線長の上限値にはほとんど差がないため、安全側の設計として座屈が開始しない直線長の上限値を採用することにした。また、第 7 章 7.3 に示したように、表-8.4 は小数点以下を切り捨てた値を直線長の上限値としているため、当該数値以下の直線長として耐震設計を行うものとする。ここで、表-8.4 の直線長とは、図-8.1 に示すように、曲げ角度 22.5 度以上の曲管に挟まれた区間の溶接線間の距離とし、本研究では T 字管の主管部は直管とみなし、分岐管部は 90 度の曲管とみなすものとする。なお、曲げ角度 22.5 度未満の曲管については、直線長の上限値に与える影響が小さいため、直管とみなして続く直線区間と合計して評価を行うものとする。

第 6 章 6.3 及び第 7 章 7.3 に示したように、直線区間の端部に曲管が 1 個の場合と伏せ越しが接続した場合の直線長の上限値を比較したところ、曲管が 1 個の場合の方が若干短い直線長となるため、表-8.4 では安全側の評価として前者における直線長の上限値を採用することとした。また、一様地盤の場合と浅層不整形地盤の場合の直線長の上限値を比較したところ、浅層不整形地盤の場合の方が若干短い直線長となるため、表-8.4 では安全側の評価として後者における直線長の上限値を採用することとした。

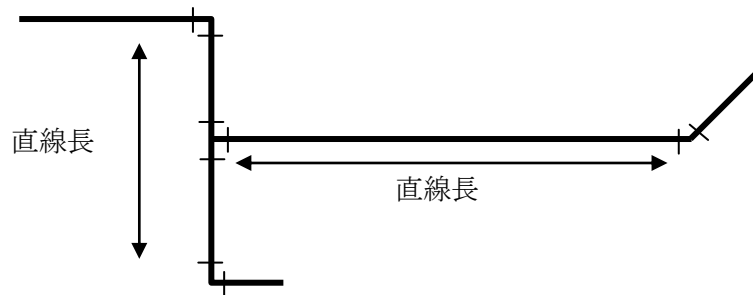


例 1：角度の大きい曲管を含む場合

例 2：角度の小さい曲管を含む場合



例 3：伏せ越しを含む場合



例 4：T字管を含む場合

図-8.1 直線長の考え方

### 8.3.3 標準耐震設計の手順

図-8.2 に示す手順にしたがい、埋設する地盤の固有周期に応じて標準耐震設計を行う。

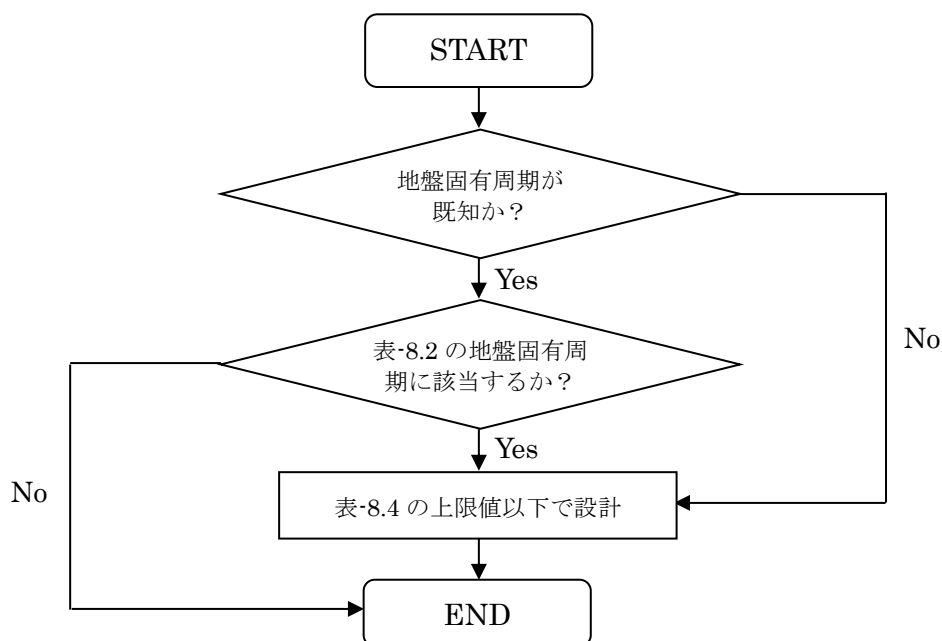


図-8.2 標準耐震設計の手順

### 8.3.4 整合性の検証

#### (1) 検証ケース

今回新たに提案する設計手法によって導かれる直線長と、実際の被害箇所における直線長との対比を行うこととした。具体的には、ボーリングデータ<sup>5)</sup>が一般公開されている被害の4箇所において、管種・呼び径、直線区間長、直線区間端部の曲げ角度の組み合わせをもとに、被害事例と標準耐震設計の整合性について検証を行った。表-8.5に検証ケースを示す。なお、検証にあたっては地盤条件を一律に浅層不整形地盤と仮定した。

表-8.5 検証ケース

ケース	被害事例			
	管種・呼び径	直線区間長	地盤条件	端部の曲げ角度
1	SGP 50A	40m	浅層不整形地盤	22.5°
2	SGP 50A	195m	浅層不整形地盤	90°
3	SGP 80A	370m	浅層不整形地盤	90°
4	SGP 100A	160m	浅層不整形地盤	45°

## (2) 地盤の固有周期

被害箇所付近のボーリングデータを用い、「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-206-03)「5.2.1 表層地盤の固有周期」にしたがい、N 値からの推定法にて地盤の固有周期  $T_D$  を求めた。式(8.2)により求めた各被害事例における地盤の固有周期を表-8.6 に示す。

$$T = \frac{4 \cdot H}{V_s} \quad (8.2)$$

ここで、 $T$  : 表層地盤の固有周期 (s)

$H$  : 表層地盤の厚さ (m)

$$\left( = \sum_{j=1}^n H_j \right)$$

$\bar{V}_s$  : 表層地盤のせん断弾性波速度 (m/s)

$$\left( = \frac{\sum_{j=1}^n V_{sj} \cdot H_j}{H} \quad \begin{array}{l} V_{sj} : \text{第 } j \text{ 層のせん断弾性波速度 (m/s)} \\ H_j : \text{第 } j \text{ 層の層厚 (m)} \end{array} \right)$$

表-8.6 地盤の固有周期

ケース	被害事例		地盤の固有周期
	管種・呼び径	地盤条件	
1	SGP 50A	浅層不整形地盤	1.5s
2	SGP 50A	浅層不整形地盤	1.5s
3	SGP 80A	浅層不整形地盤	1.5s
4	SGP 100A	浅層不整形地盤	0.9s

## (3) 検証結果

表-8.2 及び表-8.4～表-8.6 より、被害事例と標準耐震設計の整合性についての検証結果を表-8.7 に示す。各ケースとも耐震設計が必要な地盤の固有周期に分類され、実際の直線区間長は標準耐震設計の直線長の上限值より 1.5～4 倍程度長く、被害事例と標準耐震設計が良く整合することを確認できた。したがって、今回提案する標準耐震設計の考え方が実際の現場に適用できると判断した。

表-8.7 検証結果

ケース	被害事例			標準耐震設計		整合性
	管種 呼び径	直線 区間長	地盤の 固有周期	耐震設計が 必要な地盤の 固有周期	直線長の 上限値	
1	SGP 50A	40m	1.5s	0.7s 以上	30m	○
2	SGP 50A	195m	1.5s	0.7s 以上	82m	○
3	SGP 80A	370m	1.5s	0.8s～2.0s	92m	○
4	SGP 100A	160m	0.9s	0.8s～1.4s	77m	○

## 第 8 章の参考文献

- 1) 一般社団法人 日本ガス協会 (2004) 『高圧ガス導管耐震設計指針』 pp.50-84
- 2) 一般社団法人 日本ガス協会 (2004) 『高圧ガス導管耐震設計指針』 p.10
- 3) 平成 12 年 5 月 31 日 通商産業省告示第 355 号『ガス工作物の技術上の基準の細目を定める告示』
- 4) 一般社団法人 日本ガス協会 (2004) 『高圧ガス導管耐震設計指針』 pp.26-30
- 5) 国土交通省・独立行政法人土木研究所・港湾空港技術研究所『国土地盤情報検索サイト KuniJiban』  
国土地盤情報検索サイト KuniJiban ホームページ (2012 年 12 月現在)  
<http://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/index.html>

## 第9章 結論

本研究は、平成19年7月16日に発生した新潟県中越沖地震において、口径100A以下の溶接接合された高・中圧ガス導管で、過去に前例のない座屈による被害が15箇所発生した。この被害事例を整理することから見えてきた長管座屈について、その現象を解明した上で、大地震の際にも長管座屈が容易に生じることのないよう対応策を検討し、ガス導管耐震設計の更なる高度化を図ることを目的として実施した。

具体的には、鋼管の座屈開始以降の変形過程を解明するための解析モデルの構築及び実管実験を行い、解析値と実験値の比較により解析モデルの妥当性を検証した。そして、座屈開始以降の変形過程を解明するための解析を行い、その結果を踏まえ、新たなガス導管耐震設計として詳細耐震設計及び標準耐震設計の方法を提案したものである。以下に、本研究から得られた結論をまとめる。

第1章では、本研究を行うに至った背景、新潟県中越沖地震の概要、被害事例の概要、本研究の目的、本論文の構成について示した。

第2章では、一般的に小口径のガス導管として用いられるSGP（配管用炭素鋼鋼管 JIS G 3452）とSTPG370（圧力配管用炭素鋼鋼管 JIS G 3454）について、被害が集中している口径100A以下の鋼管に限定し、鋼管の寸法、強度、引張特性等の材料特性について示した。

第3章では、大地震の際にも長管座屈が容易に生じることのない設計法を提案するためには、高・中圧ガス導管における長管座屈のメカニズムを解明する必要があると考え、鋼管の座屈開始以降の変形過程を解析するためモデルの検討を行った。

研究の結果、以下の知見を得た。

- ・ 座屈の開始以降は鋼管の軸方向変位が増加し、それに伴って座屈部以外の軸応力や軸ひずみが急速に低減する。このような準静的過程である座屈現象を有限要素解析で求めることは数値的に不安定に進むことから全体解析モデルは、鋼管の座屈開始以降の変形過程を求めるための解析モデルとして適さないと判断した。
- ・ 鋼管の一部が座屈して軸力が急速に低下する場合であっても、安定した変形計算を行うことができる部分解析モデルは、鋼管の座屈開始以降の変形過程を求めるための解析モデルに適していると判断した。



- ・ 座屈が開始する直前の最大軸圧縮応力、あるいは最大軸圧縮ひずみが発生する過程は勿論のこと、座屈開始以降の変形過程についても真相を解明することが研究目的であるため、**第4章**以降本研究で行う全ての有限要素解析には、両過程の計算を行うことができる部分解析モデルを用いることにした。

**第4章**では、部分解析モデルが実際の座屈開始以降の変形過程を模擬できているかを確認するために、実管実験（土槽実験及びフィールド実験）との比較を実施した。実管実験では埋設された管に軸圧縮力を加え長管座屈させ、変形過程の応力とひずみの計測を行い、この実管実験から得られた結果と、部分解析モデルから得られる座屈開始点と局部座屈開始点における解析値（応力とひずみ）を比較し、部分解析モデルが実管実験を十分模擬でき得るかを確認した。

研究の結果、以下の知見を得た。

- ・ 実管を使った土槽実験及びフィールド実験を行ったことで、小口径管の座屈開始以降の変形過程を把握することができた。
- ・ 実験の結果と部分解析モデルによる解析結果は良好な一致を示すことが分かり、このことから部分解析モデルが実管実験の代替えとなり得ると判断した。
- ・ 本研究で行う小口径管の座屈開始ひずみ及び局部座屈開始ひずみの解析においては、部分解析モデルを用いることにした。

**第5章**では、管ひずみを求めることを目的とした部分解析モデルに対し、適切な解析条件の設定を行った。特に、本章では地盤ひずみと地盤拘束力の影響について検討した。

**5.1**では、地盤ひずみが座屈開始に及ぼす影響について検討した。

研究の結果、以下の知見を得た。

- ・ 浅層不整形地盤に発生する地盤ひずみは、一様地盤ひずみに地震基盤面が傾斜していることによって生じる地盤ひずみを重ね合わせることで求められるため、一般的には一様地盤ひずみに比べ、浅層不整形地盤ひずみが大きくなる。このため、本研究においては安全側の設計が実施できるよう浅層不整形地盤ひずみを採用するものとした。
- ・ 浅層不整形地盤における地震波として、簡易的に地震波長を一様地盤と同じものとして固定し、表層地盤変位を増幅させた地盤変位分布を用いることにした。

**5.2**では、地盤拘束力が座屈開始に及ぼす影響について検討した。

研究の結果、以下の知見を得た。

- ・ 管軸直角方向地盤拘束力の初期勾配が小さくなるにつれて、座屈開始ひずみも小さくなり、その結果、長周期側の地盤固有周期を有する地盤において座屈が開始し易くなることが確認できた。
- ・ 双曲線近似とバイリニア近似による管軸直角方向の地盤拘束力を比較した場合、バイリニアで近似した場合は双曲線で近似した場合に比べ、明らかに初期勾配が小さくなり、その結果、座屈開始ひずみを過小に評価してしまう可能性がある。
- ・ 地盤の拘束力は「高圧ガス導管耐震設計指針」(JGA 指-206-03)「4.4 地盤拘束力」の解説にしたがい、双曲線に近似された管軸直角方向地盤拘束力を用いることにした。
- ・ 施工時に管周りを適切に締め固めることは、管軸直角方向の地盤拘束力の初期勾配を確保することに繋がり、長管座屈の防止に有効である。

第6章では、第1章～第5章までの研究結果を踏まえ、部分解析モデルにて座屈開始以降の変形過程について解析を行った。

6.1 では、部分解析モデルを用いた有限要素解析を行い、各管種・口径における座屈開始ひずみ及び局部座屈開始ひずみを求め、レベル2地震動で生じる管ひずみと座屈開始ひずみを比較することにより、座屈の開始判定を行った。

研究の結果、以下の知見を得た。

- ・ RH型の引張特性を有する管は、いずれのケースも座屈開始ひずみが「高圧ガス導管耐震設計指針」のレベル2地震動で生じる管ひずみの最大値よりも大きく、座屈は開始しない。
- ・ LE型の引張特性を有する管は、いずれのケースも座屈開始ひずみが「高圧ガス導管耐震設計指針」のレベル2地震動で生じる管ひずみの最大値よりも小さく、地盤の固有周期によっては座屈が開始する可能性がある。
- ・ LE型の引張特性を有する管について、座屈が開始する可能性のある地盤固有周期の範囲を確認することができた。

6.2 では、座屈開始以降の変形過程を求める非線形解法として、座屈部の変形特性を線形とした解析モデルで繰返し計算を行う方法を採用し、得られた解析結果から管が座屈開始以降に局部座屈開始に到るか否かについて判定を行った。

研究の結果、以下の知見を得た。

- ・ 局部座屈開始判定の結果、管ひずみが許容ひずみを超える地盤固有周期の範囲を

確認することができた。

6.3 では、座屈及び局部座屈が開始しない直線長の上限值を求める方法について検討を行った。

研究の結果、以下の知見を得た。

- ・ 座屈が開始しない直線長に対して、 $\varepsilon_{2DC}=3\%$ までの座屈変形を許容した局部座屈が開始しない直線長は3~4m程度の増加であることが確認できた。
- ・ 耐震設計に用いる直線長の上限值には、安全側の設計を行うことが可能となる座屈が開始しない直線長を用いることが妥当であると判断した。

第7章では、耐震設計の必要性と詳細耐震設計及び標準耐震設計の2つの考え方について示した。

7.1 では、第1章~第6章までの研究結果を踏まえ、高価な曲管を用いず、より真直ぐな長い配管として経済的合理性のある設計を行うことができる詳細耐震設計について示した。

7.2 では、詳細耐震設計に比べ直線は短くなるが、実務に携わる多くの技術者が利便性良く耐震設計を実施できるよう、一覧表を利用した標準耐震設計について示した。

7.3 では、コストも含めガス事業者が適切な耐震設計を行えるように、直管の接続で構成される可能な限り真直ぐな長い配管（以下、直線長と呼ぶ）の上限值を求める方法を「直線長の簡易計算式」として提案した。具体的には、座屈が開始しない直線長に対する直線区間端部の配管要素（曲管）の影響、及び浅層不整形地盤の影響について検討を行い、その結果を整理することで、座屈が開始しない直線長を簡易に求めることができる計算式を考案した。

研究の結果、以下の知見を得た。

- ・ 直線区間端部要素の影響を除いた仮定で求めた基準長さに、端部の角度に応じて設定した低減係数を乗じることで、座屈が開始しない直線長を求めることができる簡易計算式を考案することができた。
- ・ 簡易計算式を用いて、管種・口径、曲管角度別の標準耐震設計における座屈が開始しない直線長の上限值を求めることができた。

第8章では、第1章~第7章までの研究結果を踏まえ、長管座屈防止のための耐震設計の具体的な手順を示した。

8.1 では、ガス事業者に要求されるガス導管の性能について一般的な条件を定めた

「高圧ガス導管耐震設計指針」に基づき、長管座屈防止のための耐震設計における設計条件を示した。

8.2 では、長管座屈防止のための詳細耐震設計の方法を示した。この方法にしたがい耐震設計を行うことで、大地震の際にも長管座屈が容易に生じることのないよう対策を講じることが可能となり、高価な曲管を用いず、より真直ぐな長い配管として経済的合理性のある設計を行うことができる。

ただし、詳細耐震設計を実践するためには、鋼管の材料特性、既存の耐震設計、有限要素解析等の高度な知識と技術の習得が不可欠であり、都市ガス業界における各事業団体及び各事業者が、必ずしも十分に、これらの耐震設計を実践できるとは限らない。したがって、より簡易的に耐震設計を行うことが可能な「標準耐震設計の方法」について検討することが課題となった。

8.3 では、長管座屈防止のための標準耐震設計の方法を示した。鋼管の材料特性、既存の耐震設計、有限要素解析等についてある程度の知識と技術を有している技術者であれば、この方法にしたがい耐震設計を行うことで、大地震の際にも長管座屈が容易に生じることのないよう対策を講じることが可能となる。

以上の研究結果を踏まえ、実務に携わる多くの技術者が利便性良く使用できるよう整理した、長管座屈防止のためのガス導管耐震設計の手順を図-9.1 に示す。

本研究で提案した耐震設計の方法は、今後、実際のガス導管に対して本格的に展開していくことが期待されるが、実際の運用においては、図-9.1 の手順にしたがい、第 8 章 8.3 に示した簡易な手法である長管座屈防止のための「標準耐震設計」によって耐震設計を行うことが大半になるのではないかと考えられる。当然のことながら、事業者によっては設計条件に関して詳細評価を行い、より効果的な設計を行う場合には、第 8 章 8.2 に示した長管座屈防止のための「詳細耐震設計」にしたがい耐震設計を行うこともできる。

また、本研究によって明らかとなった鋼管の座屈開始以降の変形過程を図-9.2 に示す。

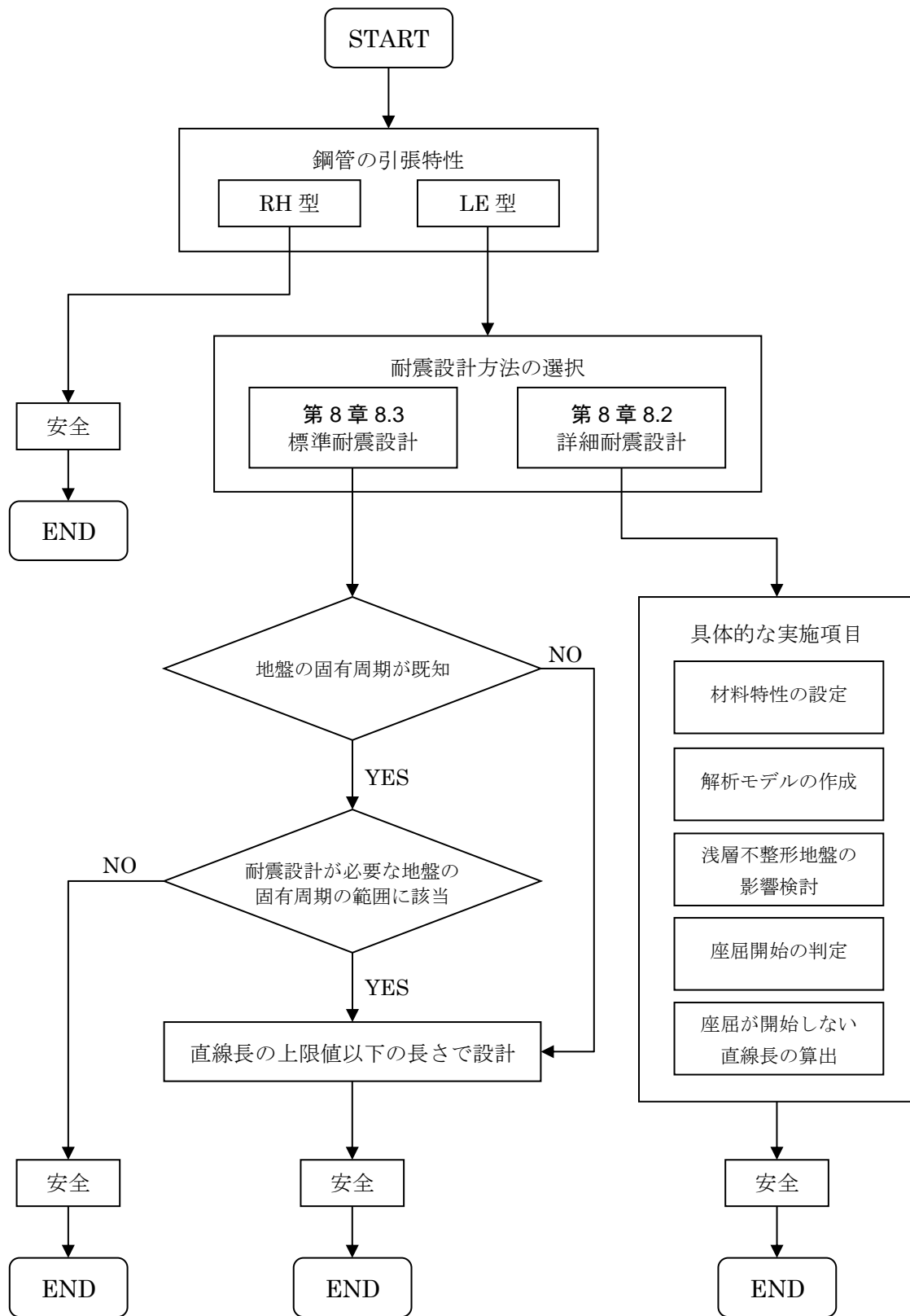
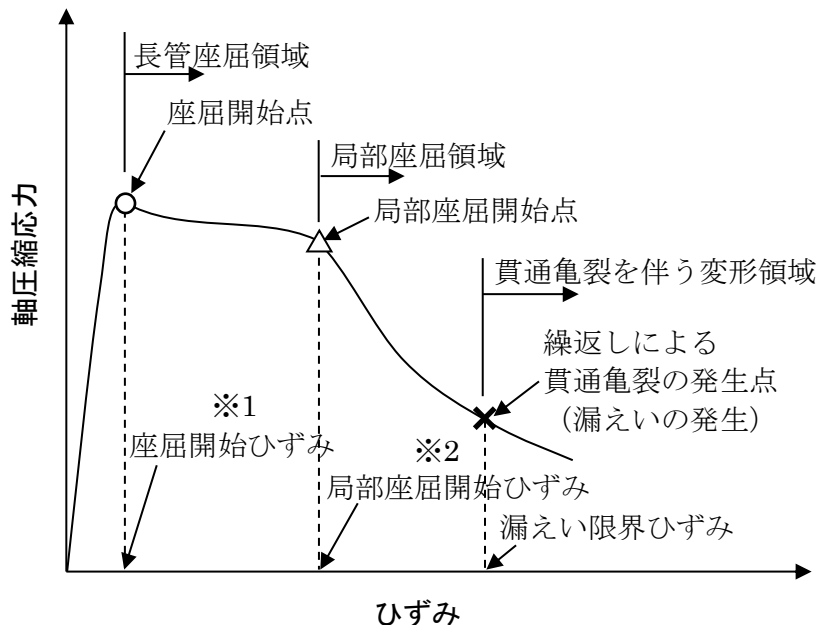


図-9.1 長管座屈防止のためのガス導管耐震設計の手順



※1 座屈開始ひずみ：

管に生じる軸圧縮応力が最大に達し、軸直角方向の曲げ変形が生じ始める軸ひずみ

※2 局部座屈開始ひずみ：

座屈変形が進行し、座屈部に生じる曲げモーメントが最大となる軸ひずみ

図-9.2 鋼管の座屈開始以降の変形過程

本研究により、新たに埋設される口径 100A 以下の供給上重要な溶接接合された高・中圧ガス導管に対して、長管座屈防止のための耐震設計の方法について提案を行うことができた。提案した耐震設計法を実際の設計・施工に適用することで、大地震の際にも長管座屈が容易に生じることのないよう地震対策を講じることができ、その結果、ガスの安定供給、保安の確保に貢献することが可能となる。

最後に、今後の課題について述べる。

これまでガス業界では、ガス導管の耐震性を確保するために「高圧ガス導管耐震設計指針」に準じ耐震性評価を行ってきた。新潟県中越沖地震で発生した長管座屈という新たな事象を除けば、その後未曾有の被害をもたらせた東日本大震災を含め、これまでの耐震性評価は十分にその効果を発揮し、ガス導管の地震対策に対する安全性・

信頼性に大きく貢献してきた。

一方、設計段階において詳細を把握することが難しい管の材料特性や前提条件としての地震動、地盤の考え方等について十分な安全率を考慮した上で様々な評価を行ってきたのが現行である。このように、これまでの設計手法は安全性を最優先事項として耐震性評価を行ってきたため、十分なコスト意識が徹底されていたとは言い難く、この点については、今後ガス業界全体で取り組むべき大きな課題の一つであると考えている。また、エネルギー業界における自由化問題、地球規模の温暖化に端を発する低炭素社会の加速といった大きな時代のうねりの中で日本の国際競争力を養うためには、ガス業界のみならず、日本のライフライン産業全体の抜本的なコストの見直しが重要であると考えている。

管の材料特性、地震動、地盤ひずみ、地盤拘束力に代表される耐震設計の条件は、実際の設計において設計対象ごとにそれぞれ異なるため、現場の実務を考慮すれば、技術者各人が現実に合った設計条件を設定することは非常に難しいのが現状である。そのため、本研究における実験や有限要素解析による一連の検討においては、これらの耐震設計の条件について安全側の設定を行い、想定される最も厳しい条件下での耐震性評価を採用したものであるため、安全性の確保は十分に確認されている反面、経済性等の面では課題が残っており、今後も以下の項目について研究の余地があると言える。

#### ① 耐震設計における許容ひずみ

本研究においては、長管座屈というこれまでに考慮されていない座屈形態に対し、安全側の設計が実施できるよう座屈開始ひずみを既存の高圧ガス耐震設計指針で定められた許容ひずみ 3%を上限値とした提案を行った。ただし、鋼管の局部座屈開始ひずみが概ね 6~9%の範囲にあり、かつ、一般的に鋼管の漏えい限界ひずみが約 25%程度であることを考慮すれば、本提案は十分な余裕代を持っていると言え、既存の高圧ガス導管耐震設計指針で用いている許容ひずみを適用することの妥当性については議論が必要である。今後は、余裕代と安全性のバランスを考慮し、耐震設計の合理化をより一層追求していく必要があると考えている。

#### ② 管の材料特性

RH 型の材料は座屈が開始しないことが明らかとなったため、例えば、将来、鋼管の製造方法の改善等により材料特性の高度化が進んだ場合、ガス導管とし

て採用する材料を RH 型に統一することで、長管座屈の防止に繋がると考えられる。また、将来的に強度が均一な材料を製造することが可能となった場合、材料特性を JIS 規格最小値から実際の特徴値に見直すこともできる。このように、製造方法の進展とともに、今後も管の材料特性を反映させて検討を継続して行っていく必要があると考える。

### ③ 設計地震動

現行の「高圧ガス導管耐震設計指針」では、既往の地震観測結果から地震基盤面における地震動を基にして、ガス導管埋設位置での表層地盤変位からガス管のひずみを算出する方法となっているため基盤面や表層地盤の前提条件に依存してしまう。地震工学の最新知見等から、地震波を表面波として直接入力できるような新たな検討を行うことにより、直接ガス導管に発生するより精緻なひずみを算出することにより既往の指針の見直しも可能と考える。

### ④ 地盤ひずみと地盤拘束力

本研究でも明らかとなった管の座屈開始に強く依存する地盤ひずみと地盤拘束力については、地盤工学分野からの新たな提言、あるいはガス事業者の基礎データの蓄積、研究成果等、今後新たな知見が得られる可能性もあり、その場合には速やかに本研究の成果を見直していくことが必要である。

### ⑤ 有限要素解析等、解析技術

コンピュータや解析技術の分野の進展は目覚しく、全国のガス事業者が今よりも簡易かつ安価に、そしてより高精度の三次元解析を行う日が近い将来に迎えることも容易に予想できる。そのため、コンピュータや解析技術の高度化と併せて、今後も実務者がより簡便かつ合理的な設計を行えるように本研究を継続していくことが耐震設計の合理化に繋がっていくと考える。