

局部変形を有する鋼管パイプラインの
地震時の変形特性に関する研究

菅沼 淳

局部変形を有する鋼管パイプラインの地震時の変形特性に関する研究

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 パイプラインの重要性	1
1.1.2 パイプラインにおける局部変形（デント）	1
1.1.3 デントの定義	1
1.1.4 デントの存在で想定するリスク	2
1.2 既往の研究	5
1.2.1 デントを有する鋼管パイプラインの耐荷重に関する研究の動向	5
1.2.2 デントを有する鋼管パイプラインの曲げによる局部座屈に関する研究	5
1.2.3 デントを有する鋼管パイプラインの軸圧縮座屈に関する研究	6
1.3 研究の目的	7
1.3.1 デントを有する鋼管パイプラインの力学的挙動の解明	7
1.3.2 デントを有する鋼管パイプラインの地震時の変形特性の確認	7
1.4 本論文の構成	8
第2章 鋼管の軸圧縮座屈実験と解析による再現	9
2.1 概説	9
2.2 軸圧縮座屈実験	9
2.2.1 日本産業規格準拠の鋼管を使用した実験	9
2.2.2 米国石油協会規格準拠の鋼管を使用した実験	15
2.3 軸圧縮座屈実験の有限要素解析による再現	21
2.3.1 健全な鋼管の実験結果の再現	21
2.3.2 デントを有する鋼管の実験結果の再現	24
2.3.3 デント部の残留ひずみが軸圧縮座屈特性に及ぼす影響	30
2.4 軸圧縮座屈解析モデルの長さの検討	36
2.4.1 鋼管パイプラインと鋼管杭の設計上の類似性	36
2.4.2 仮想固定点の応用による解析モデル長さの検討	36
2.4.3 妥当な解析モデル長さ	38
2.5 デントを有する鋼管パイプラインの軸圧縮座屈特性の評価	48
2.5.1 鋼管パイプライン全体としての軸圧縮座屈特性の評価	48
2.5.2 軸圧縮座屈特性を評価する局部座屈開始ひずみの定義	49
2.5 まとめ	50
第3章 デントを有する鋼管パイプラインの軸圧縮座屈パラメータスタディ	51
3.1 概説	51

3.2	想定する解析ケースの設定の根拠	51
3.2.1	デントの形状	51
3.2.2	デントの深さ	52
3.2.3	内部圧力の設定	52
3.2.4	土圧・地盤ばねの設定	53
3.3	軸圧縮座屈パラメータスタディ	55
3.3.1	解析条件	55
3.3.2	デントの深さの変化	56
3.3.3	パイプラインの運用圧力の付加 (1)	61
3.3.4	パイプラインの埋設条件の考慮 (1)	63
3.3.5	パイプラインの運用圧力と埋設条件の同時考慮 (1)	64
3.3.6	解析結果の比較と考察 (1)	66
3.3.7	デントの形状の違い	70
3.3.8	パイプラインの運用圧力の付加 (2)	75
3.3.9	パイプラインの埋設条件の考慮 (2)	76
3.3.10	パイプラインの運用圧力と埋設条件の同時考慮 (2)	78
3.3.11	解析結果の比較と考察 (2)	80
3.4	パラメータスタディのまとめ	83
第4章 鋼管の曲げによる局部座屈実験と解析による再現		85
4.1	概説	85
4.2	曲げによる局部座屈のリスク	85
4.2.1	地盤沈下による曲げの場合	85
4.2.2	地盤の側方流動による曲げの場合	86
4.3	曲げによる局部座屈実験	86
4.3.1	供試体	86
4.3.2	実験装置および計測項目	89
4.3.3	実験結果	92
4.4	曲げによる局部座屈実験の有限要素解析による再現	98
4.4.1	デントの作成解析	98
4.4.2	解析ケースの設定	101
4.4.3	実験結果の再現	102
4.4.4	解析結果の考察	105
4.5	まとめと今後の研究課題	106
4.5.1	まとめ	106
4.5.2	デント部の再変形挙動の解明	107
4.5.3	鋼管パイプライン耐震設計への活用方法	108
4.5.4	実務への活用方法	109

第5章 デントを有する鋼管パイプラインの耐震性検討	110
5.1 概説	110
5.2 石油パイプライン技術基準（案）	110
5.3 高圧ガス導管耐震設計指針	111
5.3.1 考え方の要点	111
5.3.2 地盤変位量の算出	112
5.3.3 管ひずみの算出	114
5.4 耐震性の判定方法	115
5.5 耐震性検討対象の鋼管パイプライン	116
5.6 耐震性の判定	122
5.6.1 レベル1地震動に対する耐震性	122
5.6.2 レベル2地震動に対する耐震性	125
5.7 まとめ	128
第6章 結論	129
6.1 各章の成果	129
6.2 今後の課題と展望	130
付録1 第1章 序論 関連資料	
付録2 第2章 鋼管の軸圧縮座屈実験と解析による再現 関連資料（1）	
付録3 第2章 鋼管の軸圧縮座屈実験と解析による再現 関連資料（2）	
付録4 第3章 デントを有する鋼管パイプラインの軸圧縮座屈パラメータスタディ関連資料	
付録5 第5章 デントを有する鋼管パイプラインの耐震性検討 関連資料	
参考文献	157
謝辞	159

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 パイプラインの重要性

パイプラインは、天然ガスや石油などの流体を、安定かつ安全に輸送できる手段として世界的に普及している[1][2][3]。特に欧米では、国境や州境をいくつも越えた長大なパイプラインが存在し、世界の経済活動を支える重要なインフラとなっている。このようなパイプラインを適切に維持管理し、安定的に運用していくことは非常に大切であり、社会的な要請が存在する。

我が国では、欧米のように地域横断的に接続されている長大な延長のパイプラインとしては、天然ガスの生産地と消費地を結ぶガスパイプライン（新潟・東京ガスパイプライン、新潟・仙台ガスパイプラインなど）が限定的に存在するのみであった。しかし近年は、都市ガスの天然ガス化を背景に、ガス事業者が沿線の需要開発を行いつつ、延伸が進められている[4]。今後も、我が国の経済活動におけるパイプラインの重要性は高まることはあっても、低くなることは当面ないと考えられ、適切な維持管理と安定的な運用は欧米同様に必要である。

東海地域の都市ガスパイプラインとして敷設されており、本研究でも取り上げる鋼管の仕様や製造方法、性能上の留意点について付録1にまとめた。予備知識としてご参照されたい。

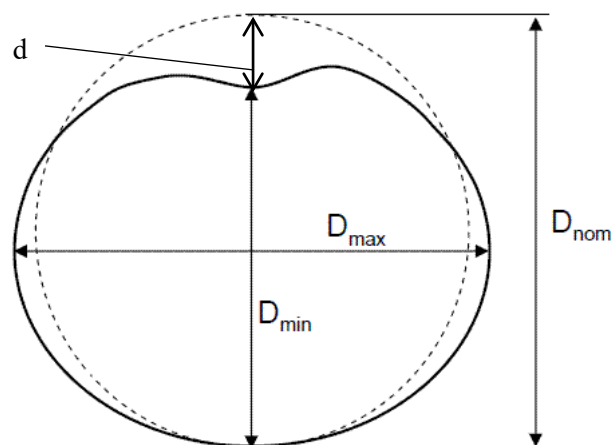
1.1.2 パイプラインにおける局部変形（デント）

パイプラインを長期にわたり維持管理していく中で、補修が必要な欠陥・損傷などが発見されることがある。米国の報告書[5]によれば、2003年に米国で発生したパイプライン事故のうち約50%は当該パイプライン以外の工事等の掘削による損傷に起因するものであり、その中には、局部変形（デント, dent）に起因する事故（遅れ割れ）によるものも散見される、と報告されている。従って、デントが有害な欠陥（形状）であった場合、パイプライン内部の流体がもたらす運用圧力（内圧）に対する安全性や耐震性の観点からも当該部分の補修を行う必要が生じる。我が国でも、操業中の鋼管パイプライン（ガス導管）が、建設機械や地盤沈下などによってデントが発生した事例が報告されている（非公開資料）。

1.1.3 デントの定義

パイプラインにおけるデントとは、米国機械学会（ASME）では、「管全体の滑らかな曲率を阻害する陥没のこと」と定義されている[6]。また、デントの発生のメカニズム（建設重機による打撃などに起因する時など）によっては、デントに加えて、同時に引っ掻き傷（スクラッチ, scratch）が発生する場合があります。さらに引っ掻き傷において亀裂が生じる可能性もある[7]。引っ掻き傷は溝（グループ, groove）、（ガウジ, gauge）などとも呼ばれる。

デントにおいては、形状の特徴、特に「デント深さ」が安全性を評価する重要な因子になる。「デント深さ」は、元のパイプの直径からの最大変化量（凹みの深さ、パーセント表示）を指す。パーセント表示は、呼び径（400A, 600A など）を基準とする場合もあれば、外径（パイプの規格に定められた標準寸法）を基準とする場合もある。本論文では、これ以降、特に断りのある場合を除き、外径を基準としたパーセント表示で表記する。図-1.1 にデントのイメージおよびデント深さの定義を示す。



$$\text{デント深さ } d (\%) = 100 \times (D_{\text{nom}} - D_{\text{min}}) / D_{\text{nom}}$$

図-1.1 デントのイメージおよびデント深さの定義

1.1.4 デントの存在で想定するリスク

デントが存在する場合の安全性評価について、ASME, 米国石油協会 (API) 等の海外諸規格では、通常時の圧力変動（内圧変動）や、損傷に伴う形状変化と、重機等により擦られて発生したデントにおいては材料特性が変化している可能性（例えば、硬度の上昇）を考慮し、「発生したデントが応力集中を生じさせる要素（スクラッチやガウジなど、管厚を減少させるもの）を含んでいる場合においては、損傷のある部分を切り取らなければならない」とされている[6][8]。

デントが存在する場合のリスクについて、ASME, API 等の海外諸規格では、パイプラインに想定される事象として、圧力変動（パイプラインの内圧変動）による再円化 (Re-Rounding), ガウジの進展による即時破壊, また、鋼組織異常の存在による硬度上昇部分の破壊, マイクロクラックの存在・進展を挙げている。デントの存在によりパイプラインで想定されているリスクと事象を表-1.1 にまとめる。

再円化について、現象とリスクを補足する。パイプラインに発生したデントの深さは、内部圧力の増減により変化する。すなわち、内部圧力が上がるとデント深さは小さくなり再円化される（元の形状に戻ろうとする）。また再円化された導管は、内部圧力が下がると再度、元の形状（デント）へと復帰しようとする。パイプライン内部の圧力が周期的に変動する場合、デント部分はこの動きを繰り返し行うこととなる。この現象を再円化と呼ぶ。図-1.2 に再円化の発生イメージを示す。海外では再円化による事故事例もあり、写真を図-1.3 に示す。

表-1.1 デントの存在によりパイプラインで想定されるリスクと事象

想定リスク	破壊状態	事象
圧力変動 (内圧変動)	再円化 (Re-Rounding)	内圧変化に伴いデント深さが変化する現象。内圧変動により繰り返し応力が作用するため疲労破壊に至る可能性がある。
	ガウジ進展による即時破壊	デント内にガウジが存在する場合、内圧変動による繰り返し応力の作用により、ガウジが成長（亀裂進展）する。このため亀裂が貫通することによる漏えいに至る可能性がある。
鋼組織異常の存在	硬度上昇部分の破壊	例えば重機の接触によるデントであった場合、デント部分の硬度が上昇している場合がある。この場合、埋設環境によっては当該部分が起点となり脆性破壊に至る可能性がある。
	マイクロクラックの存在・進展	擦られてデントが発生した場合には、デント中央部に高硬度の加工層が形成されマイクロクラックが存在する可能性がある。ガウジと同様に欠陥が成長し漏えいに至る可能性がある。

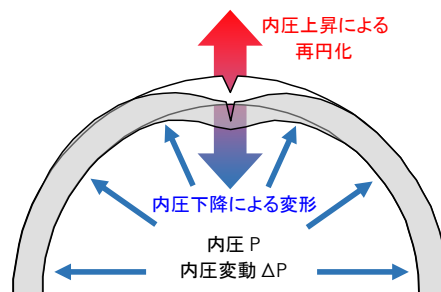
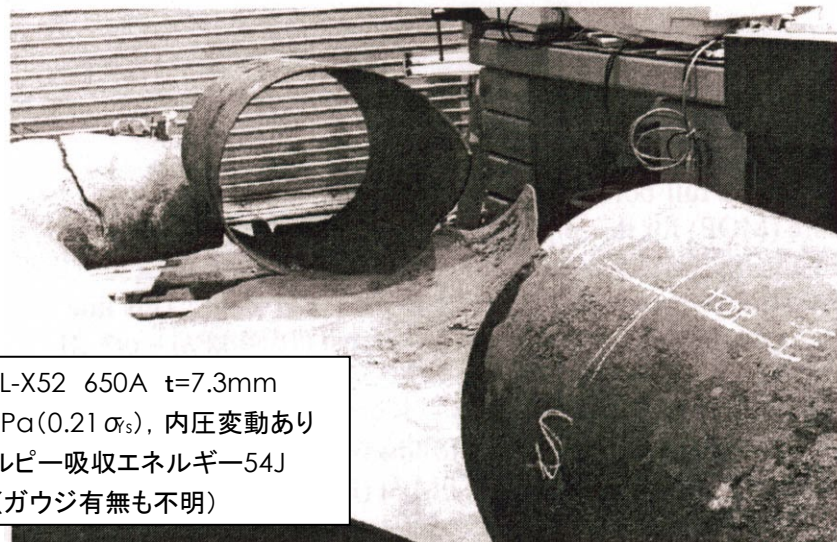


図-1.2 再円化の発生イメージ



[導管仕様]	API5L-X52 650A t=7.3mm
[内 圧]	1.6MPa(0.21 σ_s), 内圧変動あり
[導管材料]	シャルピー吸収エネルギー54J
[デント形状]	不明(ガウジ有無も不明)

図-1.3 再円化に起因する事故事例

上記のリスクに加え、地震の多発する我が国においては、地震時のリスクも考慮する必要がある。パイプラインに局部的にデントが存在している場合、外力が加わった時の応力がデント部付近に集中し、パイプライン全体としての耐力が低下している恐れがある。また、デント部付近で

座屈が発生し、亀裂が生じて脆性破壊の起点となる可能性がある。また、デント部を起点とした大規模な変形が発生する可能性も大いにあり、余震等を考慮した際に変形が進展し、破壊に至り、パイプライン内部の流体の漏えいに至る可能性もある。

地震でパイプラインに大規模な座屈が発生した事例として、1971年2月に米国カリフォルニア州で発生したサンフェルナンド地震での被害例がある[9]。図-1.4に被害例の写真を示す。口径が16インチの鋼管が管軸方向に軸圧縮座屈変形し、典型的な「提灯座屈」が発生している。この鋼管に、提灯座屈の発生を誘発する応力集中箇所が存在したかどうかは不明であるが、ひとたび図-1.4のように座屈してしまうと、余震など、この後に負荷される外力に耐えることはできないことは容易に想像される。

我が国のパイプラインの現状の運用方法を踏まえて上述のリスクを考えてみる。我が国で最も一般的な都市ガスや上水を輸送するパイプラインでは、日常の運用圧力（内圧）は極めて安定しており、日常的な圧力の変動は少ない。定期的な点検の時に内部の流体を抜いて圧力を下げることがあるが、その頻度はせいぜい数年～10年に1度程度であり、内圧変動による応力変化の繰り返し回数は少ない。以上から、再円化の発生する頻度も少なく、我が国では内圧変動による疲労破壊のリスクを考慮する必要性には乏しいと考えられる。

また、デントの発生した部分の硬度が上昇する問題であるが、硬度の上昇によって考慮すべきリスクは、低温脆性破壊の発生と硫化物応力腐食割れ（SSCC）とされている[10]。低温脆性破壊については、我が国のパイプラインの埋設環境は年間を通じて温度が安定しているため低温脆性破壊には至らないと思われる。また、硫化物応力腐食割れ（SSCC）の問題も、もともとの材料仕様として鋼管内の硫化物が成分量としてはごく僅かに抑えられているため、応力腐食割れは発生しにくい状況にあるものと判断する。

以上のことから、我が国にとって常に意識しなくてはならない地震が、デントを有する鋼管パイプラインに及ぼす影響を考慮することが重要であり、本研究では、これについて調べる。



図-1.4 米国・サンフェルナンド地震（1971年2月）で座屈した鋼管（16インチ）

※成田園郎（日本鋼管）：パイプラインと地震、（一社）日本高圧力技術協会「圧力技術」9巻6号，pp.22，1971 より引用

1.2 既往の研究

1.2.1 デントを有する鋼管パイプラインの耐荷重に関する研究の動向

デントを有するパイプラインの地震時の変形特性を考える場合、地震はパイプラインに対して外力や強制的変位をもたらす存在であるから、耐荷重に関する既往の研究成果を知ることは必須である。耐荷重に関する研究の状況について、Zhang *et al.*が論評としてまとめている[11]。デントには複数の種類があり、すべてのデントがパイプラインの安全な運転に多大な影響を与えるわけではなく、管厚の減少やその他の欠陥を伴わない平滑なデントである単純なデントは、耐荷重に及ぼす影響が少ないと考えられている。デントには 1.1 でも触れたスクラッチやガウジなどの他の欠陥を伴うことが多く、それがデントを有する鋼管パイプラインの耐荷重の分析を困難にしており、様々なシミュレーションモデルや実験研究が世界各地の研究者らによって提案されているものの、デントを有する鋼管パイプラインの安全性評価基準は未だに妥当なものにはなっていないことをはじめに指摘している。その上で、以下の内容をまとめている。

- (1) スクラッチを伴ったデントについて、鋼管パイプラインの靱性が高かったり、デント部分のひずみ硬化やその他の因子により、パイプの破裂圧力に影響しないものもある。デント内に（スクラッチから発展した）クラックが存在したとしても、内圧のかかった鋭いクラックとして見なすべきかどうかは定まっておらず、実際のスクラッチとデントの組み合わせに関する評価基準は提案されていない。
- (2) 耐荷重に関連する実験では、クラックを伴うデントのすべてが鋼管パイプラインの破裂圧力に影響するわけではないことが示されている。現時点では、数多くの変数が分析され、実験やシミュレーションの結果に基づいて当てはめることで破裂圧力の計算式が確立されている。
- (3) 曲げ耐荷力については、多くの変数によってもたらされる影響は予備的に解明されている。
- (4) 軸圧縮に関する研究は少ない。現時点では、具体的な状況における鋭いデントが生じたパイプの軸圧縮を評価することは可能であるが、より広範に応用できる評価基準を提案する必要がある。

1.2.2 デントを有する鋼管パイプラインの曲げによる局部座屈に関する研究

断層、地盤沈下、地すべり、液状化などの地盤変位により、埋設した鋼管パイプラインは曲げ荷重を受ける。過剰な曲げ荷重がかかると鋼管パイプラインは安定性を失い、楕円化、よじれ、より大きな曲げモーメントに耐える能力の喪失などという形で影響が表れるようになる。より包括的な評価を行うために、デントを有する鋼管パイプラインの限界曲げ耐荷力を検討すべきである、とされている[11]。

実験については、Ghazijahani and Showkati [12][13][14][15][16] は、異なる位置と深さのデントを被っているパイプを対象に曲げ実験を実施し、デントが生じた位置によって座屈破損モードも異なっていることを明らかにした。デントがパイプの圧縮側に位置していた場合、限界曲げ荷重に対する影響が最も大きく、デントが深いほど影響も大きくなった。デントが引張側に位置して

いた場合は影響が最も小さくなった。

解析については、Beak *et al.*[17] は単純なデントを有する直径の大きいパイプ ($D=762\text{mm}$) の有限要素解析を初めて行い、単純なデントの深さが外径の 5%に相当する場合はパイプラインの曲げ耐荷力が下がらないことを明らかにした。Liu *et al.*[18]は、材料のひずみ硬化、内圧、管径管厚比が異なる場合における限界圧縮ひずみに対するデントの深さの影響を分析し、内圧と管径管厚比の違いがデントの深さの変化とともに限界圧縮ひずみの傾向を変え、デントの深さの変化に伴う限界圧縮ひずみの傾向は、材料が異なっても類似していることを示した。

実験とシミュレーション結果に基づき、デントを有する鋼管パイプラインの曲げ耐荷力を予測する数式が数種類存在している。Wang *et al.*[19]はデントの深さに相当する形状欠陥の高さの計算式 (1.1) を提案している。

$$\frac{h_g^e}{t} = 0.01 \times \left[0.019 \times \frac{D}{t} + 1.4 \right] \left(100 \times \frac{d_{dp}}{D} \right)^{(-0.023 \times \frac{D}{t} + 1.9)} \quad (1.1)$$

h_g^e : 相当形状欠陥の高さ (mm)

d_{dp} : 内圧によるデントの深さ (mm)

D : パイプの外径 (mm)

t : パイプの管厚 (mm)

以上から、デントを有する鋼管パイプラインの曲げ耐荷力に関して、パイプの大きさや材料、デントの位置と大きさ、内圧などの数々の変数の影響が知られているものの、これらの変数のほとんどはまだ予備的に議論されているにすぎず、さらなる研究が必要である。デントを有するパイプの曲げ耐荷力の評価基準については、Wang が提案している数式が比較的合理的ではある。しかし、この数式は単純なデントがパイプの圧縮側に位置しているという限定的なケースのみでしか適用できない。

1.2.3 デントを有する鋼管パイプラインの軸圧縮座屈に関する研究

軸圧縮座屈は、地震、パイプラインの内容物や外部環境の温度変化などによって生じる過剰な軸圧縮荷重がパイプラインに裁荷されることで生じる。デントの存在により、軸圧縮荷重下におけるパイプラインの耐荷重は低下する。

Ghazijahani *et al.*[20][21]は様々な深さ、位置、方向の鋭いデントを持つ 10 本のパイプを対象に軸圧縮実験を実施し、耐荷重力への影響が最も大きかったのはデントの深さであったことを明らかにした。Zeinoddini *et al.*[22]は異なる深さの単純なデントを持つ 3 本の鋼管を対象に小規模な軸圧縮実験を行い、デントの深さが深くなるのに従い、耐荷重に関連するすべてのパラメータの値が減少したことを明らかにした。Stankovic *et al.*[23]は異なる深さのデントが生じた 3 本のアルミ製パイプを対象に軸圧縮実験を実施し、デントの深さが増すにつれて臨界荷重が有意に減少しなくなったことを明らかにした。

1960 年代以降、形状欠陥のあるシェル構造物における軸圧縮の不安定性に関する研究は行われ

てきた。しかし、石油や天然ガスの輸送用のパイプラインにデントが生じた場合に注目した研究は少なく、さらに、長距離にわたる石油や天然ガスの輸送に広く用いられているような大きなサイズの高張力鋼パイプラインに関する軸圧縮座屈実験やシミュレーションの実績は少ない[11]とされている。

1.3 研究の目的

1.3.1 デントを有する鋼管パイプラインの力学的挙動の解明

我が国において、鋼管パイプラインは石油や都市ガスなどを輸送する重要なインフラとして敷設されることも多く、いったん敷設され運用が開始されると、その内容物を長期間に亘り安定して輸送することが求められる。そして、鋼管パイプラインの既存のネットワーク（導管網）は限定的であり冗長性に乏しく、一部に何らかの異常が発生した場合に即座に交換することが困難な場合が想定される。異常を検知した場合もひとまずは運用を続けながら、鋼管パイプラインの内容物の輸送を確保する代替手段（代替のパイプラインの敷設、パイプライン以外での輸送手段（タンクローリーなど）の手配など）を確立できた後、ようやく交換や修繕を行うことができる。鋼管パイプラインの異常の程度を把握して、当面は継続して運用することが可能か、あるいはやむを得ず運用の停止を判断する状況を迎えることが想定され、その判断基準を設定することが必要となる。

鋼管パイプラインにデントが発生した場合、デントの深さや形状などは多岐に亘ることは予想でき、そのデントの程度に応じて、健全な状態と比較してどの程度強度が損なわれているかを定量的に把握することが必要となってくる。その定量的な把握により、パイプラインの運用の継続が可能か、交換や修繕が必要か、の判断につなげることができる。

1.2 ではデントを生じた鋼管の耐荷重について、既往の研究を調査した。研究が多く行われているものの、評価基準の確立には至っていない。特に軸圧縮座屈強度に関する研究はまだ少なく、今後の研究の進展が待たれるところである。また、耐荷重についての各論としての研究は存在するが、特に鋼管パイプラインの敷設環境（埋設されている状況を反映した土圧や地盤ばねの作用）を考慮した研究は少ない。

以上から、本研究では、デントを有する鋼管パイプラインについて、鋼管パイプラインの実際の運用の状態を想定した上で、その運用状態で裁荷される外力に関しての研究を進め、鋼管パイプラインの力学的挙動を明らかにする。

1.3.2 デントを有する鋼管パイプラインの地震時の変形特性の確認

デントの存在で想定するリスクについて 1.1.3 で紹介した通り、海外の研究では地震による損傷が想定されていないため、我が国では地震時のリスクについて考慮する必要がある。社会における重要なインフラである鋼管パイプラインは、地震時にその機能を維持できていない場合、地震後の市民生活、経済活動の復旧に大きな支障となる。

デントを生じた鋼管パイプラインの耐震性が確保されていない場合など、来るべき地震に備えるために速やかに修繕をすべきであり、耐震性が確保されている場合は、管体腐食の進行などの他のリスクとの兼ね合いから修繕時期を延期する、といった対応も可能になる。

以上から、本研究では 1.3.1 で述べた力学的挙動の解明結果について、地震時にはどうなるのか、デントを有する鋼管パイプラインの地震時の外力（地震動、地盤の液状化）に対する変形特性を明らかにする。地震動に対して、鋼管パイプラインの耐震設計基準類に照らして、軸圧縮座屈の発生の有無という尺度で耐震性を判定する。地盤の液状化に対して、デントを有する鋼管パイプラインの曲げによる局部座屈の実験と、解析による実験結果の再現までを行い、今後の研究進展の方向性を示す。

1.4 本論文の構成

本論文は、以下のように構成されている。

本章では、はじめにデントの定義、デントの存在で想定されるリスクを提示し、地震時の変形特性について探求するに至った研究の背景を説明した。次にデントに関する既往の研究内容とそれぞれの現状を理解し、先行研究の成果を紹介し、本研究の位置づけや価値を明確にする。

第2章では、デントを有する鋼管パイプラインの実管を使用した軸圧縮座屈実験の内容と、有限要素解析による実験結果の再現状況を紹介した上で、部分的にデントを有する鋼管パイプラインの軸圧縮座屈解析モデルの確立方法および軸圧縮座屈特性の評価方法について、その妥当性と合わせて説明する。

第3章では、第2章で確立させた解析モデルを使用して、特に都市ガスのパイプライン形成に使用されている鋼管を対象として、デントの形状、深さ、運用圧力（内圧）や埋設条件の考慮などを組み合わせた軸圧縮座屈解析パラメータスタディの結果を紹介する。

第4章では、デントを有する鋼管パイプラインの実管を使用した曲げによる局部座屈実験の内容と、有限要素解析による実験結果の再現状況について紹介する。そして、曲げによる局部座屈に関する今後の研究課題を示す。

第5章では、第3章で示した軸圧縮座屈パラメータスタディ結果を、鋼管パイプラインの耐震性の考え方に照らして、耐震性を判定する。まず、耐震性の検討を進める上での基本的知識として、パイプラインの耐震性検討の考え方や手法について紹介し、本論文で採用する耐震性の判定の考え方を示す。その上で、第3章で得られた軸圧縮座屈解析パラメータスタディの結果について、具体的に耐震性を判定する。

第6章では、本論文の結論を整理して紹介し、今後取り組むべき課題を明確にすることや研究の進捗の将来展望を述べる。

第2章 鋼管の軸圧縮座屈実験と解析による再現

2.1 概説

1.1 で述べた通り、鋼管パイプラインにデントが生じた場合、その耐震性を評価し、取り替えの要否を検討することが必要になる。本章では、我が国で実際に発見されたデントを有する鋼管について、デントを含んだ形で部分的に切り取り、埋設された環境下で軸圧縮座屈を発生させる可能性のある地震動にさらされた場合を想定した実管実験の結果を紹介する。そして、その実験結果を再現できる解析モデルを確立させて、第3章以降のパラメータスタディに活用するのであるが、解析モデル確立に際していくつかの留意すべき点がある。その留意点について解説した。

2.2 で、実管を用いた軸圧縮座屈実験2例（日本産業規格（JIS）準抛の鋼管を用いた実験、および米国石油協会（API）規格準抛の鋼管を用いた実験）を紹介する。

2.3 で、軸圧縮座屈実験結果を有限要素解析（FEA）で再現することを試みたが、再現にあたって留意すべき内容（デント部の残留ひずみを考慮すべきか、考慮しなくてもよいのか）をまとめている。

2.4 で、埋設環境を考慮し、鋼管パイプラインと環境が似ている鋼管杭の設計上の注意点を参考に、適切な解析モデル長さを確立した結果を紹介している。

2.5 では、鋼管パイプラインの形状的な特徴から、部分的にデントを含んだ鋼管パイプライン全体の耐震性（軸圧縮座屈に対する耐震性）を評価する場合に留意すべき点を解説する。

2.2 軸圧縮座屈実験

2.2.1 日本産業規格準抛の鋼管を使用した実験

都市ガス事業者にて、供用中の都市ガス導管の検査の結果、部分的にデントを生じている導管を発見した。その都市ガス導管を、デントを含んだ形で部分的に切り取り、軸圧縮座屈実験の供試体として使用した。

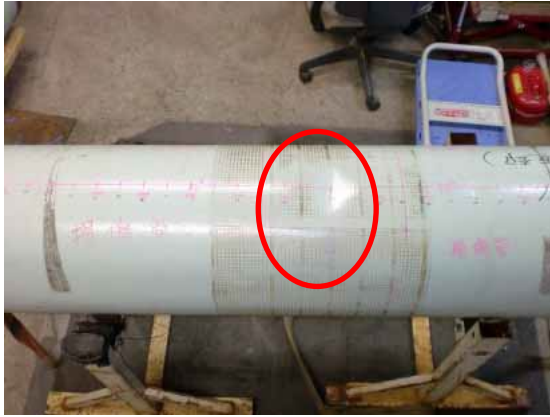
(1) 供試体

表-2.1 に鋼管パイプラインの仕様とデント寸法、図-2.1, 2.2, 2.3 にデントの形状に関する状況（写真、模式図、形状計測結果）を示す。ここで、鋼管の管軸方向のデント長さを L_D 、管周方向のデント幅を H_D 、深さを D_D と表現する。

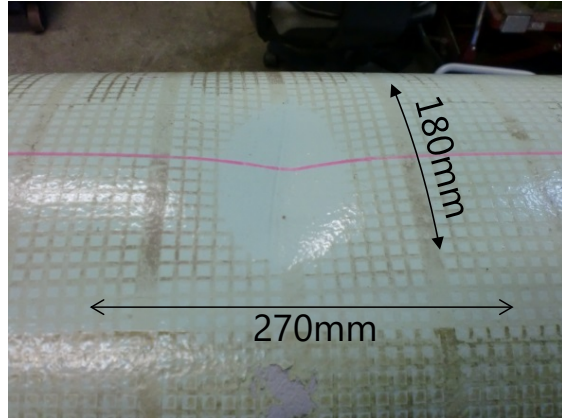
デントは、建設機械による打撃によって発生したものと思われる。具体的には、道路を掘削機にて掘削中に、バケットなどが道路下に埋設された鋼管の管軸方向と直交する形で強く押し当てられ、線状の荷重が付加されたことにより、図-2.1（拡大図）に見られるように底部が線状の（管周方向に細長い）デントが形成されたものと思われる。荷重の載荷イメージを図-2.4 に示す。

表-2.1 デントを有する鋼管仕様

仕様	呼び径	管外径 (mm)	管厚 (mm)	デント寸法 (mm) 軸長 L_D , 周長 H_D , 深さ D_D
配管用炭素鋼鋼管 (JIS G 3452 SGP)	400A	406.9	7.9	270, 180, 11.2

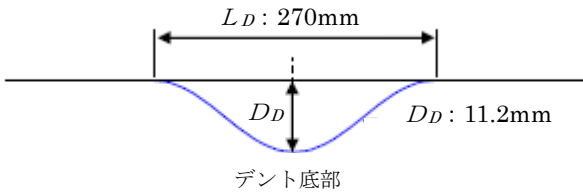


(全体)

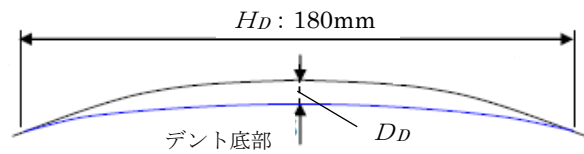


(拡大図)

図-2.1 デントを有する鋼管の写真



(鋼管の側面からの見取図)



(鋼管の長手方向からの見取図)

図-2.2 デント部の形状 模式図

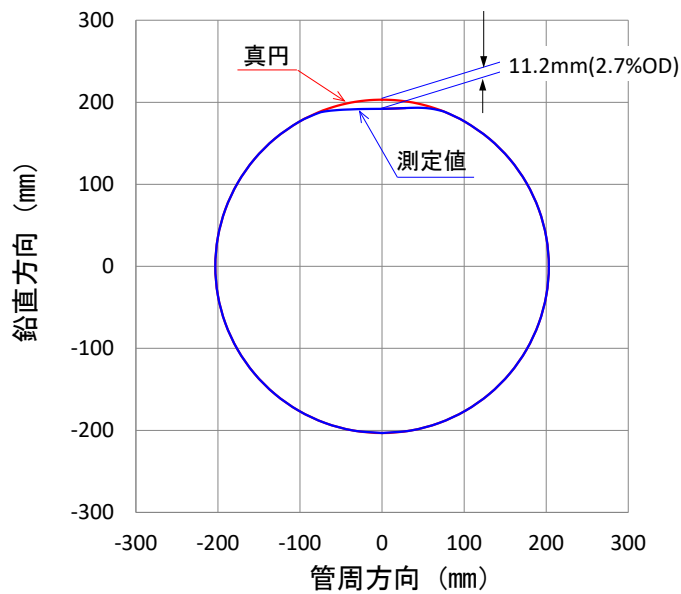


図-2.3 デント部の形状計測結果

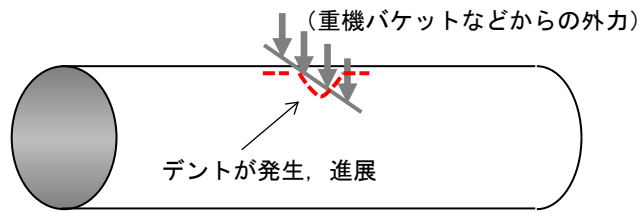


図-2.4 荷重の载荷イメージ

基礎データ取得のため、材料試験を実施した。米国石油協会（API）の API 5L 引張試験片による軸方向引張試験を実施した結果、降伏強度 $YS=333\text{MPa}$ 、引張強度 $TS=416\text{MPa}$ のラウンドハウス（Roundhouse, RH）型 [24] の材料特性が得られた。試験片の状況を図-2.5、試験結果から得られた応力-ひずみ曲線を図-2.6 に示す。

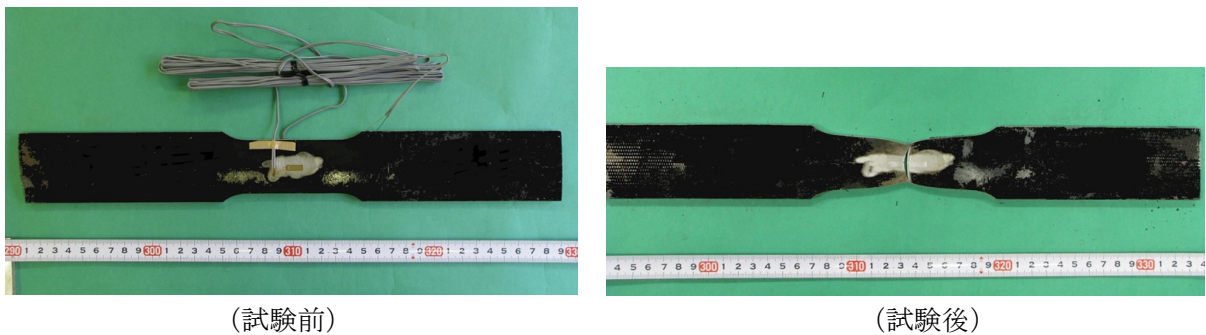


図-2.5 引張試験片（API 5L 引張試験片）

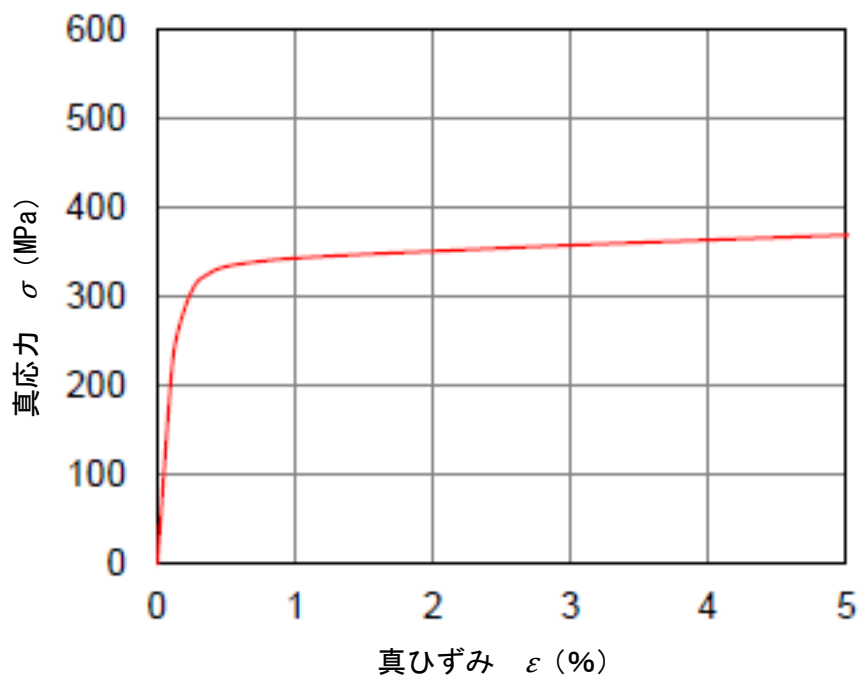


図-2.6 鋼管の軸方向応力-ひずみ曲線

(2) 実験装置および計測項目

上記(1)で示した供試体を用いて、軸圧縮座屈実験を実施した。比較のため、供試体と同種のデントを有しない健全な鋼管も用意して軸圧縮座屈実験を実施した。

実験に先立ち、供試体の管厚計測を行った。健全な鋼管、デントを有する鋼管の両端について30°ピッチで超音波板厚計を用いて計測した。計測位置を図-2.7に、計測結果を表-2.2に示す。

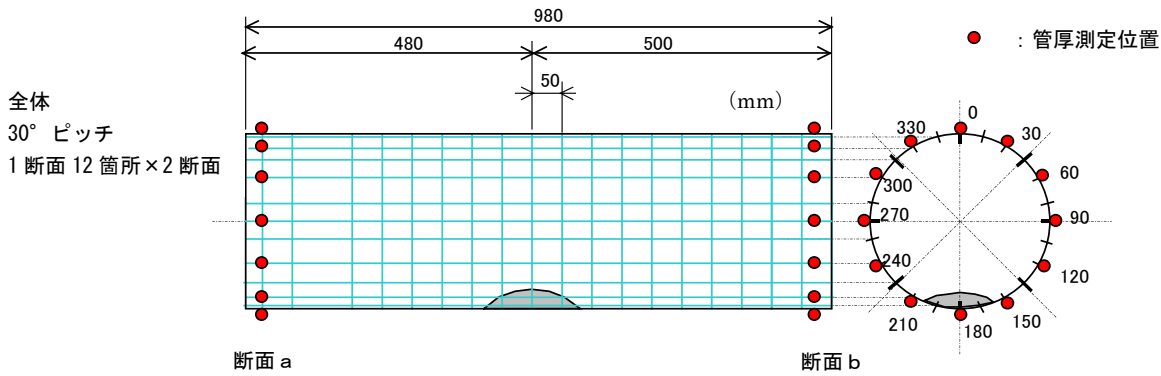


図-2.7 管厚計測位置

表-2.2 管厚計測結果

(mm)

角度		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
健全管	断面 a	7.50	7.91	7.87	7.88	7.87	7.92	7.87	7.89	7.81	7.73	7.81	7.68
	断面 b	7.86	7.87	7.95	7.84	7.90	7.91	7.87	7.84	7.98	7.77	7.74	7.68
デント管	断面 a	8.07	8.06	7.90	7.88	7.75	8.14	7.70	7.88	7.95	7.98	8.02	7.90
	断面 b	8.07	8.00	7.83	7.95	7.75	7.75	7.65	7.74	7.90	7.85	8.06	7.95

軸圧縮座屈実験装置の外観を図-2.7に示す。供試体を5000kN 万能試験機の下部クロスヘッドと下部耐圧盤の間にセットし、下部クロスヘッドを下方に移動させて供試体に軸圧縮変形を与えた。供試体の座屈（最大荷重点）を確認した後、座屈変形が十分進行するまで载荷を行った。実験時の外観を図-2.8～図-2.9に示す。

計測項目は、圧縮荷重、供試体上下端板間変位、供試体のひずみである。変位計測位置を図-2.10に示す。供試体のデント中心位置を0°とし、見下ろし図で時計回りに90°ピッチの位置において、上下端板間の変位を計測した。



図-2.7 軸圧縮座屈実験装置
(5000kN 万能試験機)



図-2.8 健全管の実験状況



図-2.9 デントを有する鋼管の
実験状況

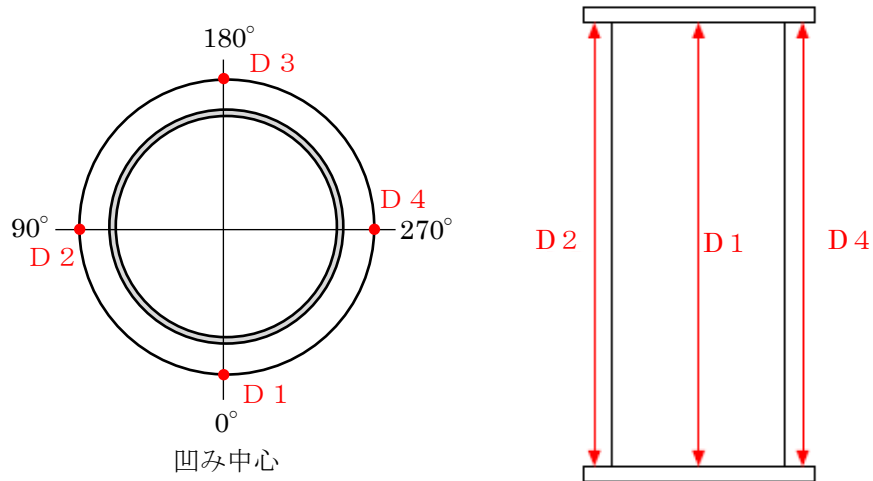


図-2.10 変位計測位置図

ひずみの計測方法は、一軸ひずみゲージを鋼管の中心部からの角度 45 度ピッチで管軸方向 8 ラインに、中心部と上下 200mm 位置に設置した。さらにデント部を中心に上下 100mm、両側 30 度の領域には、一軸ひずみゲージを 50mm 格子点に設置した。計測位置を図-2.11 に示す。

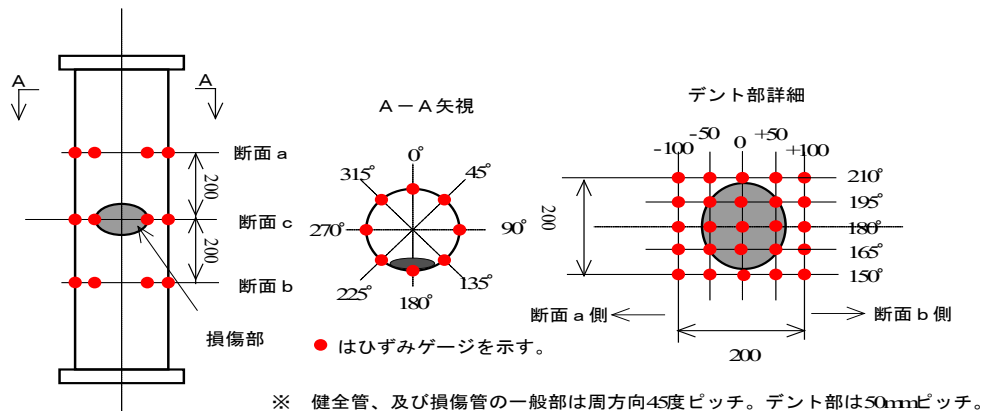


図-2.11 ひずみ計測位置図

(3) 実験結果

健全な鋼管，デントを有する鋼管の実験前後の写真をそれぞれ図-2.12，図-2.13に示す。

図-2.12 (実験後) に示すように，健全な鋼管では上部部に座屈波形が発生している。図-2.13 (実験後) に示すデントを有する鋼管では，軸圧縮変形によって初期のデントが成長している。



(実験前)

(実験後)

(実験前)

(実験後)

図-2.12 健全な鋼管の軸圧縮座屈実験

図-2.13 デントを有する鋼管の軸圧縮座屈実験

軸圧縮座屈実験で得られた軸応力 σ と軸ひずみ ϵ_n ($\epsilon_n = \delta/L$ ， L ：パイプ長さ， δ ：圧縮変形量。以下，これを公称軸ひずみと呼ぶ) の関係を図-2.14に示す。さらに，各々の最大軸応力 σ_{max} と，圧縮軸ひずみ (管周方向の平均) ϵ_{ncr} を表-2.3に示す。ここに ϵ_{ncr} は，最大軸圧縮応力における圧縮変形量を，供試体の全長で除して求める。

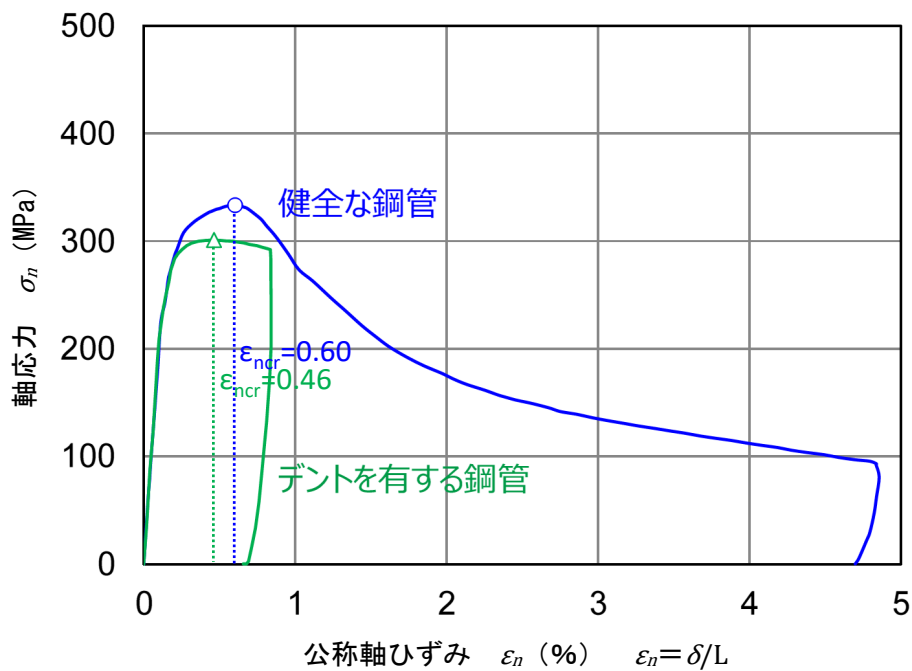


図-2.14 鋼管の軸圧縮実験結果

表-2.3 最大軸応力と平均圧縮軸ひずみ

供試体	管径管厚比 D/t	最大軸応力 σ_{max} (MPa)	座屈開始時の 平均圧縮軸ひずみ ϵ_{ncr} (%)
健全な鋼管	51.5	333	0.60
デントを有する鋼管	51.5	301	0.46

図-2.14 に示す健全な鋼管の応力-ひずみ曲線は、 $\sigma_{max}=333\text{MPa}$ と $\epsilon_{ncr}=0.60\%$ で極大値に達した後、座屈波形の成長に伴って ϵ_n が 4.8%まで増加した段階で実験を終了した。これに対し、デントを有する鋼管の応力-ひずみ曲線は、 $\epsilon_{ncr}=0.46\%$ で極大値 $\sigma_{max}=301\text{MPa}$ を示している。デントを有する鋼管の σ_{max} と ϵ_{ncr} が、健全な鋼管よりもそれぞれ 10%と 23%小さくなっているのはデントの影響である。デントを有する鋼管の実験は、デント部分が折れるように供試体が変形して実験装置に過大な偏芯荷重が载荷されたため、 ϵ_n が ϵ_{ncr} の 2 倍程度に達した段階で終了した。

2.2.2 米国石油協会規格準拠の鋼管を使用した実験

2.2.1 と同じく、都市ガス事業者にて、供用中の都市ガス導管の検査の結果、部分的にデントを生じている導管を発見した。その都市ガス導管を、デントを含んだ形で部分的に切り取り、軸圧縮座屈実験の供試体として使用した。

(1) 供試体

表-2.4 に今回用いた鋼管の仕様とデント寸法、図-2.15、図-2.16、図-2.17 にデントの形状に関する状況（写真、模式図、形状計測結果）を示す。この鋼管は、米国石油協会（API）規格に準拠したラインパイプである。ここで、鋼管の管軸方向のデント長さを L_D 、管周方向のデント幅を H_D 、深さを D_D と表現する。

表-2.4 デントを有する鋼管仕様

仕様	呼び径	管外径 (mm)	管厚 (mm)	デント寸法 (mm) 軸長 L_D , 周長 H_D , 深さ D_D
ラインパイプ (API 5L L360)	600A	610.0	10.3	1200, 532, 14.5



図-2.15 デントを有する鋼管（写真）

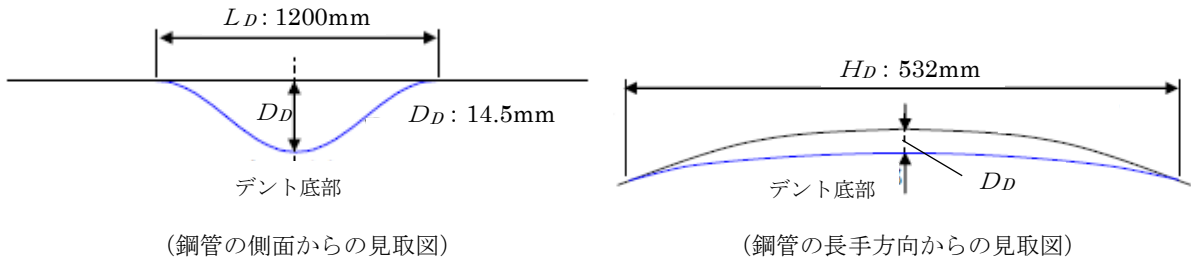


図-2.16 デント部の形状 模式図

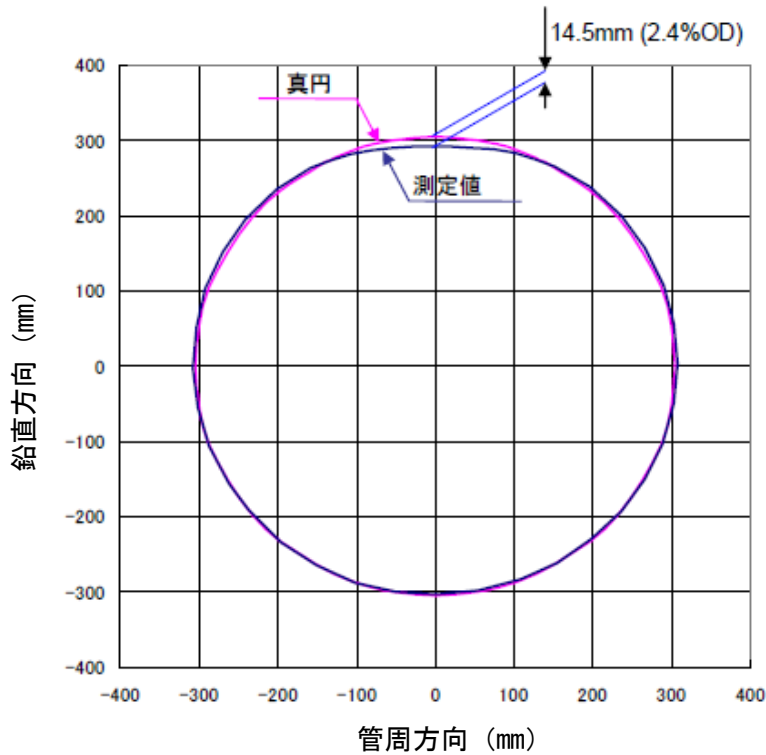


図-2.17 デント部の形状計測結果

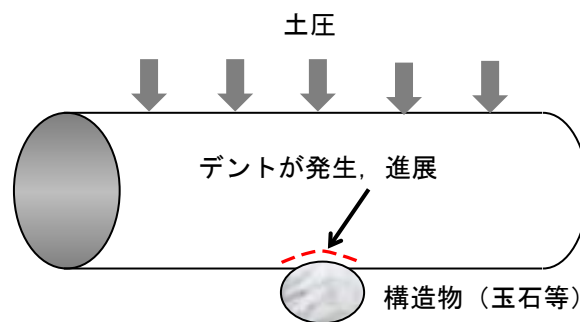


図-2.18 荷重およびデントの進展イメージ

デントは、当該ガス導管を敷設後に地盤の不等沈下により下側の構造物（玉石等）に接触し、土荷重が载荷され続けたことにより発生したものである。下側の構造物（玉石等）が接触点にて当該ガス導管を担ぐような状況になり、デントが進展していったものと思われる。荷重の载荷およびデントの進展イメージを図-2.18に示す。

基礎データ取得のため、鋼管の材料特性試験を実施した。米国石油協会（API）の API 5L 引張試験片による軸方向引張試験を実施した結果、降伏強度 $YS=412\text{MPa}$ 、引張強度 $TS=487\text{MPa}$ の材料特性が得られた。

軸方向応力-ひずみ曲線を図-2.19 に示す。なお、今回の鋼管は、日本の高圧ガス導管が準拠することが多い米国石油協会（API）のラインパイプ規格に定められたグレード L360（X52）の鋼管として敷設されたものであった。図-2.19 には、グレード L360（X52）の鋼管における降伏強度（YS）の下限値・上限値も合わせて示している。

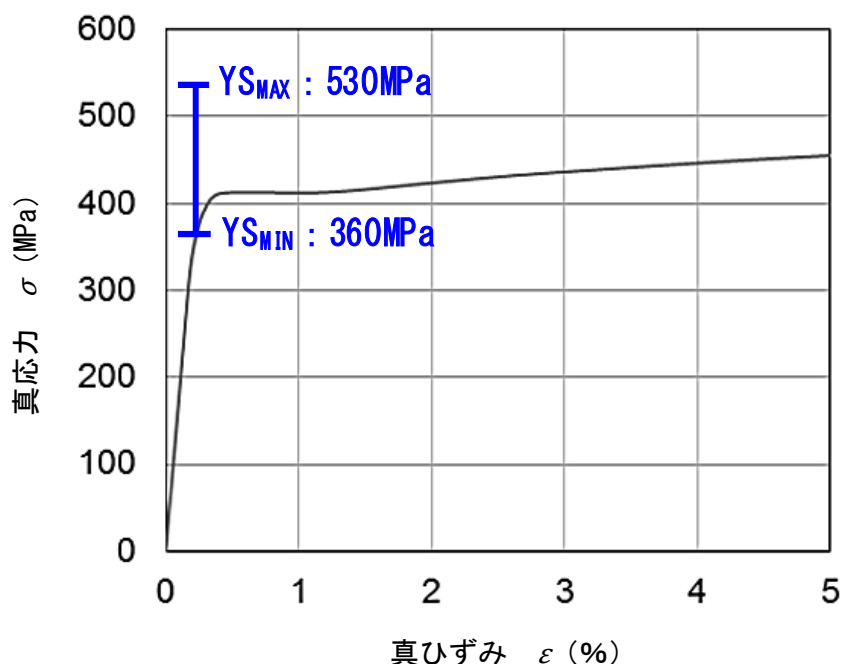


図-2.19 鋼管の軸方向応力-ひずみ曲線

(2) 実験装置および計測項目

上記 (1) で示した供試体を用いて、軸圧縮座屈実験を実施した。

軸圧縮座屈実験装置の外観を図-2.20 に示す。供試体を 10MN 構造試験機の下部クロスヘッドと下部耐圧盤の間にセットし、下部クロスヘッドを下方に移動させて供試体に軸圧縮変形を与えた。

供試体の座屈（最大荷重点）を確認した後、座屈変形が十分進行するまで载荷を行った。

計測項目は、圧縮荷重、供試体上下端板間変位、供試体のひずみである。計測項目および計測に使用した機器を表-2.5 にまとめる。

変位計測位置を図-2.21 に示す。供試体のデント中心位置を 0° とし、見下ろし図で時計回りに 90° ピッチの位置において、上下端板間の変位を計測した。供試体鋼管表面からの位置は 80mm とした。また、ひずみ計測位置を図-2.22 に示す。

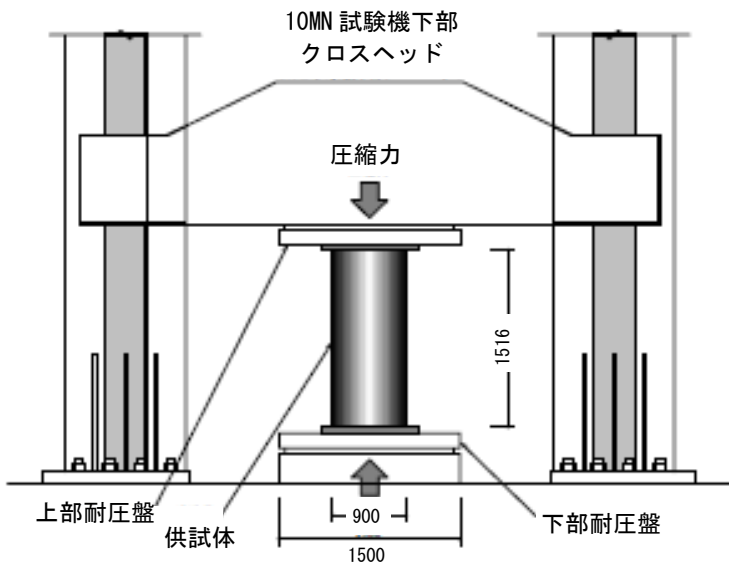


図-2.20 鋼管の軸圧縮実験装置 (10MN 構造試験機)

表-2.5 計測項目

計測項目	計測機器・方法	計測点数
圧縮荷重	10MN 試験機荷重計	1
供試体上下端板間変位	変位計	4
供試体のひずみ	1 軸ひずみゲージ	32
	2 軸ひずみゲージ	8

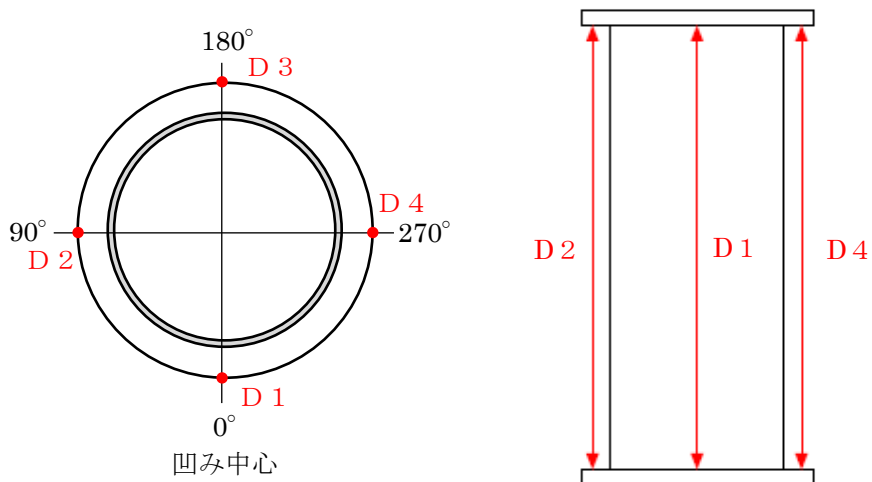


図-2.21 変位計測位置図

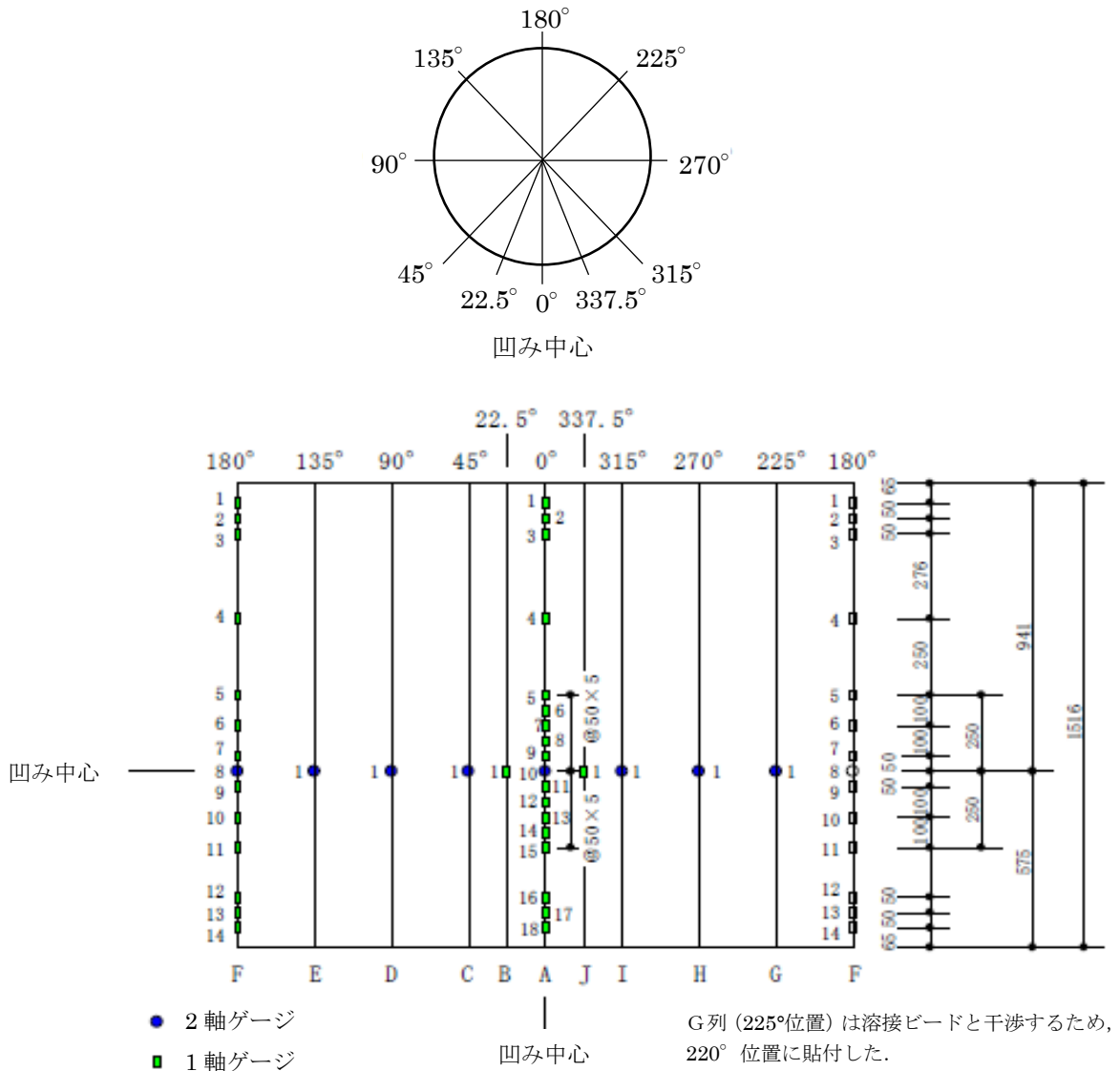


図-2.22 ひずみ計測位置図

(3) 実験結果

供試体（デントあり）の軸圧縮座屈実験前後の写真を図-2.23に示す。圧縮によって初期のデントの凹みが進行している他、固定点である鋼板近傍でも座屈が見られる。

軸圧縮座屈実験で得られた軸応力 σ ($\sigma = P/A$, P : 荷重, A : 鋼管の断面積) と軸ひずみ ϵ_n ($\epsilon_n = \delta/L$, L : パイプ長さ, δ : 圧縮変形量. 公称軸ひずみとする) の関係を図-2.24に示す。さらに、最大軸応力 σ_{max} と座屈開始時のひずみ ϵ_{ncr} を表-2.5に示す。ここに ϵ_{ncr} は、最大軸圧縮応力における圧縮変形量を、供試体の全長で除した平均圧縮軸ひずみである。 ϵ_n が ϵ_{ncr} の4倍弱程度に達した段階で実験を終了した。



(実験前)



(実験後)

図-2.23 デントを有する鋼管の軸圧縮座屈実験

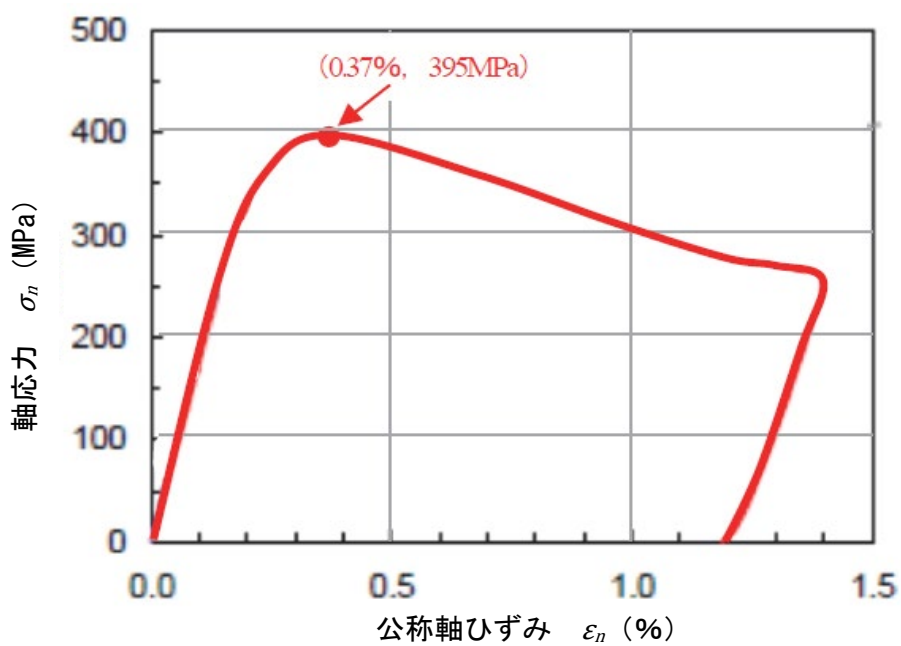


図-2.24 軸圧縮座屈実験結果 (応力-ひずみ曲線)

表-2.6 最大軸応力と平均圧縮軸ひずみ

供試体	管径管厚比 D/t	最大軸応力 σ_{max} (MPa)	座屈開始時の 平均圧縮軸ひずみ ϵ_{ncr} (%)
デントを有する鋼管	59.2	395	0.37

2.3 軸圧縮座屈実験の有限要素解析による再現

2.3.1 健全な鋼管の実験結果の再現

ここでは、2.2 で紹介した健全な鋼管パイプラインの軸圧縮座屈実験結果の有限要素解析 (FEA) による再現結果を示す。

有限要素解析には汎用構造解析コード ADINA-9.1.2 (ADINAR&D Inc : ADINA USERS MANUAL ver. 9.1.2, 2015) を使用し、鋼管は 4 節点シェル要素で分割した。解析モデルおよび解析の境界条件を図-2.25 に示す。全長 980mm の鋼管パイプライン (公称外径の約 2.5 倍) を 98 分割し、全周 1277mm を 72 分割したフルモデルとした。4 節点シェル要素の大きさは、長さ 10mm で幅 17.7mm である。

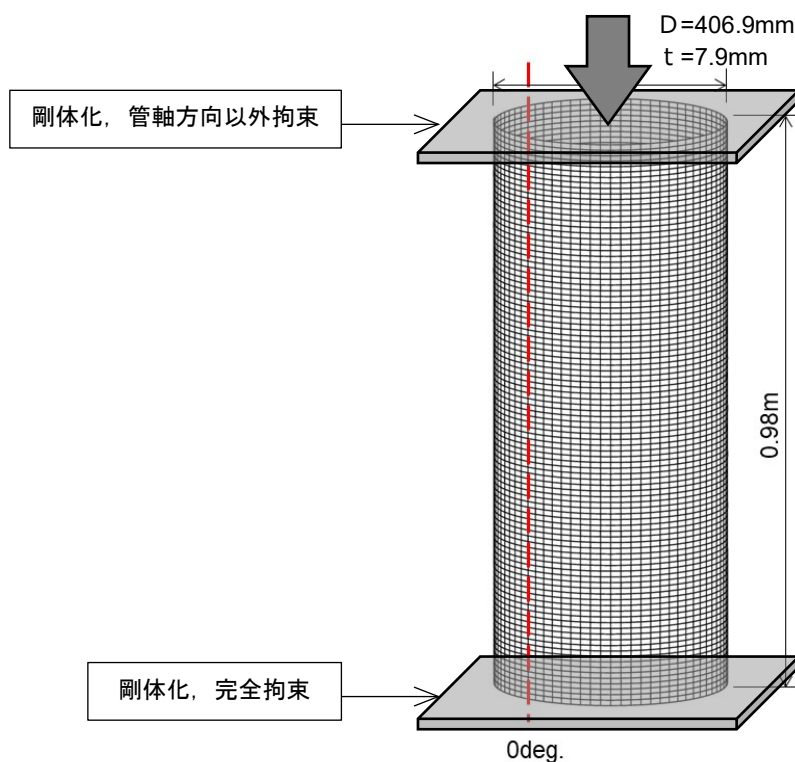


図-2.25 有限要素解析モデル図 (健全な鋼管, 鋼管パイプライン SGP 管)

実験時の材料試験で得られた材料特性 (図-2.6 参照) を、バイリニア型の簡易な形ではなく、降伏点以降も真ひずみ 0.1% 刻みで忠実に解析モデルに反映し、管厚計測結果 (表-2.2 参照) も忠実に解析モデルに反映して、FEA を実施した。健全な鋼管の実験結果 (TEST) と (FEA) の比較結果を示す。図-2.26, 図-2.27 は実験と解析の変形曲線の比較である。図-2.26 は荷重-変位曲線, 図-2.27 は応力-ひずみ曲線である。極大値までの変形曲線は TEST と FEA で良く一致しているが、極大値以降は FEA がやや小さくなっている。局部座屈開始ひずみは TEST が 0.60%, FEA が 0.58% であり、FEA の精度は十分と考えられる。

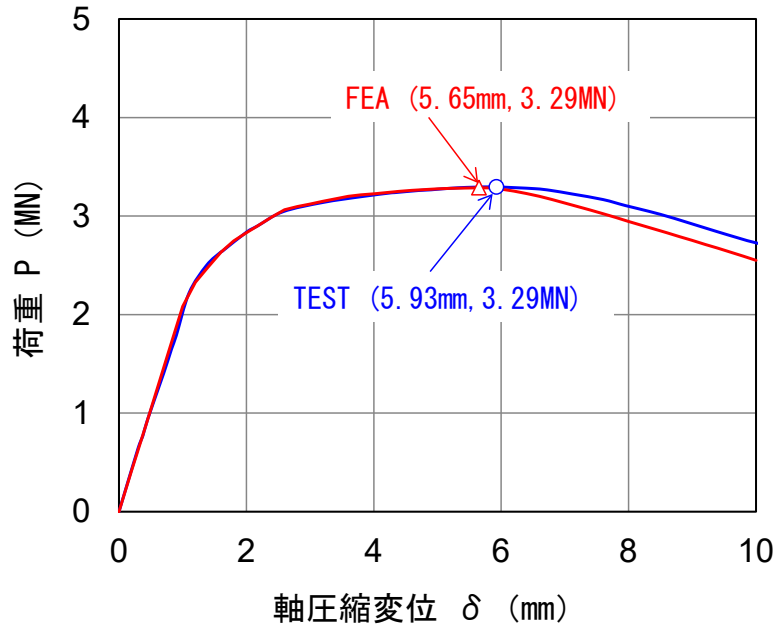


図-2.26 健全な鋼管の実験結果と有限要素解析結果の比較（荷重－変位曲線）

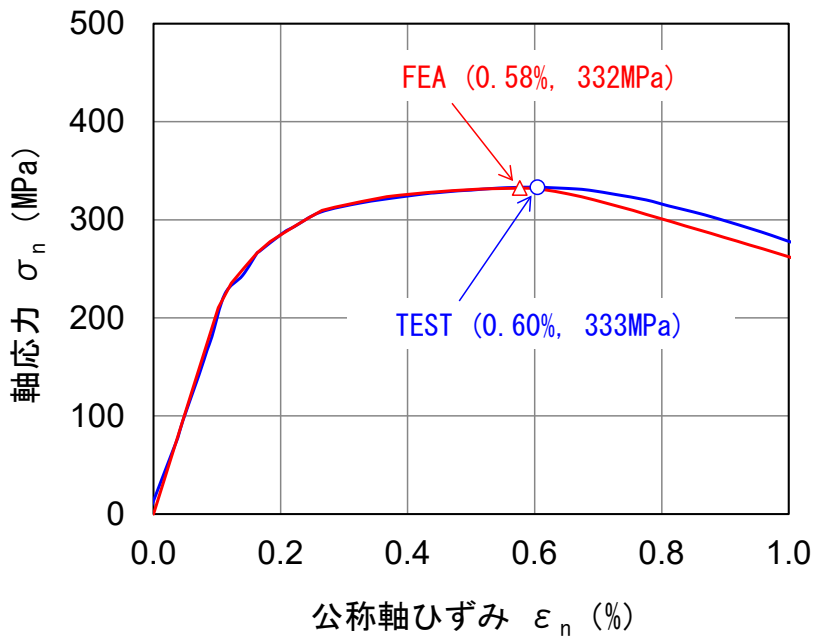


図-2.27 健全な鋼管の実験結果と有限要素解析結果の比較（応力－ひずみ曲線）

図-2.28 に健全な鋼管の軸ひずみ分布と変形状況を3段階について示す。ここに、 $0.5\epsilon_{ncr}$ 、 ϵ_{ncr} 、 $1.5\epsilon_{ncr}$ はそれぞれ、平均圧縮軸ひずみが局部座屈開始ひずみ ϵ_{ncr} の0.5、1.0、1.5倍の変形段階を表している。図-2.28 に示すように、圧縮変形が $0.5\epsilon_{ncr}$ の段階では、軸ひずみが鋼管全体に様に分布している。さらに $1.0\epsilon_{ncr}$ の変形段階では、鋼管の両端付近にひずみが集中し、 $1.5\epsilon_{ncr}$ の段階で鋼管上端部に座屈波形が成長しており、TEST と FEA は良く一致している。これは、管厚の測定結果と材料特性を FEA に忠実に反映したことによるものと考えている。

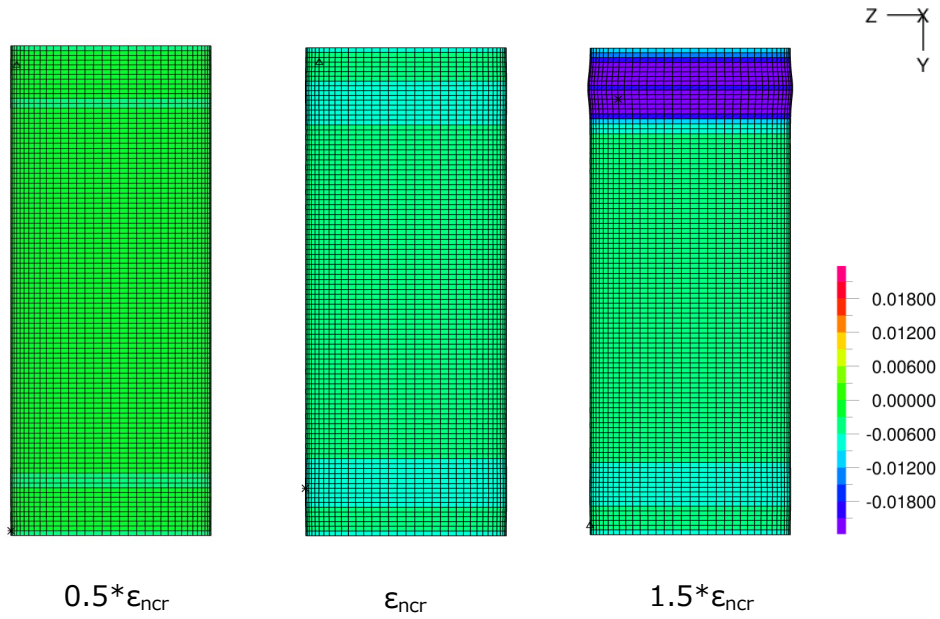


図-2.28 健全な鋼管の軸ひずみ分布

前述の3段階における健全な鋼管の軸ひずみ分布 ϵ_L を図-2.29 に示す。実線が FEA の結果で、白抜きマークがひずみゲージで計測した TEST データである。局部変形がない軸対称鋼管であるため、任意の軸線に沿ったひずみ分布は同一であるが、参考までに、図-2.29 では、任意の軸線 (0deg) に沿った軸ひずみ分布を左図に、その正反対 (180deg) に沿った軸ひずみ分布を右図に示す。

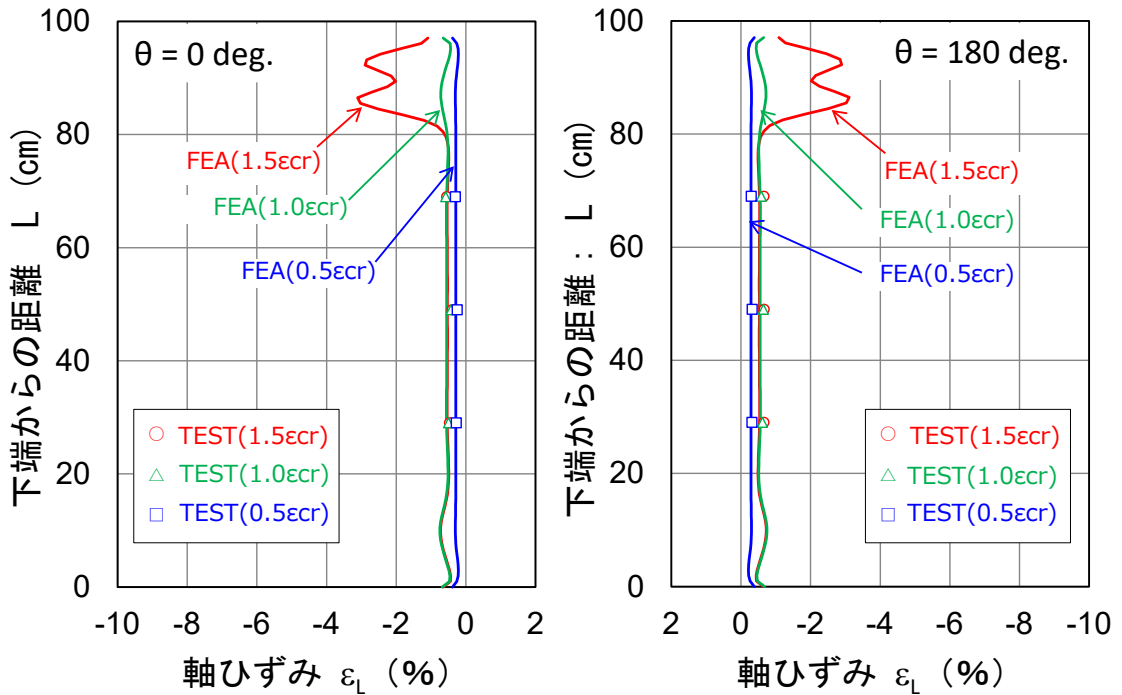


図-2.29 健全な鋼管の軸ひずみ分布 (管軸方向)

また、鋼管の軸方向中心（ $L=49\text{cm}$ ）での軸ひずみ ε_L と、公称軸ひずみ ε_n の関係を図-2.30 に示す。赤丸の試験結果（周方向平均）と、赤線の解析結果（周方向平均）は、良く一致している。図-2.29、図-2.30 に示すように、FEA と TEST は良く一致していることが分かる。

以上より、汎用構造解析コード ADINA-9.1.2 を使用した解析モデルで、健全管の軸圧縮座屈実験結果を精度よく再現できることを示した。

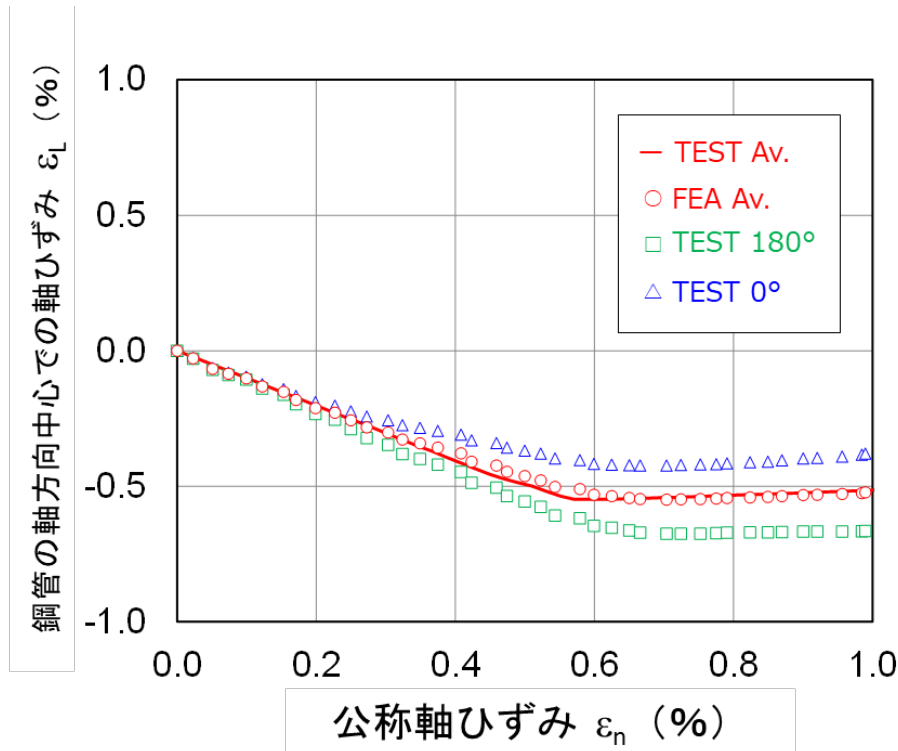


図-2.30 鋼管中央部での軸ひずみ ε_L と公称軸ひずみ ε_n

2.3.2 デントを有する鋼管の実験結果の再現

(1) デントの形成

次に、この解析モデル（デントの無い健全管）に対し、管の中央部に線状の荷重を負荷することにより（図-2.4 参照）、デントを有する鋼管パイプラインの解析モデルを作成した。荷重を載荷し、塑性変形後に除荷して復元力（スプリングバック）を発現させた後でデントの形状が一致するように、荷重の載荷方法については試行錯誤により決定した。デントの再現イメージを図-2.31 に、デント部分の拡大写真およびメッシュ分割を図-2.32 に、再現状況を図-2.33 に示す。解析モデルの変形状況（青線）は、デントの実測値（赤丸）によく一致させることができた。

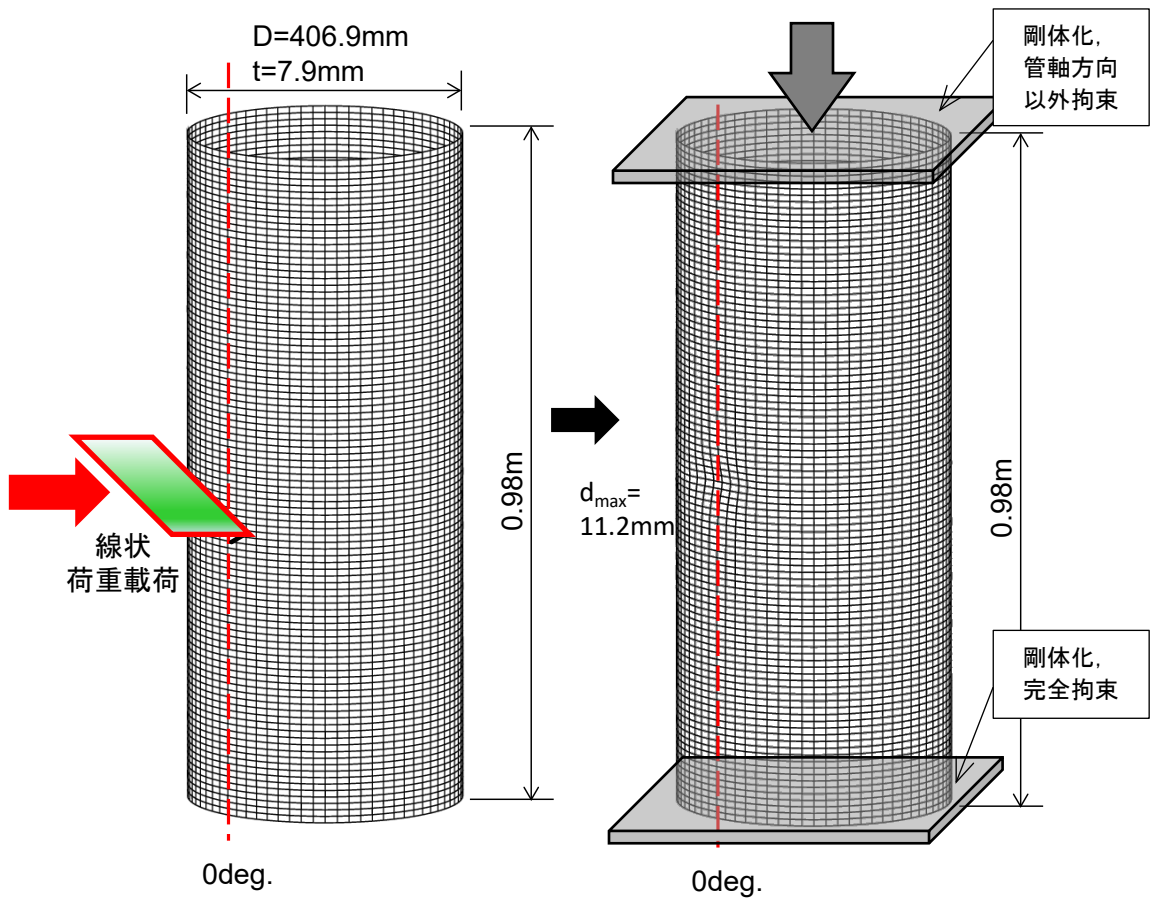


図-2.31 有限要素解析モデル図（線状デント作成，軸圧縮解析）

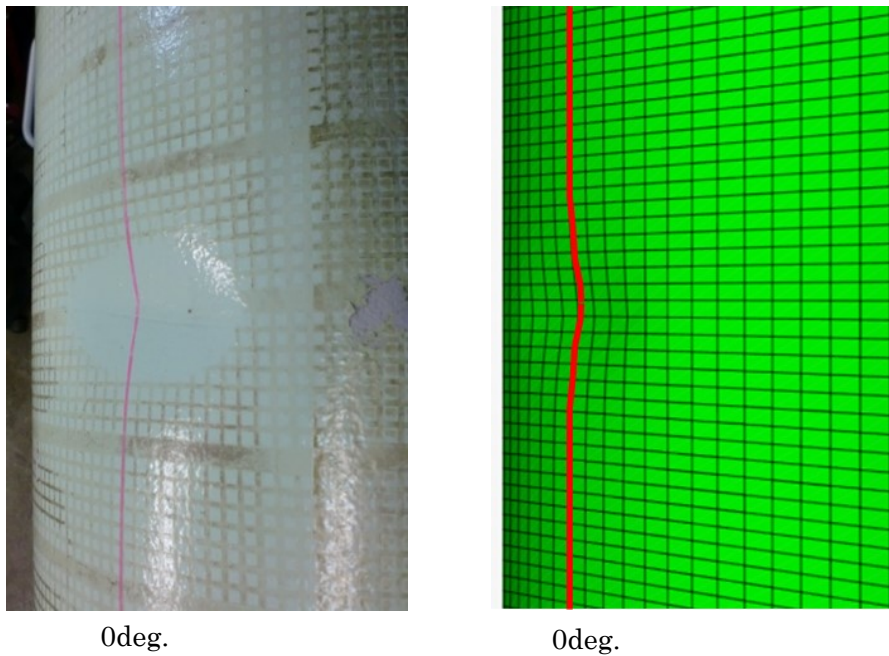


図-2.32 デント部分の拡大写真およびメッシュ分割

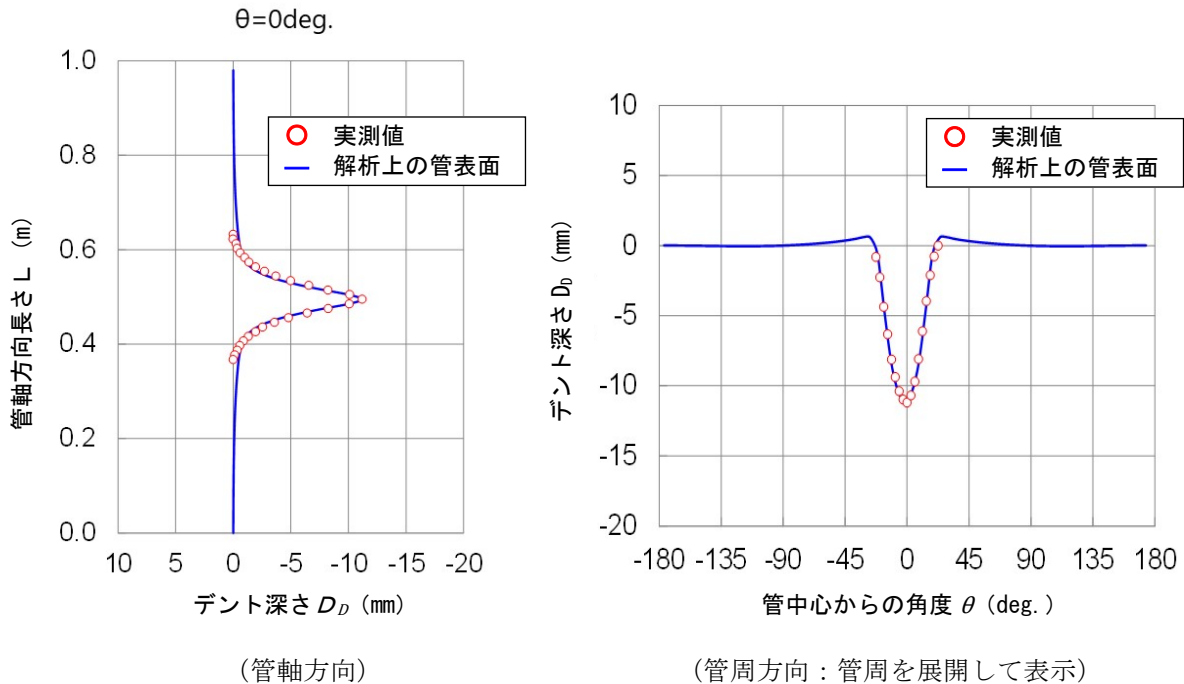


図-2.33 モデル化したデントの形状

(2) 鋼管パイプラインの運用現場で必要な解析モデル

ここで、デントを有する鋼管パイプラインの軸圧縮座屈実験結果を解析によって再現する際の留意点について考察する。

実際にデントを有する鋼管は、健全な状態から外力（今回の線状デントは建設機械による打撃と推定している）を受け、塑性変形が生じているため、デント部分には塑性ひずみが残留している。これに対し、上記で作成したデント解析モデルでは、健全な鋼管の解析モデルに荷重を加え塑性変形した状態を模擬しており、デント形状のみでなく残留している塑性ひずみを忠実に再現したモデルとなっているものと考えられる。しかしながら、軸圧縮座屈解析の実行の前に、デント形成の解析（健全な鋼管の解析モデルに線状荷重の付加解析）を実行する手順を必要としている。

運用中の鋼管パイプラインの実際の現場でデントを発見した場合、デントの形状計測は可能であるが、残留ひずみを測定することは困難である。今回の軸圧縮座屈解析にあたり、デントの形状のみを反映した解析モデル（残留ひずみは存在しない）を準備し、そのモデルでも実験結果を再現することができるとすれば、鋼管パイプラインの運用現場でデントを発見した際の軸圧縮座屈強度の評価が効率的に進められると考えられる。

(3) デント部の残留ひずみの有無による解析結果の比較

上記の理由により、デントを有する鋼管の軸圧縮座屈解析では、デント形成の解析を実施してデントと残留ひずみを存在させた解析モデルと、デント形成の解析後に残留ひずみを除去した（デントの形状を保持した状態でデント部分も健全管と同じ材料特性に置き換えた）解析モデルの2通りを用意して解析を行い、実験結果と比較した。

図-2.34 に、3通り（軸圧縮座屈実験結果、残留ひずみ無しの場合の解析、残留ひずみ考慮の

場合の解析) の比較として応力-ひずみ曲線を示す. 2通りの解析の曲線は, ほぼ同じ軌跡を描いており, 実験結果と良く一致している.

図-2.35, 図-2.36 は, 軸ひずみ分布と変形状況およびデント部の軸ひずみの最大値を, 座屈開始ひずみ ϵ_{ncr} の 0.5, 1.0, 1.5 倍の 3 段階について示している. 両図に示すように, 変形が $0.5\epsilon_{ncr}$ の段階でデントの中央部にひずみが集中している. また $1.0\epsilon_{ncr}$ の段階では, デントの中央部と周縁部にひずみが集中している. さらに $1.5\epsilon_{ncr}$ の段階では, ひずみ集中の範囲がさらに拡大し, デントとは反対側の管端に, 座屈波形の成長に起因するひずみ集中が認められる.

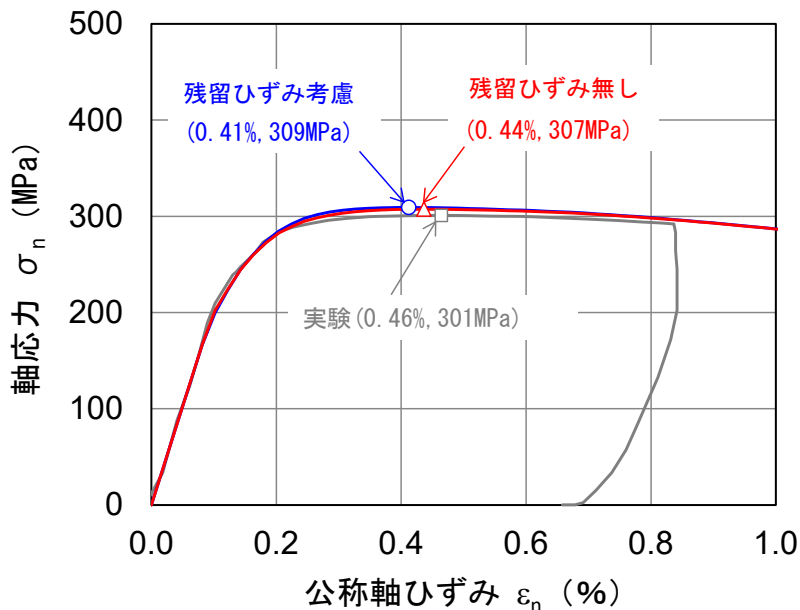


図-2.34 デントを有する鋼管の軸圧縮座屈実験結果と有限要素解析結果の比較 (デント深さ 2.8%の場合)

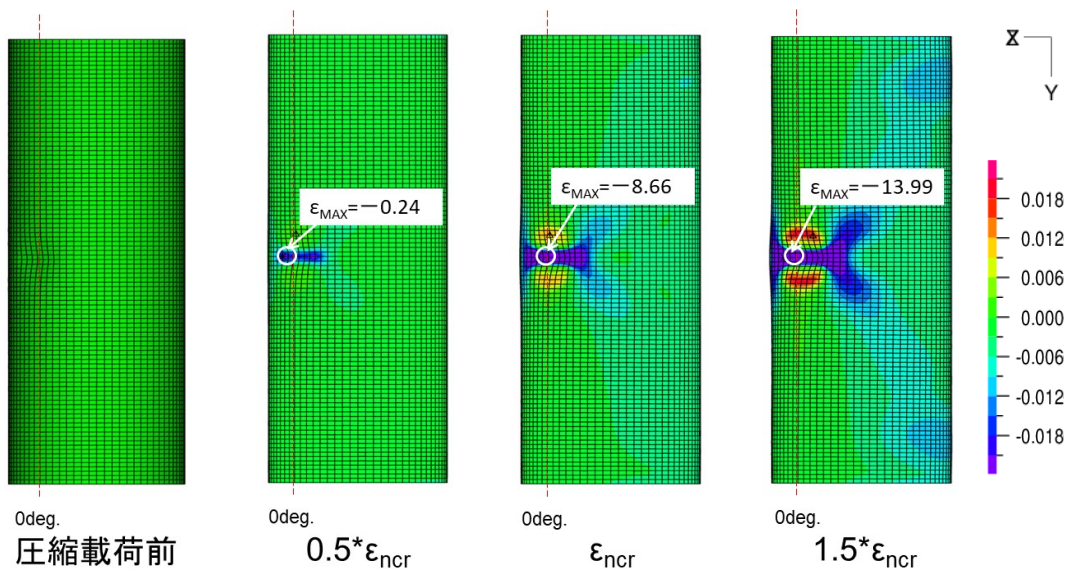


図-2.35 デントを有する鋼管の軸ひずみ分布 (デント深さ 2.8%, 残留ひずみ無し)

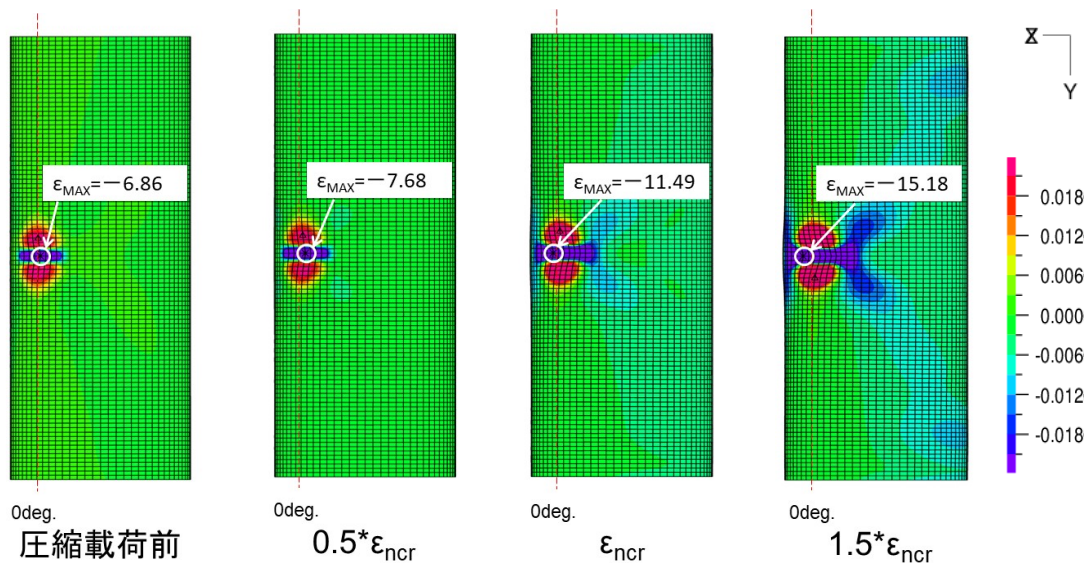


図-2.36 デントを有する鋼管の軸ひずみ分布（デント深さ2.8%，残留ひずみ考慮）

図-2.35，図-2.36を比較すると，デント部分の軸ひずみには違いが見られるが，デント部から離れた部分ではひずみの違いがほとんどなく，座屈波形の成長位置（供試体の両端）でのひずみの進展もほとんど同じである。

表-2.7に，結果のまとめを示す．応力，ひずみの算出結果は実験結果と良く一致している．両方の解析モデル共に，実験結果を再現できていると判断できる。

表-2.7 軸圧縮座屈解析結果まとめ（デント深さ2.8%）

	P_{max} (MN)	δ_{cr} (mm)	σ_{max} (MPa)	ϵ_n (%)
実験	2.98	4.56	301	0.46
FEA（残留ひずみ無し）	3.04	4.28	307	0.44
FEA（残留ひずみ考慮）	3.06	4.04	309	0.41

(4) 実験の進展経過の再現性の確認

以上から，解析による軸圧縮座屈挙動のシミュレーションを行う場合には，デント部の残留ひずみの影響はないことが予想された上で，改めて，軸圧縮実験結果における座屈進展の経過を再現できているかを確認した．確認には，デント部の残留ひずみの無い解析モデルを使用した。

上述の3変形段階（ $0.5\epsilon_{ncr}$ ， ϵ_{ncr} ， $1.5\epsilon_{ncr}$ ）について，実験データ（TEST）と有限要素解析の結果（FEA）の比較を図-2.37に示す．図-2.37の左図にはデントの中央を縦断する母線に沿った軸ひずみ分布を，右図には反対側の母線に沿った軸ひずみ分布を示す．デントの中心部においてFEAがTESTよりもわずかに小さい部分もあるが，全体的に見ればFEAとTESTは良く一致している．有限要素解析モデルは，デントの無い鋼管の場合（図-2.29参照）と同様，デントを有する鋼管の軸圧縮変形解析についても有効である。

また，鋼管の軸方向中心（ $L=49\text{cm}$ ）での軸ひずみ ϵ_L と，公称軸ひずみ ϵ_n の関係を図-2.38に

示す。図-2.30の健全な鋼管の場合と異なり、デントの中央部での比較である。デント中央部のようなひずみが大きく集中する部位でも、FEAとTESTは良く一致している。

以上から、今回の有限要素解析モデルは、実験の進展経過も精度よく再現できていると考えられる。

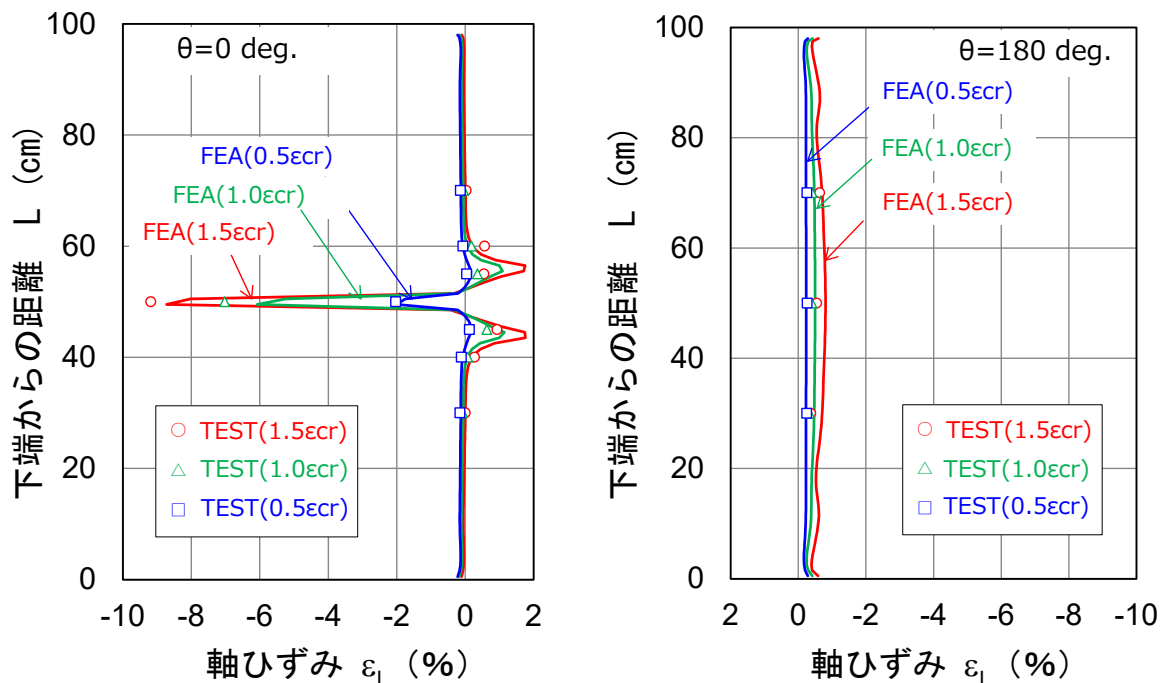


図-2.37 デントを有する鋼管の軸ひずみ分布 (管軸方向)

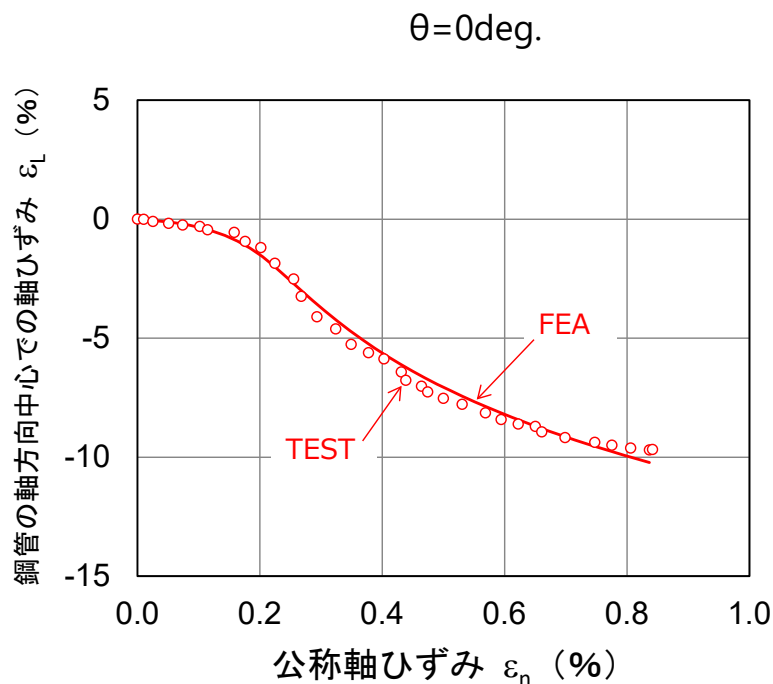


図-2.38 デント中央部での軸ひずみ ϵ_L と公称軸ひずみ ϵ_n

2.3.3 デント部の残留ひずみが軸圧縮座屈特性に及ぼす影響

2.3.2 で、軸圧縮座屈実験結果を有限要素解析で再現できることを示し、また、解析モデルにてデント部の残留ひずみの有無で解析結果に差はないことを示した。デントの深さや形状が変わると、残留ひずみの有無で軸圧縮解析結果が異なる結果になることも考えられる。本節では、デントの深さや形状が変化しても 2.3.2 で得られた傾向が保たれるかどうかを確認した。

(1) デントの深さの影響

デントが深くなるほど残留ひずみも大きくなり、残留ひずみ無し、有りの 2 種類の解析モデルの解析結果に差が出てくることも予想し、鋼管パイプラインの解析モデルでデントを 10% まで深くした場合で軸圧縮座屈解析を行った。

図-2.39 に、応力-ひずみ曲線の比較を示す。2.3.2 と同様、曲線はほぼ同じ軌跡を描いている。

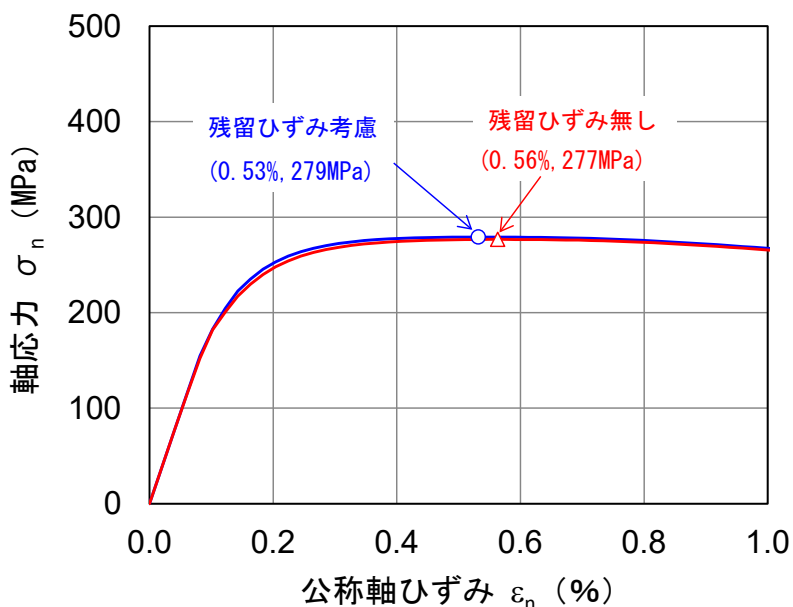


図-2.39 デントを有する鋼管の有限要素解析結果の比較（デント深さ 10% の場合）

図-2.40, 図-2.41 は、図-2.35, 図-2.36 と同様、それぞれのモデルでの軸ひずみの分布と変形状況およびデント部の軸ひずみの最大値である。変形が $0.5\epsilon_{ncr}$ の段階までは、デント部およびその周辺の局所でのひずみには明白な違いが見られるが、デント部から離れた部分ではひずみの違いがほとんどない。また、図-2.35, 図-2.36 でも同様の傾向が見られたが、変形が $1.0\epsilon_{ncr}$, $1.5\epsilon_{ncr}$ と進むにつれ、デント部のひずみの最大値に関しては、残留ひずみ無し、残留ひずみ考慮の場合の差が少なくなっていく。そして変形が $1.5\epsilon_{ncr}$ の段階では、デント部の軸ひずみの最大値に差がほとんどない。

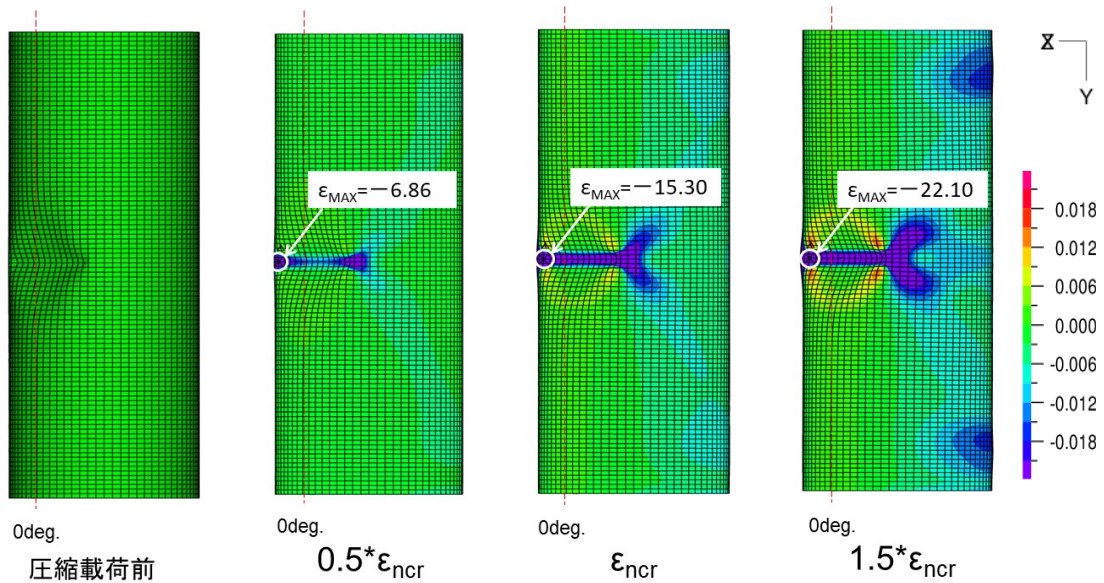


図-2.40 デントを有する鋼管の軸ひずみ分布（デント深さ10%，残留ひずみ無し）

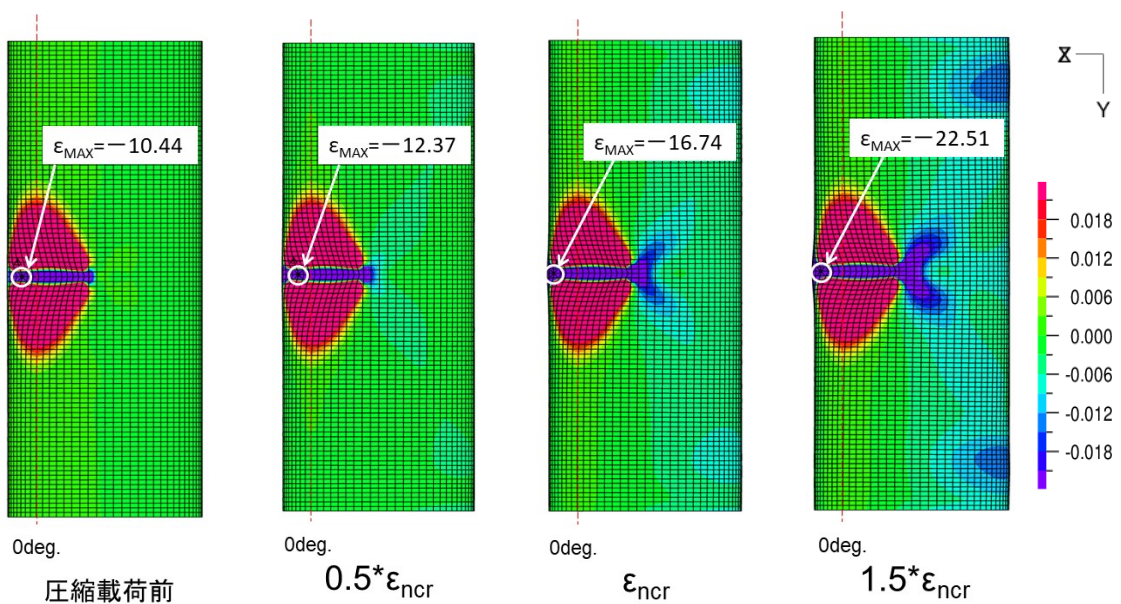


図-2.41 デントを有する鋼管の軸ひずみ分布（デント深さ10%，残留ひずみ考慮）

表-2.8 に結果のまとめを示す。応力，ひずみの算出結果は両モデルで良く一致している。

また，鋼管のデントの影響について考察された他の論文[25]での解析でも，デント部の残留ひずみを考慮していない。

以上の結果から，デントの深さに関わらず，デント部の残留ひずみは鋼管パイプライン全体での軸圧縮座屈特性には影響を及ぼさず，解析による軸圧縮座屈特性のシミュレーションを行う上では，残留ひずみ無しのモデルと考慮のモデルのどちらを使用しても結果に差はないと判断する。

表-2.8 軸圧縮座屈解析結果まとめ（デント深さ 10%）

	P_{max} (MN)	δ_{cr} (mm)	σ_{max} (MPa)	ε_n (%)
FEA（残留ひずみ無し）	2.74	5.52	277	0.56
FEA（残留ひずみ考慮）	2.76	5.21	279	0.53

(2) デントの形状の影響

2.3.2 では、2.2.1 で紹介した健全管および線状のデントを有する鋼管（日本産業規格準拠）の軸圧縮座屈実験結果を再現する解析モデルの妥当性を検証しつつ、デント部の残留ひずみの有無によって解析結果の違いがほとんどないことを示した。軸圧縮実験結果としては、2.2.2 の米国石油協会規格準拠の鋼管を用いた実験結果が存在するが、この時のデントは、デントの管軸方向の長さが比較的長い面状の形状をしている（以降、面状デントと表記する）。その軸圧縮座屈実験結果を解析モデルで再現しつつ、面状デントの場合の残留ひずみの影響についても確認した。

ここでの有限要素解析には汎用構造解析コード Altair HyperWorks OptiStruct ver 2017.1 を使用し、鋼管は 4 節点シェル要素で分割した。解析モデルの全長を 1,516mm（軸圧縮座屈実験での供試体長さ）とし、それを 50 分割し、全周 1915mm を 64 分割したフルモデルとした。4 節点シェル要素の大きさは、長さ 30.3mm で幅 29.9mm である。

なお、ここまで用いてきた汎用構造解析コード ADINA-9.1.2 から変更したことの検証は、本節の終わりおよび付録 2 にて紹介する。

この解析モデル（デントの無い健全管）に対し、管中央部に面状の荷重を負荷することにより、デントを有する米国石油協会規格準拠の鋼管の解析モデルを作成した。

解析モデルおよび面状デントの再現方法を図-2.42 に示す。鋼管の解析モデルの上下の端面は完全拘束した上で、剛体としてモデル化した押しダイを鋼管の外側に接触させ、押しダイを鋼管の管軸直角方向に押し込んだ後、元の位置まで戻して除荷し、鋼管の復元力（スプリングバック）を発現させた後のデント形状を確定させた。

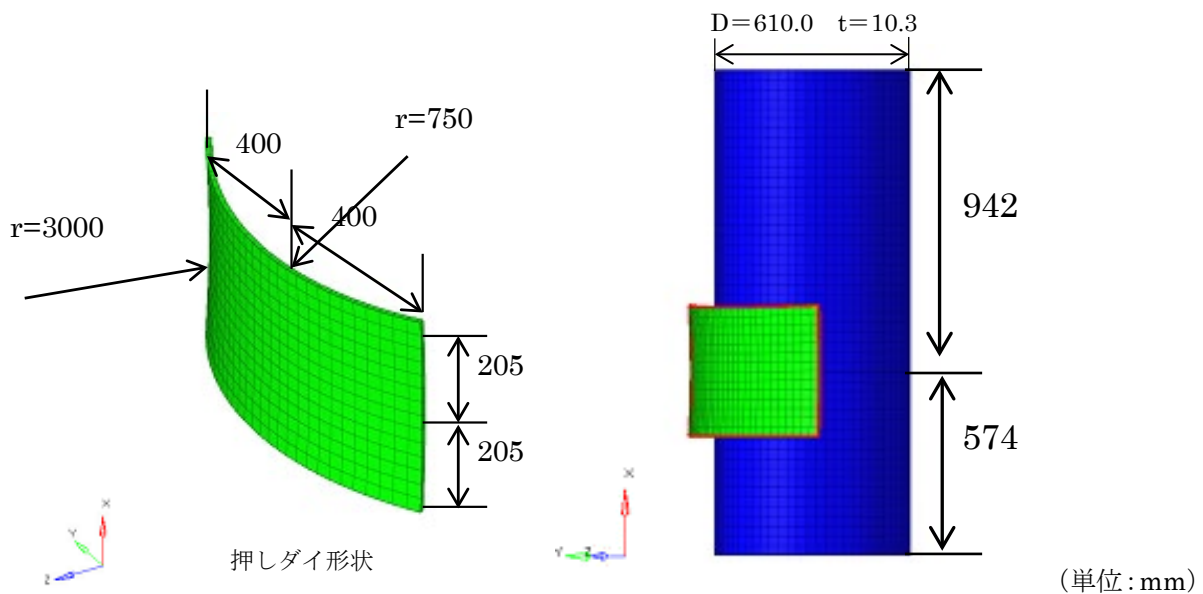


図-2.42 有限要素解析モデル図およびデントの再現方法

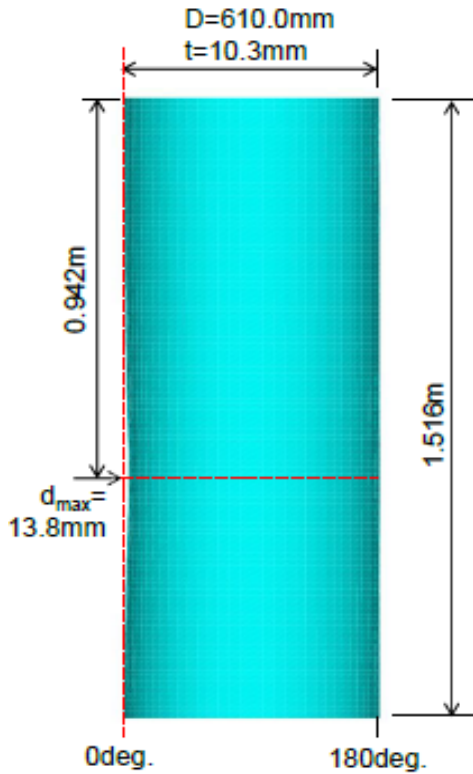


図-2.43 デント部分の変形状況

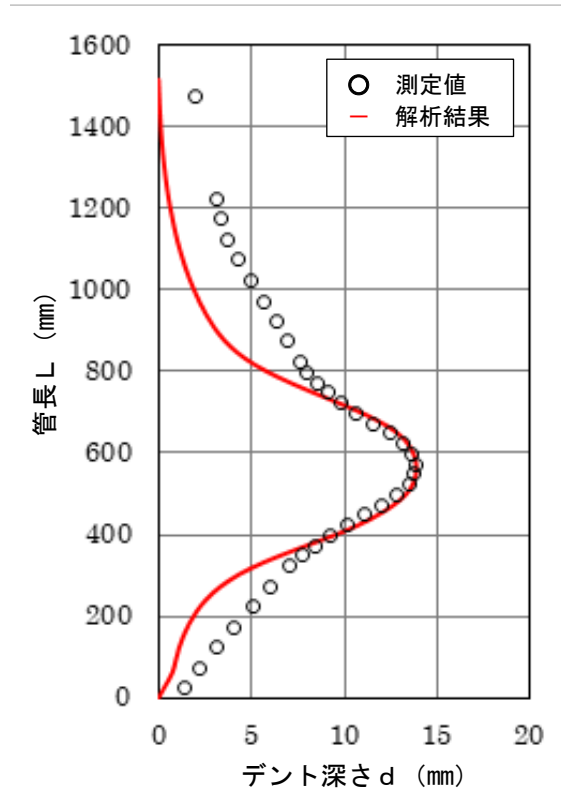


図-2.44 デント部分の再現状況（管軸方向）

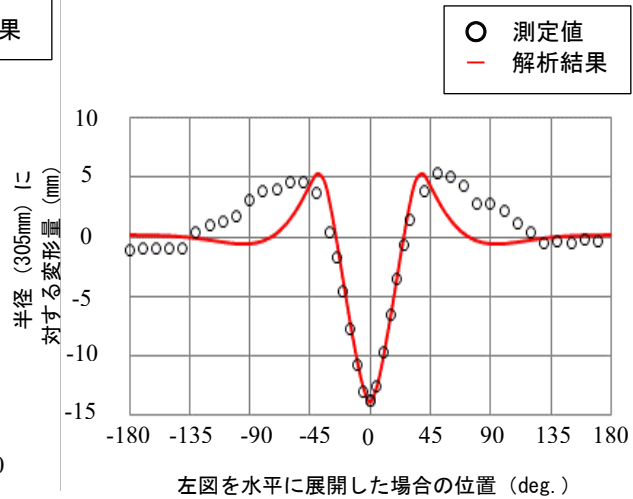
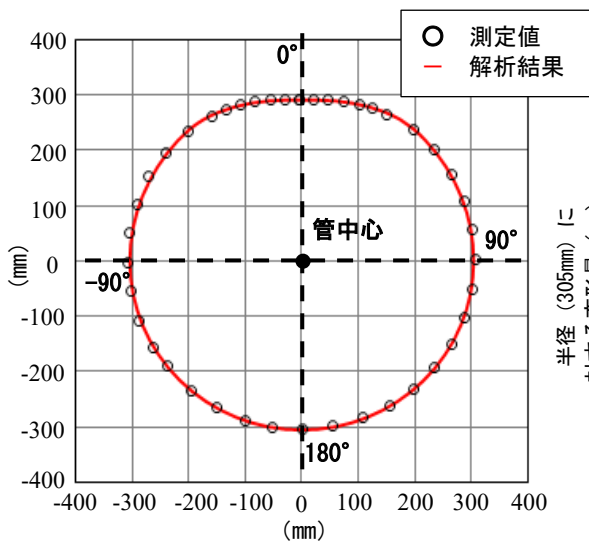


図-2.45 デント部分の再現状況（管周方向）

デント部分の変形状況を図-2.43に、再現状況を図-2.44、図-2.45に示す。図-2.45の右図は、左図の管周方向の断面を、管中心からの角度180°の位置で左右に開き、横軸に角度、縦軸に変形量を表したものである。解析モデルの変形（実線）と、デントの実測値（プロット）では、デントの「斜面」（図-2.44における管長 L が0~300mm、800~1400mmの部分および図-2.45における $\pm 45^\circ \sim 135^\circ$ の部分）では若干の乖離が見られるが、これは、実際のデントを発生させた接触物（形状不明）と、解析モデルでの押しダイとの形状の違いが主要要因と考えている。しかし

ながら、デントの最深部の深さおよび最深部付近の形状は再現できており、実際のデントを解析モデル上でほぼ再現させることができたと考えられる。

次に、この解析モデルによる軸圧縮座屈実験結果の再現性について示す。2.2.2の実管実験と同様、解析モデルの下部を完全拘束し、上部を変位させて解析を実行した。今回は2.3.1から2.3.3(1)までで使用したものと異なる解析コードを用いたので、同様に残留ひずみの影響の有無も確認した。

図-2.46に、応力-ひずみ曲線の比較（軸圧縮座屈実験結果、解析結果2通り）を示す。解析結果2通り（残留ひずみ考慮/無し）の曲線は、いずれも実験結果とほぼ同じ軌跡を描いている。図-2.47、図-2.48は、それぞれのモデルでの軸ひずみの分布と変形状況である。表-2.9に結果のまとめを示す。応力、ひずみの結果は良く一致している。よって、面状デントの場合も、軸圧縮座屈解析における残留ひずみの影響は無いと判断した。

なお、2.3.1から2.3.3(1)まで用いてきた汎用構造解析コードADINA-9.1.2でも実験結果を再現しており、Altair HyperWorks OptiStruct ver 2017.1での結果との比較を、付録2に載せている。両方の解析コードはともに実験結果を再現できており、解析結果の精度に差は見受けられない。

以上から、本解析コードAltair HyperWorks OptiStruct ver 2017.1を用いた有限要素解析モデルは、解析コードADINA-9.1.2と同様に使用できると判断する。

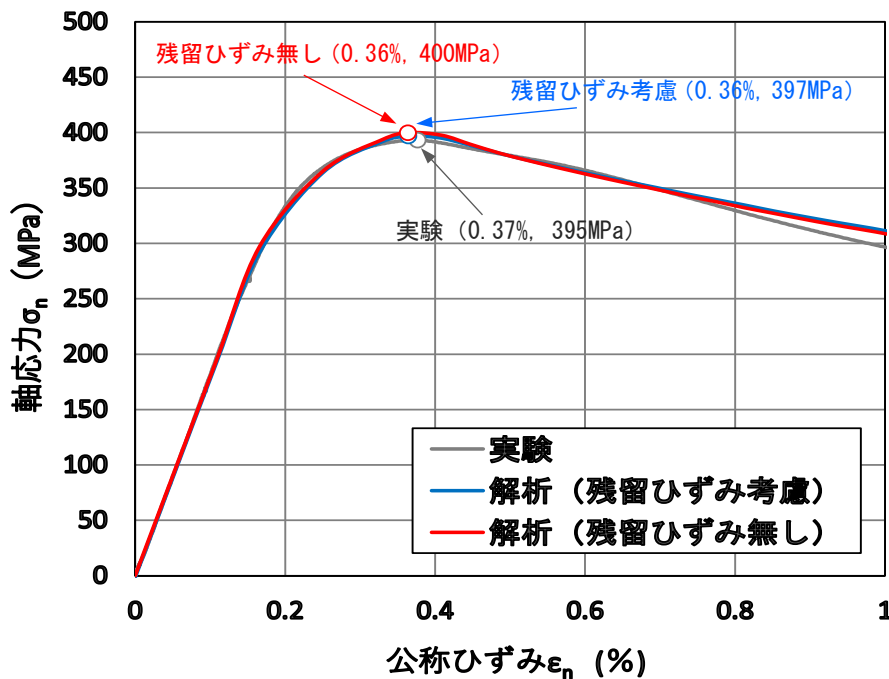


図-2.46 デントを有する鋼管の軸圧縮座屈実験結果と有限要素解析結果の比較
(米国石油協会規格の鋼管 API 5L L360, 面状デント : 深さ 2.4%)

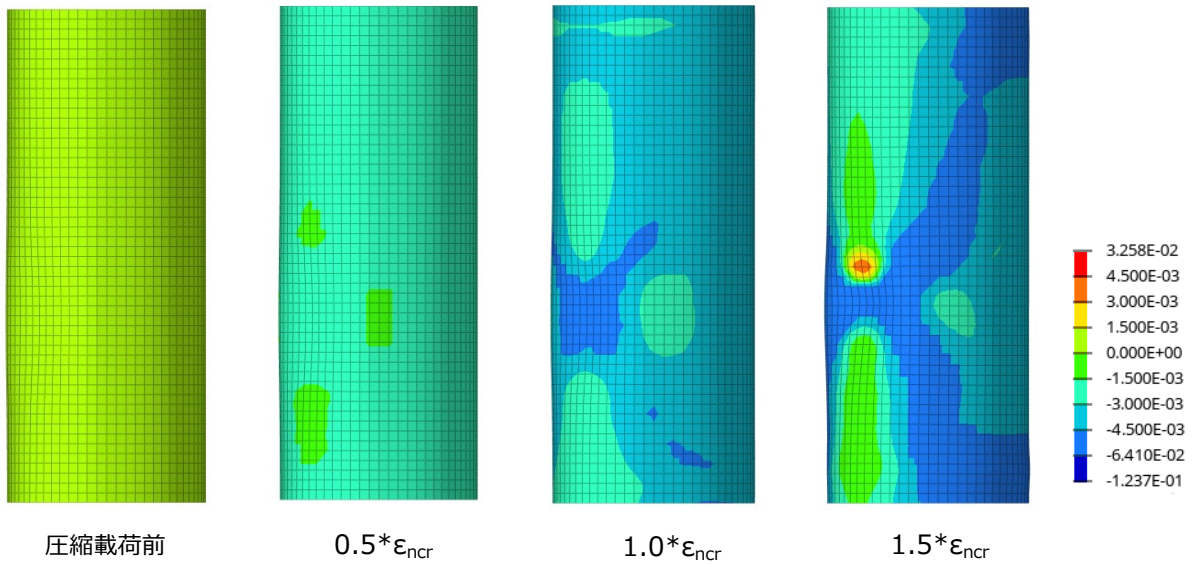


図-2.47 デントを有する鋼管の軸ひずみ分布（面状デント：深さ 2.4%，残留ひずみ無し）

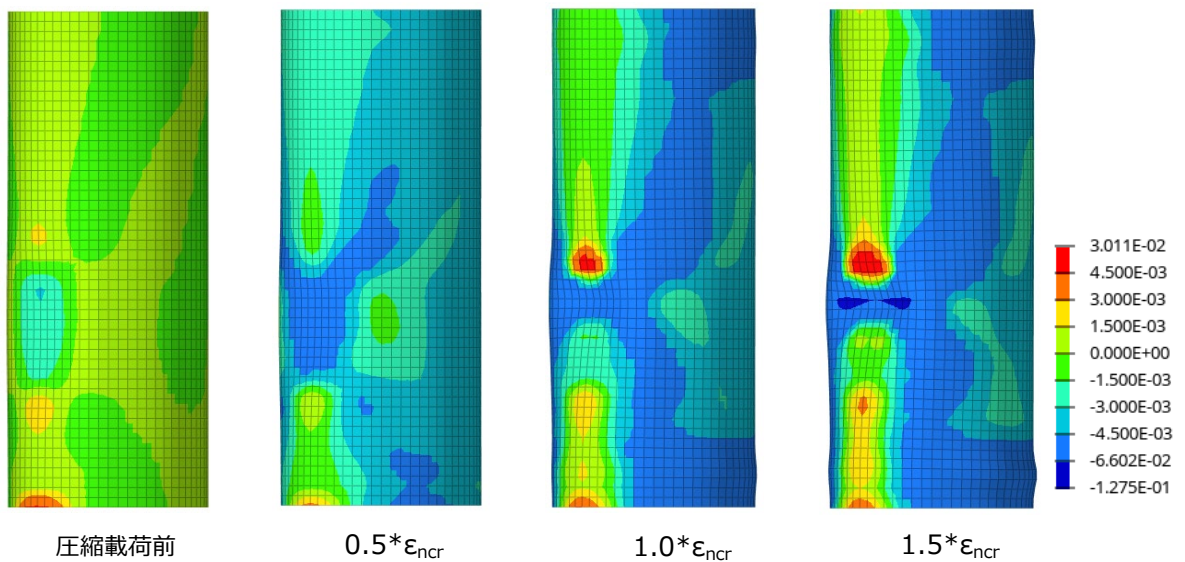


図-2.48 デントを有する鋼管の軸ひずみ分布（面状デント：深さ 2.4%，残留ひずみ考慮）

表-2.9 軸圧縮座屈解析結果まとめ

（米国石油協会規格の鋼管 API 5L L360 面状デント：深さ 2.4%）

	P_{max} (MN)	δ_{cr} (mm)	σ_{max} (MPa)	ϵ_n (%)
実験	7.63	5.64	395	0.37
FEA（残留ひずみ無し）	7.76	5.52	400	0.36
FEA（残留ひずみ考慮）	7.70	5.53	397	0.36

2.4 軸圧縮座屈解析モデルの長さの検討

2.4.1 鋼管パイプラインと鋼管杭の設計上の類似性

鋼管パイプラインは、輸送対象物（ガス、石油など）を受け入れる始点から何 km にも渡って地中に埋設されていることが多い。よって、その挙動を考える場合、例えば解析によってパラメータスタディを行う場合、解析モデルの長さは十分に長いことが望ましい。しかしながら、解析モデルが長くなるほど計算負荷は増加して、計算終了までに時間を要し、効率性に問題を生じる。

2.3 では軸圧縮座屈実験結果の解析による再現性を示した。本節では、第3章以降で軸圧縮座屈解析によるパラメータスタディを行うにあたり、解析計算が無用に長時間化しない軸圧縮座屈解析モデルの妥当な長さについて検討する。

地中に埋設された鋼管パイプラインの軸圧縮座屈挙動を検討するにあたり、鋼管パイプラインと同様、大半が地中に埋設された環境下に存在する鋼管杭の耐震設計の考え方を参考にした。鋼管杭は橋梁などの地上構造物を支持するため、主に鉛直方向に埋設されるが、平常時や地震時に地上構造物に作用する外力が伝播する形で圧縮力・引き抜き（引張）力・曲げ力が作用する。また、鋼管杭の周囲の土からは土圧や押し返し（地盤ばね）による外力が作用する。地中に埋設された鋼管パイプラインは、構造物の長軸方向（軸方向）は鋼管杭とは異なり、水平方向に存在するが、全体が埋設されていることは鋼管杭と同様であり、地震時には地震動による圧縮力・引張力・曲げ力が作用し、周囲の土から土圧や押し返し（地盤ばね）による外力が付加されることも鋼管杭と同様であるといえる。これらのことから、鋼管杭の設計で考慮される考え方は鋼管パイプラインにも応用できると考え、今回の鋼管パイプラインの解析モデルの必要長さを検討した。

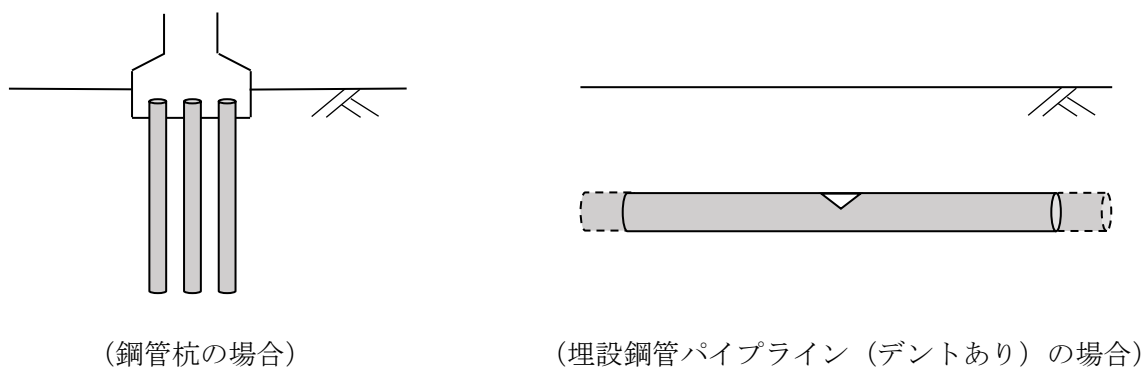


図-2.49 設計に関する模式図

2.4.2 仮想固定点の応用による解析モデル長さの検討

鋼管杭の仮想固定点（地上構造物からの作用力の影響を受けない位置）として、Chang の方法 [26] では、以下の式 (2.1) で求められる β を使って、仮想地表面下の $1/\beta$ の位置にあると定められる。そして、道路橋示方書・同解説IV下部構造編 [27] では、杭基礎の設計の考え方として、杭の長さが $1/\beta$ を超え $3/\beta$ 未満までは「有限長の杭」として、杭の変位や断面力は杭先端の支持条件の影響を受けるが、杭の長さが $3/\beta$ 以上になると「半無限長の杭」として認められ、杭の

長さを考慮せずに杭の挙動を検討できる，という考え方を示している。

鋼管パイプラインも上記の考え方を適用できると仮定して，以下の議論を進める．本研究においても，部分的にデントを有する鋼管パイプラインの挙動を解析により調べる場合，仮想固定点までの距離（解析モデルの長さの 1/2 にあたる） L は，鋼管杭と同様， $3/\beta$ 以上が必要と仮定する．

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_1 \cdot D}{4 \cdot E \cdot I}} \quad (2.1)$$

$$L = \frac{3}{\beta} \quad (2.2)$$

k_1 : 地盤反力係数 (=0.0049) (N/mm³)

E : 管のヤング率 (N/mm²)

D : 管外径 (mm)

I : 管の断面二次モーメント (mm⁴)

L : 仮想固定点までの距離 (mm)

本研究で研究対象としている鋼管について，式 (2.1) (2.2) より必要な解析モデル長さを求めてみると，表-2.10 のように求められる。

表-2.10 必要な解析モデル長さ

	API 5L L360 ^{注1)} (X52)	API 5L L415 ^{注1)} (X60)	API 5L L450 ^{注1)} (X65)	SGP ^{注2)}
外径 D (mm)	610.0	406.4	610.0	406.4
肉厚 t (mm)	10.3	11.9	15.1	7.9
ヤング率 E (N/mm ²)	177,000	206,000	206,000	206,000
管の断面二次モーメント I (mm ⁴)	8.73×10^8	2.87×10^8	1.25×10^9	1.96×10^8
仮想固定点までの距離 L (mm)	11,912	10,372	13,533	9,432
解析モデル長さ $2L$ (外径との比 : $2L/D$)	23,824 (39)	20,744 (51)	27,066 (44)	18,864 (46)

注1) API 5L は米国石油協会 (American Petroleum Institute, API) のラインパイプ規格を表し，L360 という表記はパイプの強度を表す．L360 の場合，最低耐力が 360N/mm²であることを表す．

注2) SGP は日本産業規格 (JIS) の JIS G 3452 (配管用炭素鋼鋼管) を表す．

表-2.10 より，鋼管パイプラインの解析モデル長さは管径の 40~50 倍が必要ということになる．ただ，解析モデル長さが長い場合，解析が複雑になり長時間を要し，収束しないケースが発生することが懸念される．

2.4.3 妥当な解析モデル長さ

本節では、長い延長で埋設されている鋼管パイプラインの実際の挙動を再現できている軸圧縮座屈解析モデルに求められる長さを検討する。解析計算にかかる負担ができるだけ軽減される方が汎用性で優位となるため、解析モデルに必要な長さをできるだけ短くとどめるべく、検討した。

(1) 解析対象および条件

まず、都市ガス用の鋼管パイプラインとして我が国で最も多く使用されており、2.2の実管実験でも使用した日本産業規格準拠の鋼管（SGP、呼び径 400A）を解析対象に選定した。

汎用構造解析コード Altair HyperWorks OptiStruct ver 2017.1 を使用し、鋼管は 4 節点シェル要素で分割した。表-2.11 に解析条件を示す。解析モデル長さを表-2.11 の下から 2 行目の 3 通りに変化させて軸圧縮座屈解析を実施した。いちばん短いモデル長さを管外径の 10 倍（10D）として、管外径の 20 倍（20D）、理論上の仮想固定点以上の長さを有する管外径の 52 倍（50D）の 3 通りに実施した。埋設深さは、一般的な都市ガスパイプラインの敷設で標準的な値に設定した。

表-2.11 解析条件 一覧：日本産業規格準拠の鋼管（SGP）

共通事項	解析形式	非線形静解析（接触解析および大変形解析）			
	メッシュ形式	デント形成用治具：ビーム要素（剛体） 鋼管：シェル要素 地盤：ばね要素			
	メッシュサイズ	長さ 20.3mm×幅 19.9mm			
	デント深さ	外径に対し 10%（「d10%」と呼称）：41mm			
	SGP	外径	406.4mm（呼び径：400A）		
		鋼管肉厚	7.9mm		
		埋設深さ	1200mm		
		ヤング率 ^{注1)}	206GPa		
		降伏点 ^{注2)}	真応力 174MPa, 真ひずみ 0.085%		
		応力-ひずみ曲線終点 ^{注2)}	真応力 326MPa, 真ひずみ 8.47%		
		応力-ひずみ曲線 ^{注2)}	図-2.50 参照		
	管内内圧 ^{注3)}	0.8MPa			
	上方からの土圧 ^{注4)}	埋設深さ 1200mm : 0.0188 MPa			
地盤ばね強さ ^{注5)}	図-2.52 参照				
変数	解析モデル長さ	管外径の 10 倍 (10D)	管外径の 20 倍 (20D)	管外径の 52 倍 (52D)	
	境界条件	両端を剛体化して拘束 上下方向のみ回転可能		両端を剛体化して完全拘束	

注1) 「高圧ガス導管液状化耐震設計指針（日本ガス協会）」[28]で、導管材料特性として定められた値。

注2) 鋼管（SGP）の数多くの材料試験の実測値を元に、それらを包含する形でまず応力-ひずみ曲線を描き、次にその曲線を読み取って降伏点、終点を定めた。詳しくは以下で説明する。

注3) 都市ガス輸送導管内を流れるガスによる圧力。

注4) 「石油パイプライン技術基準（案）（日本道路協会）」[29]の計算式を基に設定。詳しくは以下で説明する。

注5) 「高圧ガス導管耐震設計指針（日本ガス協会）」[30]より引用。詳しくは以下で説明する。

図-2.50 の応力-ひずみ曲線について説明する。日本産業規格準拠の鋼管 (SGP) は我が国のパイプラインとして広く使われており、材料特性試験も多数実施されている。多数の材料特性試験結果から多数の応力-ひずみ曲線 (実測値に基づくもの) も描かれ、それら多数の応力-ひずみ曲線は、鋼管 (SGP) の強度の実力のばらつきを表している。ある鋼管製造会社で得られた多数の応力-ひずみ曲線を重ね合わせたものを図-2.51 に示す。その多数の曲線から、鋼管 (SGP) の強度実力の最低値として想定した応力-ひずみ曲線を赤線で描くことができる。この想定は公称応力、公称ひずみを表しているので、この赤線のグラフを真応力、真ひずみに変換したものが図-2.50 の曲線となる。

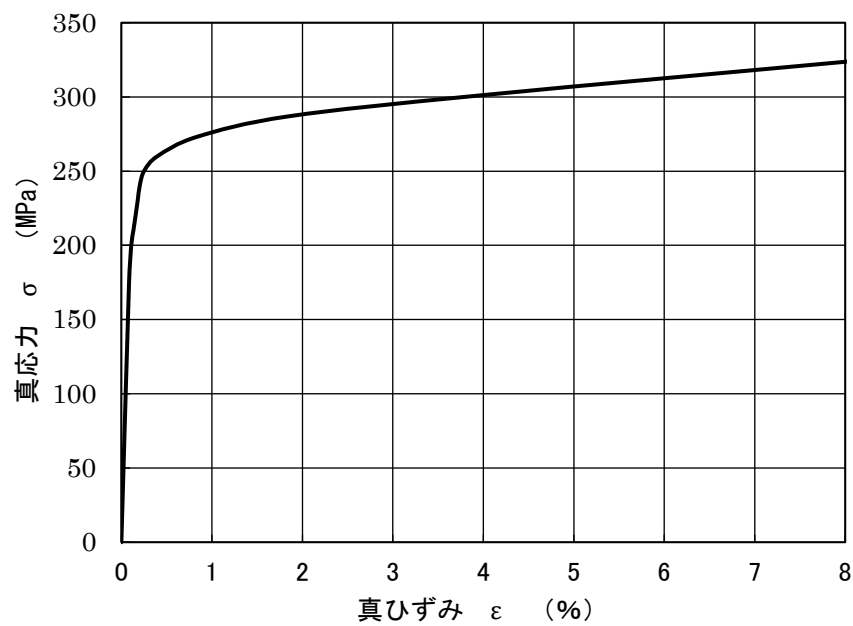


図-2.50 応力-ひずみ曲線 (SGP)

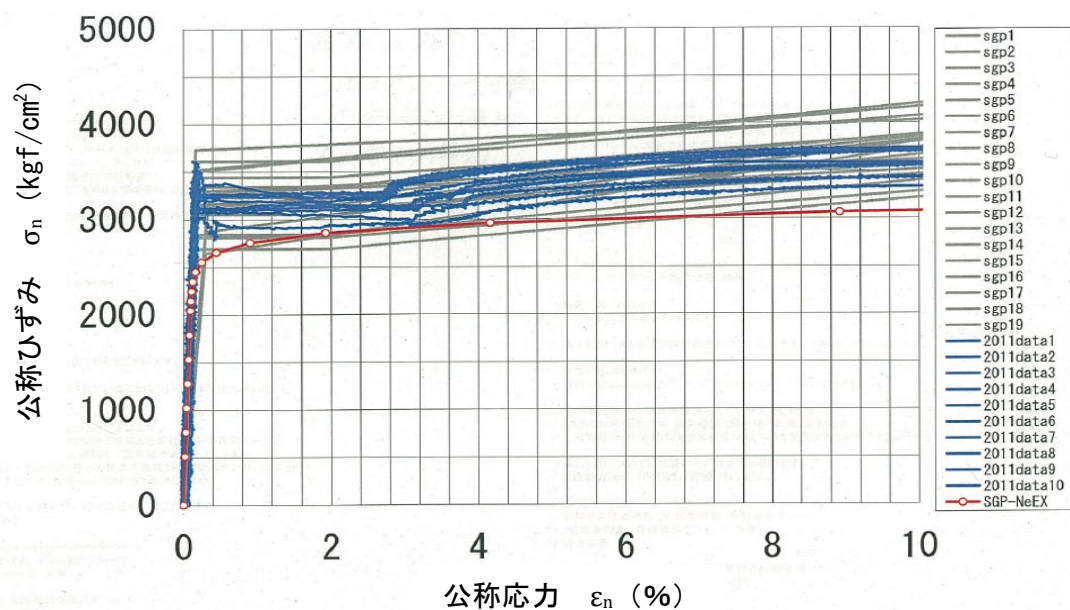


図-2.51 多数の応力-ひずみ曲線 (実測値) と最低強度の想定 (SGP)

次に、解析モデルに設定する土圧、および図-2.52の地盤ばね強さについて説明する。土圧および地盤ばねによる外力の計算は、「石油パイプライン技術基準(案)」[29]に準拠した。

土圧の設定を図-2.53に示す。管頂部に作用する土圧(ω_r)は、鉛直方向の等分布荷重とする。管底面に作用する基礎反力(ω_b)は、基床条件を加味した適正な支持角度($2\theta_b$)に分布する鉛直上向きの等分布荷重とする。管の側面部に作用する土圧(ω_h)は、管の中央部 100° の範囲で放物線分布し、最大反力は土圧係数(K_h)に管の水平方向の変形(δ_x)の $1/2$ を乗じた値とする。

地盤ばねの設定は、図-2.54に示すように、解析モデル上の管軸直角方向断面単位で上下左右にそれぞれ5か所で、1か所(矢印の先端)で管軸方向(τ)、管軸直角鉛直方向(σ_1)、管軸直角水平方向(σ_2)のばねを設置している。地盤ばね係数の設定は、「高圧ガス導管耐震設計指針[30]」に則り、図-2.55に示すバイリニアを設定し、管軸方向、管軸直角方向をそれぞれ表-2.12に示す数値を用いて設定した。表-2.12の右の2列は、本論文で扱う標準的な埋設条件2例の場合を示している。なお、管軸方向の地盤ばね係数(k_1)は固定値、管軸直角方向の最大地盤拘束力(σ_{cr})、降伏変位(δ_{cr})、地盤ばね係数(k_2)は管径別に定められる。

なお、図-2.54の右図から想起できるが、管軸直角方向の地盤ばねは、管がばねを押し縮める方向に変位した場合には管を押し返す力として作用するが、管と地盤の間には引張力は働かないことから、管がばねを伸ばす方向に変位した場合は、地盤ばねは作用しない。よって、ばね変位がプラスの場合の管軸直角方向ばね強さは0としている。管軸方向のばねは、常に管が変位する方向とは逆に作用する。これらの条件により、図-2.52を描いている。

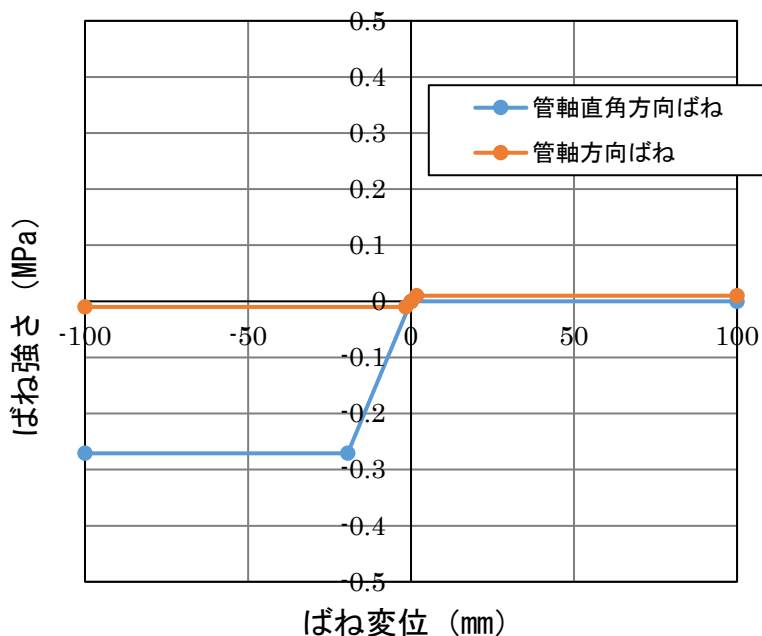


図-2.52 地盤ばね強さ (埋設深さ 1200mm)

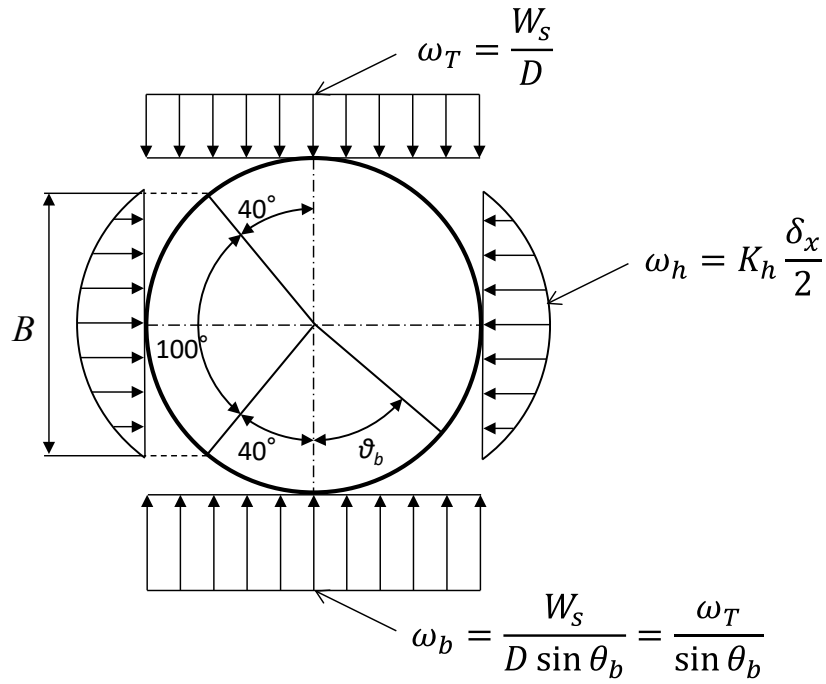


図-2.53 土圧の設定 ※参考文献[29]より引用

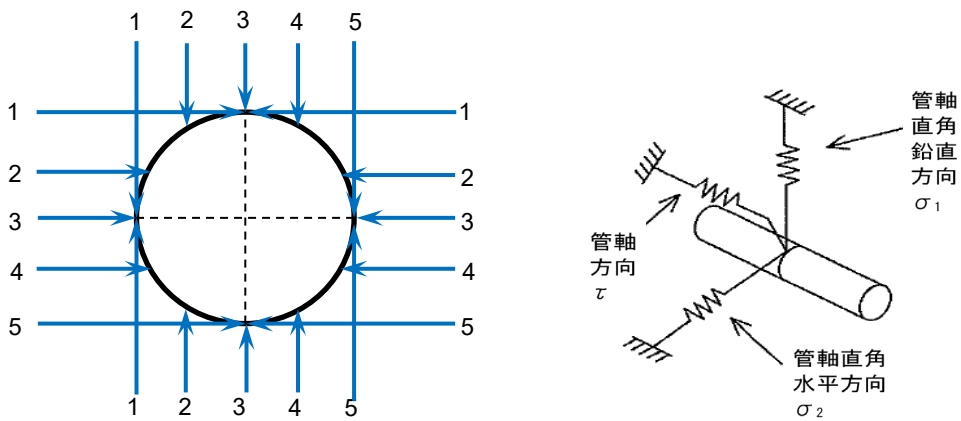
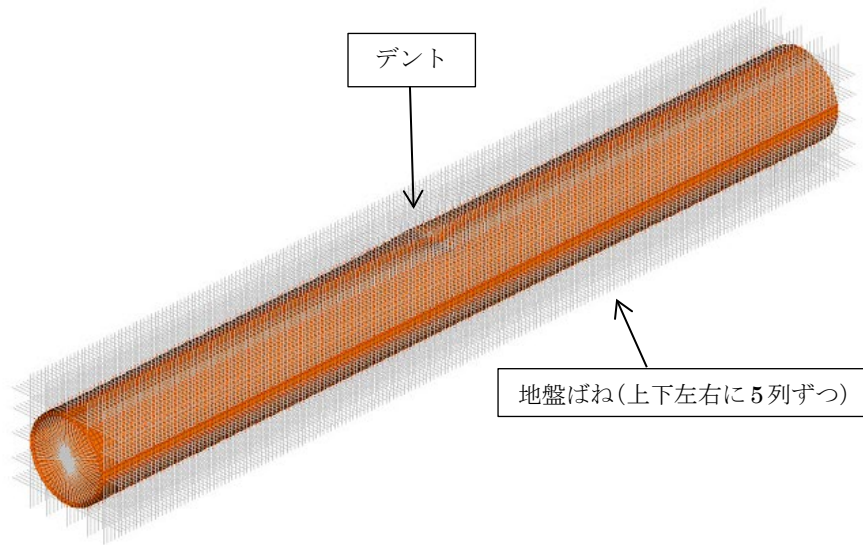


図-2.54 地盤ばねの設置方法 ※右図は参考文献[28]より引用

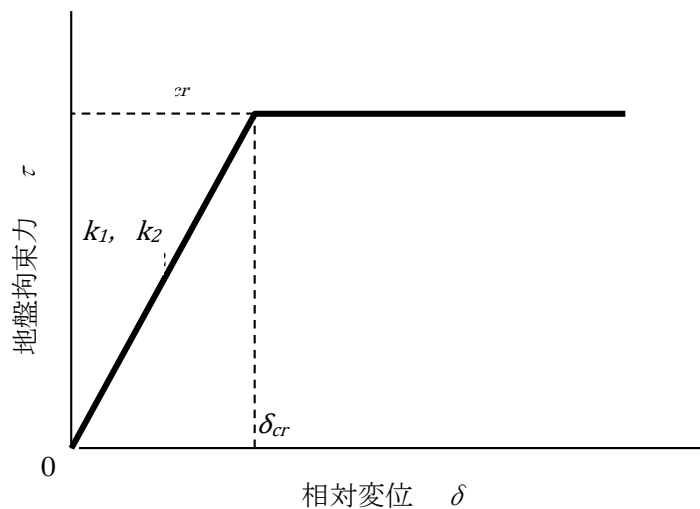


図-2.55 地盤ばねの設定に用いたグラフ

表-2.12 埋設条件（土圧，地盤ばね）を考慮する際の設定諸数値

項目	記号（単位）	管径 400A, 埋設深 1200mm の場合	管径 600A, 埋設深 1800mm の場合
導管の管径（外径）	D (mm)	410	610
土被り高さ	h (mm)	1200	1800
土の単位体積重量	γ_s (N/mm ³)	1.76×10^{-5}	1.76×10^{-5}
管の単位長さ当り鉛直土圧	$W_s^{(注)}$ (N/mm)	8.7	19.3
土圧係数 (高压ガス耐震[30]に準じる)	K_h	0.65	0.65
管軸方向の地盤ばねの設定	τ_{cr} (N/mm ²)	1.0×10^{-2}	1.5×10^{-2}
	k_1 (N/mm ³)	6.0×10^{-3}	6.0×10^{-3}
管軸直角方向の地盤ばねの 設定	σ_{cr} (N/mm ²)	0.193	0.338
	δ_{cr} (mm)	0.019	0.029
	k_2 (N/mm ³)	10200	12000

注) $W_s = \gamma_s \cdot h \cdot D$

また、高压で運用される都市ガス用の鋼管パイプラインとして多く使用されており、2.2の実管実験でも使用した米国石油協会（API）規格準拠の鋼管（API 5L L360，呼び径 600A）でも同様の検討を行った。鋼材の強度や、管内内圧，埋設条件などが変わった場合，日本産業規格準拠の鋼管（SGP，呼び径 400A）の場合と相違が発生するかどうかを確認した。

日本産業規格準拠の鋼管（SGP）の場合と同様，汎用構造解析コード Altair HyperWorks OptiStruct ver 2017.1 を使用し，鋼管は 4 節点シェル要素で分割した。表-2.13 に解析条件を示す。メッシュサイズは，日本産業規格準拠の鋼管（SGP，呼び径 400A）と米国石油協会（API）規格準拠の鋼管（API 5L L360，呼び径 600A）の呼び径の違いに合わせて，相似形となるように設定した。埋設深さは，我が国の高压ガスパイプラインの敷設で標準的な値に設定した。

表-2.13 解析条件 一覧：米国石油協会規格準拠の鋼管（API 5L L360）

共通事項	解析形式	非線形静解析（接触解析および大変形解析）			
	メッシュ形式	デント形成用治具：ビーム要素（剛体） 鋼管：シェル要素 地盤：ばね要素			
	メッシュサイズ	長さ 30.5mm×幅 29.9mm			
	境界条件	両端を剛体化して拘束，上下方向のみ回転可能			
	デント深さ	外径に対し 10%（「d10%」と呼称）：61mm			
	API 5L L360	外径	610.0mm（呼び径：600A）		
		鋼管肉厚	10.3mm		
		埋設深さ	1800mm		
		ヤング率 ^{注1)}	177GPa		
		降伏点 ^{注1)}	真応力 314MPa，真ひずみ 0.17%		
		応力-ひずみ曲線終点 ^{注1)}	真応力 487MPa，真ひずみ 12%		
		応力-ひずみ曲線 ^{注1)}	図-2.56 参照		
	管内内圧 ^{注2)}	2.0MPa			
	上方からの土圧 ^{注3)}	埋設深さ 1800mm：0.0317 MPa			
地盤ばね強さ ^{注4)}	図-2.57 参照				
変数	解析モデル長さ	管外径の 10 倍 (10D)	管外径の 20 倍 (20D)	管外径の 52 倍 (52D)	
	境界条件	両端を剛体化して拘束 上下方向のみ回転可能		両端を剛体化して完全拘束	

注1) 後述の章で述べる軸圧縮座屈実験に先立ち実施した材料試験で得られた値。

注2) 都市ガス輸送導管内を流れるガスによる圧力。

注3) 「石油パイプライン技術基準（案）（日本道路協会）」[29]の計算式を基に設定。想定方法は上記，図-2.52の説明内容と同じ。設定諸数値は表-2.12の右列にまとめて記載。

注4) 「高圧ガス導管耐震設計指針（日本ガス協会）」[30]より引用。想定方法は上記，図-2.52の説明内容と同じ。設定諸数値は表-2.12の右列にまとめて記載。

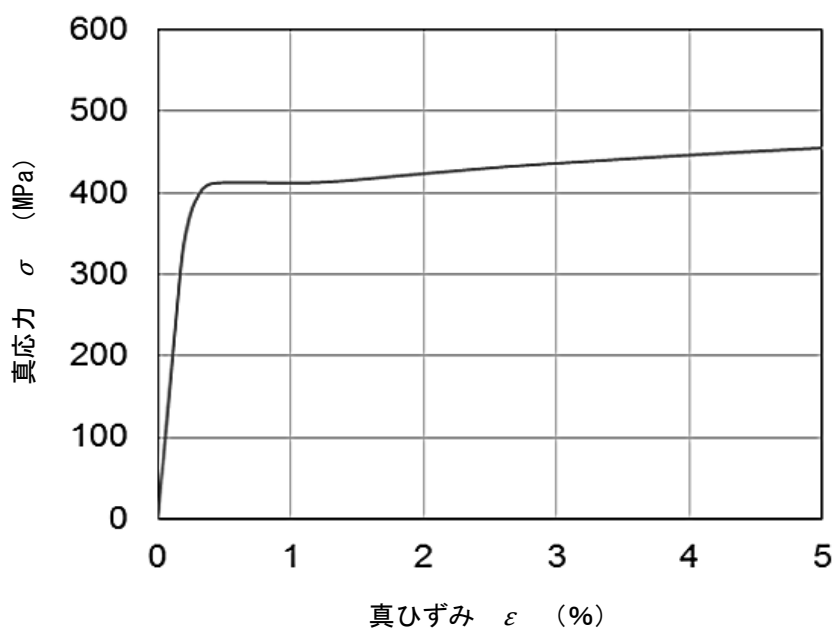


図-2.56 応力-ひずみ曲線（API 5L L360）

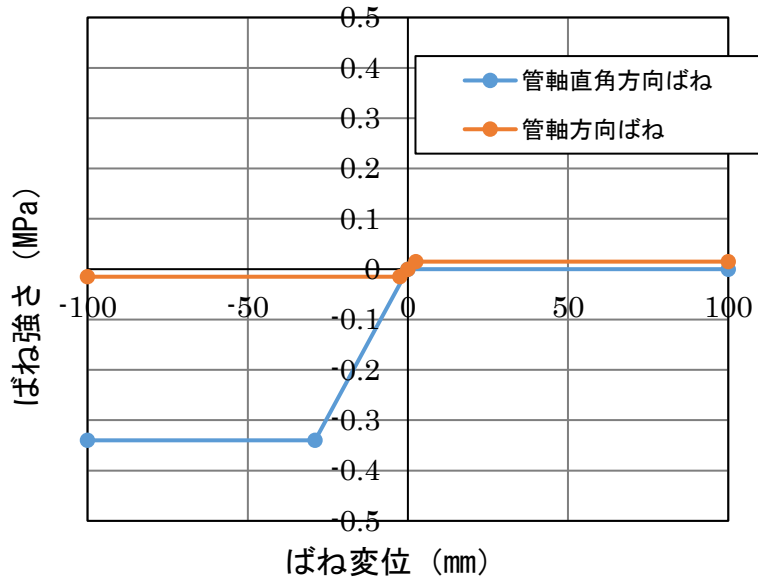


図-2.57 地盤ばね強さ (埋設深さ 1800mm)

上記の2種類の鋼管について、図-2.58～図-2.60の通り、解析鋼管長の異なる3通りの条件で軸圧縮座屈解析を行い、軸力やひずみの発生状況などを確認した。まず、鋭利なデント（線状デント）でデント深さ10%の場合で、比較検討した。解析の境界条件として、2.4.2で説明した仮想固定点よりも短い解析モデルの両端は、土中で軸圧縮変形した場合の挙動を想定し、上下方向は回転可能に設定した。仮想固定点を超えた長さの解析モデルの両端は、完全固定とした。

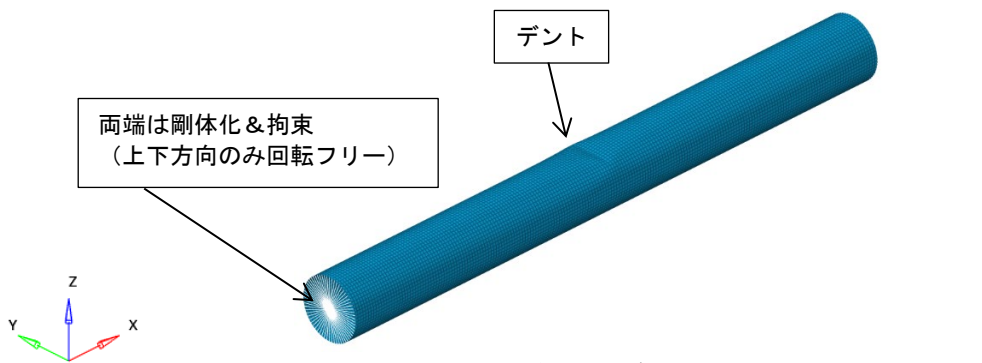


図-2.58 基本の解析モデル (長さ: 10D)

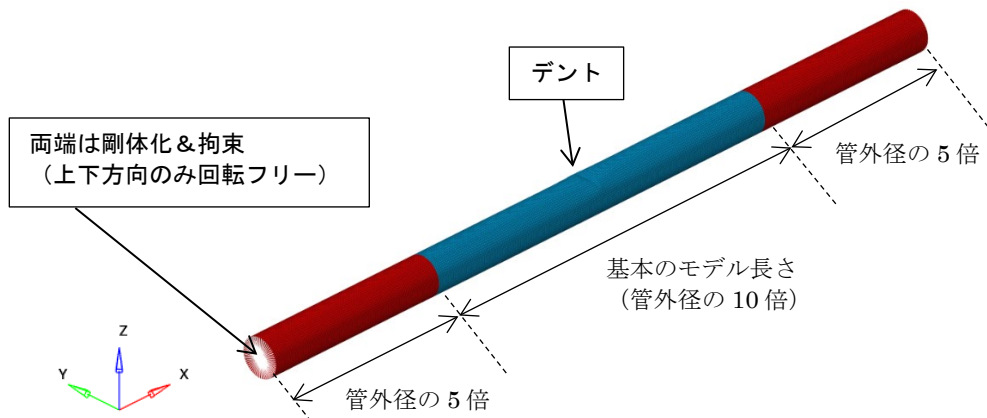


図-2.59 管長を基本のモデルの2倍に延長した解析モデル (長さ: 20D)

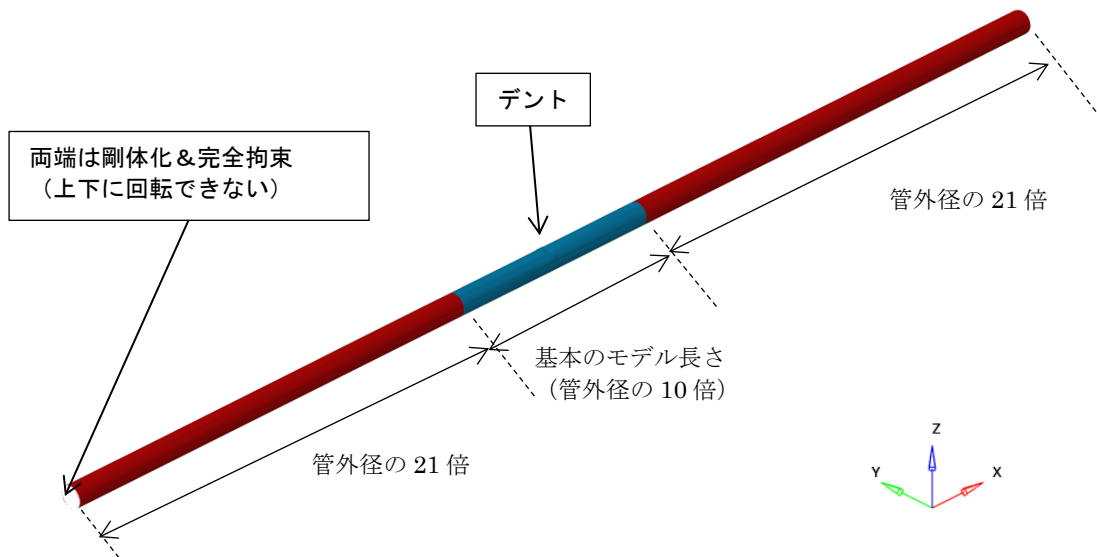


図-2.60 仮想固定点以上の長さを確保した解析モデル (長さ : 52D)

(2) 解析結果

図-2.61 は、日本産業規格準拠の鋼管 (SGP) に対する解析結果 (公称応力-公称ひずみ曲線) である。解析モデル延長が違うので公称ひずみ ϵ_n (軸力 P が最大の時のひずみ) は異なるが、軸圧縮座屈開始時の公称応力 σ_n は解析モデル長さによらずほぼ同じである。

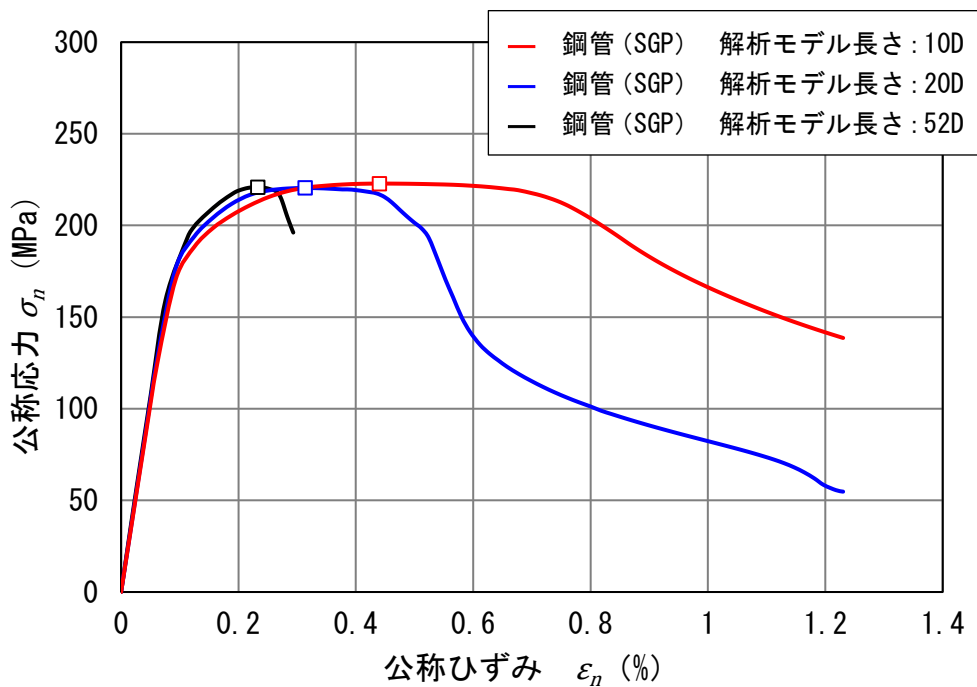
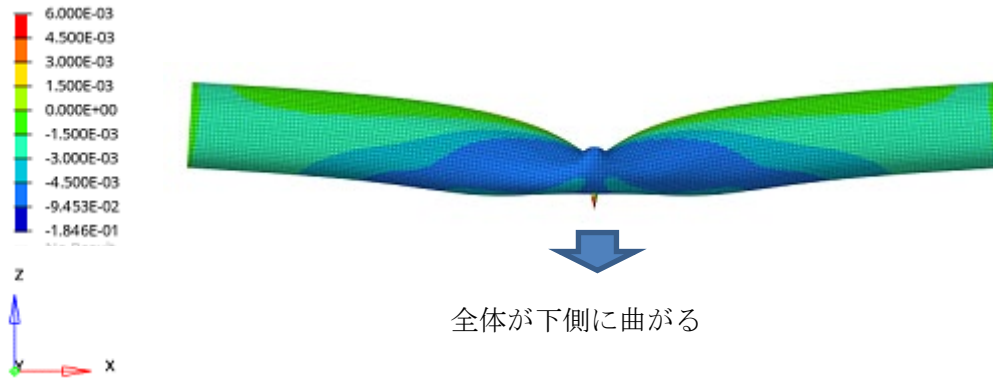


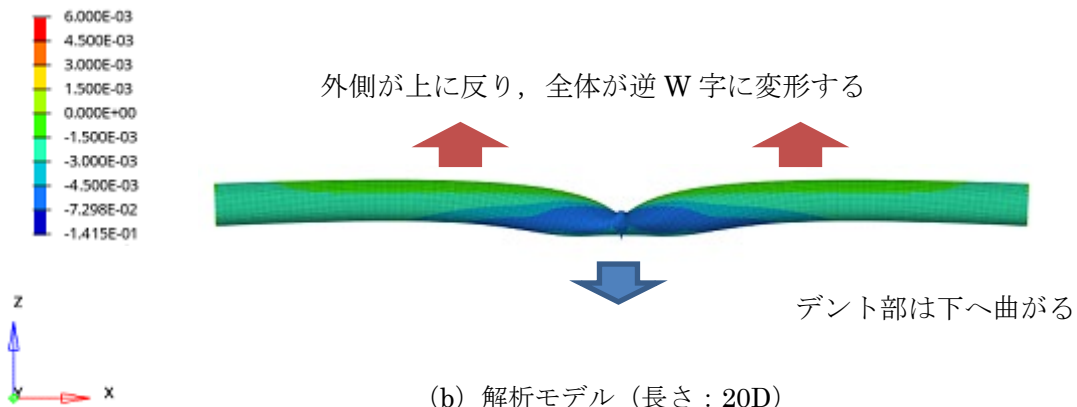
図-2.61 解析結果の比較 (軸力-ひずみ) (SGP, 線状デント, デント深さ 10%の場合)

管軸方向ひずみ（中立面）[-]



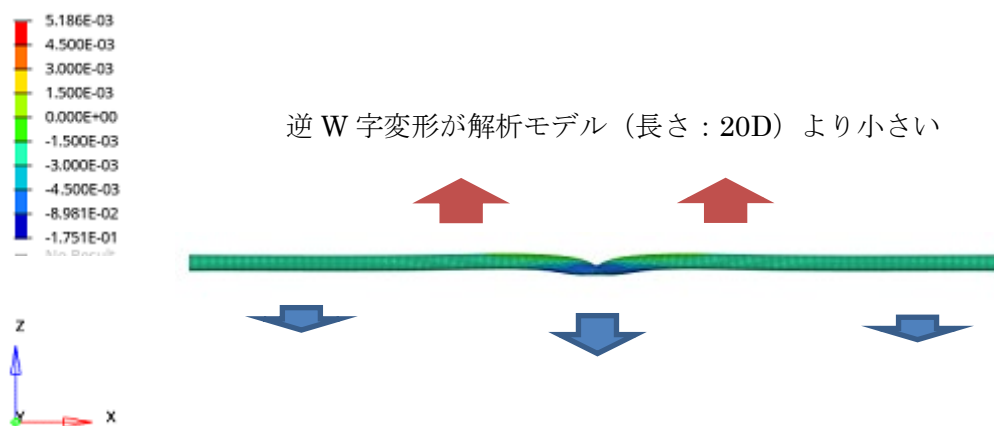
(a) 解析モデル（長さ：10D）

管軸方向ひずみ（中立面）[-]



(b) 解析モデル（長さ：20D）

管軸方向ひずみ（中立面）[-]



(c) 解析モデル（長さ：52D）

図-2.62 各モデルの座屈開始時点での変形の様子（変形を10倍に拡大表示）
（SGP，線状デントでデント深さ10%の場合）

図-2.62 は日本産業規格準拠の鋼管 (SGP) の軸圧縮座屈解析時のコンター図である。この図からわかるように、解析モデル (長さ: 10D) では全体が下向きに「く」の字に折れる。一方、解析モデル (長さ: 20D), 解析モデル (長さ: 52D) では管全体が「逆 W 字」状に変形する。この変形は、解析モデルの両端が完全拘束の (長さ: 52D) モデルよりも両端が回転自由の (長さ: 20D) モデルで顕著に見られる。なお、米国石油協会規格準拠の鋼管 (API 5L L360) の場合も傾向は同様であった。付録 3 にそのコンター図を示す。

次に、各解析モデルで軸圧縮座屈が開始した時点での軸圧縮ひずみの分布を、デント中心からの距離に従ってプロットした。これは、軸圧縮解析でひずみが集中するデント中心部からどれだけ離ればデントの影響を受けないかを確認するため、描いたものである。図-2.63 が日本産業規格準拠の鋼管 (SGP) の場合、図-2.64 が米国石油協会規格準拠の鋼管 (API 5L L360) の場合である。図-2.63, 図-2.64 とともに、管外径の 7~8 倍程度まで離れた位置では、軸圧縮ひずみが安定している。すなわち、デントの影響を受けなくなっていると考えられる。よって、管外径の 8 倍離れた位置での軸圧縮ひずみ ϵ_{R8D} を、デントを有する鋼管パイプラインの軸圧縮特性を評価する指標とする。

また、解析モデルに必要な長さとしては、図-2.63, 図-2.64 ではいずれも、20D と 52D でほぼ同じ解析結果が得られる。図-2.64 では 10D モデルでも解析結果に差はほとんどない。

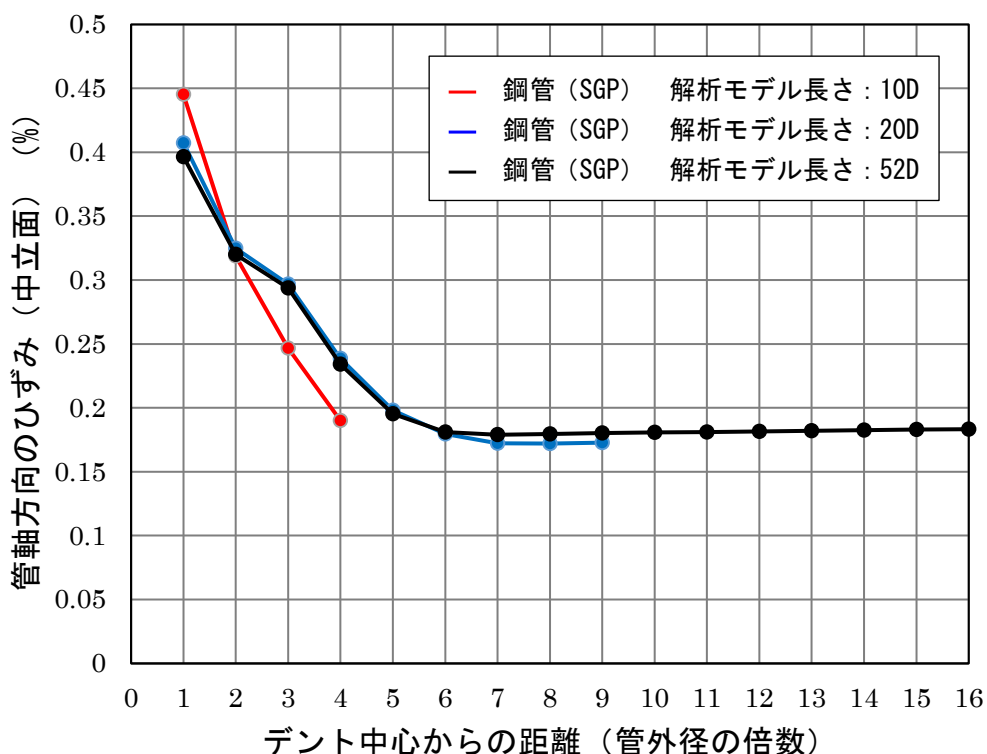


図-2.63 軸圧縮座屈開始時点での管軸ひずみの分布：日本産業規格準拠の鋼管 (SGP)

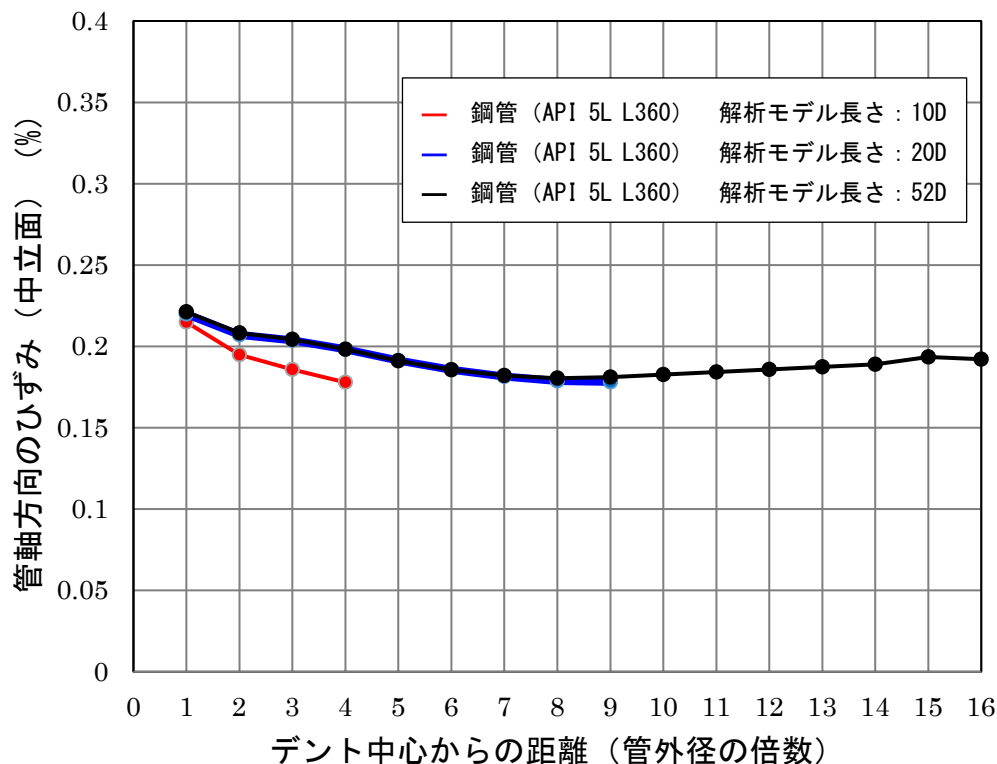


図-2.64 軸圧縮座屈開始時点での管軸ひずみの分布：
米国石油協会規格準拠の鋼管（API 5L L360）

以上から、本研究で扱う鋼管パイプラインの軸圧縮座屈解析では、解析モデルの長さが、鋼管杭の設計法を援用して求められる必要長さよりも短い管外径の20倍（20D）でも十分と判断し、以下で示す解析では（20D）モデルでパラメータスタディを進める。

2.5 デントを有する鋼管パイプラインの軸圧縮座屈特性の評価

2.5.1 鋼管パイプライン全体としての軸圧縮座屈特性の評価

2.4では、鋼管パイプラインの軸圧縮座屈解析を実施する際の解析モデル長さが、管外径 D の20倍（20D）であれば十分であることを示した。本節では、長大な長さで敷設された鋼管パイプラインとして、軸圧縮座屈に対する耐性の評価方法について考察する。

鋼管パイプラインの軸圧縮ひずみとしては、まず、解析モデルの全体から求められる公称軸ひずみ ε_n ($\varepsilon_n = \delta / L$, L : 解析モデルの長さ, δ : 圧縮変形量) を考えることができる。そして、軸圧縮座屈荷重 P が最大の P_{max} に達した時の圧縮変形量 δ_{cr} から求められる ε_{ncr} で評価することも考えられるが、これは解析モデルの全長から計算したもので、デント部も含んでの計算結果となる。デントを有する鋼管パイプラインが軸圧縮座屈を起こす場合は、デント部およびその近傍に座屈が集中して激しく変形するが、デントの形状や深さの違いから、 ε_{ncr} にはばらつきが生じるこ

とが予想される。そこで、デントを有する鋼管パイプラインの軸圧縮座屈特性については、デントの影響を受けない部分でのひずみの進展に着目して論ずる必要があると考え、デントの影響を受けない部分を示した概念図を図-2.65に示す。

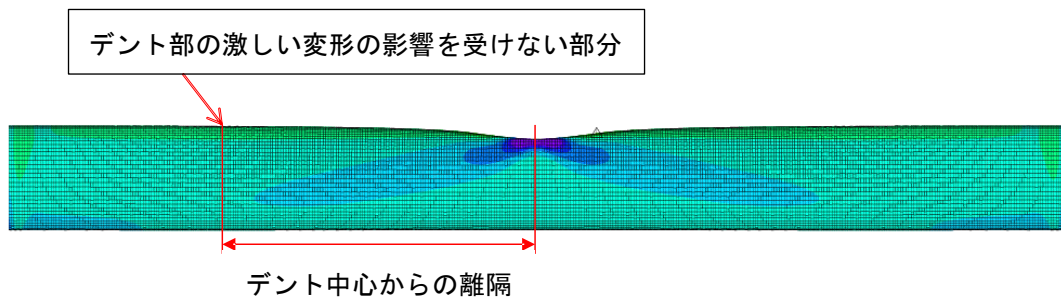


図-2.65 軸圧縮座屈時、デントの影響を受けない部分

2.5.2 軸圧縮座屈特性を評価する局部座屈開始ひずみの定義

2.4では、軸圧縮座屈解析モデルの長さの検討を行い、解析モデルの長さを3通り（管外径の10倍、20倍、52倍）設定して、管軸ひずみの分布の違いを調べた。2種類の鋼管について、図-2.63および図-2.64の通りの分布となった。

ここから、解析モデルに必要な長さは管外径 D の20倍 ($20D$) あれば十分であることがわかった。また、2.5.1で示したデント部の影響を受けない部分の設定として、デント中心から管外径の8倍 ($8D$) の位置が適切であることが読み取れる。この位置での管軸ひずみ ϵ_{R8D} が軸圧縮座屈解析にて座屈が始まった（軸圧縮座屈荷重が最大となった）時の値を、局部座屈開始ひずみ ϵ_{Rcr} と定義し、デントを有する鋼管パイプラインの軸圧縮座屈の開始のモニタリング値とする。

局部座屈開始ひずみ ϵ_{Rcr} は、デント中央部から管軸方向に $8D$ 離れた位置で、解析によって求めた管周方向の各位置（管厚の中央の位置）での、管軸方向ひずみの値を平均して算出する。図-2.66にイメージを示す。

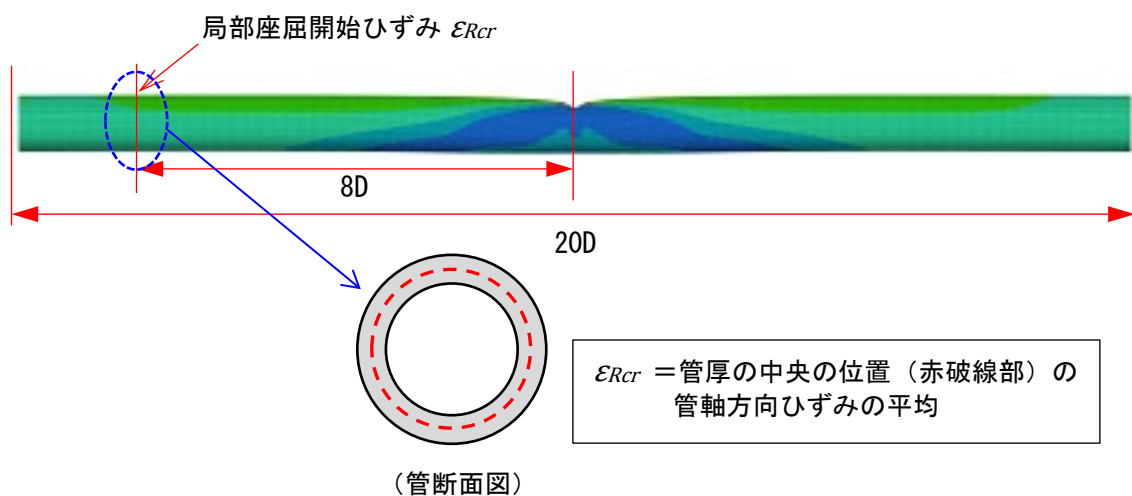


図-2.66 局部座屈開始ひずみ ϵ_{Rcr} の定義（解析モデル長さ： $20D$ ）

2.5 まとめ

第2章のまとめを、以下に箇条書きで簡潔に記す.

- デントを有する実際の鋼管 2 種類を用いた軸圧縮座屈実験を紹介した.
- 実験結果を再現できる有限要素解析モデルを確立した.
鋼管パイプラインの耐震性評価に適切な解析モデル長さ (20D) を確立した.
- 部分的にデントを含んだ鋼管パイプラインの耐震性を評価する場合の留意点 (デント部の激しい変形の影響を受けない十分に離れた位置のひずみで耐震性を評価) を解説した.

第3章 デントを有する鋼管パイプラインの軸圧縮座屈パラメータスタディ

3.1 概説

本章では、デントを有する鋼管パイプラインが軸圧縮変形する際の挙動を模擬できる解析モデルを用いて、鋼管の種類、デント深さ、敷設状況など様々な状況を想定した解析を行って、デントを有する鋼管パイプラインが軸圧縮座屈に至る際の各条件の影響度合いを分析する。

第2章で検証した解析モデルを用いて実施した軸圧縮座屈パラメータスタディの結果を紹介する。3.2では、想定する解析ケースとして、デントの形状、デントの深さ、内部圧力、土圧・地盤ばねなどの境界条件の設定や、計算の方法について述べる。3.3では、鋼管パイプラインの材料となる2種類の鋼管（日本産業規格準拠）（米国石油協会規格準拠）を用いた軸圧縮座屈パラメータスタディの内容を示す。

3.2 想定する解析ケースの設定の根拠

3.2.1 デントの形状

鋼管パイプラインにデントが発生するケースは、地中に敷設して運用開始後に何らかの外力を受けて発生することが想定される。外力としては、建設機械による打撃や、地中の構造物との接触に起因するものが想定される。図-3.1の左図が建設機械による打撃のイメージ、右図が地中の構造物との接触に起因する場合のイメージで、わが国で発見された事例（第3章で示した事例）は、この2例に分類することができる。

建設機械によって発生したと思われるデントの形状は、Mechanical Damage Final Report [5]において、多岐に渡ることが報告されている。他のデント形状に関しても、本論文で紹介するケースと同様な研究は必要であるが、デントの形状として最も鋭利で、軸圧縮座屈に対する耐性としては最も低いと考えられる図-3.1の左図の例で解析ケースを設定し、そこに分類できないデントの形状は、図-3.1の右図の例に分類され得るものとして、検討を進める。

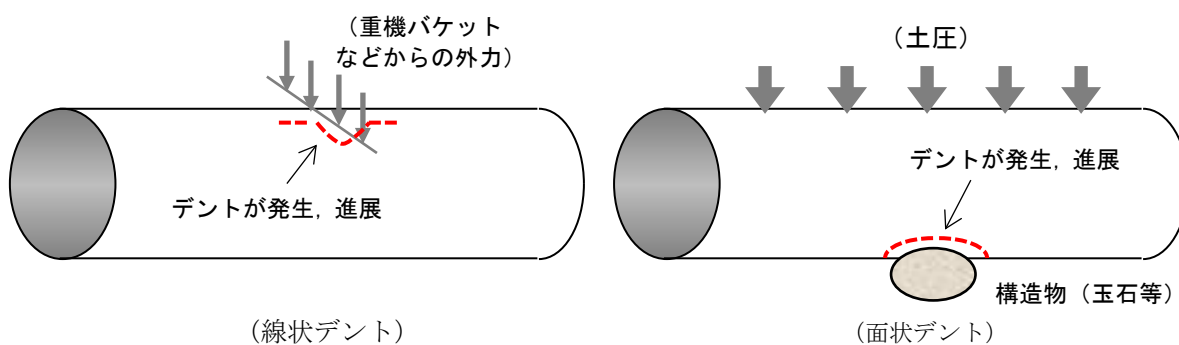


図-3.1 デントの発生イメージ

3.2.2 デントの深さ

発生したデントの変形が激しいほど、鋼管パイプラインは全体としての強度が低下し、耐震性も損なわれる。デントの深さ（健全な状態だった時の外径からどれほど内側に凹んだか）が1つの指標となるのは想像に難くない。

なお、デント深さの設定については、単純なデントに対するパイプラインの補修基準について Mechanical Damage Final Report [5]にて、デント深さ 10%を超えると、どの規格でも直ちに補修を要すると判断されている。そこで、補修が行われない可能性のあるデント深さの範囲において軸圧縮変形特性を評価し、耐震安全性の検討を行うという観点で、デントの深さを 10%を最大値として 3%、6%の 3 ケースを設定した。

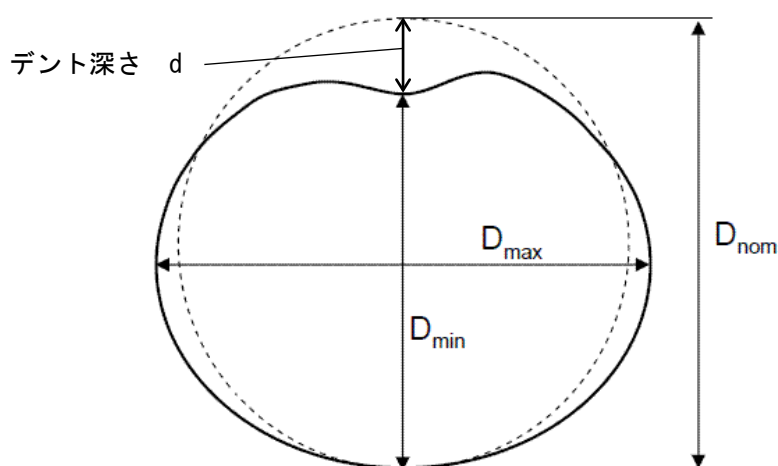


図-3.2 デントの深さ

3.2.3 内部圧力の設定

鋼管パイプラインは今では世界に広く普及したインフラであるが、その使用環境や敷設環境には違いが多く見られる。

鋼管パイプラインの運用中は、当然、内部の輸送物（天然ガス、上水など）から圧力（内部圧力、以下、内圧と表記する）が作用している。パイプラインの埋設に関する我が国の各種の設計基準や指針類の基礎を支えている「石油パイプライン技術基準（案）」[29]では、内圧による円周方向応力及び軸方向応力は、地中埋設導管には以下の式で規定されている。

$$\sigma_{\theta} = \frac{P_i(D-t)}{2t} \quad (3.1)$$

$$\sigma_z = \gamma \cdot \frac{P_i(D-t)}{2t} \quad (3.2)$$

σ_{θ} : 内圧による円周方向応力 (MPa)
 σ_z : 内圧による管軸方向応力 (MPa)
 P_i : 内圧 (MPa)
 D : 導管の外径 (mm)
 t : 導管の管厚 (mm)
 γ : ポアソン比 ※鋼材の場合, 0.3

図-3.3 は内圧を受ける鋼管に生じる円周方向応力 σ_{θ} , および管軸方向応力 σ_z の载荷イメージを示す. σ_z は軸圧縮変形に対抗する応力として存在するため, 内圧の無い場合に比べて軸圧縮座屈強度が上昇することになる.

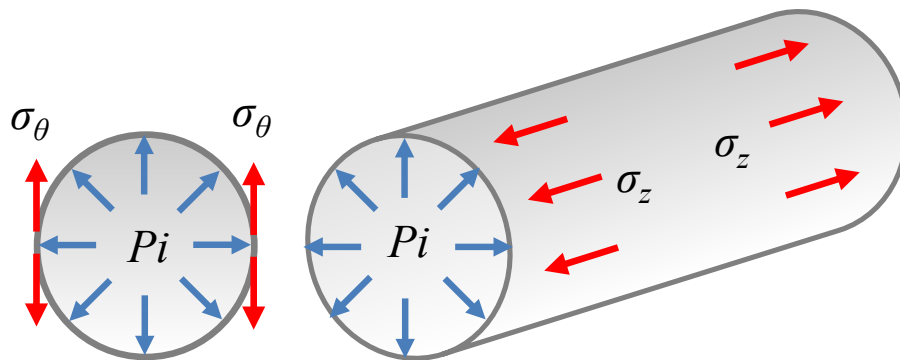


図-3.3 内圧が付加される鋼管パイプラインに発生する応力

3.2.4 土圧・地盤ばねの設定

敷設時の環境についても, 我が国と欧米諸国では大きな違いがある. 我が国では市街地や住宅地域での敷設工事が中心であり, 道路下への敷設が余儀なくされる. その場合, 道路の保全のため, 一定以上の敷設深さを確保することが必要となる.

土圧および地盤ばねによる外力の計算は, 上記 3.2.3 と同様, 「石油パイプライン技術基準(案)」[29]に準拠した. 条件は, 第2章と同一条件とし, 詳細は図-2.53~図-2.55 に示されている. また, 埋設条件を考慮する際の設定も, 表-2.12 と同一である. 表-2.12 の右の2列は, 本論文で扱う標準的な埋設条件2例の場合を示している.

「高圧ガス導管耐震設計指針」[30]では, 埋設深さ 1.8m の場合を標準として地盤ばねを設定しており (表-2.12 では, 右列がそのケース), 埋設深さが異なる場合, 図-3.4 に示すように埋設深さを H_{po} (mm), 導管中心までの深さを H_p (mm) とすると, 管軸方向の応力上限 τ_{cr} , 降伏変位 δ_{cr} は式 (3.3), (3.4) で計算される. 管軸直角方向の応力上限 σ_{cr} は, 別途, C.H. Trautmann, & T.D. O'Rourke の提案図[31] (図-3.5, および表-3.1 参照) を利用して算定するものとされている. σ_{cr} の値は, 導管の呼び径の他に, 埋め戻し土の締め固め土や埋設深さによっても異なる. 実際の埋め戻し土の締め固め度は, N 値や相対密度の調査結果から判断すると密な砂と中密な砂の中間的な範疇に分類でき, 内部摩擦角 ϕ は 40° 相当と考えられる. そこで, σ_{cr} の値は, C.H. Trautmann, & T.D. O'Rourke が ϕ をパラメータとして整理した図-3.5 のうち $\phi=40^\circ$ の場合を引用して算定した. なお, 土の単位体積重量は, $\gamma_t=1.76 \times 10^{-5} \text{N/mm}^3$, 埋設深さ $H_{po}=1,800 \text{mm}$ としている.

$$\tau_{cr} (\text{N/mm}^2) = 1.5 \times 10^{-2} \cdot \frac{H_{po}}{1800} \quad (3.3)$$

$$\delta_{cr} (\text{mm}) = 0.0138H_p \quad (3.4)$$

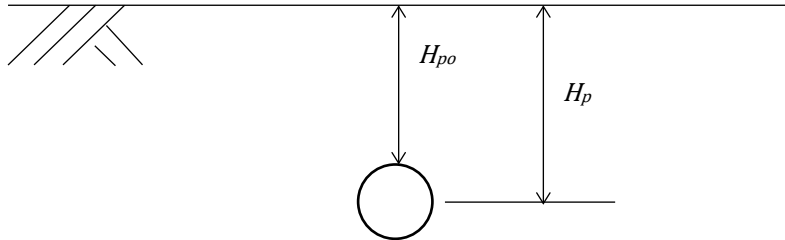


図-3.4 埋設深さ H_{po} , 導管中心までの深さ H_p

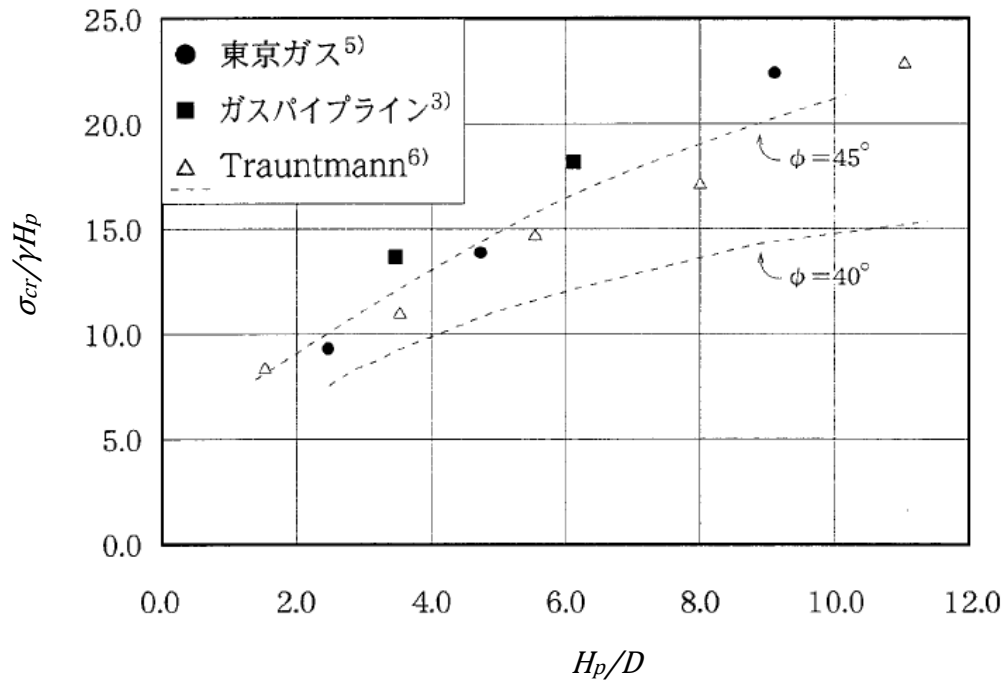


図-3.5 C.H. Trautmann, & T.D. O'Rourke の提案による最大地盤拘束力および実験結果
 ※日本ガス協会「高圧ガス導管耐震設計指針」[30]より引用

表-3.1 C.H. Trautmann, & T.D. O'Rourke の提案による最大地盤拘束力 (内部摩擦角 $\phi = 40^\circ$)
 ※日本ガス協会「高圧ガス導管耐震設計指針」[30]より引用

H_p/D	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\sigma_{cr}/\gamma H_p$	6.7	8.4	9.9	11.1	12.0	12.9	13.7	14.4	14.8	15.2	15.5

3.3 軸圧縮座屈パラメータスタディ

3.3.1 解析条件

第2章では、鋼管の軸圧縮座屈実験結果を再現することができる解析モデルを検討した上で、長大な延長を持つ鋼管パイプラインの軸圧縮座屈特性を評価可能な解析モデルの長さを決定し、デントを有する鋼管パイプラインの軸圧縮座屈特性を示す「局部座屈開始ひずみ」を定義して評価できることを示した。本節では、その解析モデル（モデル長さ 20D）を使い、日本産業規格準拠の鋼管（SGP）および米国石油協会規格準拠の鋼管（API 5L L415）の2種類の鋼管の軸圧縮座屈解析パラメータスタディを実施した結果を述べる。

パラメータは、デントの深さ、鋼管パイプライン内の圧力（内圧）の有無、埋設環境下での土圧および地盤ばねの有無、内圧と土圧および地盤ばねの有無、デントの形状の違い（線状デント・面状デント）を取りあげた。

有限要素解析には汎用構造解析コード Altair HyperWorks OptiStruct ver 2017.1 を使用し、鋼管は4節点シェル要素で分割した。本節の全ケースに共通する解析条件について表-3.2 にまとめる。

表-3.2 軸圧縮座屈解析条件

（日本産業規格準拠の鋼管（SGP）及び米国石油協会規格準拠の鋼管（API 5L L415）の場合）

	日本産業規格準拠の鋼管 (SGP)	米国石油協会規格準拠の鋼管 (API 5L L415)
解析形式	非線形静解析（接触解析および大変形解析）	
メッシュ形式	デント形成用治具：ビーム要素（剛体） 鋼管：シェル要素，地盤：ばね要素	
メッシュサイズ	長さ 20.3mm×幅 19.9mm	
境界条件	両端を剛体化して拘束，上下方向のみ回転可能	
デント深さ	外径に対し 3%，6%，10%（d3%，d6%，d10%と呼称）	
外径	406.4mm（呼び径：400A）	406.4mm（呼び径：400A）
鋼管肉厚	7.9mm	11.9mm
埋設深さ	1,200mm	1,200mm
ヤング率 ^{注1)}	206GPa	206GPa
応力-ひずみ曲線	第2章 図-2.50 参照	図-3.6 参照 ^{注3)}
降伏点	真応力 174MPa ^{注2)} 真ひずみ 0.085% ^{注2)}	真応力 205MPa ^{注3)} 真ひずみ 0.100% ^{注3)}
応力-ひずみ曲線の 終点	真応力 326MPa ^{注2)} 真ひずみ 8.47% ^{注2)}	真応力 519MPa ^{注3)} 真ひずみ 8.00% ^{注3)}
管内内圧 ^{注4)}	0.8MPa	2.0MPa
上方からの土圧 ^{注5)}	埋設深さ 1,200mm：0.0188 MPa	
地盤ばね強さ ^{注6)}	第2章 図-2.52 参照	

- 注1) 「高圧ガス導管液状化耐震設計指針（日本ガス協会）」**[28]**で、導管材料特性として定められた値。
 注2) 鋼管（SGP）の数多くの材料試験の実測値を元に、それらを包含する形でまず応力-ひずみ曲線を描き、次にその曲線を読み取って降伏点、破断点を定めた。詳しくは**2.4.3**を参照。
 注3) 米国石油協会規格で定める最低レベルの強度を満たす応力-ひずみ曲線を描いて定めた。**図-3.6**参照。
 注4) 都市ガス輸送導管内を流れるガスによる圧力。
 注5) 「石油パイプライン技術基準（案）（日本道路協会）」**[29]**の計算式を基に設定。詳しくは**2.4.3**を参照。
 注6) 「高圧ガス導管耐震設計指針（日本ガス協会）」**[30]**より引用。詳しくは**2.4.3**を参照。

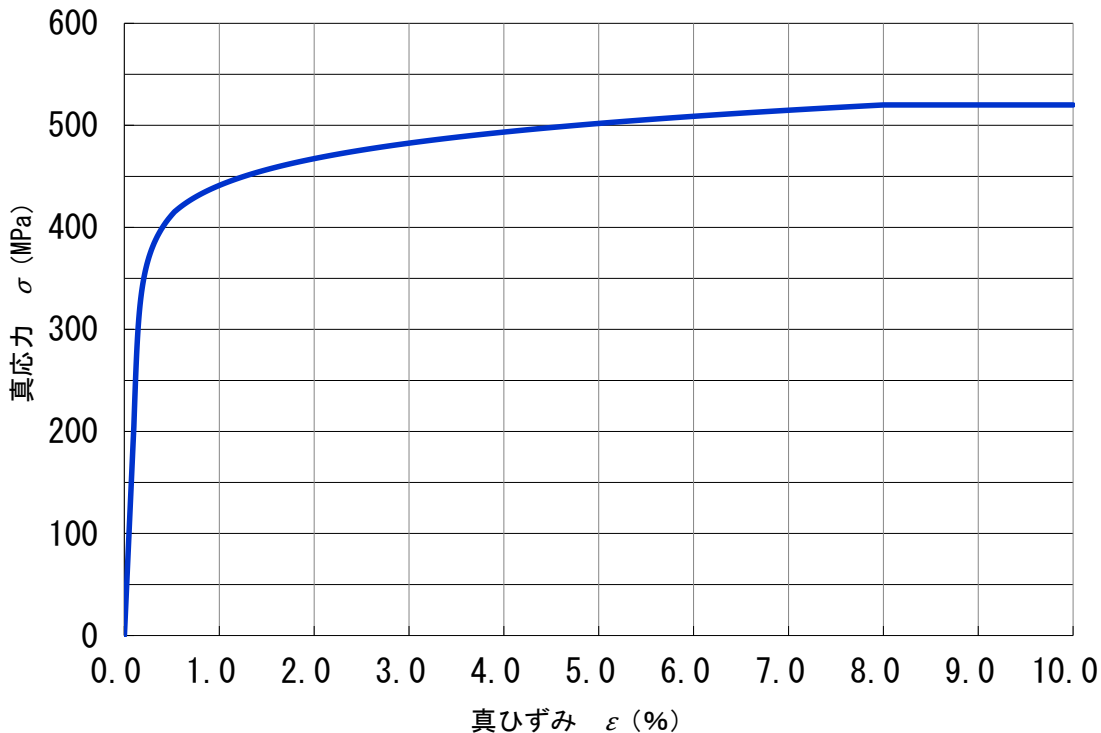


図-3.6 応力-ひずみ曲線（米国石油協会規格準拠の鋼管：API 5L L415）

3.3.2 デントの深さの変化

第2章で検証した解析モデル（モデル長さ：鋼管パイプライン外径の20倍）に対し、3.2で示したように、デントの深さが管径の3%（深さ12mm）、6%（深さ24mm）、10%（深さ40mm）の3ケースの解析モデルを設定する。

まず、デントの形状としては、3.2.1で示した通り、2ケースのデントを想定するが、初めに面状デントの場合でパラメータスタディを実施する。

面状デントの形成方法を示す。ここでは2.3.3(2)でも示したように、解析モデル（デントの無い健全管）に対し、中央部に面状の荷重を負荷することにより、デントを有する鋼管パイプラインの解析モデルを作成した。解析モデルへのデントの形成方法を**図-3.7**に示す。パイプラインの運用圧力および土圧・地盤ばねを考慮した上で、剛体としてモデル化した押しダイを鋼管の外側に接触させ、押しダイを鋼管の管軸直角方向に押し込んだ後、元の位置まで戻して除荷し、鋼管の復元力（スプリングバック）を発現させた後のデント形状を確定させた。

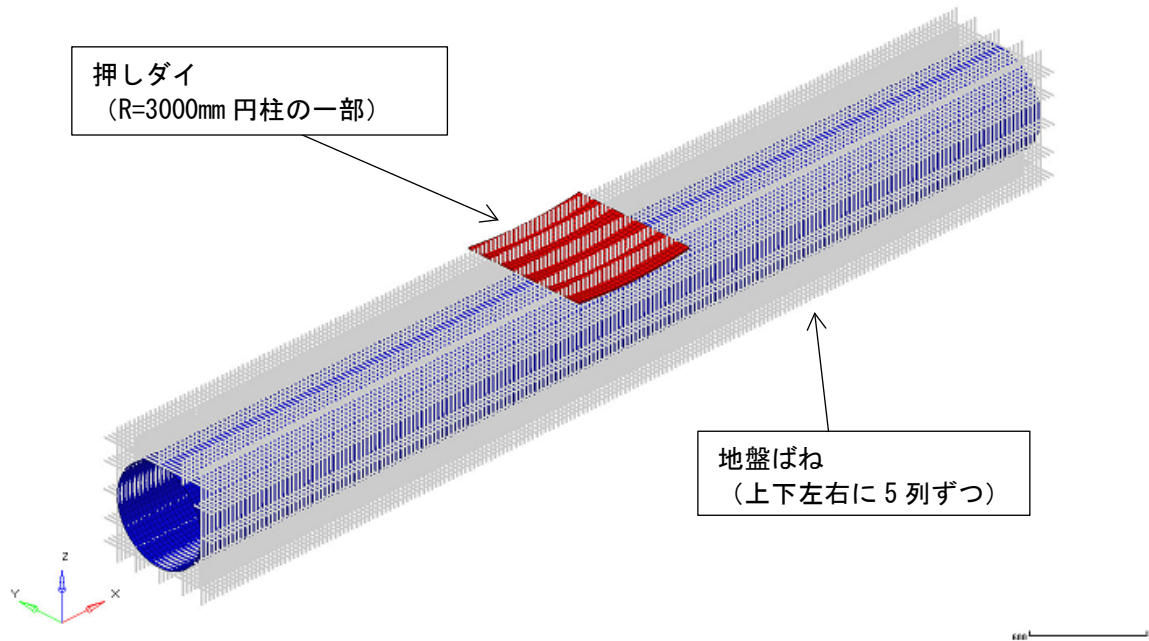


図-3.7 解析モデルへの面状デントの形成方法

解析モデルに面状デントが形成された図を図-3.8～図-3.17 に示す。図-3.8～図-3.10 および図-3.13～図-3.15 それぞれの上図はデントを形成した部分を上面から見た図，下図はデントを形成した部分を側面から見た図を示す。図-3.17 で管底部分が一致していないのは，デントの形成により解析モデル全体がわずかに曲がり，除荷後も戻りきらず，管底部分が沈み込んでいるためである。



図-3.8 解析モデルに形成した面状デント外観 (SGP, デント深さ: 3%)



図-3.9 解析モデルに形成した面状デント外観 (SGP, デント深さ: 6%)

管軸方向ひずみ [-]

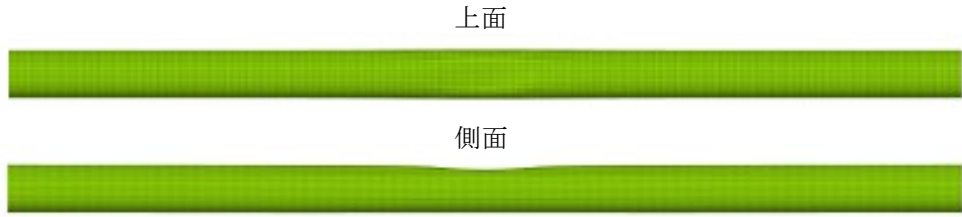
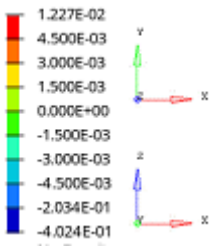


図-3.10 解析モデルに形成した面状デント外観 (SGP, デント深さ : 10%)

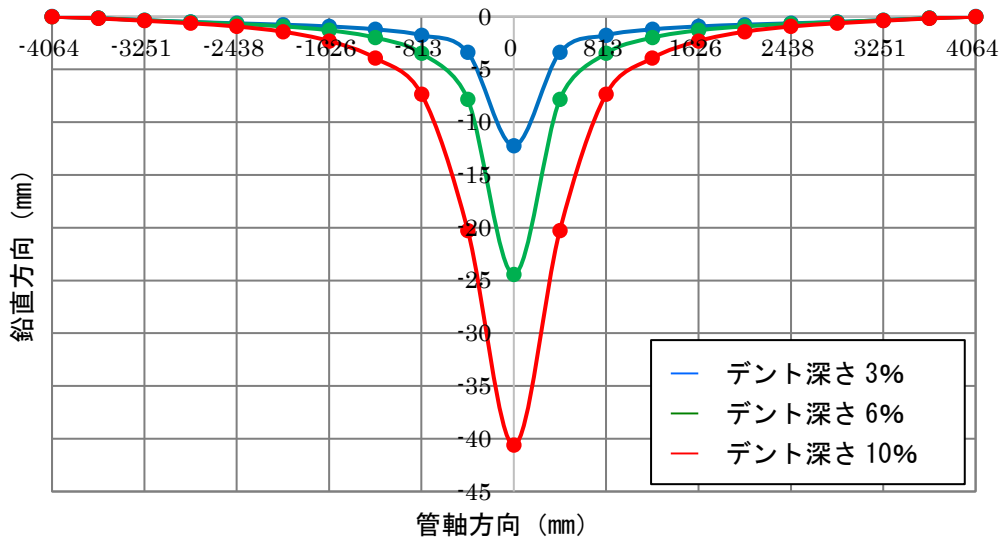


図-3.11 解析モデルに形成した面状デントの形状 (SGP, 管軸方向)

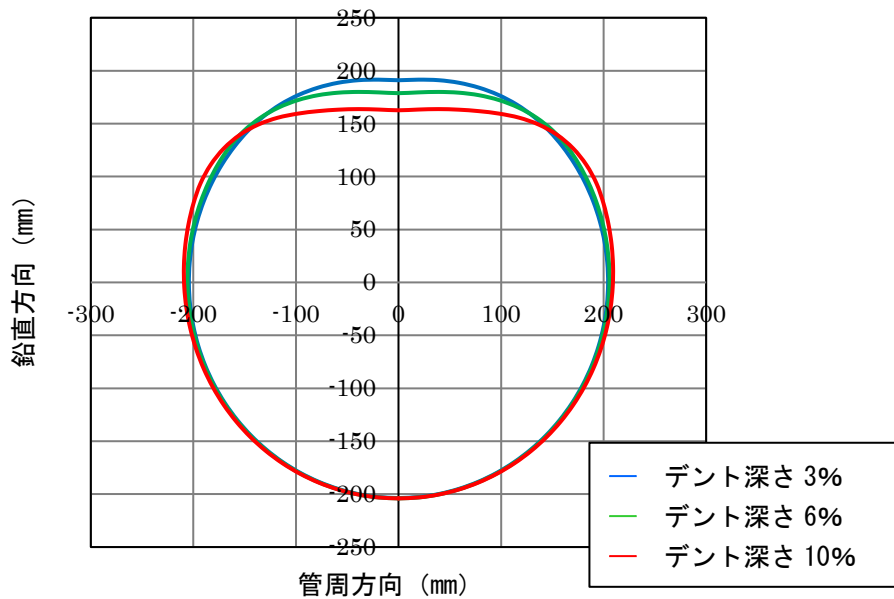


図-3.12 解析モデルに形成した面状デントの形状 (SGP, 管周方向)

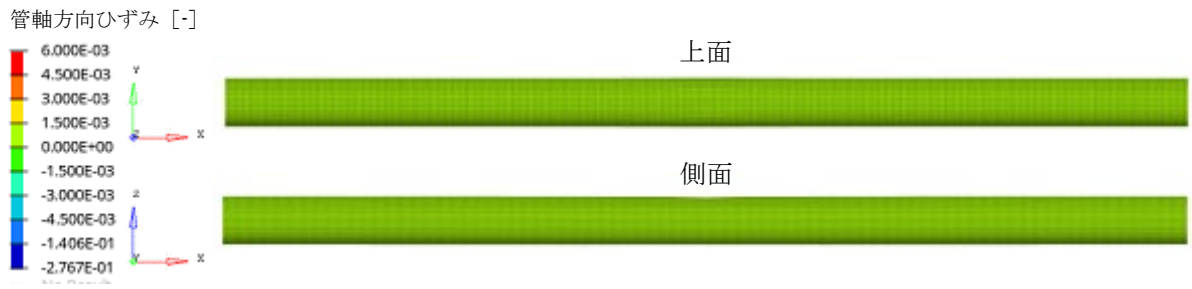


図-3.13 解析モデルに形成したデント外観 (API 5L L415, デント深さ : 3%)



図-3.14 解析モデルに形成したデント外観 (API 5L L415, デント深さ : 6%)

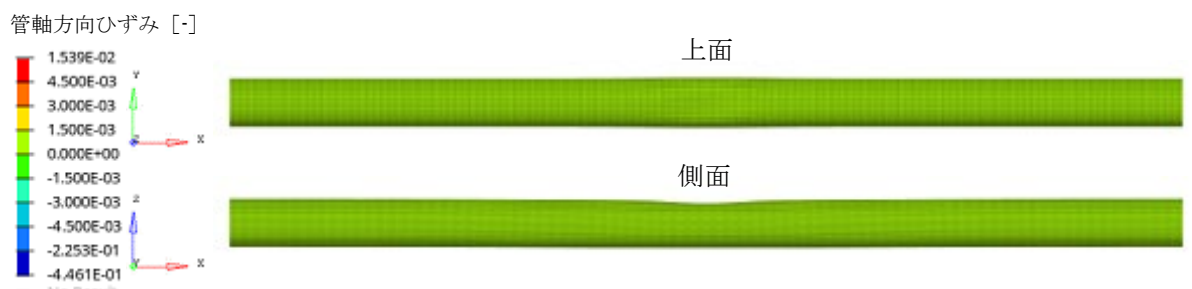


図-3.15 解析モデルに形成したデント外観 (API 5L L415, デント深さ : 10%)

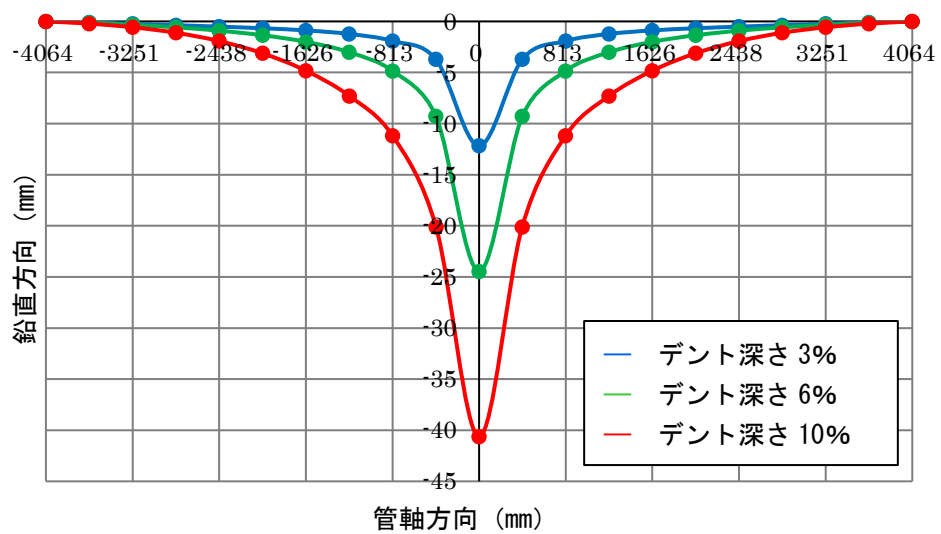


図-3.16 解析モデルに形成したデントの形状 (API 5L L415, 管軸方向)

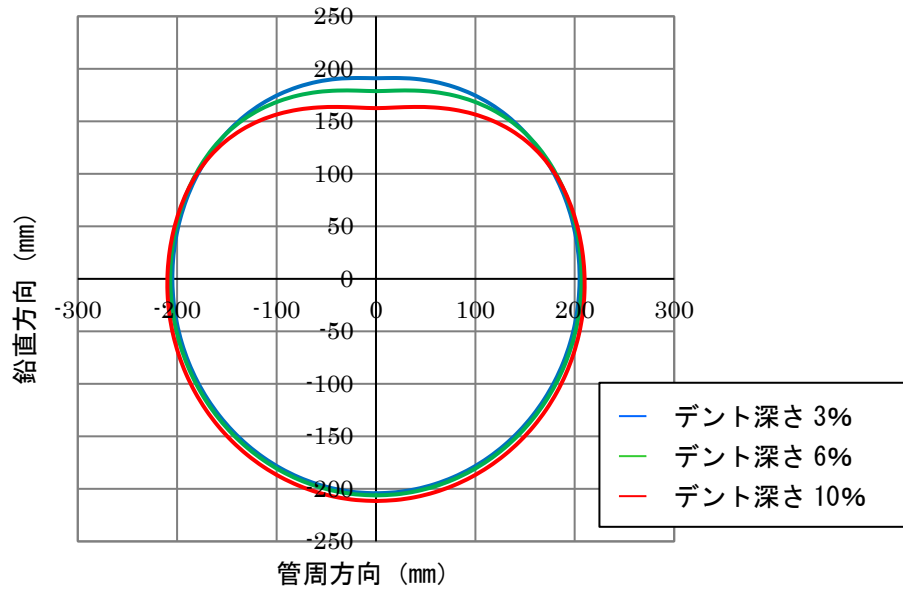


図-3.17 解析モデルに形成したデントの形状 (API 5L L415, 管周方向)

次に、軸圧縮座屈解析を行い、2.5で定義した局部座屈開始ひずみ ϵ_{Rcr} (デント中心から鋼管外径の8倍の位置における軸ひずみ) を求めた。なお、軸圧縮座屈解析時の境界条件は、図-2.59同様、両端を剛体化して拘束するが、上下方向のみは回転が可能とする。

図-3.18, 図-3.19に長尺モデルでの軸ひずみ分布2例(デント深さ3%の場合)を示す。なお、デント深さ6%, 10%の場合の軸ひずみ分布図は付録3に掲載する(図-3.18付図1のように表記)。図-3.18および図-3.19はそれぞれ、平均圧縮軸ひずみ ϵ_{ncr} の0.5倍圧縮した時 ($0.5\epsilon_{ncr}$) と1.0倍に達した時 ($1.0\epsilon_{ncr}$) の軸ひずみ分布図を示す。なお、掲載する軸ひずみ分布図も同様に $0.5\epsilon_{ncr}$ と $1.0\epsilon_{ncr}$ について示す。

デント深さ3%の場合は解析モデルの全体で軸圧縮ひずみが生じているが、6%, 10%の場合はデント部とその周辺に軸圧縮ひずみが集中している様子が見られる。

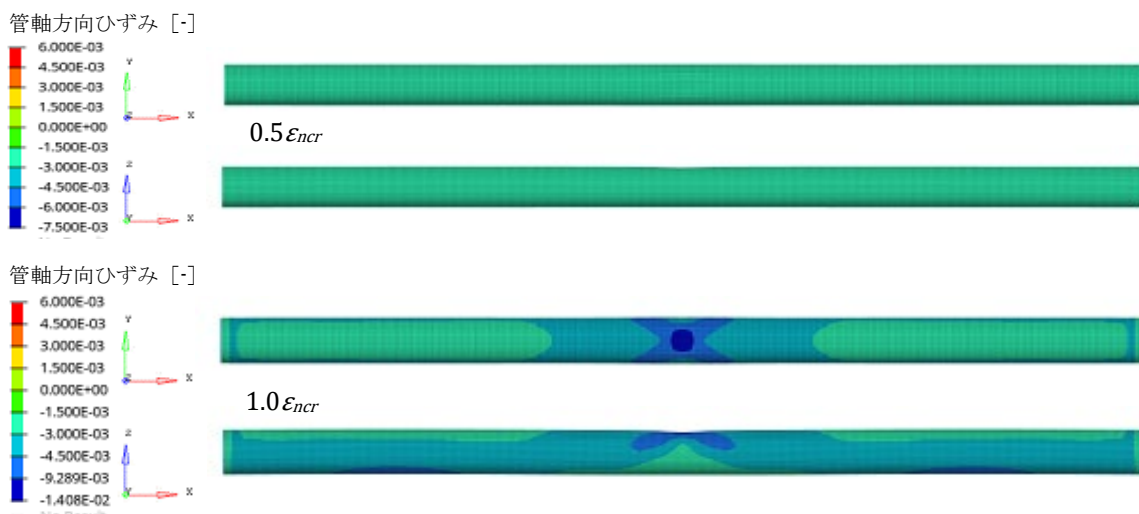


図-3.18 軸ひずみ分布図 (SGP, 面状デント: 深さ3%, 内圧無し, 埋設条件未考慮)

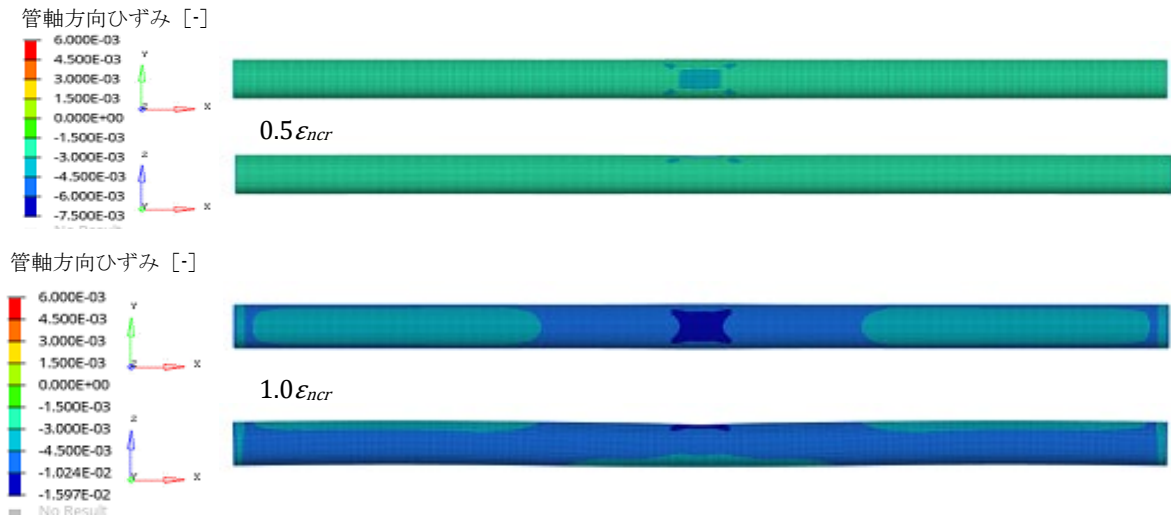


図-3.19 軸ひずみ分布図 (API 5L L415, 面状デント: 深さ 3%, 内圧無し, 埋設条件未考慮)

表-3.3 にパラメータスタディの結果の一覧を示す. 日本産業規格準拠の鋼管 (SGP), 米国石油協会規格準拠の鋼管 (API 5L L415) はいずれも, デント深さ d が深くなるに従い, 最大荷重 P_{max} , 変位 δ_{cr} , 最大軸応力 σ_{max} , 局部座屈開始ひずみ ϵ_{Rcr} が全て低下し, 軸圧縮座屈強度は低下する. ただし, デント深さ 6% の場合と 10% の場合には, 大きな差が生じていない.

表-3.3 軸圧縮座屈解析結果 (デントの深さの影響)

管種	形状	d/D (%)	P_{max} (MN)	δ_{cr} (mm)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{ncr} (%)	ϵ_{Rcr} (%)
SGP	面状デント	3	2.55	28.60	258	0.35	0.35
		6	1.89	10.15	191	0.13	0.11
		10	1.80	8.61	182	0.11	0.09
API 5L L415	面状デント	3	6.10	46.99	414	0.58	0.59
		6	3.97	13.36	269	0.16	0.15
		10	3.76	13.36	255	0.16	0.14

3.3.3 パイプラインの運用圧力の付加 (1)

実際に運用中の鋼管パイプラインには, 内部の流体がもたらす運用圧力 (内圧) が作用している. そこで, その影響を考慮した軸圧縮座屈解析を行った. 都市ガス用に鋼管パイプラインを使用している場合に運用されている圧力として, 日本産業規格準拠の鋼管 (SGP) の場合は 0.8MPa, 米国石油協会規格準拠の鋼管 (API 5L L415) の場合は 2.0MPa を内圧として付加した.

図-3.20, 図-3.21 はそれぞれ, SGP と API 5L L415 の管に対する軸ひずみ分布 (デント深さ 3% の場合) を示す. なお, デント深さ 6%, 10% の場合の軸ひずみ分布図は付録に掲載することは 3.3.2 と同様である. 内圧を付加しない場合と類似しており, ほとんど変化がない.

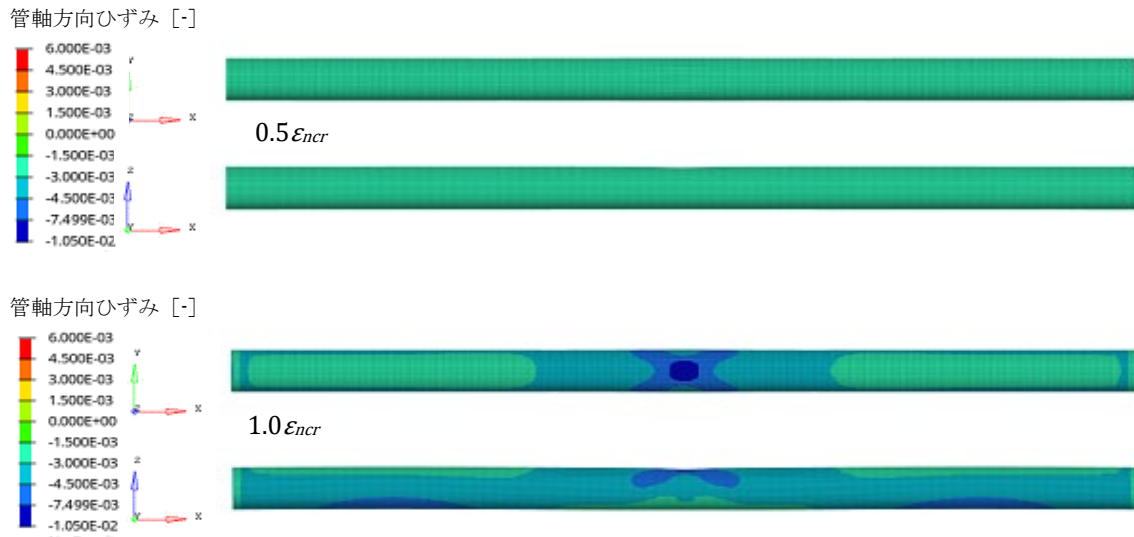


図-3.20 軸ひずみ分布図 (SGP, 面状デント : 深さ 3%, 内圧あり, 埋設条件未考慮)

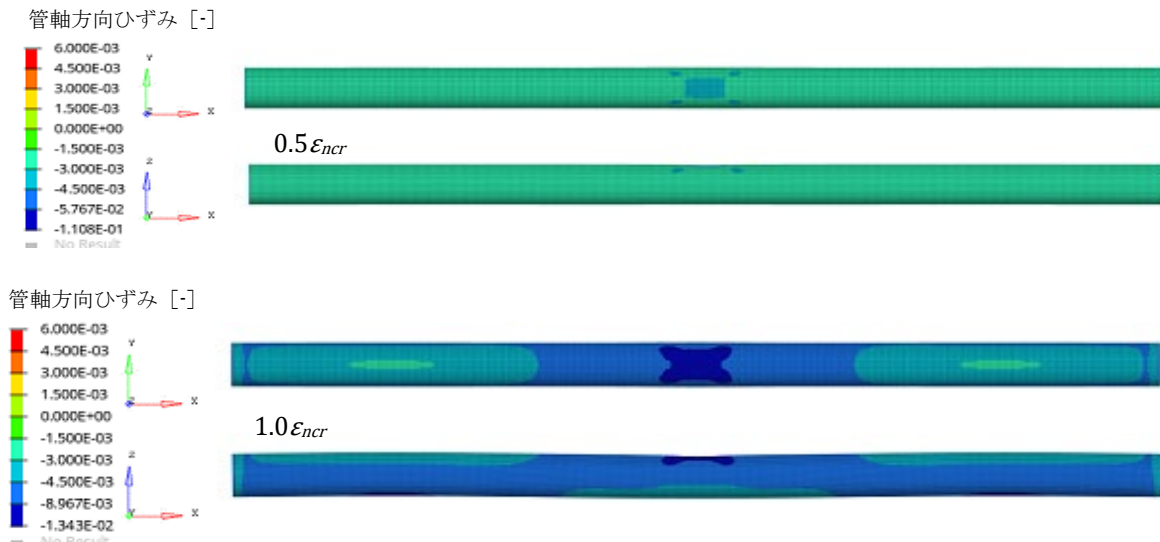


図-3.21 軸ひずみ分布図 (API 5L L415, 面状デント : 深さ 3%, 内圧あり, 埋設条件未考慮)

表-3.4 に結果の一覧を示す。最大荷重 P_{max} , 変位 δ_{cr} , 最大軸応力 σ_{max} , 局部座屈開始ひずみ ϵ_{Rcr} のいずれにも大きな差は見られない。3.2.3 で説明した内圧の効果は、今回のケースではほとんど生じていないといえる。

表-3.4 軸圧縮座屈解析結果（内圧の有無の影響）

管種	デント形状	d/D (%)	内圧	P_{max} (MN)	δ_{cr} (mm)	σ_{max} (MPa)	ε_{ncr} (%)	ε_{Rcr} (%)
SGP	面状デント	3	無し	2.55	28.60	258	0.35	0.35
			有り	2.53	29.42	255	0.36	0.36
		6	無し	1.89	10.15	191	0.13	0.11
			有り	1.88	10.15	190	0.13	0.11
		10	無し	1.80	8.61	182	0.11	0.09
			有り	1.81	8.87	183	0.11	0.09
API 5L L415	面状デント	3	無し	6.10	46.99	414	0.58	0.59
			有り	5.97	45.31	405	0.56	0.57
		6	無し	3.97	13.36	269	0.16	0.15
			有り	3.97	13.36	269	0.16	0.15
		10	無し	3.76	13.36	255	0.16	0.14
			有り	3.74	13.36	254	0.16	0.14

3.3.4 パイプラインの埋設条件の考慮 (1)

実際に運用中の鋼管パイプラインは、橋梁などへ添架されている部分を除けば道路下などに埋設されていることがほとんどであるため、その環境下で受ける外力（土圧、および地盤ばねによる変位量に応じた押し返し）を考慮した軸圧縮座屈解析を行った。

土圧および地盤ばねによる外力の計算は、2.4.3 および 3.2.4 に示した通り、「石油パイプライン技術基準（案）」[29]に準拠した。埋設条件を考慮する際の設定は第2章の表-2.12の右2列に示している。図-3.22 および図-3.23 は軸ひずみ分布（デント深さ 3%の場合）を示す。なお、デント深さ 6%、10%の場合の軸ひずみ分布図は 3.3.2 と同様の付録に掲載している。

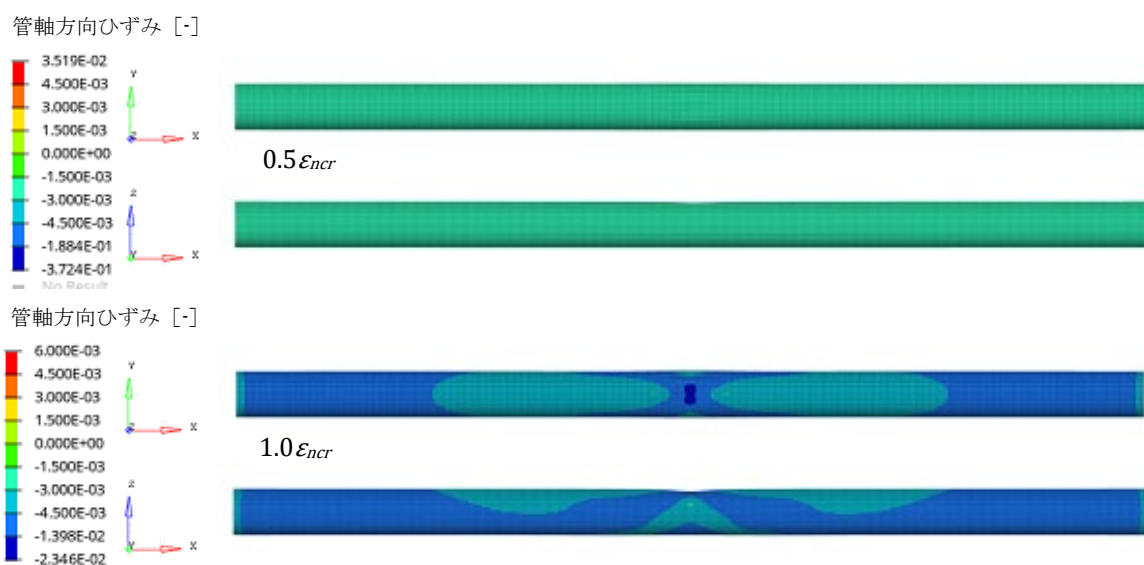


図-3.22 軸ひずみ分布図（SGP，面状デント：深さ 3%，内圧無し，埋設条件考慮）

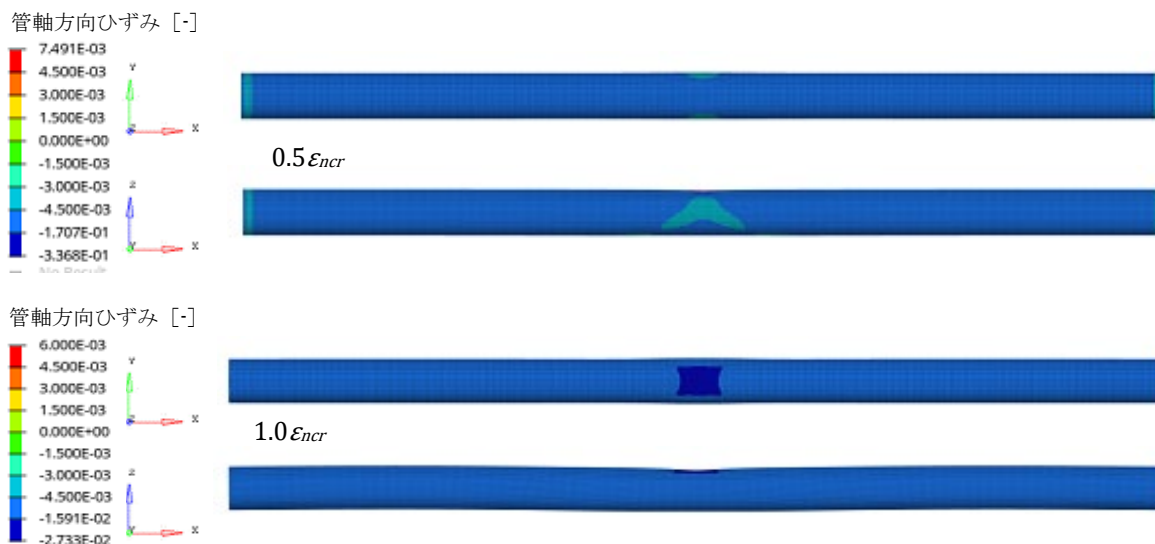


図-3.23 軸ひずみ分布図 (API 5L L415, 面状デント : 深さ 3%, 内圧無し, 埋設条件考慮)

表-3.5 に結果の一覧を示す. 埋設条件を考慮することで最大荷重 P_{max} , 変位 δ_{cr} , 最大軸応力 σ_{max} , 局部座屈開始ひずみ ϵ_{Rcr} はいずれも上昇し, 軸圧縮座屈強度は上昇する. ϵ_{Rcr} で見ると, SGP では 0.09~0.14% 上昇し, API 5L L415 では 0.22~0.37% 上昇しており, API 5L L415 の方が軸圧縮座屈強度の向上効果が大きくなっている.

表-3.5 軸圧縮座屈解析結果 (埋設条件の考慮)

管種	デント形状	d/D (%)	土圧 地盤ばね	P_{max} (MN)	δ_{cr} (mm)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{ncr} (%)	ϵ_{Rcr} (%)
SGP	面状 デント	3	未考慮	2.55	28.60	258	0.35	0.35
			考慮	2.66	38.65	269	0.48	0.47
		6	未考慮	1.89	10.15	191	0.13	0.11
			考慮	2.45	20.38	248	0.25	0.25
		10	未考慮	1.80	8.61	182	0.11	0.09
			考慮	2.22	19.12	225	0.24	0.18
API 5L L415	面状 デント	3	未考慮	6.10	46.99	414	0.58	0.59
			考慮	6.54	68.02	443	0.84	0.82
		6	未考慮	3.97	13.36	269	0.16	0.15
			考慮	6.15	43.69	417	0.54	0.52
		10	未考慮	3.76	13.36	255	0.16	0.14
			考慮	5.72	30.31	388	0.37	0.36

3.3.5 パイプラインの運用圧力と埋設条件の同時考慮 (1)

3.3.3, 3.3.4 に続き, 運用圧力 (内圧) と埋設条件 (土圧および地盤ばね) を同時に考慮した場合の軸圧縮座屈解析を行った.

図-3.24 および図-3.25 はそれぞれ、SGP と API 5L L415 の管に対する軸ひずみ分布 2 例（デント深さ 3% の場合）を示す。なお、デント深さ 6%、10% の場合の軸ひずみ分布図は 3.3.2 と同様、付録に掲載することは 3.3.2 と同様である。

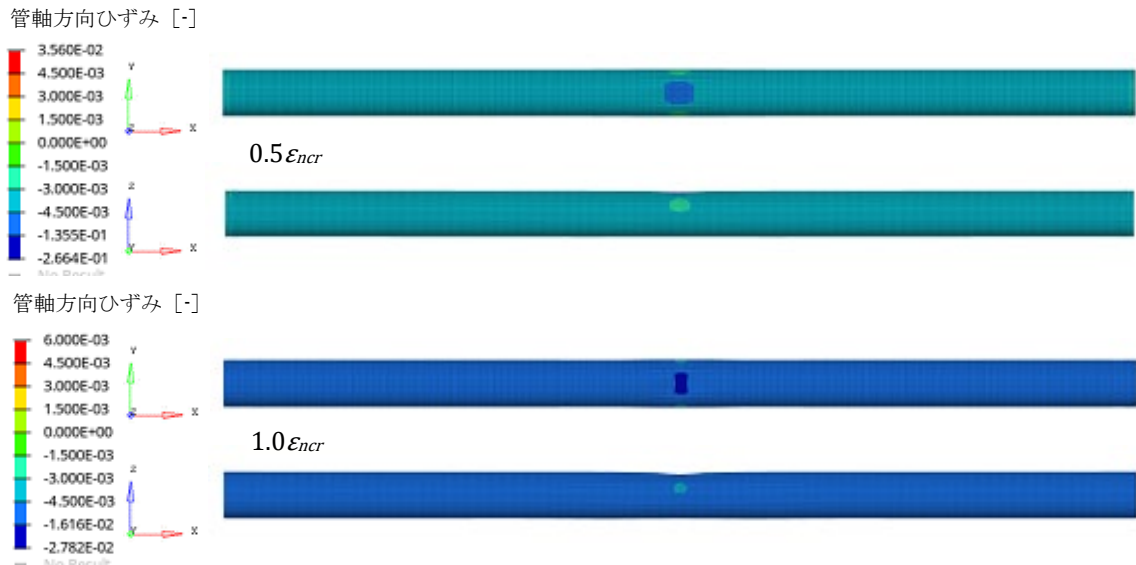


図-3.24 軸ひずみ分布図（SGP，面状デント：深さ 3%，内圧，埋設条件を両方考慮）

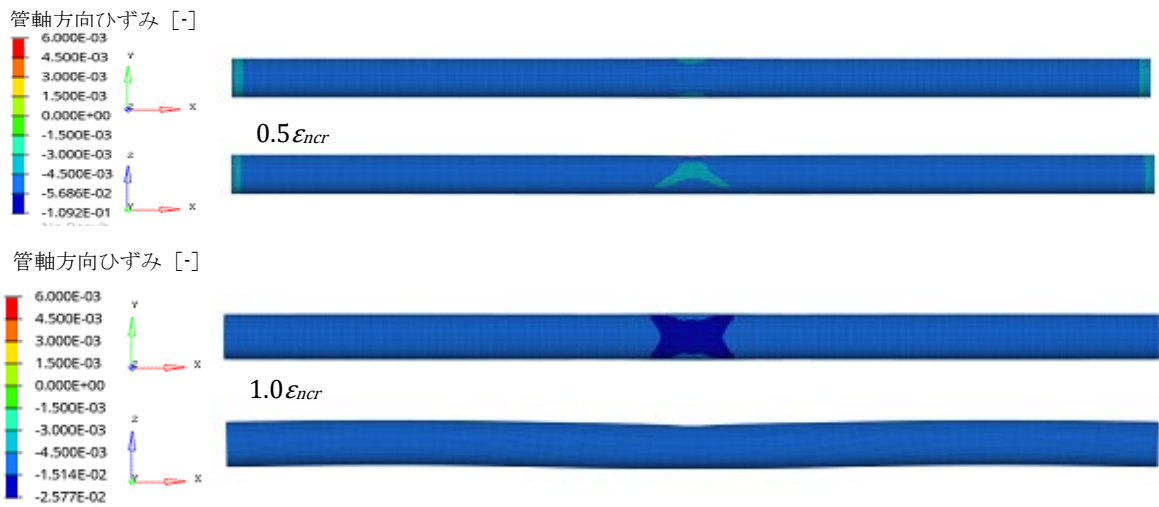


図-3.25 軸ひずみ分布図（API 5L L415，面状デント：深さ 3%，内圧，埋設条件を両方考慮）

表-3.6 に結果の一覧を示す。運用圧力と埋設条件を同時に考慮することで、最大荷重 P_{max} 、変位 δ_{cr} 、最大軸応力 σ_{max} 、局部座屈開始ひずみ ϵ_{Rcr} は全て上昇し、軸圧縮座屈強度は改善する。3.3.4 で埋設条件を考慮した場合よりもさらに改善している。 ϵ_{Rcr} で見ると、SGP では 0.11~0.41%、API 5L L415 では 0.30~0.51% 上昇しており、表-3.5 の埋設条件のみ考慮した場合に比べてさらに上昇している。また、API 5L L415 の方が軸圧縮座屈強度の向上効果が大きくなっていることも傾向は同じである。

表-3.6 軸圧縮座屈解析結果（内圧，埋設条件を両方考慮）

管種	デント形状	d/D (%)	内圧埋設条件	P_{max} (MN)	δ_{cr} (mm)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{encr} (%)	ϵ_{Rcr} (%)
SGP	面状デント	3	未考慮	2.55	28.60	258	0.35	0.35
			考慮	2.69	61.40	272	0.76	0.76
		6	未考慮	1.89	10.15	191	0.13	0.11
			考慮	2.49	23.75	252	0.29	0.28
		10	未考慮	1.80	8.61	182	0.11	0.09
			考慮	2.28	17.18	231	0.21	0.20
API 5L L415	面状デント	3	未考慮	6.10	46.99	414	0.58	0.59
			考慮	6.43	82.19	436	1.01	1.00
		6	未考慮	3.97	13.36	269	0.16	0.15
			考慮	6.22	55.04	422	0.68	0.66
		10	未考慮	3.76	13.36	255	0.16	0.14
			考慮	5.87	37.49	398	0.46	0.44

3.3.6 解析結果の比較と考察 (1)

ここで，3.3.2～3.3.5で示した結果について比較考察する。

図-3.26～図-3.31は，3.3.2で示した管種およびデント深さ（3%，6%，10%）別に，鋼管パイプライン単独，3.3.3の運用圧力（内圧）の付加，3.3.4の埋設条件の考慮，3.3.5の運用圧力と埋設条件を共に考慮した場合の比較結果を，公称応力-軸圧縮ひずみ曲線に示す。

内圧の存在は局部座屈開始ひずみ（公称応力がピークを迎える点）の上昇にほとんど寄与しないが，埋設条件を考慮するとデント深さ 3%～10%のいずれでも，局部座屈開始ひずみが日本産業規格準拠の鋼管（SGP）では 0.09～0.14%，米国石油協会規格準拠の鋼管（API 5L L415）では 0.22～0.37%向上した。また，内圧と埋設条件を共に考慮した場合は，相乗効果的にさらに局部座屈開始ひずみが向上していることが読み取れる。図-3.3に示した通り，内圧の存在により軸圧縮座屈に抗する力は σ_z であるが，内圧単独では軸圧縮座屈の進展中に σ_z が十分に効果を発揮できないが，埋設条件を考慮した結果から軸圧縮座屈の進展に伴い，管の変形が抑えられるため， σ_z の効果が発揮され，「相乗効果」が生まれるものと考えられる。

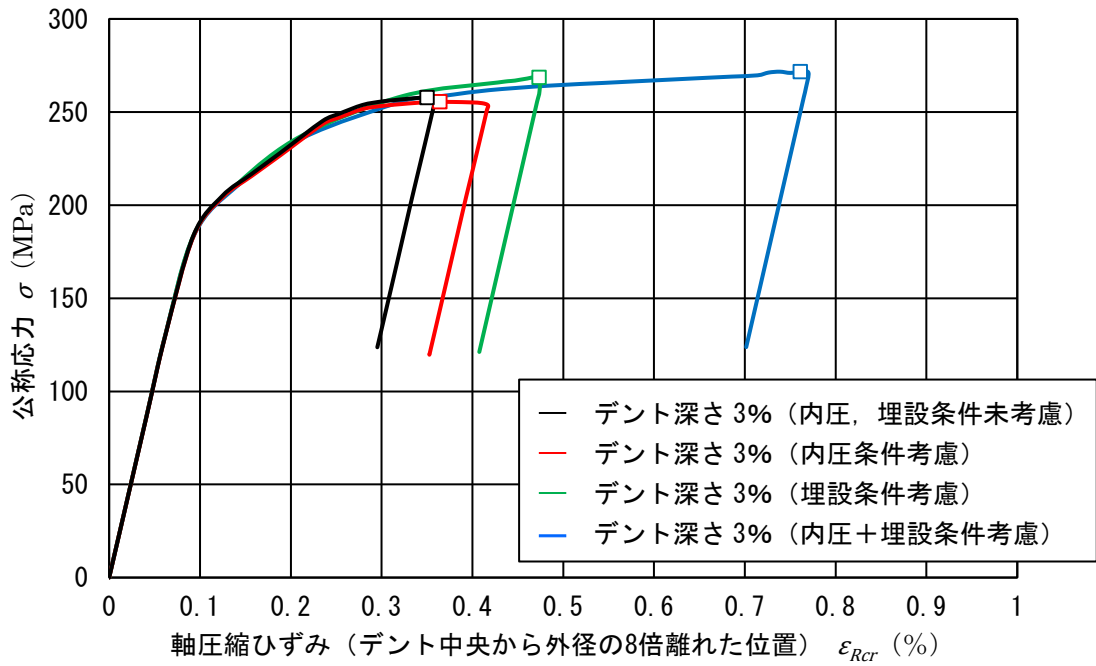


図-3.26 公称応力-軸圧縮ひずみ曲線の比較 (SGP, 面状デント: 深さ 3%)

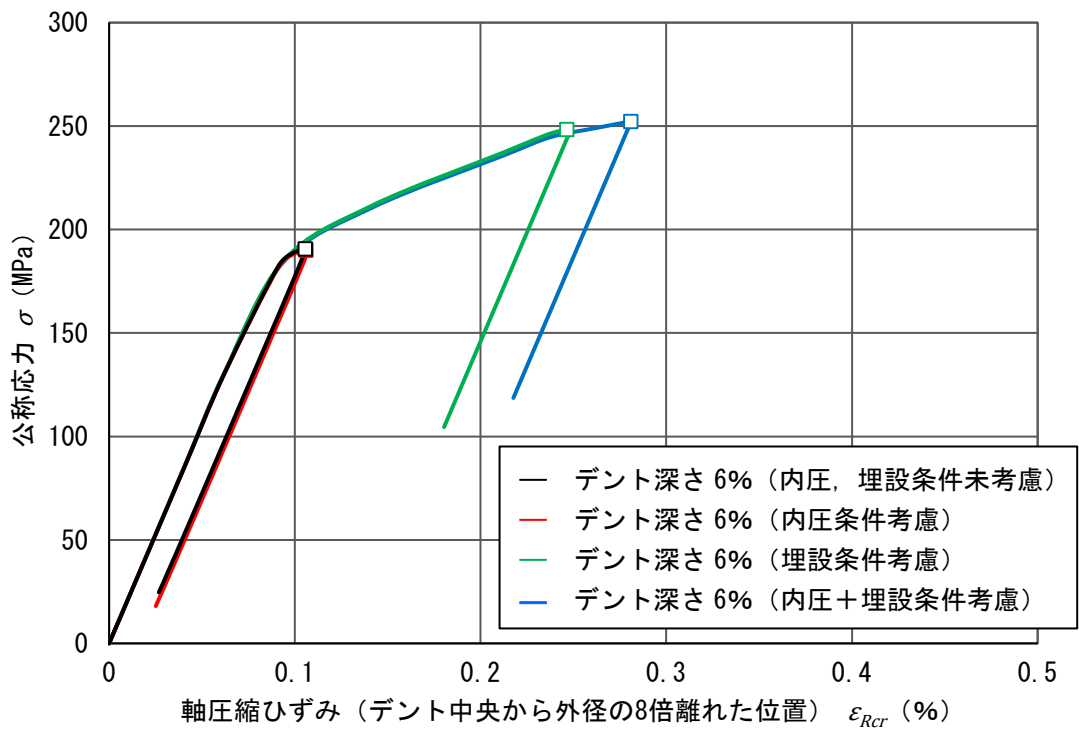


図-3.27 公称応力-軸圧縮ひずみ曲線の比較 (SGP, 面状デント: 深さ 6%)

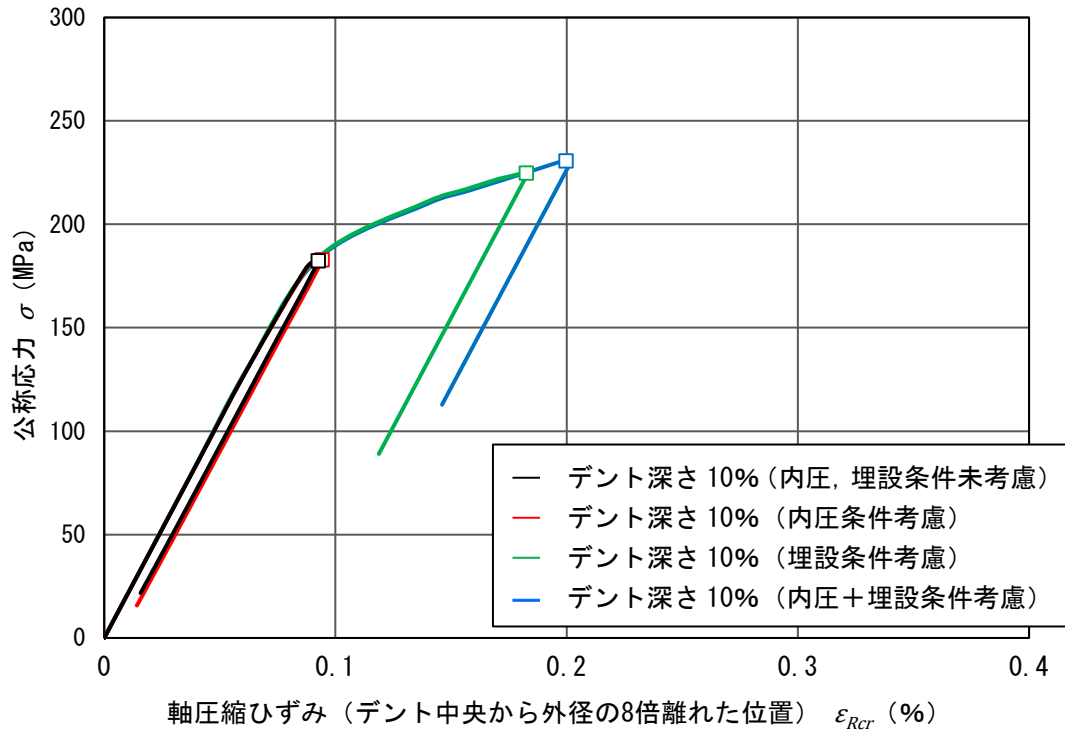


図-3.28 公称応力-軸圧縮ひずみ曲線の比較 (SGP, 面状デント: 深さ 10%)

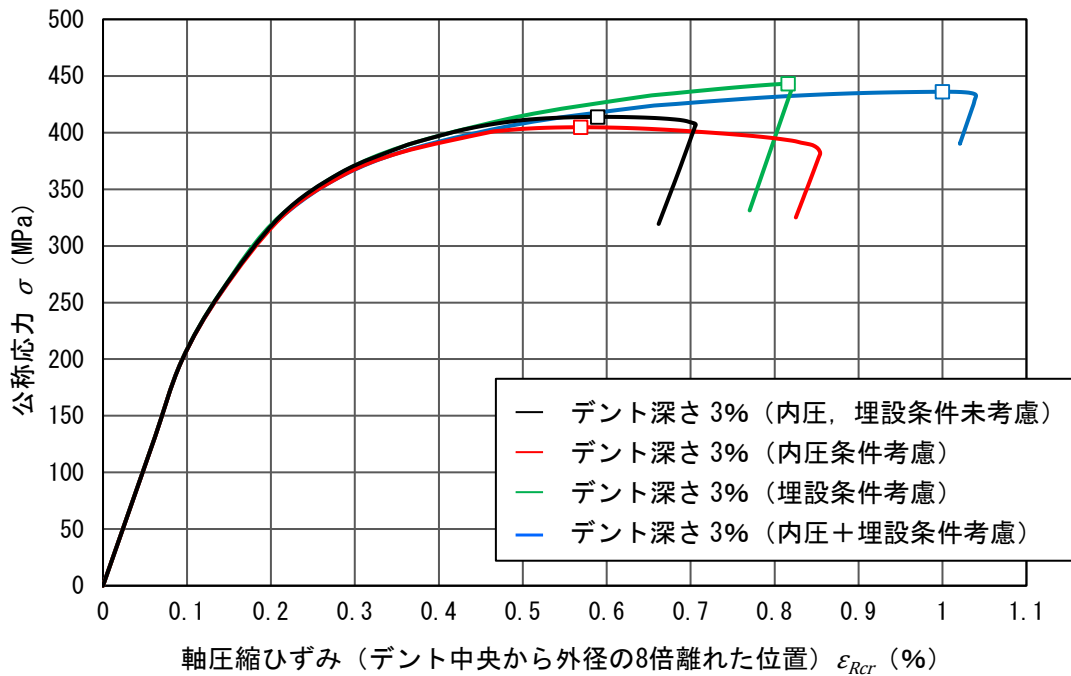


図-3.29 公称応力-軸圧縮ひずみ曲線の比較 (API 5L L415, 面状デント: 深さ 3%)

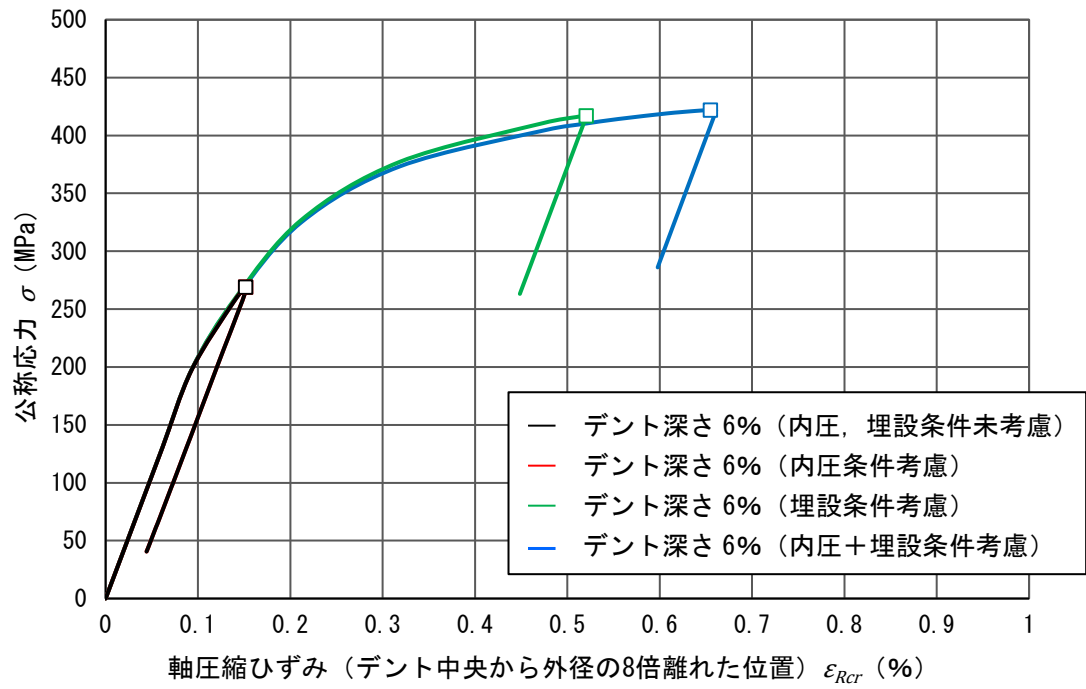


図-3.30 公称応力-軸圧縮ひずみ曲線の比較 (API 5L L415, 面状デント: 深さ 6%)

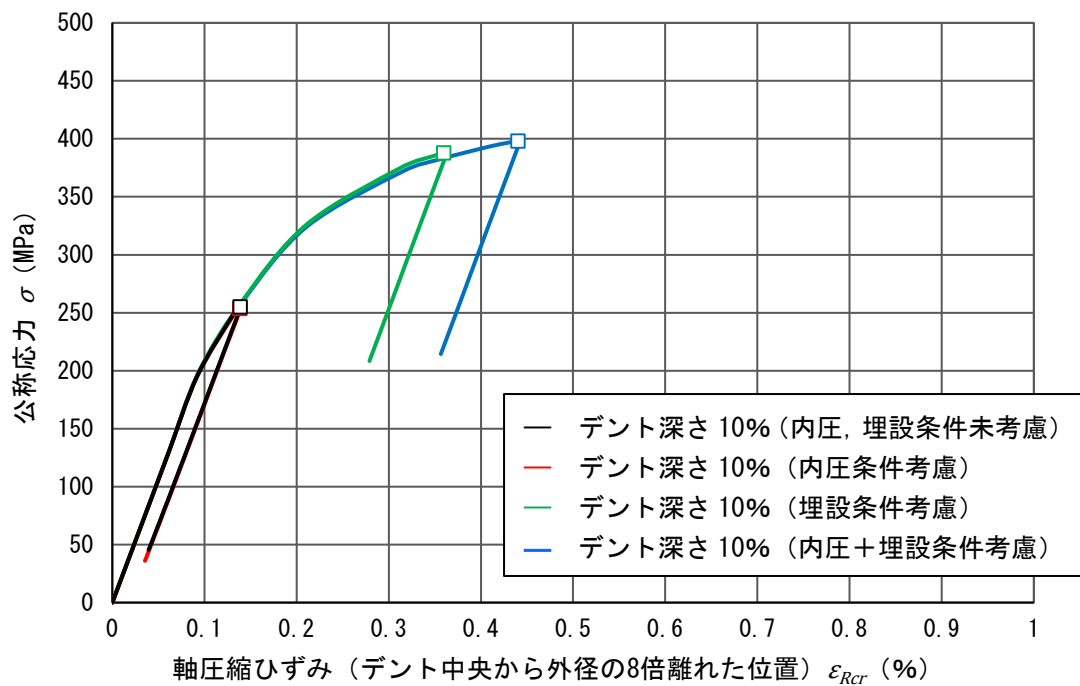


図-3.31 公称応力-軸圧縮ひずみ曲線の比較 (API 5L L415, 面状デント: 深さ 10%)

3.3.7 デントの形状の違い

3.2.1 でも示した通り、デントの形状として線状デントも想定される。本節以降は、線状デントの場合でパラメータスタディを実施する。

線状デントの形成方法を図-3.32に示す。解析モデル（デントの無い健全管）に対し、管中央部に線状の荷重を負荷することにより、デントを有する鋼管パイプラインの解析モデルを作成した。面状デントと同様、解析モデルにパイプラインの運用圧力および土圧・地盤ばねを考慮した上で、剛体としてモデル化した押しダイを解析モデルの外側に接触させ、管軸直角方向に押し込んだ後、元の位置まで戻して除荷し、鋼管の復元力（スプリングバック）を発現させた後のデント形状を確定させた。

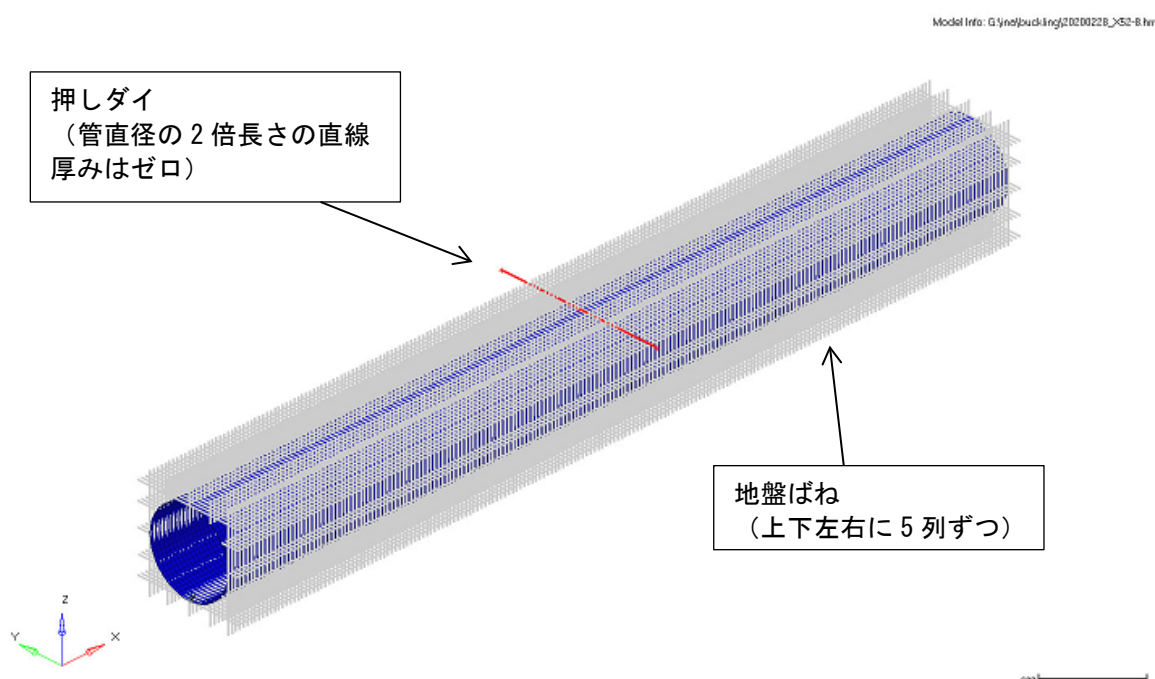


図-3.32 解析モデルへの線状デントの形成方法

解析モデルに線状デントが形成された図を図-3.33～図-3.42に示す。



図-3.33 解析モデルに形成した線状デント外観（SGP，デント深さ：3%）



図-3.34 解析モデルに形成した線状デント外観 (SGP, デント深さ : 6%)



図-3.35 解析モデルに形成した線状デント外観 (SGP, デント深さ : 10%)

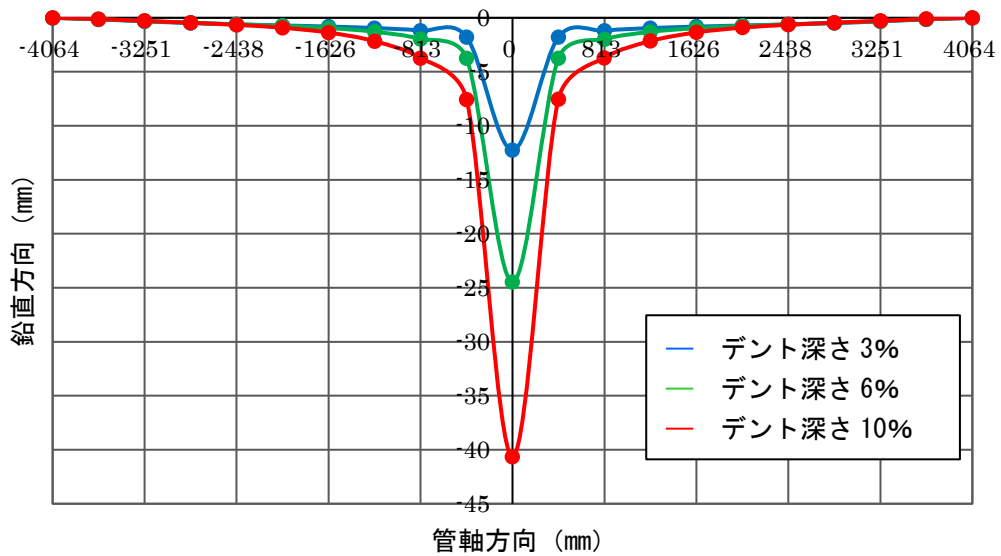


図-3.36 解析モデルに形成した線状デントの形状 (SGP, 管軸方向)

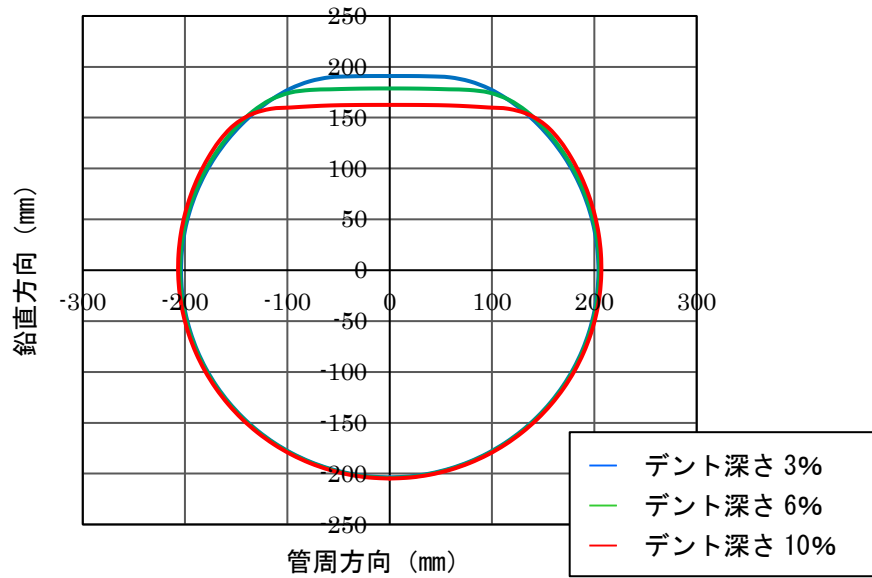


図-3.37 解析モデルに形成した線状デントの形状 (SGP, 管周方向)

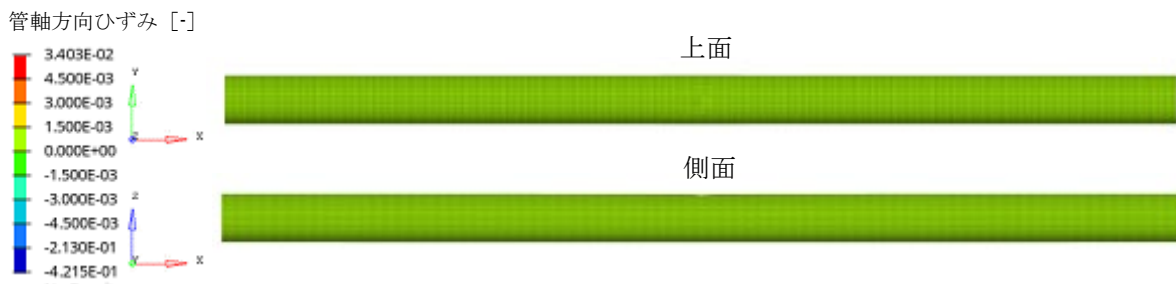


図-3.38 解析モデルに形成した線状デント外観 (API 5L L415, デント深さ : 3%)



図-3.39 解析モデル上に形成した線状デント外観 (API 5L L415, デント深さ : 6%)



図-3.40 解析モデル上に形成した線状デント外観 (API 5L L415, デント深さ : 10%)

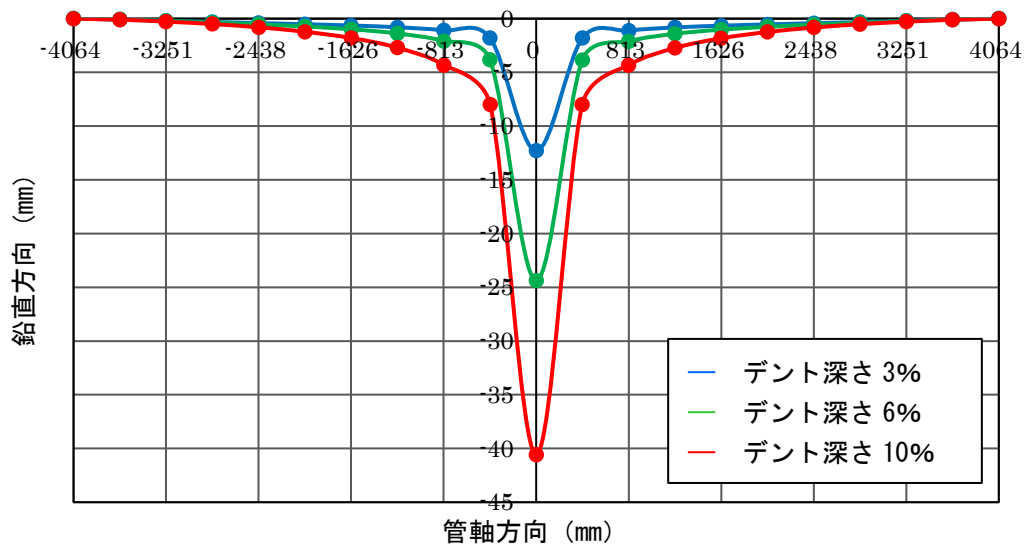


図-3.41 解析モデル上に形成した線状デントの形状 (API 5L L415, 管軸方向)

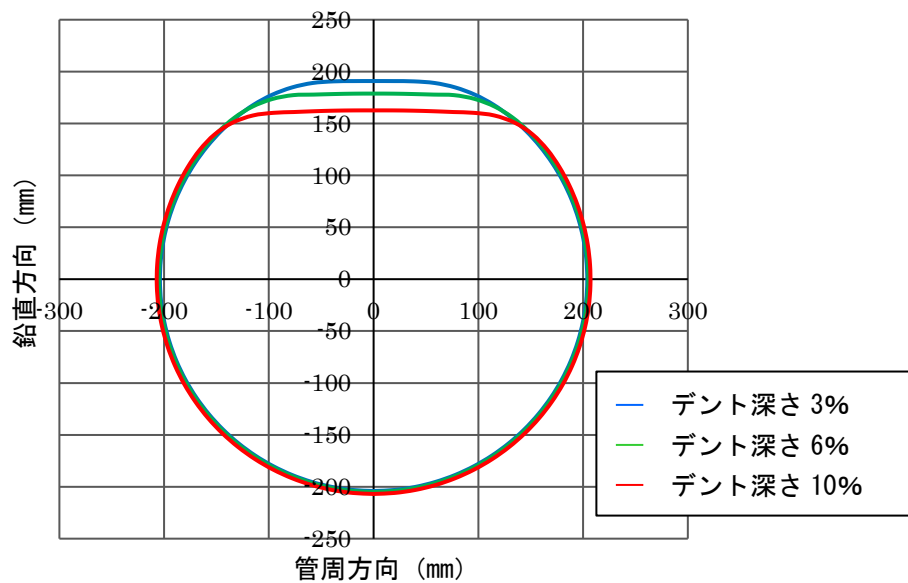


図-3.42 解析モデル上に形成した線状デントの形状 (API 5L L415, 管周方向)

次に、軸圧縮座屈解析を行い、2.5で定義した局部座屈開始ひずみ ϵ_{Rcr} (デント中心から鋼管外径の8倍の位置の軸ひずみ) を求めた。図-3.43、図-3.44に軸ひずみ分布 (デント深さ3%の場合) を示す。なお、デント深さ6%、10%の場合の軸ひずみ分布図は3.3.2と同様、付録に掲載している。

表-3.7に結果の一覧を、面状デントの場合との比較の形で示す。面状デントに比べ、線状デントの方が最大荷重 P_{max} 、変位 δ_{cr} 、最大軸応力 σ_{max} 、局部座屈開始ひずみ ϵ_{Rcr} は小さくなるものがほとんどで、軸圧縮座屈強度は線状デントの方が弱くなるのがうかがえる。ただその差はやや小さく、特にデント深さ6%の場合は、結果に差はないといえる。



図-3.43 軸ひずみ分布図 (SGP, 線状デント : 深さ3%, 内圧無し, 埋設条件未考慮)

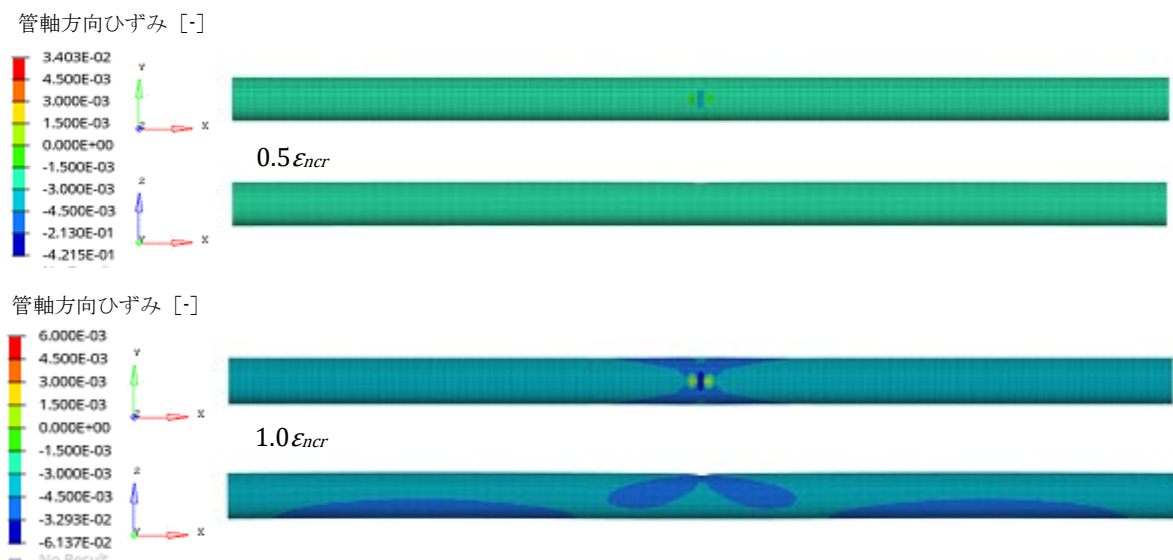


図-3.44 軸ひずみ分布図 (API 5L L415, 線状デント : 深さ3%, 内圧無し, 埋設条件未考慮)

表-3.7 軸圧縮座屈解析結果（デントの形状による違い）

管種	d/D (%)	デント形状	P_{max} (MN)	δ_{cr} (mm)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{ncr} (%)	ϵ_{Rcr} (%)
SGP	3	面状デント	2.55	28.60	258	0.35	0.35
		線状デント	2.41	21.28	243	0.26	0.24
	6	面状デント	1.89	10.15	191	0.13	0.11
		線状デント	1.73	7.83	175	0.10	0.09
	10	面状デント	1.80	8.61	182	0.11	0.09
		線状デント	1.46	6.73	148	0.08	0.07
API 5L L415	3	面状デント	6.10	46.99	414	0.58	0.59
		線状デント	5.88	35.15	398	0.43	0.42
	6	面状デント	3.97	13.36	269	0.16	0.15
		線状デント	3.90	13.36	265	0.16	0.15
	10	面状デント	3.76	13.36	255	0.16	0.14
		線状デント	3.39	11.43	230	0.14	0.12

3.3.8 パイプラインの運用圧力の付加 (2)

線状デントの場合で、3.3.3と同様、パイプラインの運用圧力（内圧）を付加して軸圧縮座屈解析を行った。図-3.45、図-3.46は軸ひずみ分布（デント深さ3%の場合）を示す。なお、デント深さ6%、10%の場合の軸ひずみ分布図は3.3.2と同様、付録に掲載している。3.3.3での結果と同様、内圧の有無で、ほとんど結果の差はなかった。

表-3.8に結果の一覧を示す。最大荷重 P_{max} 、変位 δ_{cr} 、最大軸応力 σ_{max} 、局部座屈開始ひずみ ϵ_{Rcr} のいずれにも大きな差は見られない。

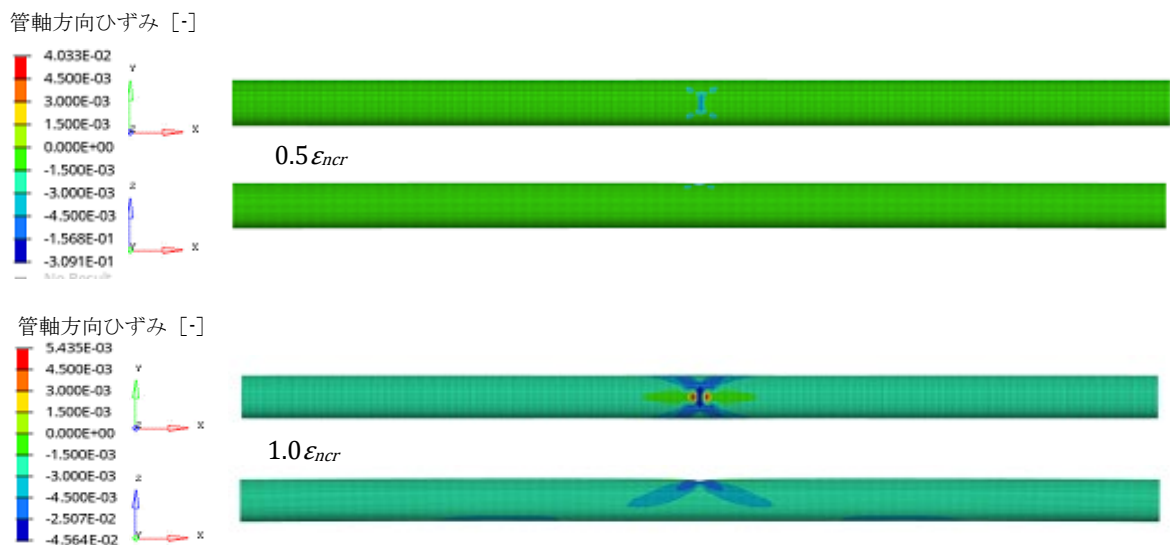


図-3.45 軸ひずみ分布図（SGP、線状デント：深さ3%、内圧あり、埋設条件未考慮）

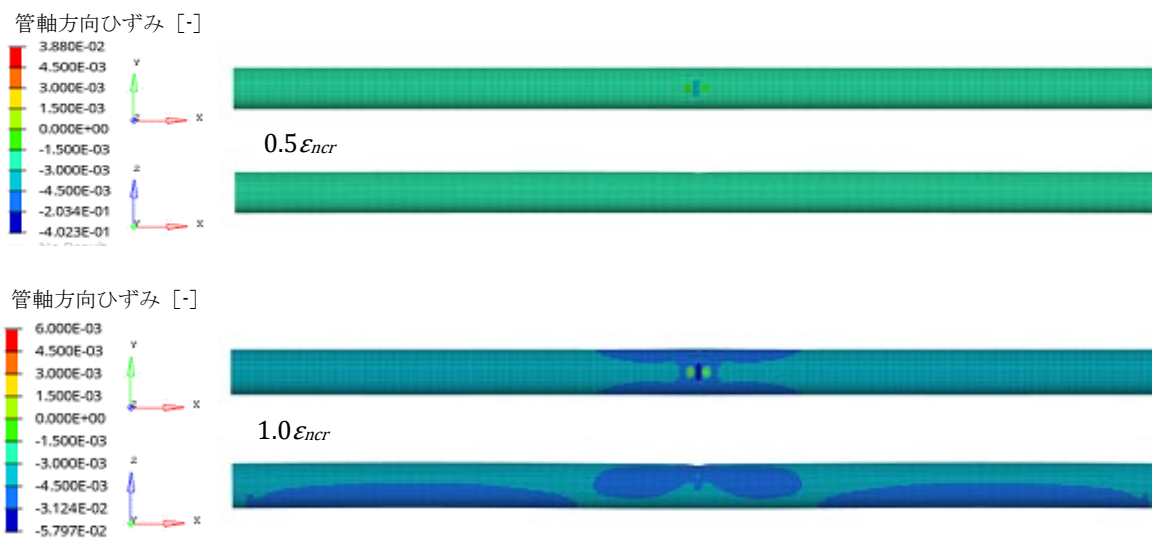


図-3.46 軸ひずみ分布図 (API 5L L415, 線状デント : 深さ 3%, 内圧あり, 埋設条件未考慮)

表-3.8 軸圧縮座屈解析結果 (内圧の有無)

管種	デント形状	d/D (%)	内圧	P_{max} (MN)	δ_{cr} (mm)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{ncr} (%)	ϵ_{Rcr} (%)
SGP	線状デント	3	無し	2.41	21.28	243	0.26	0.24
			有り	2.38	20.20	240	0.25	0.23
		6	無し	1.73	7.83	175	0.10	0.09
			有り	1.74	7.83	175	0.10	0.09
		10	無し	1.46	6.73	148	0.08	0.07
			有り	1.47	6.73	148	0.08	0.07
API 5L L415	線状デント	3	無し	5.88	35.15	398	0.43	0.42
			有り	5.86	37.18	397	0.46	0.45
		6	無し	3.90	13.36	265	0.16	0.15
			有り	3.89	13.36	263	0.16	0.15
		10	無し	3.39	11.43	230	0.14	0.12
			有り	3.39	11.43	230	0.14	0.12

3.3.9 パイプラインの埋設条件の考慮 (2)

線状デントの場合で、3.3.4と同様、埋設条件（土圧、および地盤ばねによる変位量に応じた押し返し）を考慮した軸圧縮座屈解析を行った。図-3.47、図-3.48は軸ひずみ分布（デント深さ3%の場合）を示す。なお、デント深さ6%、10%の場合の軸ひずみ分布図は3.3.2と同様、付録に掲載している。

表-3.9に結果の一覧を示す。日本産業規格準拠の鋼管（SGP）でデント深さ3%の場合、埋設条件を考慮しない場合との差はほとんど生じなかったが、デント深さ6%、10%の場合、最大荷重 P_{max} 、変位 δ_{cr} 、最大軸応力 σ_{max} 、局部座屈開始ひずみ ϵ_{Rcr} は全て上昇し、軸圧縮座屈強度は上

昇した。

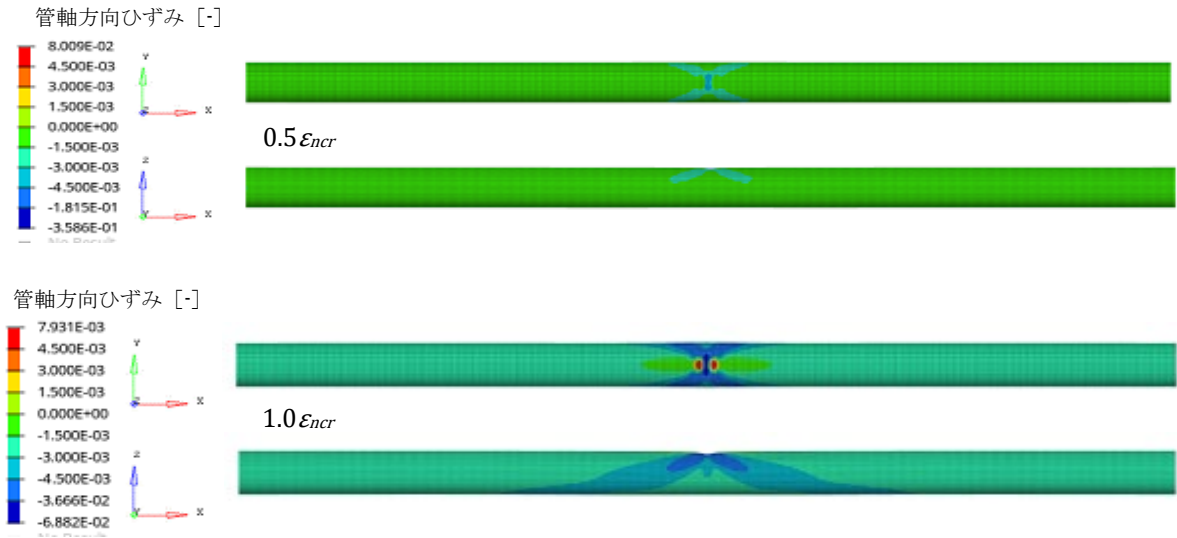


図-3.47 軸ひずみ分布図 (SGP, 線状デント: 深さ 3%, 内圧無し, 埋設条件考慮)

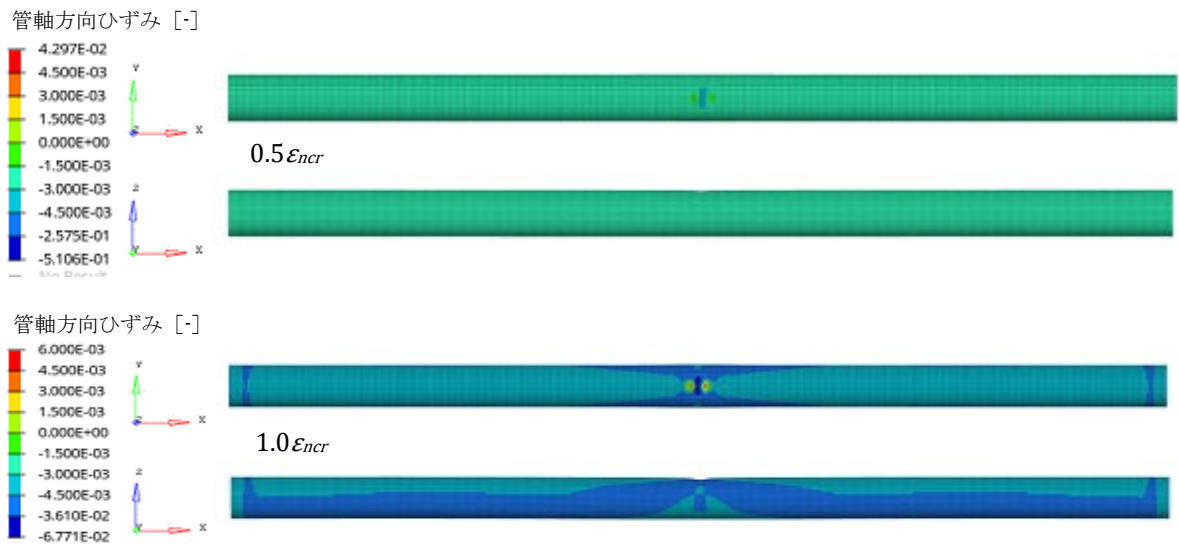


図-3.48 軸ひずみ分布図 (API 5L L415, 線状デント: 深さ 3%, 内圧無し, 埋設条件考慮)

表-3.9 軸圧縮座屈解析結果（埋設条件の考慮）

管種	デント形状	d/D (%)	土圧 地盤ばね	P_{max} (MN)	δ_{cr} (mm)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{ncr} (%)	ϵ_{Rcr} (%)
SGP	線状 デント	3	未考慮	2.41	21.28	243	0.26	0.24
			考慮	2.43	21.88	245	0.26	0.24
		6	未考慮	1.73	7.83	175	0.10	0.09
			考慮	2.29	23.61	231	0.29	0.20
		10	未考慮	1.46	6.73	148	0.08	0.07
			考慮	2.19	25.85	222	0.32	0.17
API 5L L415	線状 デント	3	未考慮	5.88	35.15	398	0.43	0.42
			考慮	6.00	38.52	407	0.47	0.45
		6	未考慮	3.90	13.36	265	0.16	0.15
			考慮	5.48	33.06	372	0.41	0.31
		10	未考慮	3.39	11.43	230	0.14	0.12
			考慮	5.19	33.06	352	0.41	0.27

3.3.10 パイプラインの運用圧力と埋設条件の同時考慮（2）

線状デントの場合で、3.3.5と同様、運用圧力（内圧）と埋設条件（土圧および地盤ばね）を同時に考慮した場合の軸圧縮座屈解析を行った。

図-3.49、図-3.50は軸ひずみ分布（デント深さ3%の場合）を示す。なお、3.3.2と同様、デント深さ6%、10%の場合の軸ひずみ分布図は付録に掲載している。

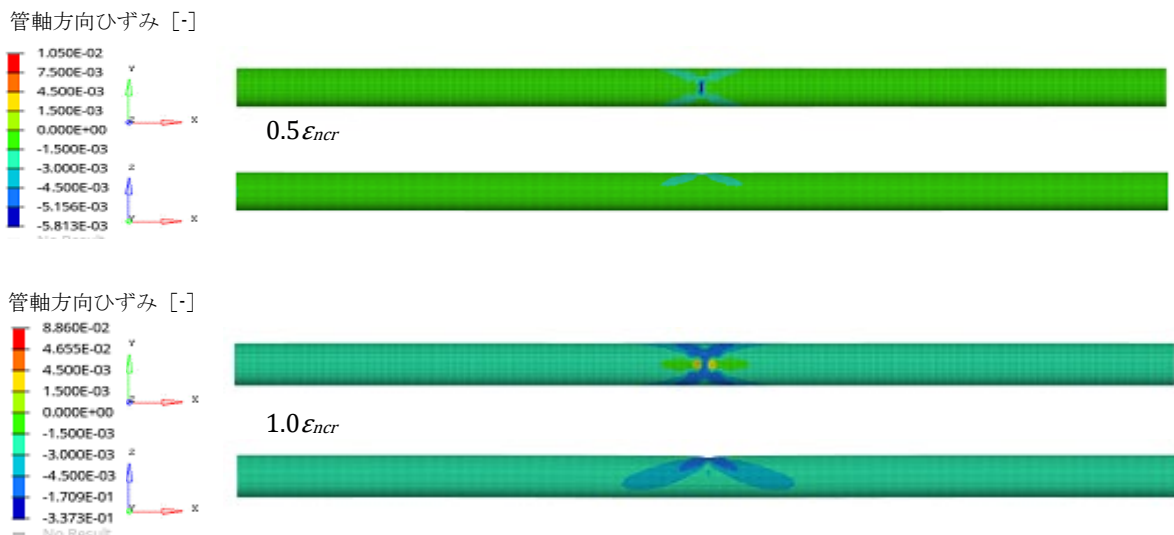


図-3.49 軸ひずみ分布図（SGP，線状デント：深さ3%，内圧，埋設条件を両方考慮）

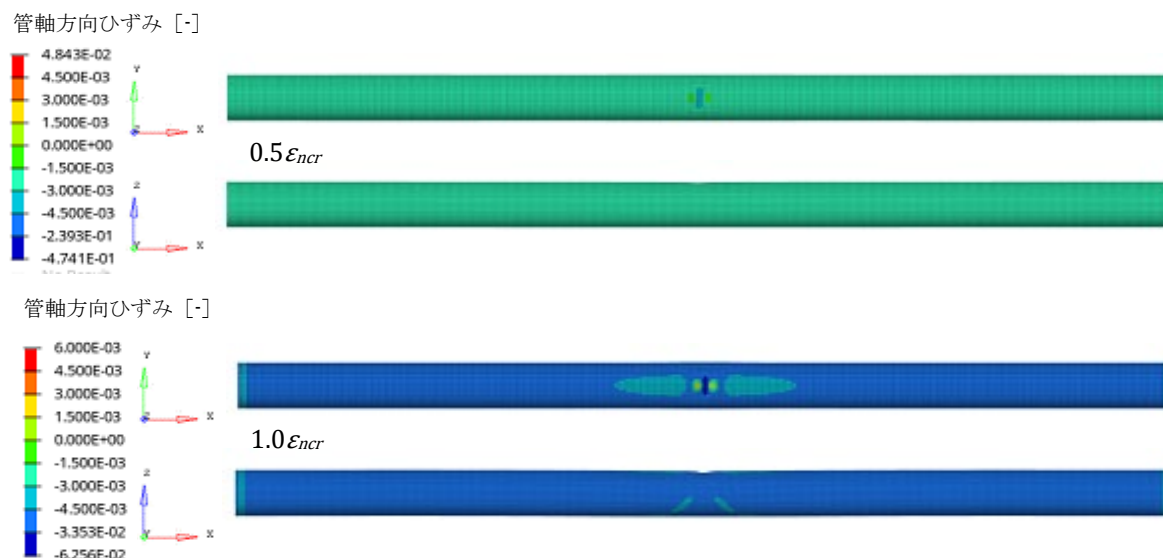


図-3.50 軸ひずみ分布図 (API 5L L415, 線状デント : 深さ 3%, 内圧, 埋設条件を両方考慮)

表-3.10 に結果の一覧を示す。3.3.5 と同様、運用圧力と埋設条件を同時に考慮することで、最大荷重 P_{max} 、変位 δ_{cr} 、最大軸応力 σ_{max} 、局部座屈開始ひずみ ϵ_{Rcr} は全て上昇し、軸圧縮座屈強度は改善する。3.3.5 と違うところは、今回の結果が 3.3.9 の結果とほとんど同じで、3.3.6 で述べた相乗効果が見られないことである。線状デントの形状に起因して、内圧により軸圧縮座屈に抗する力 σ_z がほとんど効果を発揮していないと考えられる。

表-3.10 軸圧縮座屈解析結果 (内圧, 埋設条件を両方考慮)

管種	デント形状	d/D (%)	内圧埋設条件	P_{max} (MN)	δ_{cr} (mm)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{ocr} (%)	ϵ_{Rcr} (%)
SGP	線状デント	3	未考慮	2.41	21.28	243	0.26	0.24
			考慮	2.42	20.98	245	0.26	0.24
		6	未考慮	1.73	7.83	175	0.10	0.09
			考慮	2.28	23.61	231	0.29	0.20
		10	未考慮	1.46	6.73	148	0.08	0.07
			考慮	2.18	25.53	220	0.31	0.17
API 5L L415	線状デント	3	未考慮	5.88	35.15	398	0.43	0.42
			考慮	6.02	42.18	408	0.52	0.51
		6	未考慮	3.90	13.36	265	0.16	0.15
			考慮	5.46	32.34	370	0.40	0.32
		10	未考慮	3.39	11.43	230	0.14	0.12
			考慮	5.17	33.40	350	0.41	0.27

3.3.11 解析結果の比較と考察 (2)

3.3.7 から 3.3.10 で、線状デントの場合での運用圧力（内圧）の付加，埋設条件（土圧および地盤ばね）を考慮して解析を実施してきた。傾向は、3.3.2 から 3.3.6 と同じく、内圧の付加による軸圧縮座屈強度の向上はほとんど見られず，埋設条件を考慮した場合は強度の向上が見られた。本項では，面状デントと線状デントとの比較を行い，軸圧縮座屈強度の違いについて考察する。

図-3.51～図-3.56 は，それぞれデント深さ 3%，6%，10%の場合で，面状デントと線状デントで公称応力-軸圧縮ひずみ曲線を比較したものである。同じ色の実線（面状デント）と破線（線状デント）を比較すれば，同じ条件での比較ができる。いずれの場合でも，線状デントの方が面状デントの場合よりも局部座屈開始ひずみ（公称応力がピークを迎える点）が小さい。同じデント深さの場合，線状デントを有する鋼管パイプラインの方が軸圧縮座屈強度が低くなることの方がえる。

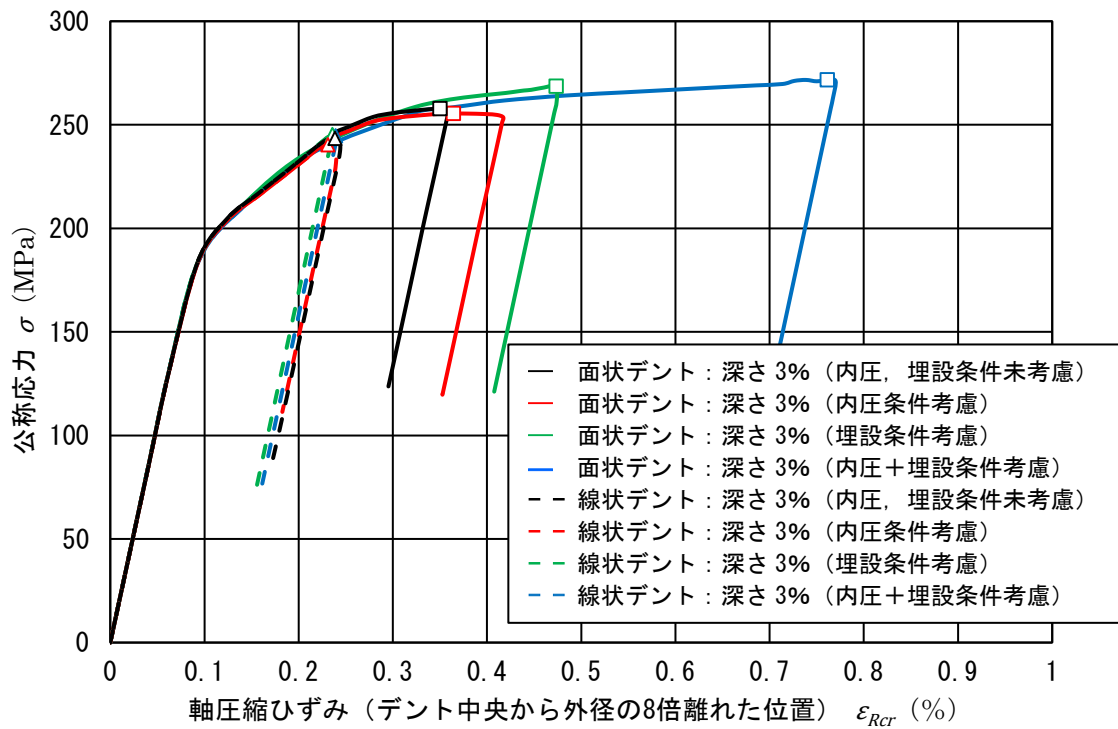


図-3.51 公称応力-軸圧縮ひずみ曲線の比較 (SGP, デント深さ 3%)

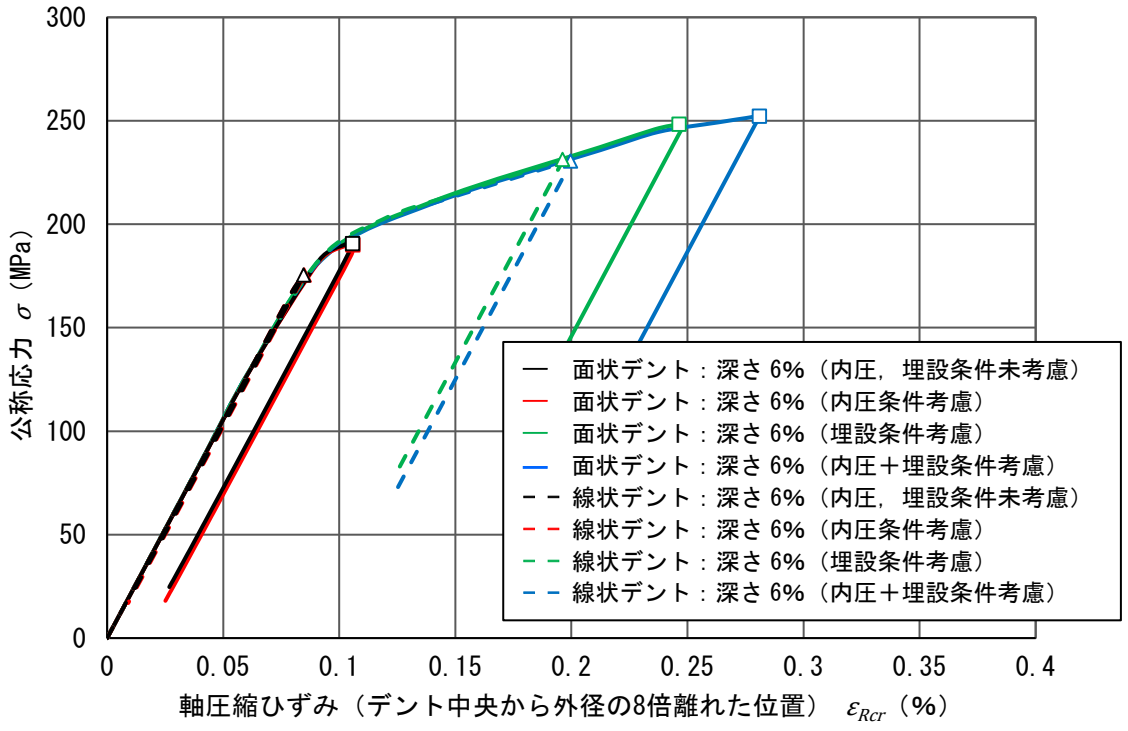


図-3.52 公称応力-軸圧縮ひずみ曲線の比較 (SGP, デント深さ 6%)

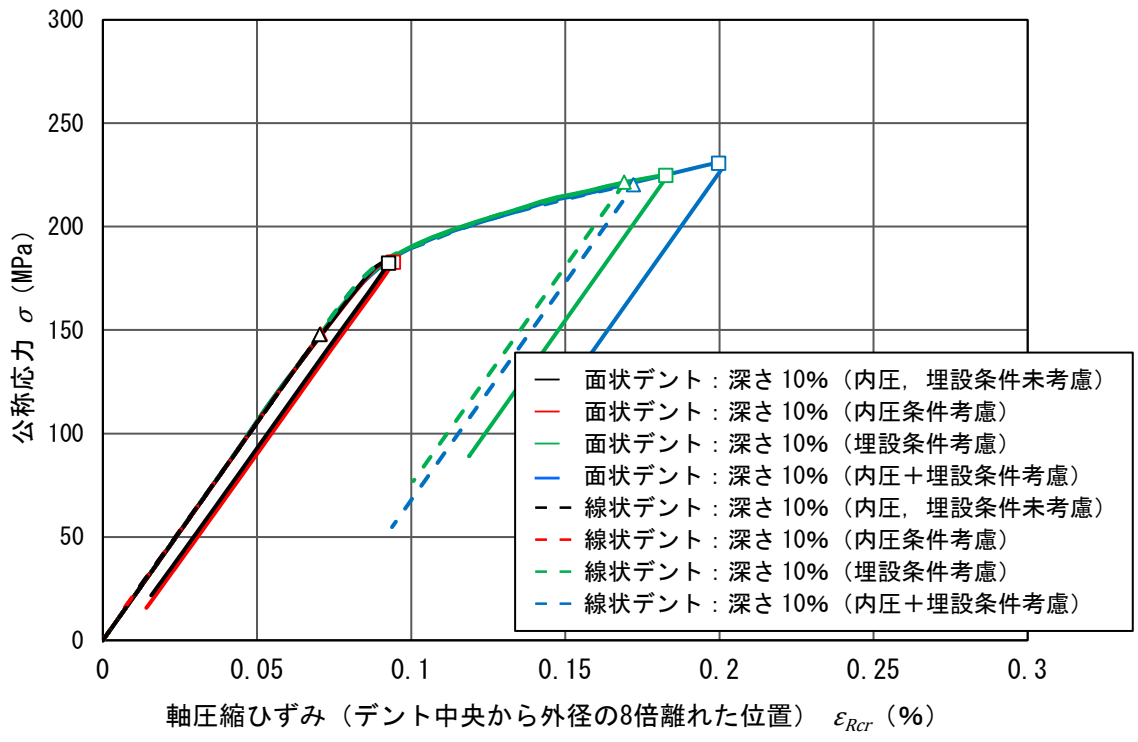


図-3.53 公称応力-軸圧縮ひずみ曲線の比較 (SGP, デント深さ 10%)

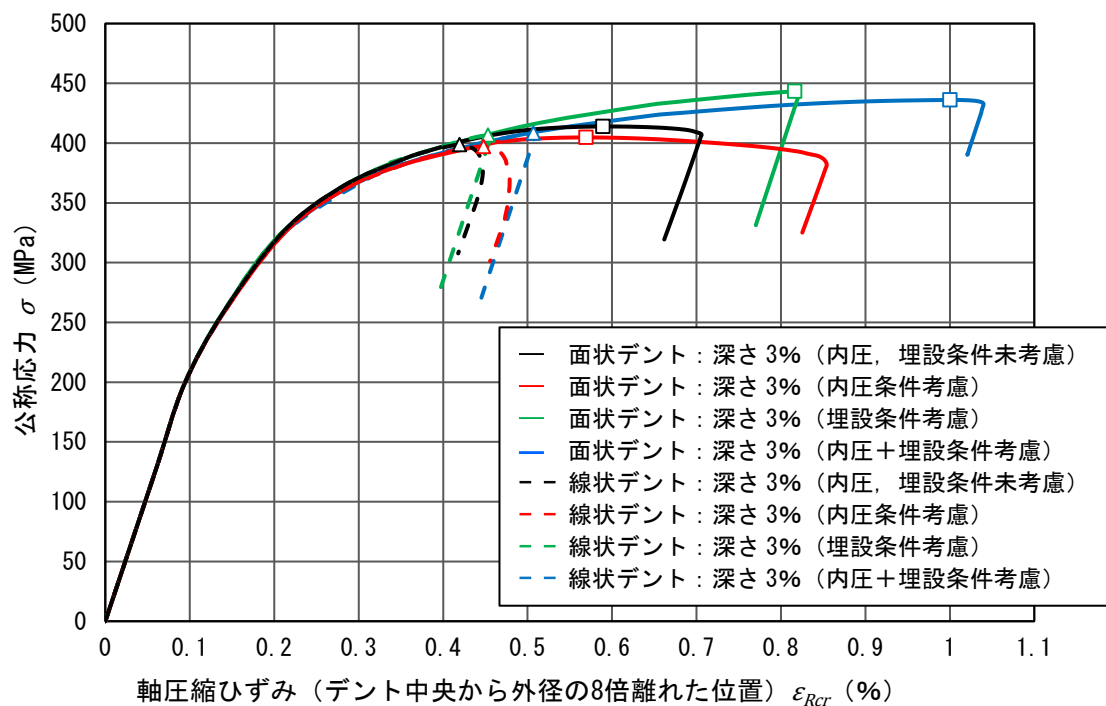


図-3.54 公称応力-軸圧縮ひずみ曲線の比較 (API 5L L415, デント深さ 3%)

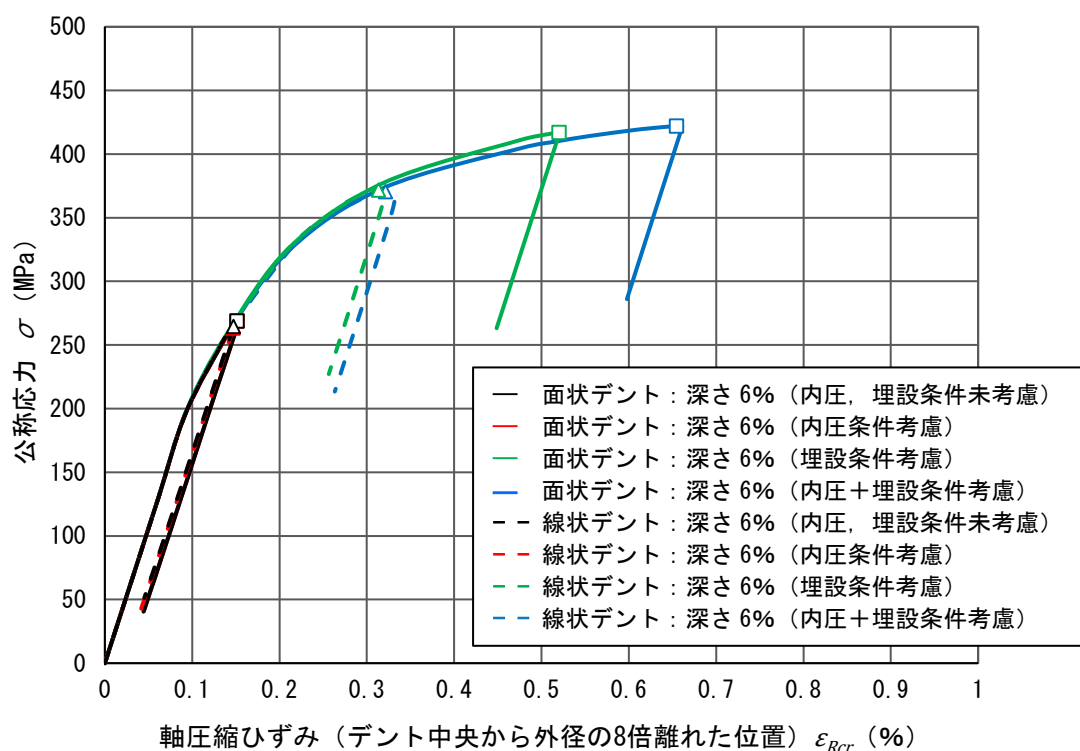


図-3.55 公称応力-軸圧縮ひずみ曲線の比較 (API 5L L415, デント深さ 6%)

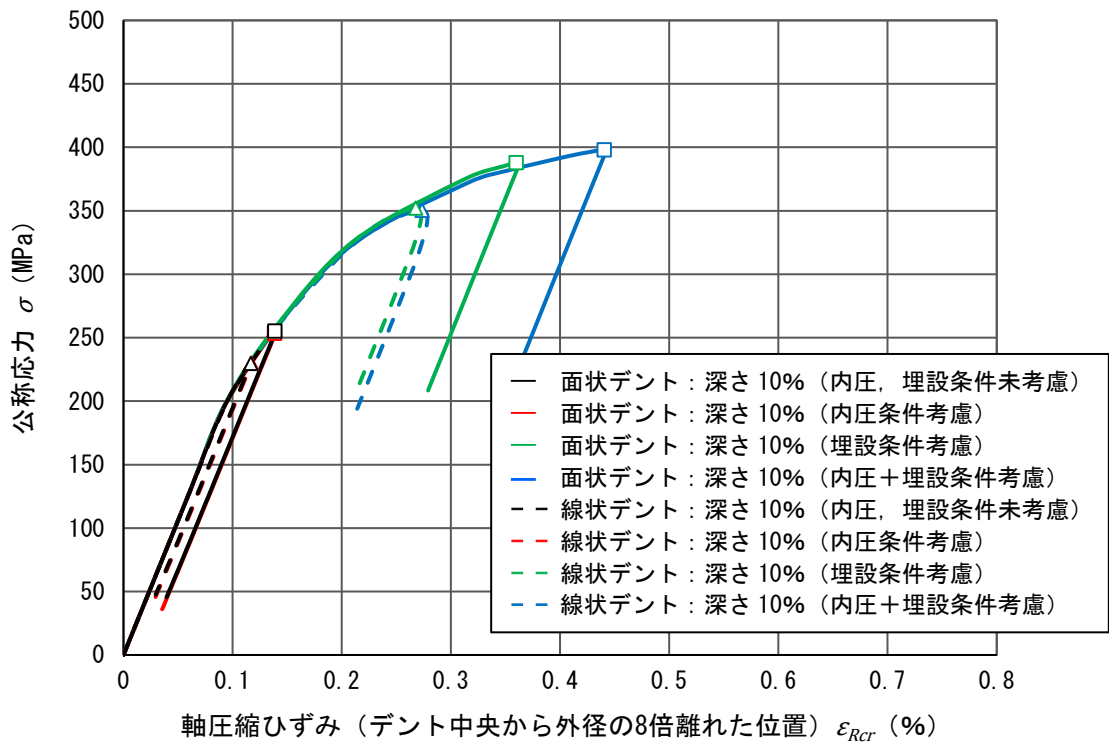


図-3.56 公称応力-軸圧縮ひずみ曲線の比較 (API 5L L415, デント深さ 10%)

3.4 パラメータスタディのまとめ

ここでは、日本産業規格準拠の鋼管 (SGP) 及び米国石油協会規格準拠の鋼管 (API 5L L415) の 2 種類の鋼管パイプラインを対象とした軸圧縮座屈パラメータスタディの結果をまとめる。

まず、想定する解析ケースの設定根拠について整理した上で、以下の通りまとめることができる。

- (デント形状の分類)

鋼管パイプラインの敷設環境およびデントが形成される過程を勘案し、線状デントと面状デントに分類した。

- (デント深さ)

深さが管径の 10% を超えるデントは速やかに補修されること (海外の報告書) を根拠に、デントの深さを 3%, 6%, 10% を最大値とした 3 段階の軸圧縮座屈パラメータスタディから、デントが深いほど軸圧縮座屈強度が低いことが明らかとなった。

- (内部圧力の影響)

鋼管パイプラインの実際の運用状況を考えた内部圧力の有無によるパラメータスタディから、内部圧力がもたらす軸圧縮座屈強度への影響はごくわずかであることがわかった。

- (埋設環境の影響)

鋼管パイプラインの実際の埋設されている環境から土圧および地盤ばねを設定し、考慮・未考慮の違いによるパラメータスタディから、土圧および地盤ばねを考慮することで軸圧

縮座屈強度が向上することがわかった。

- (内部圧力と埋設環境の同時考慮)

内部圧力と土圧および地盤ばねを同時に考慮すると、それぞれ別々に考慮した場合に確認できた軸圧縮座屈強度の向上分の足し合わせ以上に強度が向上する「相乗効果」が確認された。

- (面状デントと線状デント)

最後に、面状デントと線状デントの違いでは、デント深さが同じ場合、常に線状デントの方が軸圧縮座屈強度が小さく、線状デントを有する鋼管パイプラインの方が、面状デントを有するものよりも軸圧縮座屈への耐性が低くなる傾向は強く表れている。

以上の知見を踏まえた上で、第5章では、デントを有する鋼管パイプラインの耐震性の検討を進める。

第4章 鋼管の曲げによる局部座屈実験と解析による再現

4.1 概説

本章では、第3章までの軸圧縮座屈特性の評価に続き、鋼管パイプラインの曲げによる局部座屈特性を評価するため、デントを人工的に付加した鋼管パイプライン（日本産業規格準拠）の曲げによる局部座屈実験を実施するとともに、実験結果を再現できる有限要素解析モデルを構築し、それらから得た知見を報告する。

4.2 曲げによる局部座屈のリスク

4.2.1 地盤沈下による曲げの場合

地中に埋設された鋼管パイプラインは、周囲の地盤から外力を受ける。このことを踏まえ、鋼管パイプラインに曲げ変形をもたらす外力について考える。

まず、地盤沈下が考えられる。地震により地盤の液状化が発生した場合、液状化後に大規模な地盤沈下が発生することが考えられる。図-4.1に示すように、地盤沈下により埋設パイプラインを曲げ、座屈に至らしめようとする力が発生することが想定される。

「高圧ガス導管液状化耐震設計指針」[28]（以降、高圧液状化指針と表記）では、液状化による地盤沈下については室内要素試験による研究が行われており、その1つとして液状化抵抗率 F_L 値および相対密度 D_r と体積ひずみ ϵ_v との関係から、液状化層の厚さの5%を地盤沈下量と見込めば十分であるとされている。また、地盤沈下に対する影響を検討する場合として、パイプラインが橋台等の構造物に支持されている場合は、付近で地盤沈下に対する影響を検討する必要があるとされている。

なお、液状化に伴い導管に発生する浮力については、高圧液状化指針では、実規模の振動台実験および数値解析の結果から、我が国における通常の埋め戻し方法で締め固めがなされていれば埋め戻し土は液状化せず、鋼管パイプライン（ガス導管）は浮上しないと紹介されている。よって、本章でも浮上の検討は行わず、沈下の影響のみを検討する。

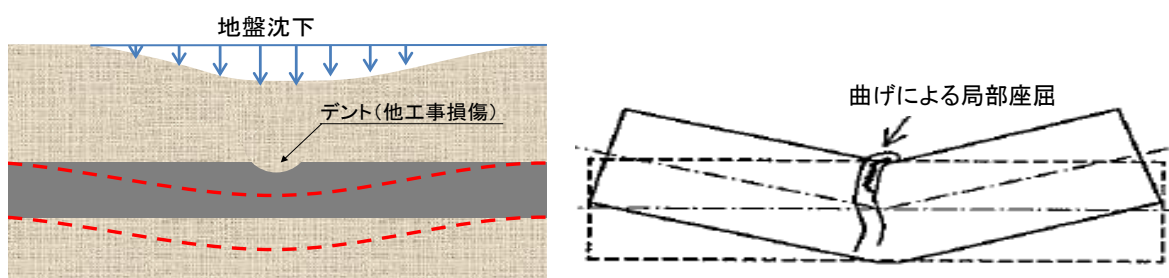


図-4.1 地盤沈下による鋼管パイプラインへの影響（概念図） ※右図は参考文献[28]より引用

4.2.2 地盤の側方流動による曲げの場合

高压液状化指針では、液状化が発生した地盤が傾斜している場合、あるいは護岸の背後の地盤の場合、地盤が側方に流動することがあることを示している。この場合、図-4.2に示すように、パイプラインを側方に曲げ、局部座屈に至らしめようとする力が発生することが想定される。また、図-4.3に示すように、パイプラインを軸方向に圧縮し、座屈に至らしめようとする力が発生することも想定される。

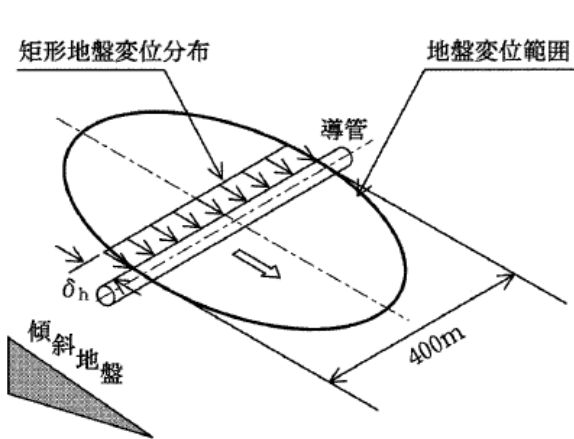


図-4.2 地盤の側方流動による影響概念図
(曲げによる局部座屈) ※参考文献[28]より引用

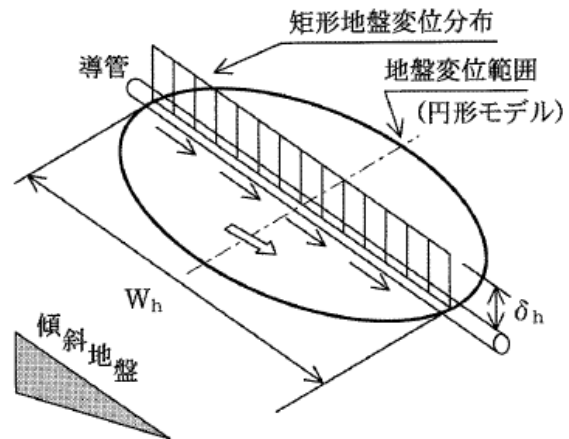


図-4.3 地盤の側方流動による影響概念図
(軸圧縮座屈) ※参考文献[28]より引用

そこでパイプラインの変形モードを考えてみる。図-4.2は、パイプラインが盛土や道路の法面部分へ埋設されている場合に、このような曲げ変形を受ける状況の発生が想定できる。図-4.3は、パイプラインが傾斜のある道路下に沿って埋設されている場合が想定されるが、パイプラインの延伸方向（管軸方向）と地盤の側方流動の方向が一致する場合のみ軸圧縮座屈が発生し、完全に一致しない場合は、パイプラインは軸圧縮と曲げの複合した外力を受けることになり、挙動の分析が複雑となる。この複合力の影響に関する研究は、後進に譲ることとしたい。

以上から、地盤の側方流動でパイプラインに曲げによる局部座屈が発生し得ることを認識し、4.2.1での認識と合わせ、本章ではデントを有する鋼管パイプラインの曲げによる局部座屈に関して研究した内容を述べる。

4.3 曲げによる局部座屈実験

4.3.1 供試体

4.2に述べたように、曲げによる局部座屈のリスクとして、地盤の液状化による地盤沈下と側方流動の影響を想定した上で、デントを有する鋼管の曲げによる局部座屈試験を実施した。

供試体は、日本産業規格準拠の鋼管（SGP）を用いた。本実験では、供用中の鋼管パイプラインから実際に発見されたデントを有する鋼管ではなく、人工的にデントを形成した鋼管を用いた。

比較のため、デントのない健全管も用いて実験を実施した。表-4.1に供試体の仕様をまとめる。

図-4.4はデントの形成方法を、図-4.5はデントの形成後の状況を示す。

供試体の管厚のばらつきが実験結果に反映すると考えられたため、供試体の管厚計測を詳細に行った。各供試体の周方向22.5度ピッチ16点×軸方向50mmピッチ13点、合計208点の管厚計測を、超音波厚さ計を用いて測定した。計測区間を図-4.6に、計測結果を表-4.2に示す。計測の結果、デント加工による管厚の大きな変動は発生していないことが確認された。

また、供試体の形状計測（デント部を含む）を、3D スキャナを用いて実施した。図-4.7、図-4.8にデント部の形状計測結果を示す。

表-4.1 供試体仕様

仕様	呼び径	管外径 (mm)	管厚 (mm)	供試体	デント寸法 (mm)
					軸長 L_D , 周長 H_D , 深さ D_D
配管用炭素鋼鋼管 (JIS G 3452 SGP)	200A	216.3	5.8	1	デント無し
				2	約 800, 約 150, 23.1
				3	約 800, 約 150, 23.5

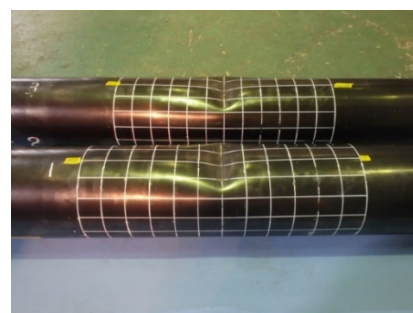
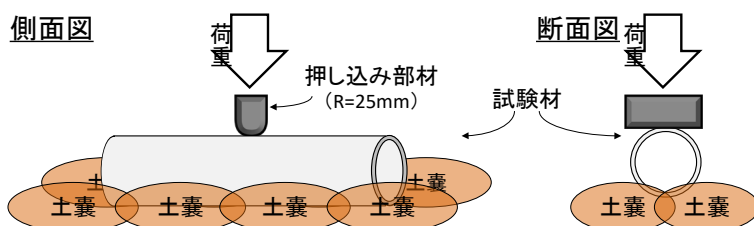


図-4.4 供試体へのデント形成方法（荷重の载荷イメージ）

図-4.5 デント形成後の供試体

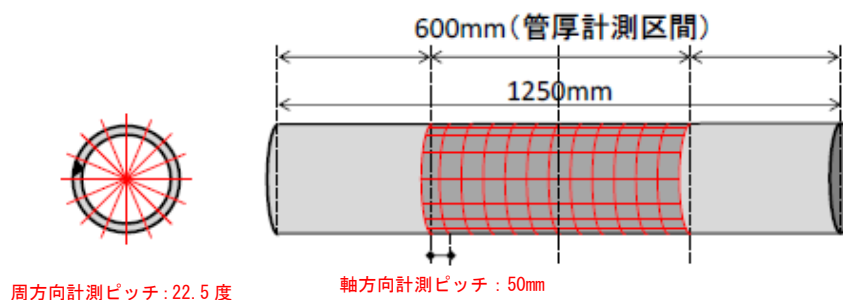


図-4.6 供試体の管厚計測区間

表-4.2 供試体の管厚計測結果

供試体	デント位置	平均	最大値	最小値
1	なし	5.42 mm	5.48 mm	5.35 mm
2	腹側曲げ ^{注)}	5.42 mm	5.52 mm	5.35 mm
3	側方側曲げ ^{注)}	5.41 mm	5.51 mm	5.33 mm

注) 4.3.2 (1) 参照

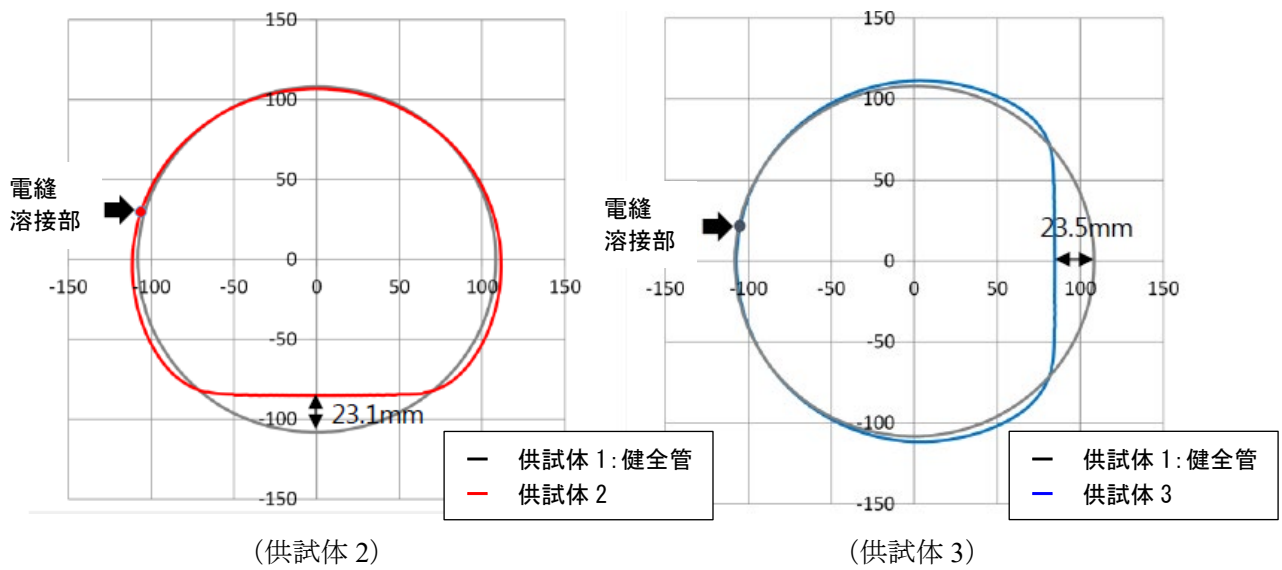


図-4.7 デント部の形状計測結果

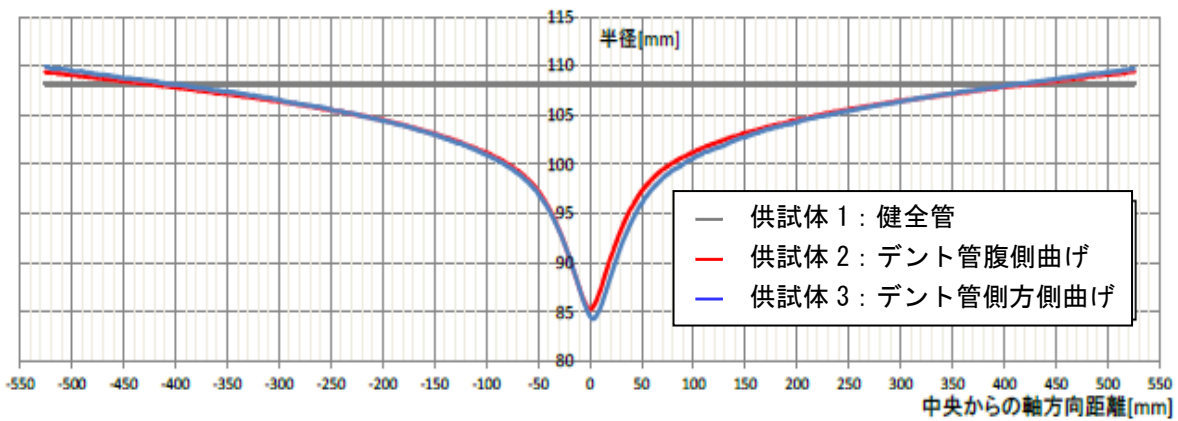


図-4.8 デント最深部の軸方向断面図

基礎データ取得のため、材料試験を実施した。降伏強度が 309MPa、引張強度が 354MPa のラウンドハウス (Roundhouse, RH) 型[24]の材料特性が得られた。軸方向の応力-ひずみ曲線を図-4.9 に示す。

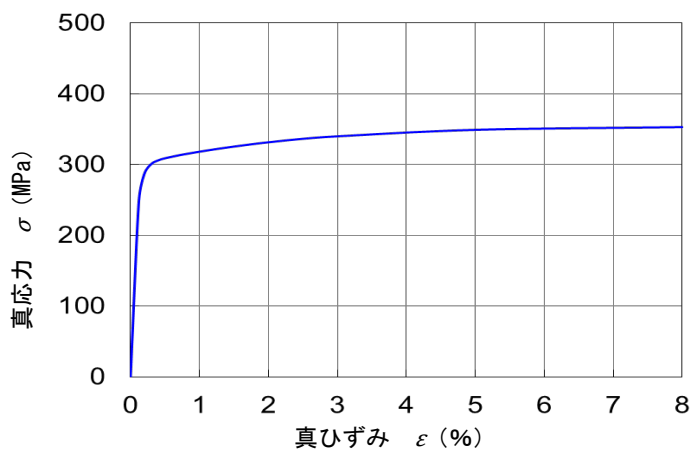


図-4.9 実験に用いた鋼管の軸方向の応力-ひずみ曲線

4.3.2 実験装置および計測項目

(1) 実験装置

実験装置の概略図を図-4.10に示す。供試体の両端に曲げ治具を取り付け、治具の根元を両端ピン支持として、油圧ジャッキを利用して片側から強制変位を与えた。

図-4.10の曲げ治具の上部に角度計を設置して実験中の角度を測定した。実験時の曲げ角度 θ および曲げモーメント M は、図-4.11から、以下の通りとなる。

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 \quad (4.1)$$

$$M = P \cdot h \quad (4.2)$$

実験の進行に従い、供試体中心断面の高さ h は増加していく。荷重 P が最大になるまでは P 、 h とも増加する。その後、 P は減少しながら h はなお増加するが、 P の減少量と h の増加量の兼ね合いで、最大荷重 P_{\max} の発現と最大曲げモーメント M_{\max} の発現のタイミングは必ずしも一致しない。

供試体の設置は、図-4.12のように行った。実験は3回実施し、実験1は健全管の曲げによる局部座屈、実験2はデントを有する鋼管が液状化による地盤沈下を受ける場合を想定した曲げによる局部座屈、実験3は同じく液状化による地盤の側方流動を受ける場合を想定した曲げによる局部座屈を想定して行った。供試体の曲げ方向とデントの位置の関係から、これ以降、実験1は「供試体1（健全管曲げ座屈実験）」、実験2は「供試体2（デント管腹側曲げ座屈実験）」、実験3は「供試体3（デント管側方側曲げ座屈実験）」と呼称する。

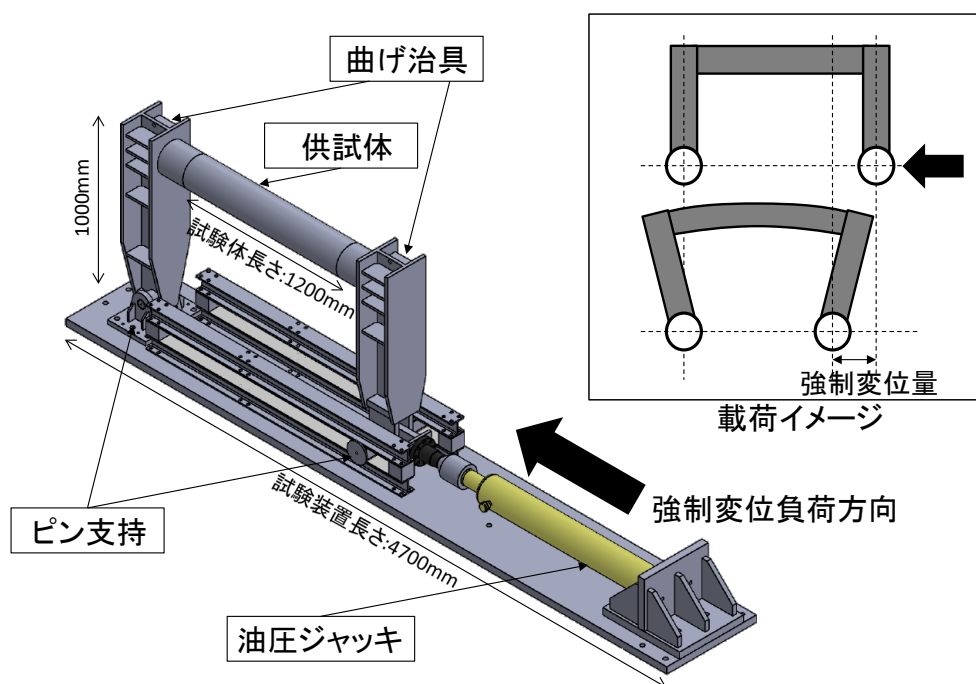


図-4.10 曲げによる局部座屈実験装置の概観

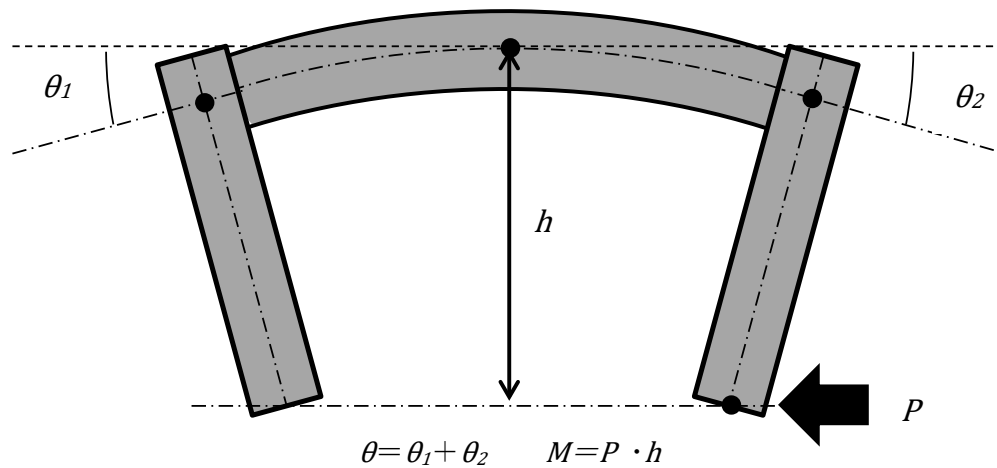


図-4.11 実験中の曲げ角度，曲げモーメントの定義説明図

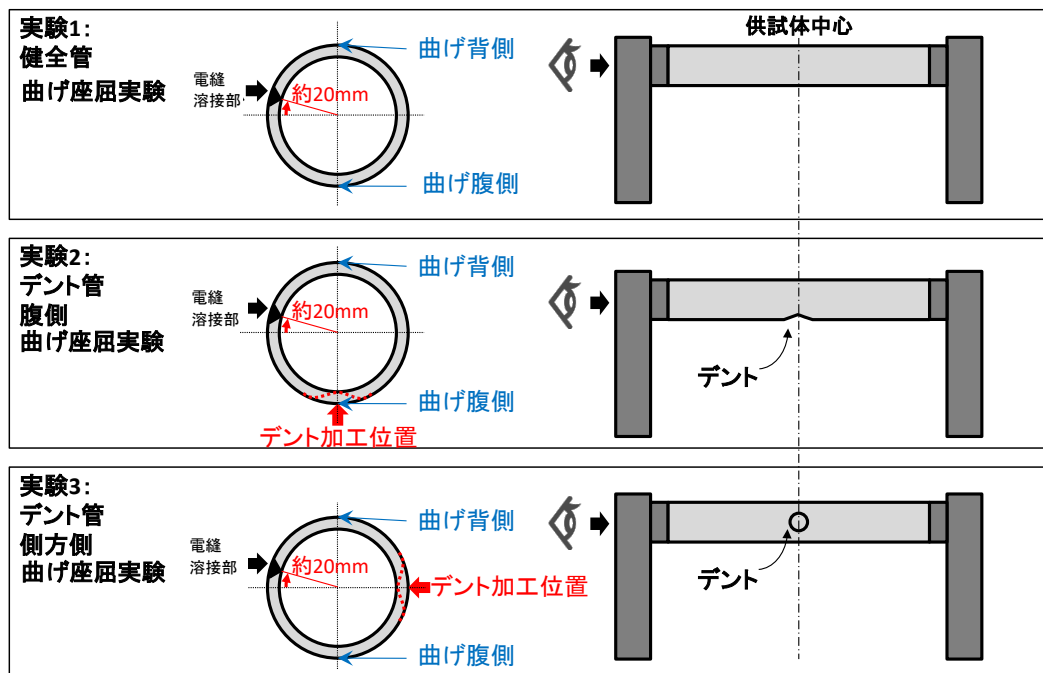


図-4.12 供試体の設置方向

(2) 荷重の載荷方法

実験終了後のスプリングバック効果(除荷時に変形量の一部が元に戻る現象)も加味するため，座屈開始後には一定の間隔で除荷過程を設けた．曲げモーメントが最大値 (M_{MAX}) を示した時のピン支持点での強制変位量 (δ_M) に達するごとに除荷し，その時点での破壊の有無を確認した．その模式図を図-4.13 に示す．

なお，実験中の管の破壊の確認のため，管内に内圧 (0.1MPa) を作用させ，管壁を貫通する破壊を検知できるようにした．今回の実験では，内圧は破壊が検知できるレベルの作用に留めた．

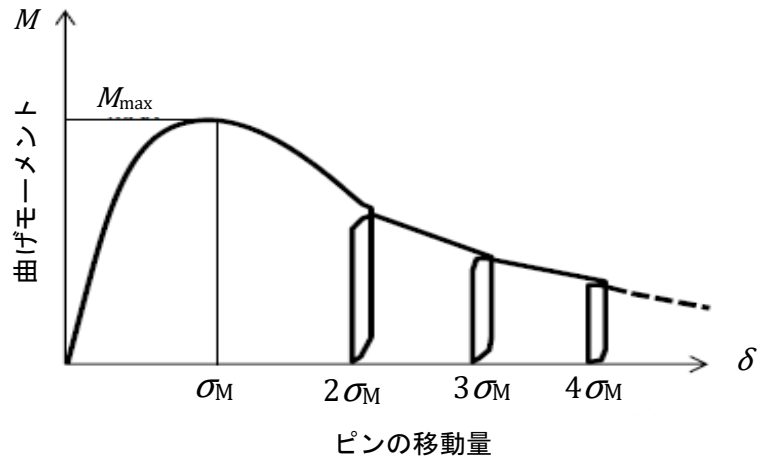


図-4.13 除荷過程の導入模式図

(3) ひずみの測定位置

供試体には、1体あたり50点程度のひずみゲージを貼付してひずみを計測した。詳細な位置を図-4.14~図-4.16に示す。なお、実験中に最大ひずみを記録したひずみゲージに、a~fの記号を記しておく。

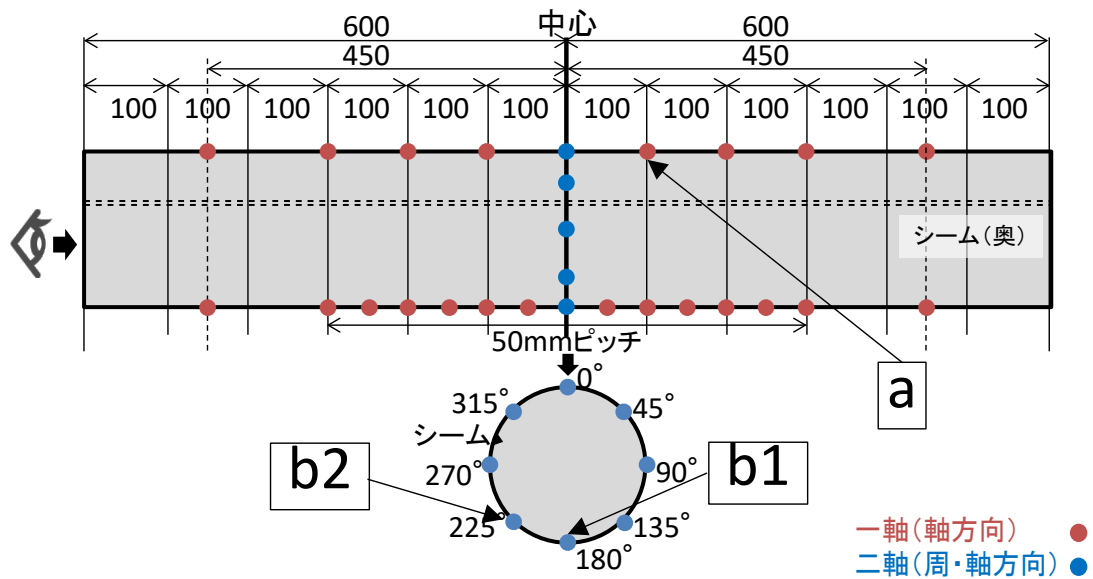


図-4.14 ひずみゲージ貼り付け位置 (供試体1:健全管曲げ座屈実験)

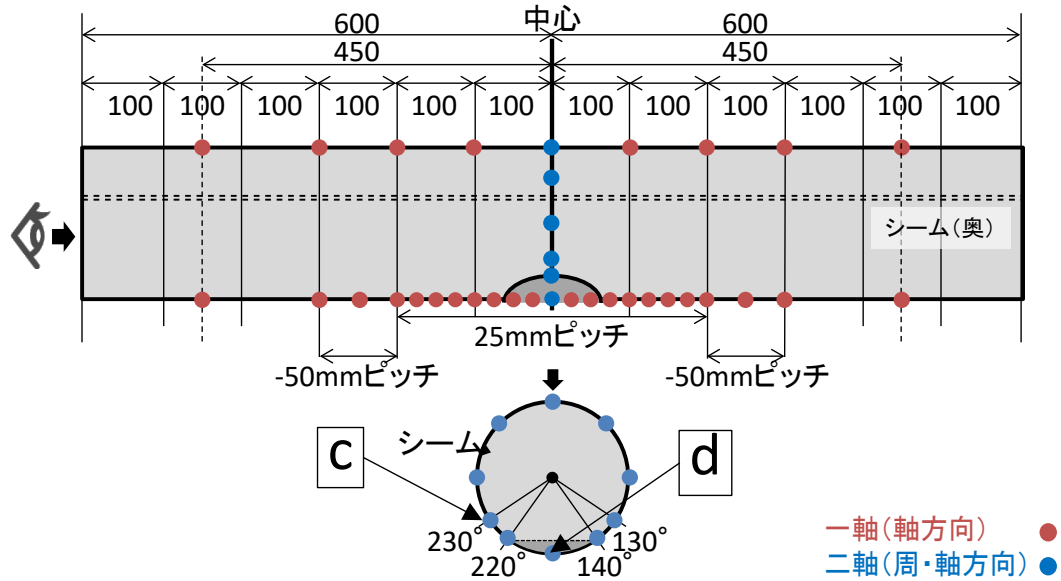


図-4.15 ひずみゲージ貼り付け位置 (供試体2: デント管腹側曲げ座屈実験)

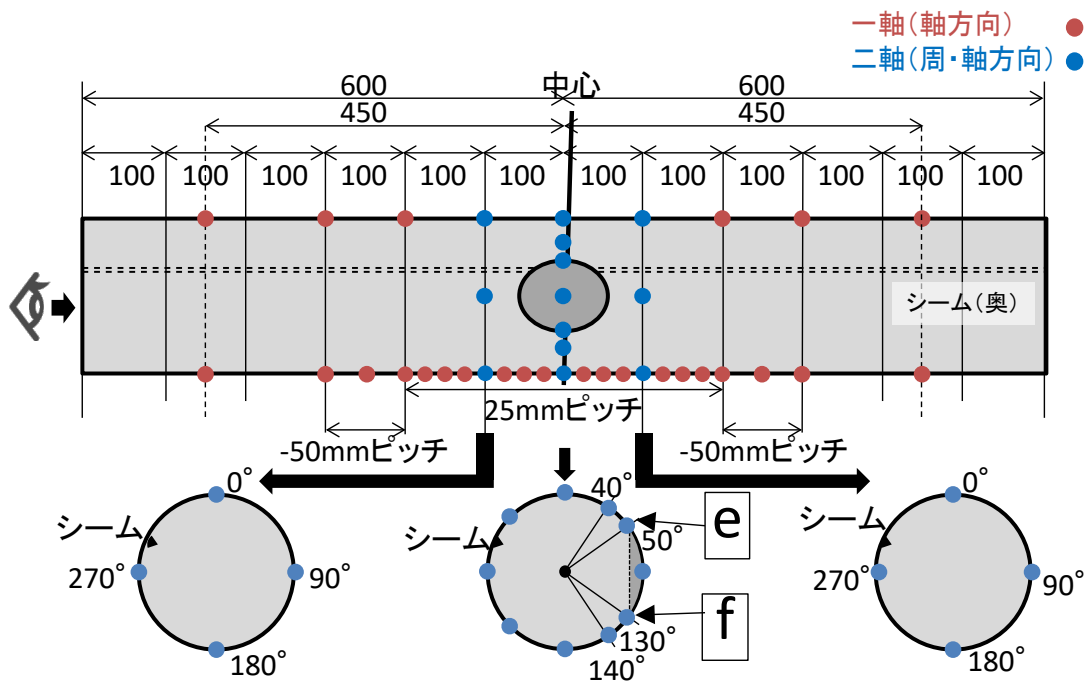


図-4.16 ひずみゲージ貼り付け位置 (供試体3: デント管側方側曲げ座屈実験)

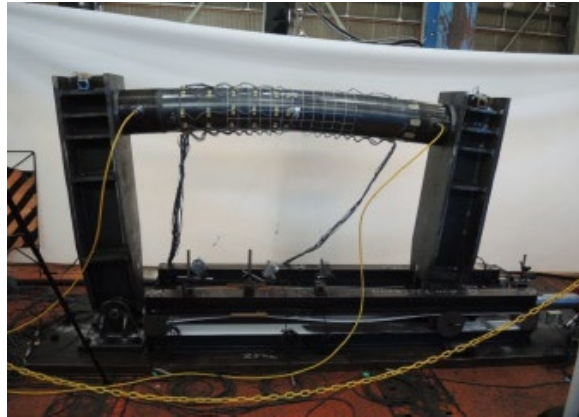
4.3.3 実験結果

(1) ひずみの進展

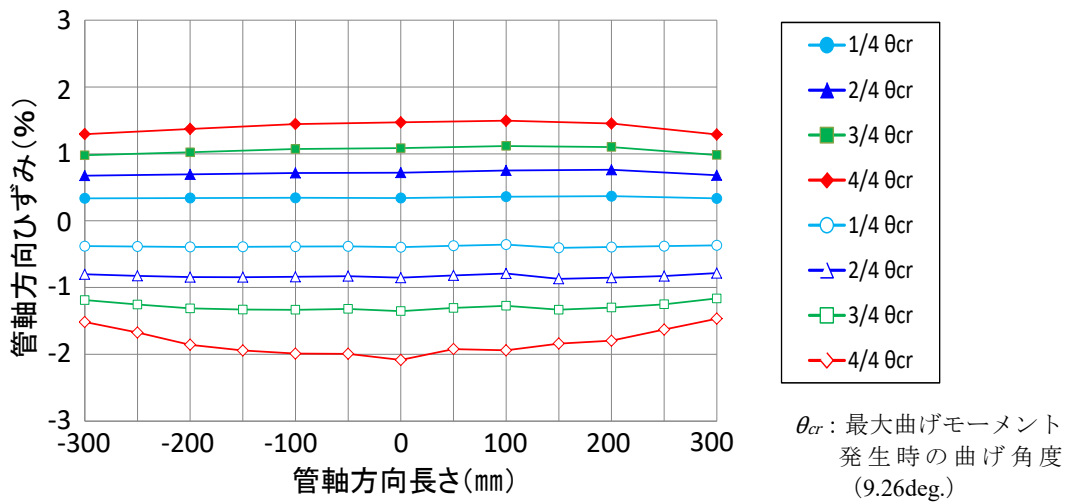
図-4.17 は、供試体1 (健全管曲げ) が最大曲げモーメントに達した時の外観 (写真) と、ここに至るまでの管頂部 (0deg.) および管底部 (180deg.) の管軸方向ひずみの伸長 (グラフ) である。 θ_{cr} は最大曲げモーメント発生時の曲げ角度を表す。ひずみの正の値は引張ひずみ、負の値は圧縮ひずみとなる。ひずみが局所に集中することなく、供試体の全体でほぼ一様にひずみが発生

している。また、管頂部の引張ひずみと管底部の圧縮ひずみの絶対値がほぼ同じであることから、この実験方法は供試体に曲げ荷重のみが載荷されており、軸圧縮荷重はほとんど与えていないことも読みとれる。

図-4.18 は、実験終了時（曲げ角度 40.1deg.）の供試体 1 の状態である。管体の割れ（目視にて確認）や、貫通亀裂（内圧の低下）はいずれも発生しなかった。



(供試体外観)



(ひずみ分布図)

図-4.17 中央部付近の変形状況（供試体 1）（曲げモーメント最大時）

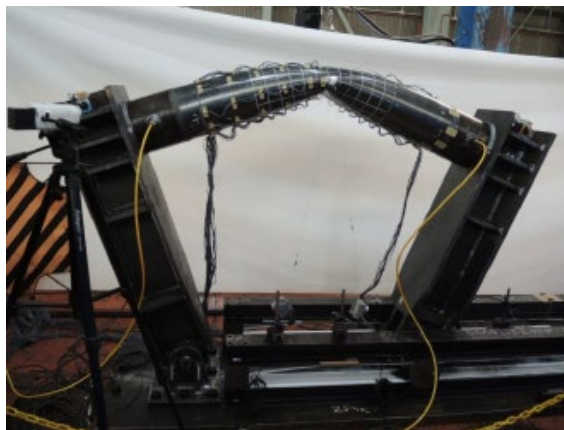
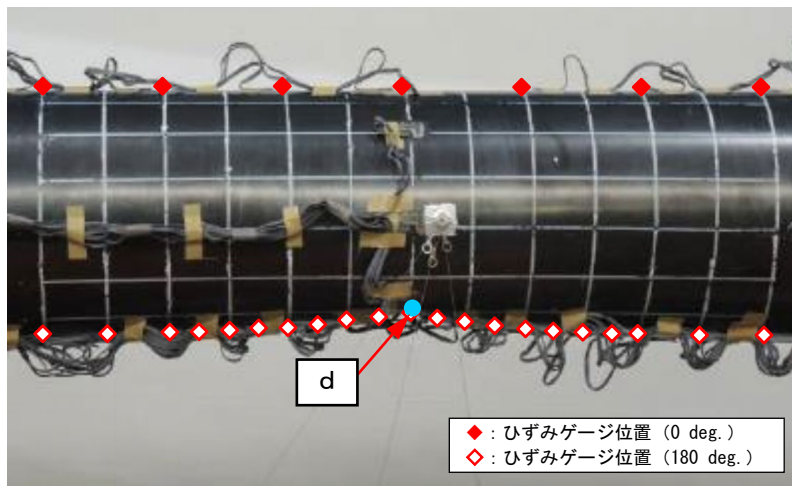


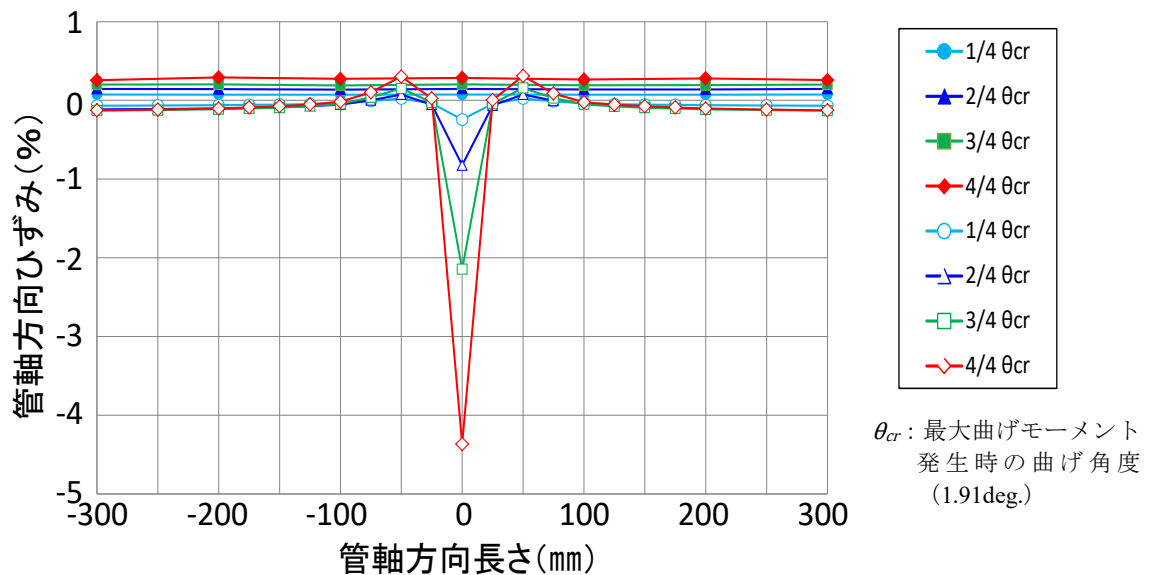
図-4.18 供試体の変形状況（供試体 1）（実験終了時）

図-4.19 は、供試体 2（デント管腹側曲げ）が最大曲げモーメントに達した時の外観（写真）と、そこに至るまでの管頂部（0deg.）および管底部（180deg.）の管軸方向ひずみの伸長（グラフ）である。写真上のプロットは、ひずみゲージの位置を示す。また、写真上の白線は、4.3.1の管厚測定時に描いた罫書き線である。ひずみゲージ d に圧縮ひずみが著しく集中し、180deg.の位置での d の前後は、引張ひずみが発生している。d 以外の位置に生じるひずみはわずかである。

図-4.20 は、実験終了時（曲げ角度 39.7deg.）の供試体 2 の状態である。デント部が大きく内側に座屈しているが、管体の割れ（目視にて確認）や、貫通亀裂（内圧の低下）はいずれも発生しなかった。



(供試体外観)



(ひずみ分布図)

図-4.19 デント部付近の変形状況（供試体 2）（曲げモーメント最大時）

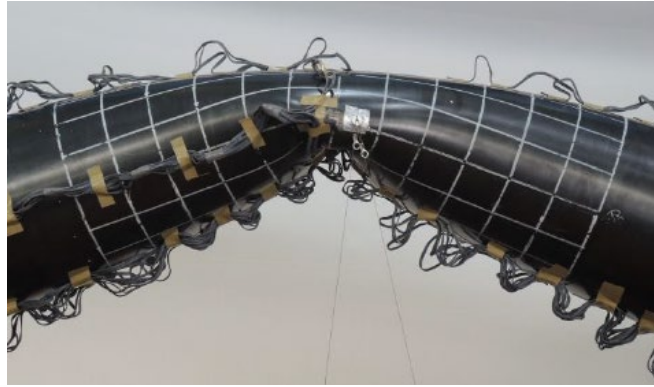
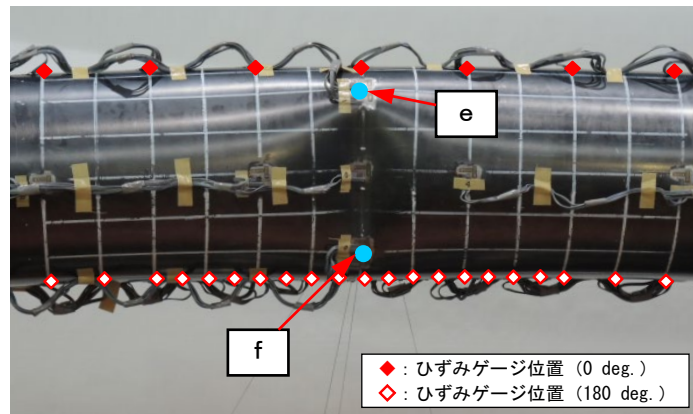
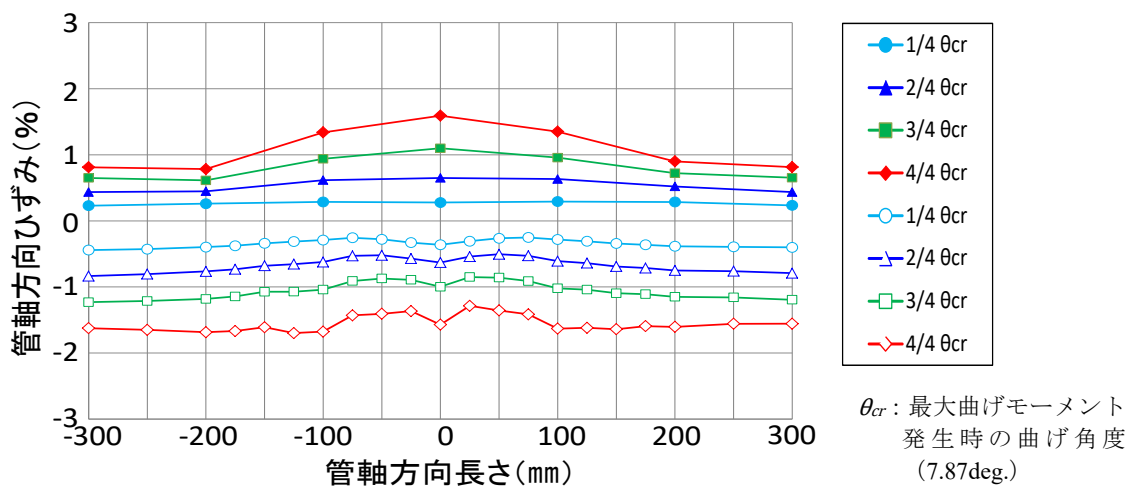


図-4.20 デント部付近の変形状況（供試体2）（実験終了時）

図-4.21 は、供試体3（デント管側方側曲げ）が最大曲げモーメントに達した時の外観（写真）と、そこに至るまでの管頂部（0deg.）および管底部（180deg.）の管軸方向ひずみの伸長（グラフ）である。写真上のプロットは、ひずみゲージの位置を示す。供試体3の全体としては、引張ひずみの最大はひずみゲージe、圧縮ひずみの最大はひずみゲージf、いずれもデントの辺縁部で記録された。



（供試体外観）



（ひずみ分布図）

図-4.21 デント部付近の変形状況（供試体3）（曲げモーメント最大時、ひずみの分布）

図-4.22 は、実験終了時（曲げ角度 35.1deg.）の供試体 3 の状態である。デント部に向かって左側で管体が大きく内側に座屈しているが、管体の割れ（目視にて確認）や、貫通亀裂（内圧の低下）はいずれも発生しなかった。



図-4.22 デント部の変形状況（供試体 3）（実験終了時）

図-4.23 は、供試体 1～3 の軸方向ひずみの最大値と曲げ角度の関係を表す。

供試体 1 は、最大曲げモーメントを示した後、最大圧縮ひずみの発生位置が管底部の b1 (180deg.) から b2 (225deg.) に移動している（位置は、図-4.14 参照）。これは実験における荷重載荷方向のわずかなずれと、管底部付近の形状（管厚等）のわずかな不均質性の影響が作用し、座屈の開始という不安定な状況下で発現したと考えられる。

供試体 2 は、ひずみの集中で引張ひずみ・圧縮ひずみとも約 15%に達した後、ひずみゲージでの測定が不可能に至ったと考えられる。供試体 3 のひずみゲージ f も同様に考えることができる。供試体 3 のひずみゲージ e は、引張ひずみ 5%に達した後はひずみの進行が一旦止まり、管頂部 (0deg.) の e 以外の部位でも引張ひずみが進行したと考えられる。

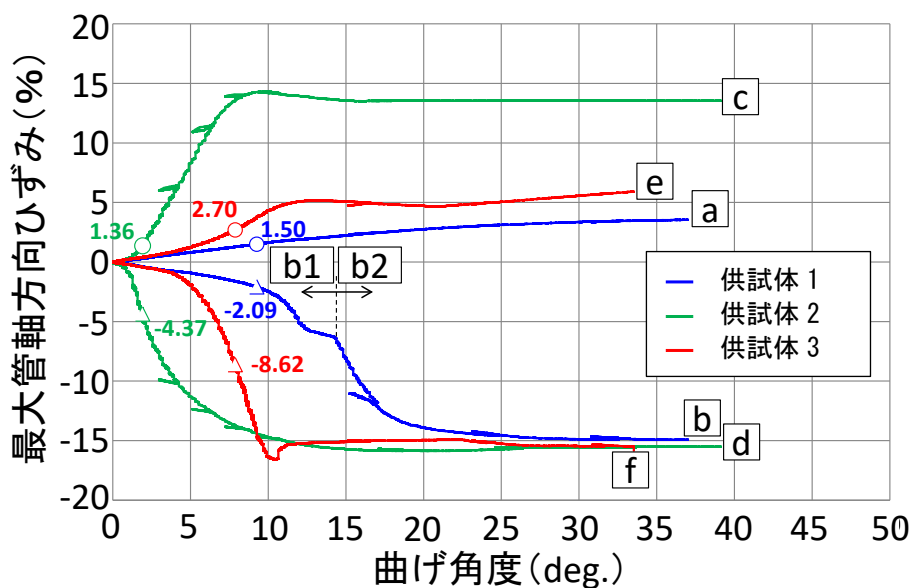


図-4.23 最大軸方向ひずみ-曲げ角度関係（供試体 1～3）

(2) 荷重／曲げモーメント、曲げ角度の推移

図-4.24 は、3つの供試体の曲げモーメントー曲げ角度関係を示す。なお、ピン支持部が変位開始直前までに載荷されていた荷重である静止摩擦力は減算して算出している。供試体1と供試体3は、最大曲げモーメントまでは、ほぼ同じ挙動をする。最大曲げモーメントを過ぎ、1回目の除荷の後は、デントの幾何学的形状が曲げ方向に対する抵抗力となったこと、およびデント部（デント付加時に塑性変形し、「ひずみ硬化」が発生している）の変形（再塑性化）に必要な荷重が健全部に比べて大きいこと、による複合的な効果と思われるが、供試体3の方が曲げモーメントにおいて供試体1を上回るようになっている。この再塑性化については、4.4.4で考察する。

なお、供試体3では、曲げ角度が15 deg.を超えてからデント部が抵抗となって、荷重が下がらずに供試体が曲げ治具と共にねじれはじめ、35 deg.を超えたところで、ジャッキ部に接続したピン支持が破壊したため、そこで実験を終了した。

供試体2は、図-4.19のひずみ分布図に示されるように、曲げ荷重およびひずみがデント部に集中し、供試体1や供試体3に比べて小さい曲げモーメントで曲げ座屈が始まっている。最大曲げモーメントは供試体1や供試体3に比べて小さいが、変位（曲げ角度）が大きくなるにつれ、デント部の再塑性化が進行して硬度が上昇するため、供試体1に比べて曲げモーメントの低下は緩やかとなり、供試体1の挙動に近づいていく。

なお、3つの供試体はいずれも、今回の実験装置で与えられる限界の最大変位（最大曲げ角度）まで実験を継続する間、ひずみの集中するデント部分においても、管体の割れ（目視確認）や貫通亀裂（内圧の低下）はいずれも発生しなかった。高圧液状化指針[28]に定められている耐震性の要求性能「変形は生じるが、漏えいは生じない」は満たしている。

実験中に測定した実験結果（曲げモーメント、荷重、変位、曲げ角度、供試体の破壊の有無など）をまとめ、表-4.3、および表-4.4に示す。

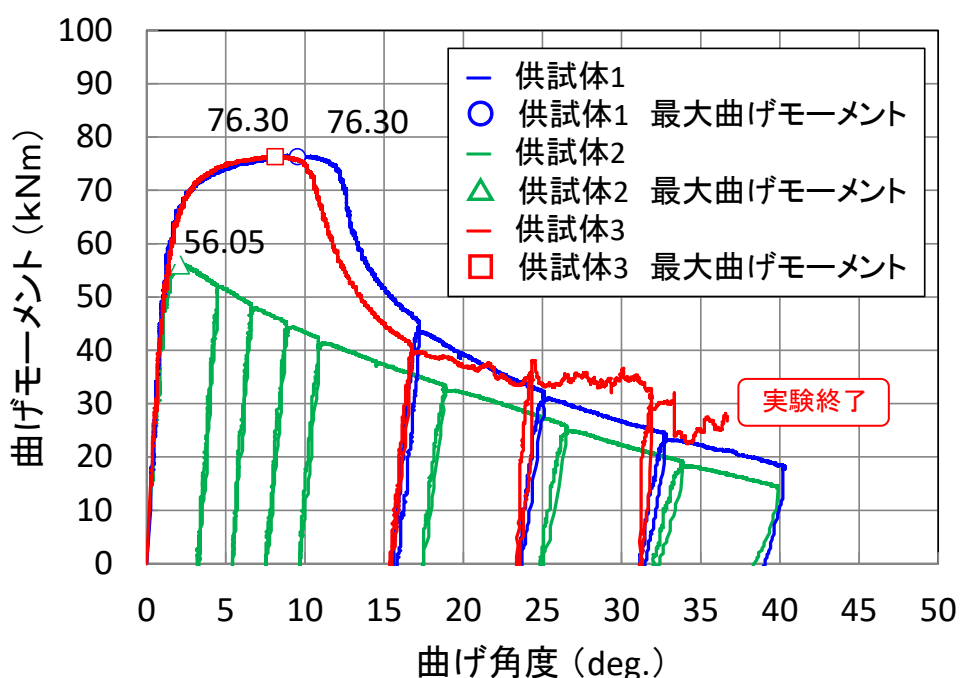


図-4.24 曲げモーメントー曲げ角度関係（供試体1～3）

表-4.3 実験結果のまとめ（供試体 1~3）その 1 ※荷重，曲げモーメント，変位，曲げ角度等

供試体	P_{max} (kN)	曲げモーメント最大 (M_{max}) 時				δ_{max} (mm)	θ_{max} (deg.)
		M_{max} (kN·m)	P (kN)	δ (mm)	θ (deg.)		
1	73.1	76.3	72.6	177.2	9.52	790.5 deg.	38.5
2	55.1 (75.4)	56.1 (73.5)	55.1 (75.9)	37.9 (21.4)	2.12 (22.3)	783.0 (99.1)	37.9 (98.3)
3	73.5 (100.5)	76.3 (100.0)	73.3 (101.0)	149.2 (84.2)	8.12 (85.3)	749.1 (94.8)	36.7 (95.3)

P : 荷重 M : 曲げモーメント δ : 変位 θ : 曲げ角度
 P_{max} : 最大荷重 M_{max} : 最大曲げモーメント δ_{max} : 最大変位 θ_{max} : 最大曲げ角度
 ※かっこ内数値は供試体 1 の結果と比較した割合 (%)

表-4.4 実験結果のまとめ（供試体 1~3）その 2 ※供試体の破壊の有無

供試体	表面割れ（目視確認）	貫通亀裂（内圧の低下）
1	無し	無し
2	無し	無し
3	無し	無し

4.4 曲げによる局部座屈実験の有限要素解析による再現

4.4.1 デントの作成解析

本節では，4.3の実験結果を再現できる解析モデルとその妥当性について述べる。

有限要素解析を実施するべく，解析モデルを作成した。有限要素解析には汎用構造解析コード ADINA-9.1.2（ADINA R&D Inc : ADINA USERS MANUAL ver. 9.1.2, 2015）を使用し，鋼管は 4 節点シェル要素で分割した。解析の基本条件のまとめを，表-4.5 に示す。

表-4.5 解析の基本条件

項目	解析条件
解析コード	ADINA-9.1.2
要素モデル	4 節点シェル要素
外径	216.3mm（実験時の管厚計測結果を用いる）
供試体厚さ	5.4mm（実験時の管厚計測結果を用いる）
材料特性	図-4.9 参照
デント深さ・形状	健全管曲げ：実験時の形状計測結果を用いる デント管腹側曲げ，デント管側方側曲げ：デント作成解析結果を用いる
内圧	考慮しない

実際のデントの加工方法を基にデント作成時の解析条件（押し込み量，地盤バネ設置範囲）を設定し，実際の実験において付与したデント形状との一致を確認した．

(1) デント管腹側曲げ座屈

デントの作成解析結果を図-4.25に示す．デント深さは22.9mmである．図-4.26に，実験におけるデント形状の計測結果との比較を示す．解析モデルは，実験での供試体の形状計測結果を良く再現できている．

また，図-4.27にデントの作成により発生した管軸方向残留ひずみ図，管周方向残留ひずみ図を示す．いずれも管外面の残留ひずみである．管軸方向残留ひずみ図では，デントの底部に圧縮ひずみ，デントの周縁部に引張ひずみが発生している．

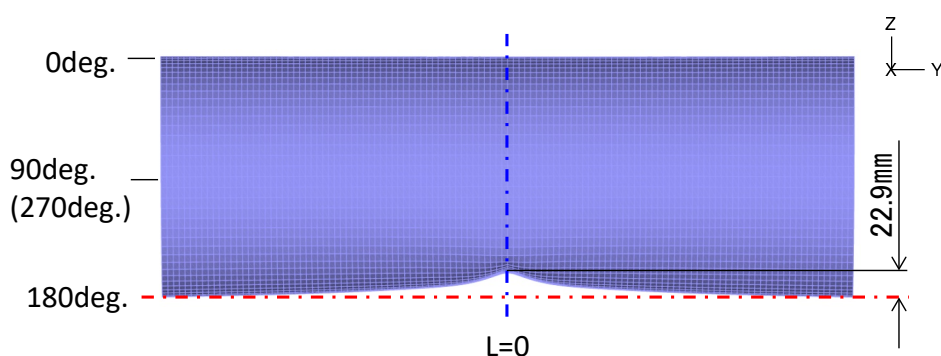


図-4.25 解析モデル上でのデント作成結果（デント管腹側曲げ）

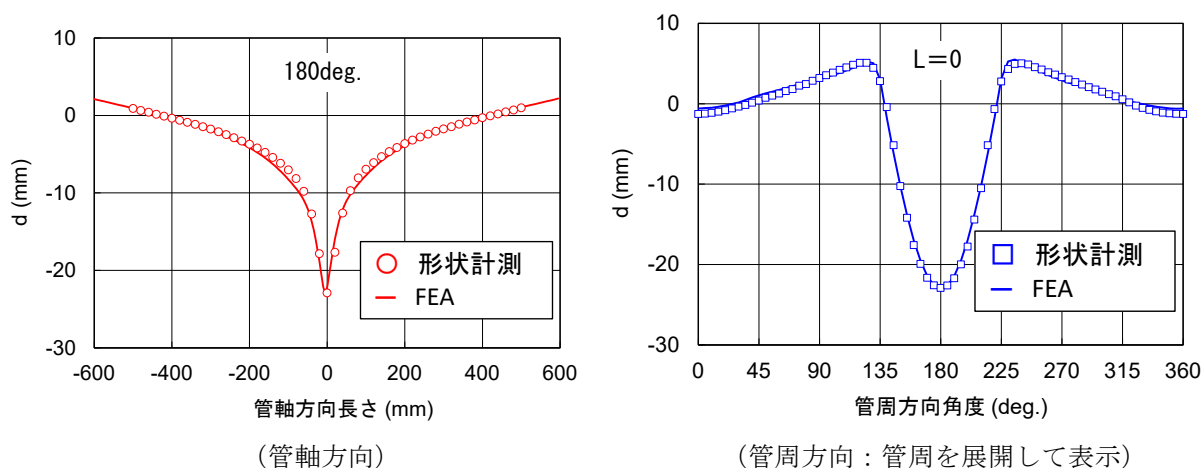


図-4.26 解析モデルでのデント形状と実験でのデント形状計測結果との比較（デント管腹側曲げ）

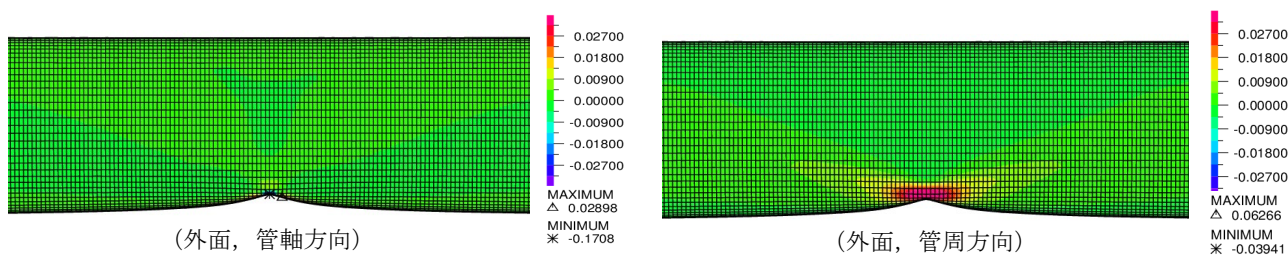


図-4.27 解析モデルでの残留ひずみ図（デント管腹側曲げ）

(2) デント管側方側曲げ座屈

デントの作成解析結果を図-4.28に示す。デント深さは23.5mmである。図-4.29に、実験におけるデント形状の計測結果との比較を示す。解析モデルは、実験での供試体の形状計測結果を良く再現できている。

また、図-4.30にデントの作成により発生した管軸方向残留ひずみ図、管周方向残留ひずみ図を示す。いずれも管外面の残留ひずみである。

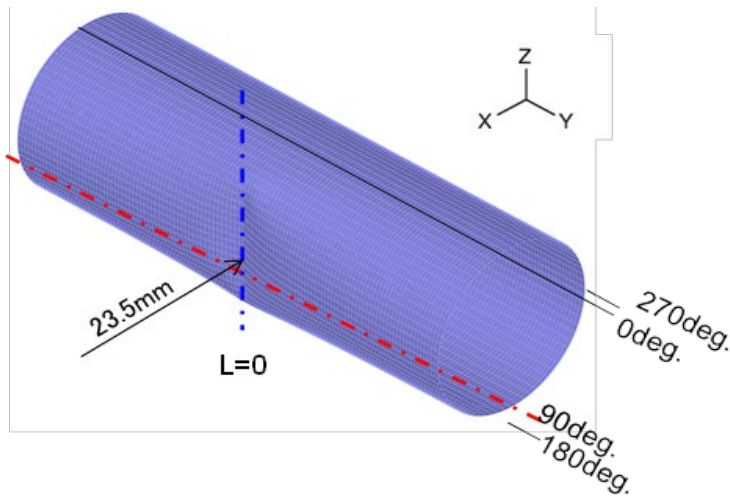


図-4.28 解析モデル上でのデント作成結果（デント管側方側曲げ）

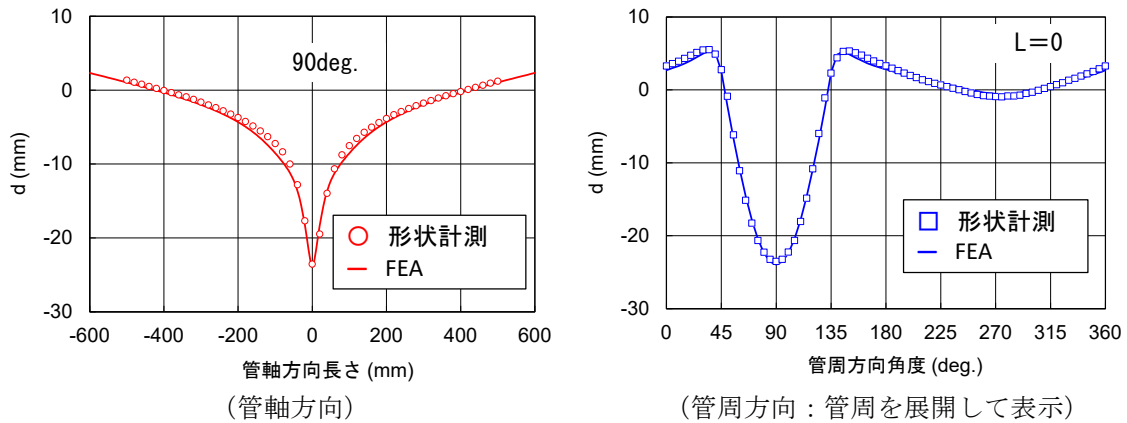


図-4.29 解析モデルでのデント形状と実験でのデント形状計測結果との比較（デント管側方側曲げ）

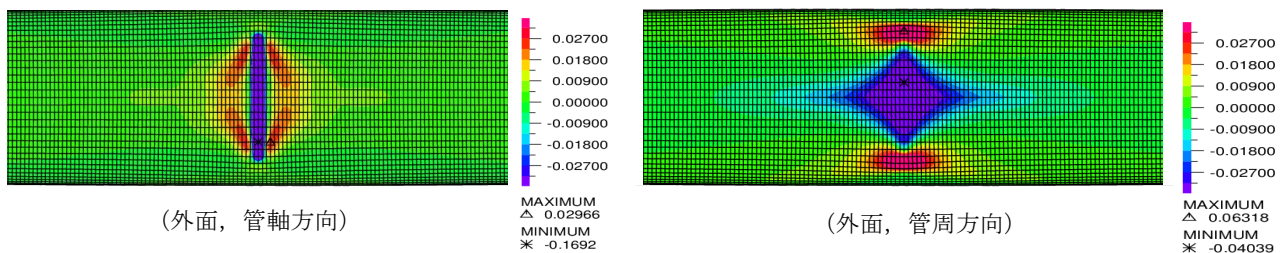


図-4.30 解析モデルでの残留ひずみ図（デント管側方側曲げ）

4.4.2 解析ケースの設定

曲げ試験における供試体設置条件，実験装置寸法を基に解析ケースを設定した．ここでは，解析ケースにおけるデント部の設定について説明する．

2.3.3にて，解析による軸圧縮座屈特性のシミュレーションを行う上では，デント部の残留ひずみの無いモデルと，残留ひずみを考慮のモデルのどちらを使用しても，結果に差はないことを示している．今回の曲げによる局部座屈実験の解析による再現においても，デント部の残留ひずみを考慮するか，しないかで，結果に差異が発生するかどうかを確認した．

デント管腹側曲げ，デント管側方側曲げについては，4.4.1の解析結果からデント形状のみを考慮して曲げ载荷を実施した解析と，デント部の残留ひずみを考慮して曲げ载荷を実施した解析をそれぞれ実施し，全5ケースの解析を実施した．解析モデル図を図-4.31～図-4.33に示す．

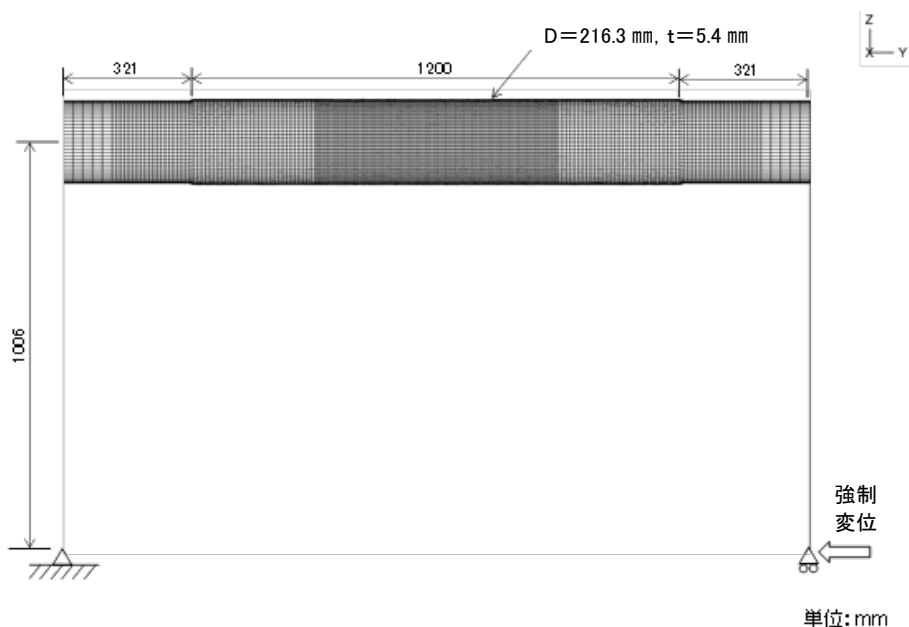


図-4.31 解析モデル図（健全管曲げ）

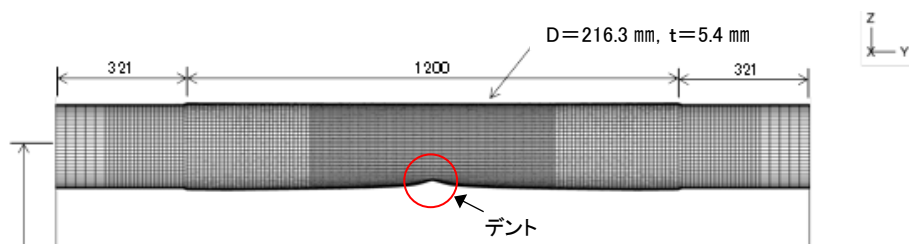


図-4.32 解析モデル図（デント管腹側曲げ） ※強制変位を与える位置は図-4.31と同じ

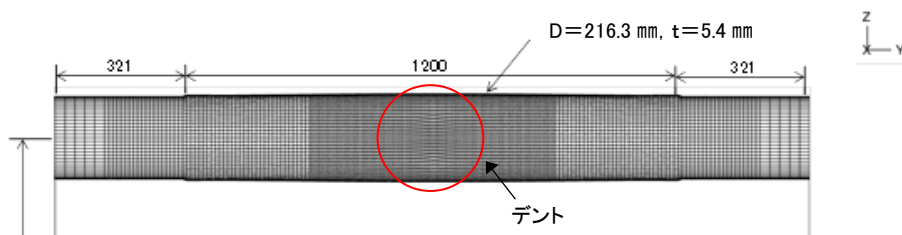


図-4.33 解析モデル図（デント管側方側曲げ） ※強制変位を与える位置は図-4.31と同じ

4.4.3 実験結果の再現

(1) 健全管曲げ座屈

健全管の曲げ座屈解析結果を実験結果と併せて表-4.6 にまとめる。図-4.34 に荷重～変位関係、図-4.35 に曲げモーメント～曲げ角度関係、図-4.36 に最大曲げモーメント発生時のひずみ分布を示す。なお、図-4.36 の凡例の 0deg. は管頂部、180deg. は管底部を表す。 δ_{cr} は最大荷重発生時のピン間変位、 θ_{cr} は最大曲げモーメント発生時の曲げ角度を示す。 θ_{cr} は、実験時 9.52deg.、解析時 9.53deg. であり、解析は実験を良く再現できている。ひずみの分布も、解析は実験を良く再現できている。

表-4.6 解析結果まとめ (健全管曲げ)

項目	P_{max} (kN)	δ_{cr} (mm)	M_{max} (kNm)	θ_{cr} (deg.)	M_{max} 時 ϵ_{Lmin} (%)
実験	73.1	158.6	76.3	9.52	-2.09
解析	72.9	137.0	76.3	9.53	-2.63

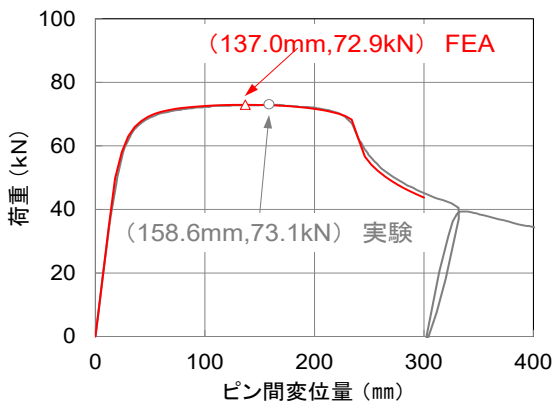


図-4.34 荷重～変位関係 (健全管曲げ)

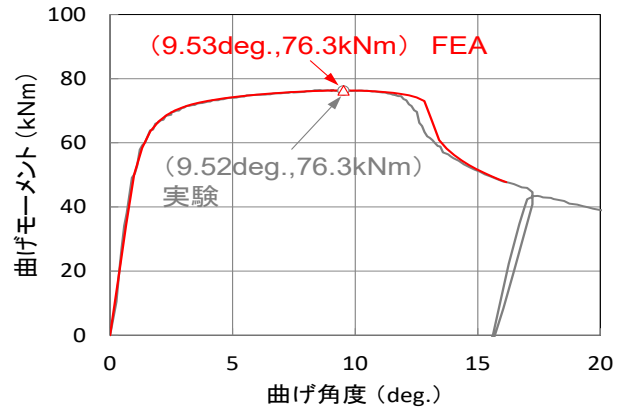


図-4.35 曲げモーメント～曲げ角度関係 (健全管曲げ)

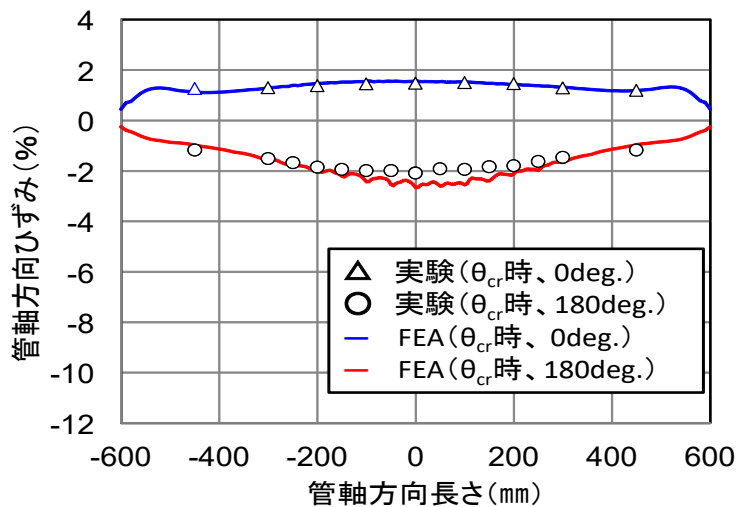


図-4.36 ひずみ分布 (健全管曲げ)

(2) デント管腹側曲げ座屈

デント管腹側の曲げ座屈解析結果を実験結果と併せて表-4.7 にまとめる。図-4.37 に荷重～変位関係、図-4.38 に曲げモーメント～曲げ角度関係、図-4.39、図-4.40 に最大曲げモーメント発生時のひずみ分布（残留ひずみを考慮しない解析／考慮する解析）を示す。（1）と同じく、図-4.39、図-4.40 の凡例の 0deg. は管頂部、180deg. は管底部を表す。図-4.37、図-4.38 から、デント部の残留ひずみを考慮したモデルの解析の方が、実験結果を良く再現できている。残留ひずみを考慮しないモデルは、実験結果および残留ひずみを考慮したモデルに比べ、荷重および曲げモーメントが小さくなった。

θ_{cr} は、実験時 2.12 deg., 残留ひずみを考慮しない解析時 2.81 deg., 残留ひずみを考慮する解析時 2.04 deg. であった。

表-4.7 解析結果まとめ（デント管腹側曲げ）

項目	残留ひずみ	P_{max} (kN)	δ_{cr} (mm)	M_{max} (kNm)	θ_{cr} (deg.)	M_{max} 時 ϵ_{Lmin} (%)
実験	—	55.1	37.9	56.1	2.12	-4.37
解析	なし	46.9	47.7	48.0	2.81	-28.54
	考慮	52.4	35.1	53.4	2.04	-7.00

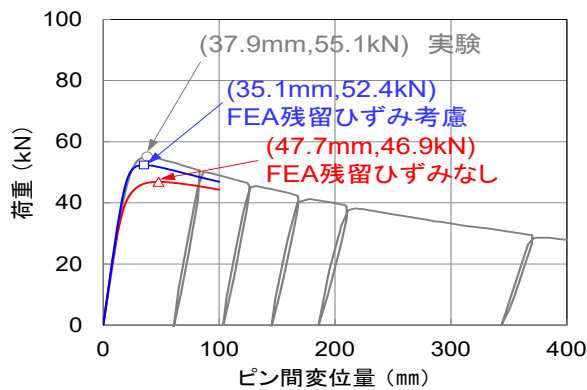


図-4.37 荷重～変位関係
(デント管腹側曲げ)

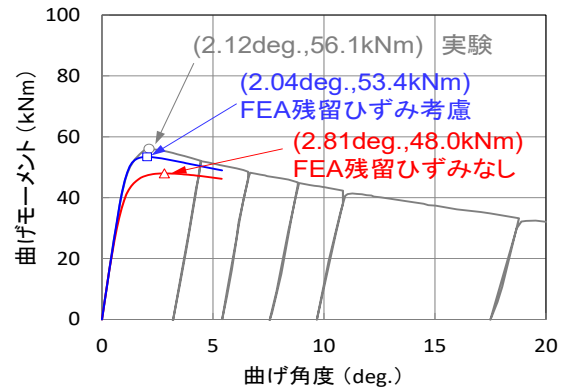


図-4.38 曲げモーメント～曲げ角度関係
(デント管腹側曲げ)

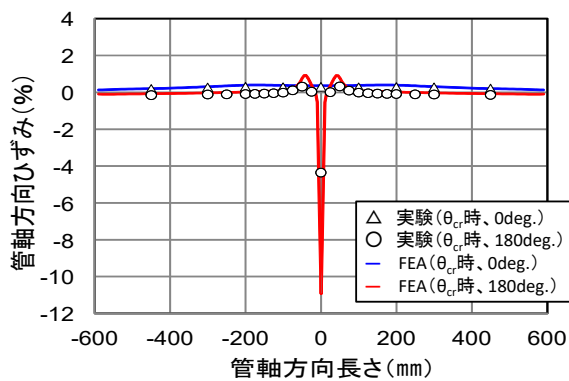


図-4.39 ひずみ分布（残留ひずみなしの場合）
(デント管腹側曲げ)

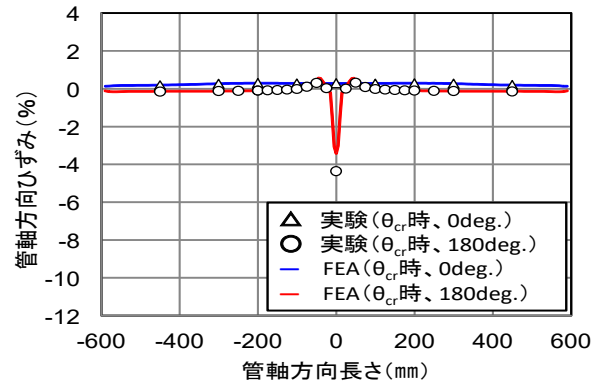


図-4.40 ひずみ分布（残留ひずみ考慮の場合）
(デント管腹側曲げ)

(3) デント管側方側曲げ座屈

デント管側方側曲げ座屈解析結果を実験結果と併せて表-4.8 にまとめる。図-4.41 に荷重～変位関係，図-4.42 に曲げモーメント～曲げ角度関係，図-4.43，図-4.44 に最大曲げモーメント発生時のひずみ分布（残留ひずみ無しの解析／考慮する解析）を示す。（1）と同じく，図-4.43，図-4.44 の凡例の 0deg. は管頂部，180deg. は管底部を表す。図-4.41，図-4.42 から，残留ひずみを考慮したモデルの解析の方が，実験結果を良く再現できている。残留ひずみを考慮しないモデルは，実験結果および残留ひずみを考慮したモデルに比べ，浅い曲げ角度で荷重および曲げモーメントがピークに達している。

θ_{cr} の値は，実験時 8.12 deg.，残留ひずみを考慮しない解析時 6.49 deg.，残留ひずみを考慮する解析時 8.66 deg. であった。

表-4.8 解析結果まとめ（デント管側方側曲げ）

項目	残留ひずみ	P_{max} (kN)	δ_{cr} (mm)	M_{max} (kNm)	θ_{cr} (deg.)	M_{max} 時 ϵ_{Lmin} (%)
実験	—	73.5	129.2	76.3	8.12	-8.62
解析	なし	70.6	103.9	73.8	6.49	-29.48
	考慮	72.6	130.3	76.4	8.66	-14.74

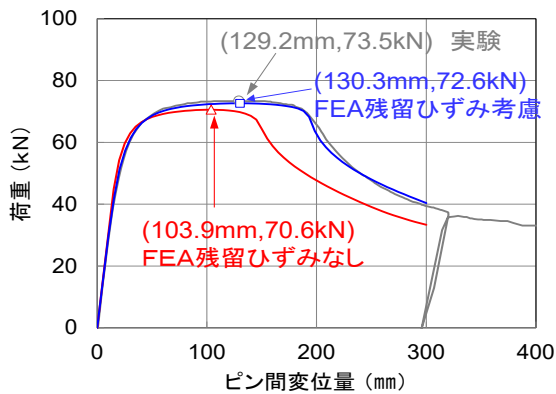


図-4.41 荷重～変位関係
(デント管側方側曲げ)

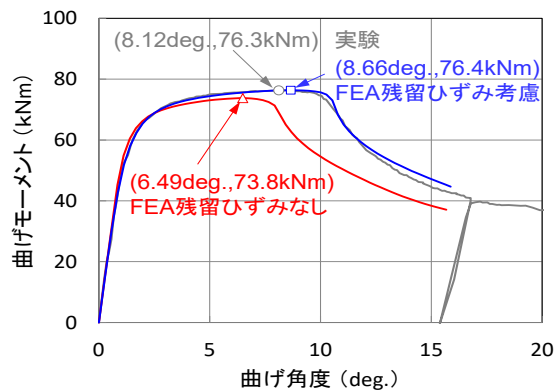


図-4.42 曲げモーメント～曲げ角度関係
(デント管側方側曲げ)

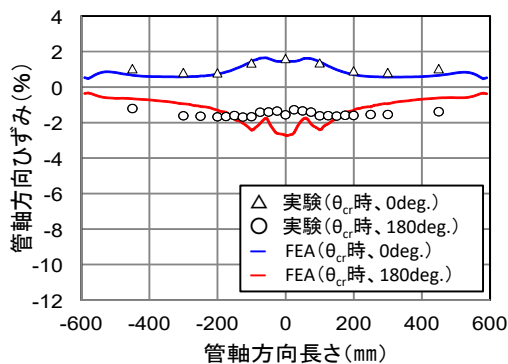


図-4.43 ひずみ分布（残留ひずみなしの場合）
(デント管側方側曲げ)

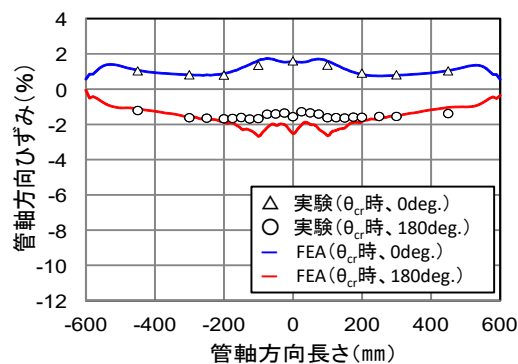


図-4.44 ひずみ分布（残留ひずみ考慮の場合）
(デント管側方側曲げ)

4.4.4 解析結果の考察

(1) 健全管曲げ座屈

曲げ座屈実験過程における健全管の座屈挙動は、今回の有限要素解析によって十分な精度で再現できている。

(2) デント管腹側曲げ座屈

解析モデルとして、デント部の残留ひずみを考慮した場合、考慮しない場合の2通りのモデルを用意して解析を行った。残留ひずみを考慮したモデルの解析結果の方が実験結果を良く再現できている。したがって、腹側にデントがある鋼管の場合、曲げ座屈特性に及ぼす残留ひずみの影響を明確に確認することができた。次に、この点について考察する。

図-4.37、図-4.38において解析結果を比較すると、残留ひずみの有無で、最大荷重あるいは最大曲げモーメントに明確に差異が発生している。これは、3.5(2)でも触れたが、金属の塑性力学の理論における「ひずみ硬化」の発現であると捉えることができる。

図-4.45に示す応力-ひずみ曲線の模式図で、デント部は応力-ひずみ曲線上の履歴として、まずデント加工時は、鋼管材料の降伏点のA点を越えB点を経て、デント加工終了時はC点に至り、 ϵ_R の残留ひずみが存在しているとする。ここから再载荷（今回は曲げ载荷）されると、「ひずみ硬化」を示しているデント部は、D点で降伏に至ることになる。これが残留ひずみを考慮した再塑性化のメカニズムである。

それに対し、残留ひずみを考慮しない場合、C点からD点に至る場合と同じ降伏ひずみ ϵ_y に至るのは原点からA点までとなり、図-4.45における降伏応力の差 $\Delta\sigma = \sigma_{CD} - \sigma_A$ が生じる。この差が、図-4.37、図-4.38における最大荷重あるいは最大曲げモーメントの差に反映されていると捉えることができる。

なお、図-4.45に示した模式図は、デント部を、様々な履歴を持つ要素の集合として捉えた場合に、鋼管の全体として発現する傾向として示していることを補足する。

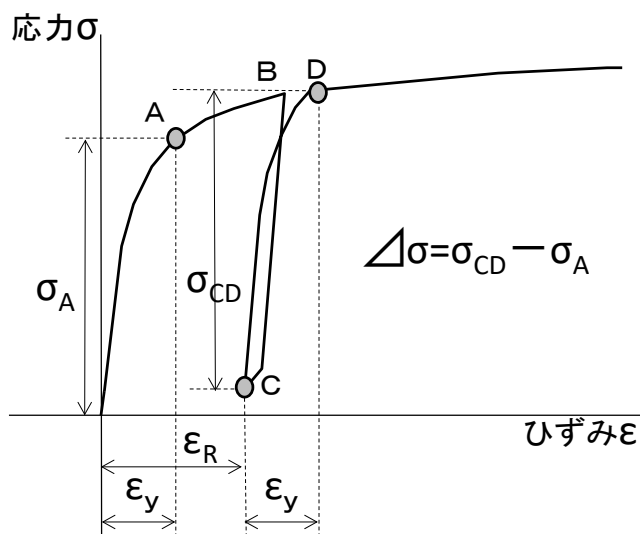


図-4.45 塑性ひずみ発生履歴を考慮した場合の応力-ひずみ曲線

(3) デント管側方側曲げ座屈

デント管腹側曲げ座屈と同じく，デント部の残留ひずみを考慮した場合と，考慮しない場合の2通りのモデルを用意して解析を行った．図-4.41，図-4.42において，残留ひずみを考慮したモデルの解析結果の方が実験結果を良く再現できているのは(2)と同じであるが，最大荷重あるいは最大曲げモーメントの差は，(2)の場合に比べ少ない．この点について考察する．

鋼管の曲げ座屈にて，座屈が発生するのは曲げの内側（管底部，180deg.）である．その管底部における，デント作成時に発生する残留ひずみ（解析結果）の分布に着目すると，図-4.46となる．デント管腹側曲げとデント管側方側曲げの2つの場合を示している．

デント管腹側曲げの場合では曲げの中心部で管軸方向に引張と圧縮ひずみが生じているのに対し，デント管側方側曲げの場合では，残留ひずみはほとんど生じていない．曲げ変形を施す場合に最も大きなひずみが生じる部位（管底部，180deg.の全体），および実際に座屈した箇所（デント部のすぐ横）には残留ひずみがほとんど生じていないがゆえに，最大荷重あるいは最大曲げモーメントの差がほとんど生じていないのではないかと考えられる．

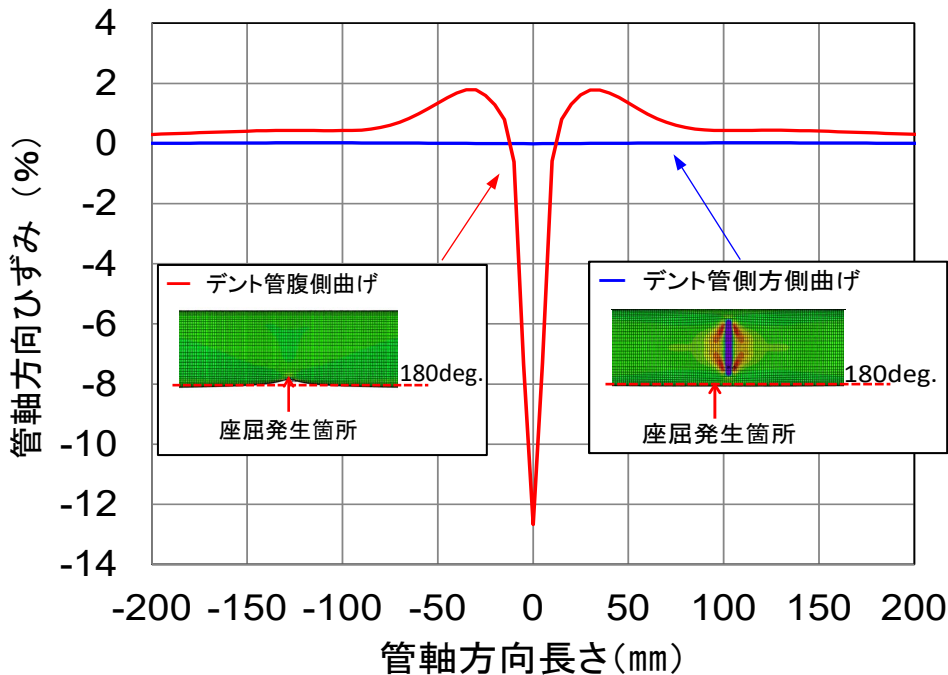


図-4.46 デント作成時に管底部（180deg.）に発生する残留ひずみ（管軸方向）の分布

4.5 まとめと今後の研究課題

4.5.1 まとめ

日本産業規格準拠の鋼管（SGP）を用いた，デントを有する鋼管パイプラインの曲げによる局部座屈実験と有限要素解析による再現について，以下の通り，箇条書きでまとめる．

- 地盤沈下および地盤の側方流動により、鋼管パイプラインには曲げによる局部座屈のリスクが存在することを認識した。
- デントを有する鋼管の曲げによる局部座屈実験を実施した。デントのない健全な供試体と、人工的にデントを形成した供試体を用意し、(1) 健全管、(2) デント管腹側曲げ座屈（地盤沈下を想定）、(3) デント管側方側曲げ座屈（地盤の側方流動を想定）、3通りの実験を実施した。(2) はデント部にひずみが集中した局部座屈が発生し、(3) はデント部のすぐ横で局部座屈が発生した。3体とも、実験装置の限界まで曲げても供試体は破壊しなかった。
- 実験結果を再現できる解析モデルの作成を試みた。軸圧縮座屈実験（2章）と同様、デント部の残留ひずみを考慮した解析モデルと残留ひずみを考慮しない解析モデルの2通りで検討し、残留ひずみを考慮した解析モデルの方が考慮しない解析モデルより実験結果の再現に優れた結果となり、両解析モデルに再現性の差がないという軸圧縮座屈実験（2章）での結果とは異なる結果となった。
- 曲げによる局部座屈の実験結果の再現解析について考察した。(2) はデント部の「ひずみ硬化」の影響が現れて最大曲げモーメントの再現性に差が出たのではないかと考察した。(3) は、曲げによる局部発生する部分には残留ひずみが存在していないので、最大曲げモーメントの差が生じなかった、と考察した。

4.5.2 デント部の再変形挙動の解明

デントを有する鋼管パイプラインの曲げによる局部座屈においては、デント部の残留ひずみを考慮した解析の方が実験結果を良く再現できる結果となった。これは2.3.3の軸圧縮座屈の場合で、デント部の残留ひずみの影響は少ないとされてきたこととは異なる結果であった。本研究では曲げによる局部座屈であり、軸圧縮座屈とは変形モードが異なるという点で、残留ひずみの影響力も異なっていると考えられる。

これは、鋼管パイプラインの曲げによる局部座屈に対するデント部の再変形の影響について4.4.4で「ひずみ硬化」と関連付けて定性的に考察したことと比較して、軸圧縮座屈の場合は、座屈耐力の減少はデントの存在による幾何学的な管断面積の減少による荷重集中の影響が大きく、残留ひずみの存在による「ひずみ硬化」部分は、主には座屈の方向（管軸方向）と異なる方向に配列されていることもあり、その効果がほとんど寄与しなくなっているのではないかと考えている。図-4.47にイメージを示した。今後、さらなる詳細な分析が必要である。

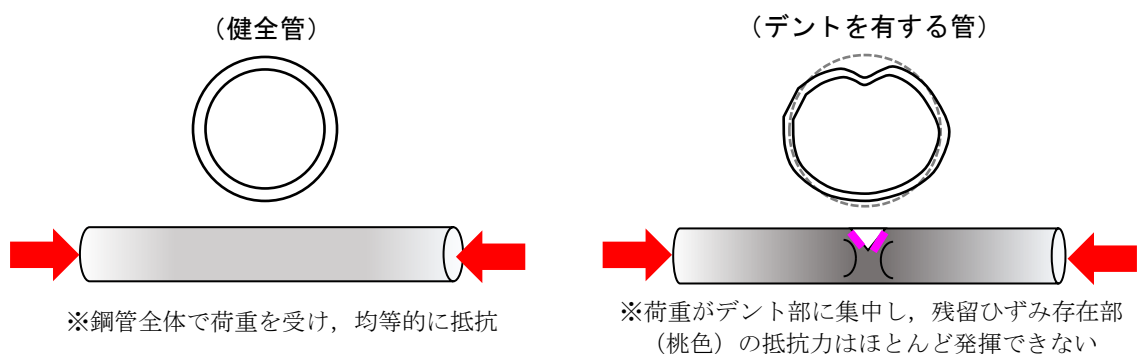


図-4.47 健全管とデントを有する管の軸圧縮座屈変形に対する耐力の違い（イメージ）

4.5.3 鋼管パイプライン耐震設計への活用方法

本研究は、鋼管パイプラインの耐震安全性の検討に資することを旨としたものである。念頭にあるのは、地盤の液状化に対する安全性の検討である。4.2でも述べた通り、埋設された鋼管パイプラインの液状化耐震設計の手法としては、高圧液状化指針[28]が存在する。

高圧液状化指針では、基本的考え方として、液状化に伴う地盤変状に対して「変形は生じるが、漏えいは生じない」性能を求めている。これを担保する具体的な耐震性判定方法として、液状化による地盤変状によって発生するパイプラインの変形（曲げによる局部座屈、軸圧縮座屈）が限界変位を超えたかどうかで耐震性を判定することになっている。限界変位とは、変形のモードに応じて、曲げによる局部座屈に対しては「限界曲げ角度」、軸圧縮座屈に対しては「限界軸圧縮変位」で表される。

「限界曲げ角度」については、以下の式で定められる。

$$\omega_{sc} = \left\{ \frac{44t_s}{100D} \left(8k - \frac{2k^2}{3} \right) + \frac{3.44}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{D/t_s}} \left(1 + \frac{\epsilon_f}{2} \right) \right\} \cdot \frac{180}{\pi} \quad (4.3)$$

ω_{sc} : 直管の限界曲げ角度 (度)

D : 直管の外径 (cm)

t_s : 直管の公称管厚 (cm)

ϵ_f : 0.35

k : 3.2

式 (4.3) は、鋼管パイプラインに発生した座屈（鋼管の外表面への盛り上がり）が鋼管の外表面に倒れ込み、その部分で管厚全面が引張状態となり貫通亀裂が発生するまでを考慮している。図-4.48にその概念を示す。そしてこれはあくまで健全な鋼管パイプラインの場合の式であり、デントが存在する場合、「限界曲げ角度」自体が小さくなり（耐震性が健全管より劣り）、上式が適用できない可能性がある。

L_s : 直管の曲げ角度を定めるための基準長さ (=6.4D)

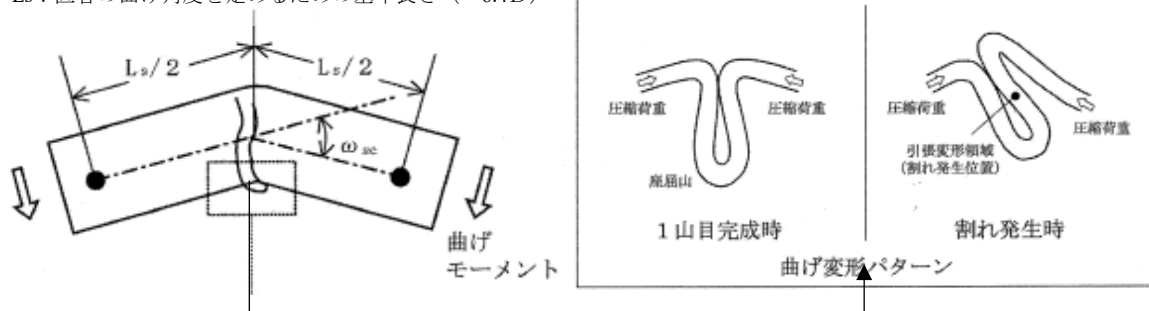


図-4.48 鋼管の曲げによる局部座屈における「限界曲げ角度」(概念図)

今後の研究で、実験と解析、パラメータスタディを積み重ねることにより、デントを有する鋼管パイプラインの曲げによる局部座屈に対する耐震性を解明していくことが必要である。

4.5.4 実務への活用方法

本研究が今後進展し、デントを有する鋼管パイプラインの実際の地震被害（曲げによる局部座屈発生）の有無を推定するという実用の段階を考えると、残留ひずみを考慮した解析を行うということは、まず健全管の解析モデル上で外力を加えて残留ひずみを与えながら、実際に現場で発見されたデントの形状を再現させるという前作業が必要となることを意味する。現場で発見されたデントの形状計測結果をそのまま使って現場と同じ形状の解析モデルを準備する場合に比べ、前作業が1回必要ということで、解析作業全体として負担が大きくなるという問題が生じる。

この問題を解決するには、デント部の残留ひずみを簡易に推定する手法を見出して、残留ひずみを計算し、その計算結果を、あらかじめデントの形状のみを反映した解析モデル上に入力する方法を採る必要があるが、「デント部の残留ひずみを簡易に推定する手法」の確立には相当に多くの研究エフォートが必要と想定される。よって、実際のパイプラインの耐震性の照査に活用しようとする場合は、本研究で実施した実験および解析では安全側に結果が導き出される、残留ひずみを考慮しないモデルを活用することも視野に入れ、研究を進める必要があると考えている。

第5章 デントを有する鋼管パイプラインの耐震性検討

5.1 概説

本章では、第3章で示した鋼管パイプラインの軸圧縮座屈パラメータスタディ結果を踏まえて、デントを有する鋼管パイプラインの耐震性を判定する。

5.2では、我が国の各種地中管路の耐震設計の考え方の基礎となっている「石油パイプライン技術基準（案）」[29]の考え方について紹介する。

5.3では、我が国の鋼管パイプラインの耐震設計に広く用いられている「高圧ガス導管耐震設計指針」[30]の要点について紹介する。

5.4では、本論文で用いた耐震性の判定方法について提案する。

5.5では、本論文で耐震性の検討対象としたデントを有する鋼管パイプライン（第3章で示したものと、追加して軸圧縮座屈パラメータスタディを実施したもの）を紹介し、5.6で耐震性の判定結果を提示する。

5.2 石油パイプライン技術基準（案）

石油パイプライン技術基準（案）[29]とは、東京国際空港の建設に伴う新しい輸送手段としての石油パイプラインの建設に対して、我が国で初めて1974年に設けられた地中管路に対する耐震基準である。その後、今日に至るまで、日本の各種地中管路の耐震技術基準の基礎となっている。

ここでは、この技術基準における入力地震動および設計手順について紹介する。石油パイプライン技術基準（案）では、まずパイプラインの埋設場所によって考慮する地震外力を変えていることが特徴的であり、流動化するおそれのある砂質土層や軟弱な粘性土層及びシルト質土層に埋設されている場合は地震動による慣性力および動水圧を考慮し、それ以外の地盤（一般的な地盤）では地盤の変位を考慮することとしている。ここでは後者の一般的な地盤での考え方の手順について、設計基盤面の水平震度の算出、表層地盤の固有周期の算出、地盤変位の算出までの3つの過程を紹介する。

①設計基盤面における水平震度（ K_{oh} ）を算出する。

$$K_{oh}=0.15 \cdot v_1 \cdot v_2 \quad (5.1)$$

v_1 ：地域別補正係数

v_2 ：土地利用区分別補正係数

②表層地盤の固有周期（ T ）を算出する。

$$T=C \cdot H / V_s \quad (s) \quad (5.2)$$

C : 表層地盤が粘性土の場合は 4.0, 砂質土の場合は 5.2

H : 表層地盤の厚さ (cm)

V_s : 表層地盤のせん断弾性波速度 (cm/s)

③表層地盤面の水平変位振幅 (U_h) を求める. ここに S_V は図-5.1 として与える.

$$U_h = 0.203 \cdot T \cdot S_V \cdot K_{oh} \quad (5.3)$$

S_V : 応答速度の基準値 (以下の図-5.1 参照)

なお上式の 0.203 は, $2/\pi^2$ を示す.

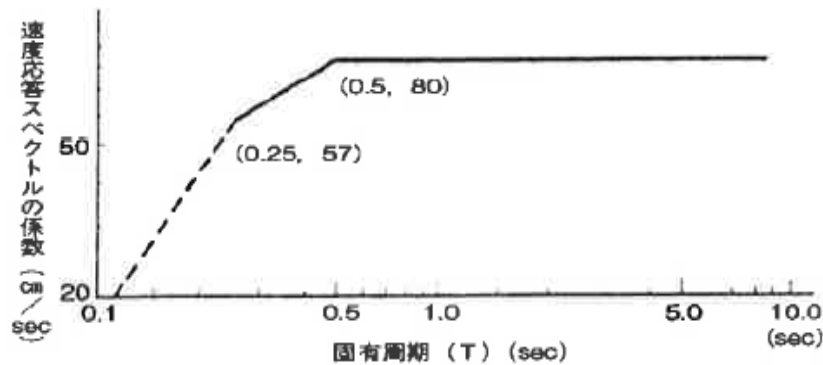


図-5.1 応答速度の基準値

5.3 高圧ガス導管耐震設計指針

5.3.1 考え方の要点

我が国の埋設パイプラインの耐震設計に広く用いられている高圧ガス導管耐震設計指針[30](初版は 1982 年. 以下, 「高圧ガス耐震」と表記)における耐震設計の考え方の要点を示す.

高圧ガス耐震では, 基本的な考え方として 2 段階のレベル (レベル 1, レベル 2) の地震動を想定し, 地震動毎に定めた耐震性能 (表-5.1 参照) を確保することを基本としている. なお, このような 2 段階のレベルの地震動を想定し, レベル 2 地震動に対しある程度の変形を許容するという考え方は, 阪神・淡路大震災以降, 土木建築構造物の耐震設計の指針類 (例: 「道路橋示方書」等) に広く採り入れられており, 高圧ガス耐震も, 一般的な耐震設計の指針類と同等な考え方を採用している.

耐震性評価の方法としては, 埋設ガス導管に対して管軸方向地盤応答変位分布を与え, 発生する管ひずみが許容ひずみを超えないことを照査する考え方となっている. なお, ひずみに基づき耐震性評価を行う手法は海外専門誌にも解説されている[32]. これは, 鋼管の形状面の特徴から, 管に作用する変形モードとして「管軸方向引張」「管軸方向圧縮」の 2 種類が考えられる中で, 鋼管の耐力評価としては最も厳しい「管軸方向圧縮」について検討することに基づいている. 具体的には, 地震波動が起こす地盤の変位が, 埋設鋼管に加わり軸圧縮外力として作用するものとする. この

外力によりガス導管には軸圧縮ひずみが生じ、それが過大となればガス導管が座屈する。図-5.2に、その軸圧縮外力が作用するイメージ図を示す。

表-5.1 地震動と耐震性能[29]

設計で想定する地震動		耐震性能
レベル1 地震動	ガス導管の供用期間中に1~2回発生する確率を有する一般的な地震動を想定する。	被害が無く、修理することなく運転に支障がない。
レベル2 地震動	ガス導管の供用期間中に発生する確率は低い、非常に強い地震動。内陸型と海溝型地震を想定する。	導管に変形は生じるが、漏洩は生じない。

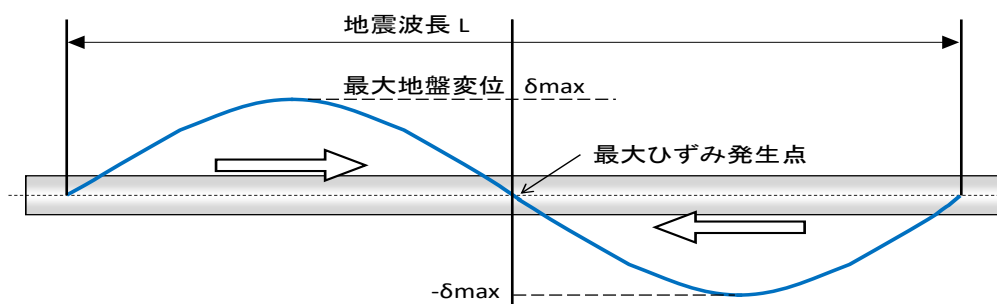


図-5.2 鋼管パイプラインに発生する地震時の軸圧縮外力イメージ

5.3.2 地盤変位量の算出

高圧ガス耐震では、地盤変位量の算出にあたり、①設計基盤面における水平震度の算出、②表層地盤の固有周期を算出、③表層地盤面の水平変位振幅の算出という手順で、地盤変位量を算出する。以下にそれらを示す。

①震度の算出

高圧ガス耐震は1978年の宮城県沖地震で得られた知見を踏まえて初版が1982年に制定された後、1995年の兵庫県南部地震、2011年の東北地方太平洋沖地震で得られた知見を踏まえて改訂を重ね、現在の内容に定まっている。設計に供する地震動（設計地震動）として、表-5.1の考え方に基づくレベル1地震動（従来から想定されていた地震動）・レベル2地震動（兵庫県南部地震で初めて観測された高レベルの地震動）の2段階の地震動が想定されている。

レベル1地震動の場合は、石油パイプライン技術基準（案）の考え方とほぼ同じである。設計基盤面における水平震度（ K_{oh} ）を定める。

$$K_{oh} = 0.15 \cdot v_1 \cdot v_2 \quad (5.3)$$

v_1 ：耐震設計に際しての重要度係数

v_2 ：地域係数

レベル2地震動の場合は、内陸型の地震と海溝型の地震でそれぞれ設計地震動が速度応答スペクトル S_v (cm/s) の形であらかじめ定められている。図-5.3、図-5.4に示す。

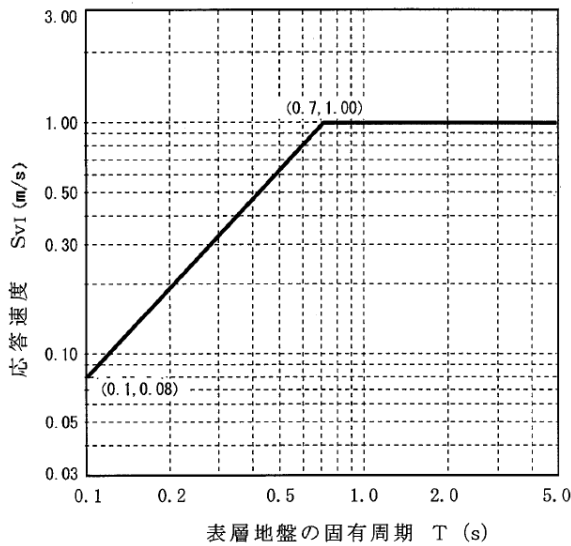


図-5.3 レベル2設計地震動（内陸型地震）

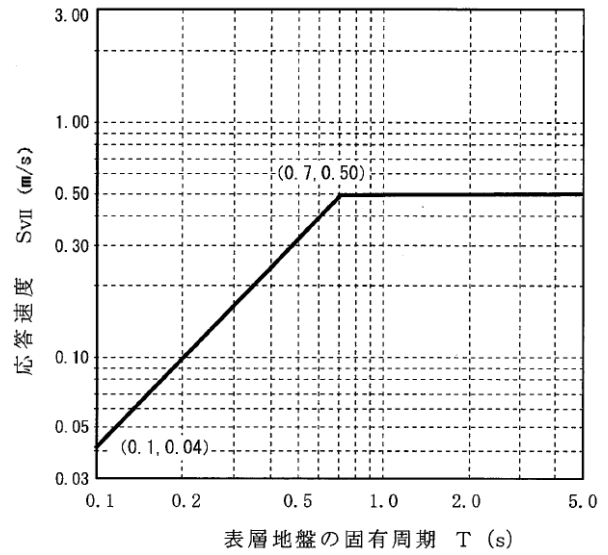


図-5.4 レベル2設計地震動（海溝型地震）

②表層地盤の固有周期 (T) の算出

レベル1地震動，レベル2地震動ともに，同じ式で求める。レベル2地震動の場合， T の算出により，図-5.3および図-5.4を参照して応答スペクトルが決まることになる。

$$T = 4 \cdot H / V_s \quad (\text{s}) \quad (5.4)$$

H : 表層地盤の厚さ (m)

V_s : 表層地盤のせん断弾性波速度 (m/s)

③表層地盤面の水平変位振幅 (U_h) の算出

レベル1地震動の場合，以下の式で求める。

$$U_h = \frac{2}{\pi^2} \cdot T \cdot S_v \cdot K_{oh} \quad (5.5)$$

レベル2地震動の場合， S_v は内陸型あるいは海溝型に応じて，それぞれ図-5.3あるいは図-5.4から読み取って与える。

$$U_h = \frac{2}{\pi^2} \cdot v \cdot T \cdot S_v \quad (5.6)$$

v : 地域別補正係数

S_v : 応答速度 (図-5.3あるいは図-5.4から読みとり)

以上が地盤変位の算出である。この算出方法は，石油パイプライン技術基準（案）も高圧ガス耐震もほぼ同じである。

5.3.3 管ひずみの算出

5.3.2 で求めた地盤変位から表層地盤ひずみを計算し、表層地盤ひずみが作用することで鋼管パイプラインに発生するひずみ（管ひずみ）を算出する方法を説明する。

レベル1地震動，レベル2地震動ともに，地盤変位（表層地盤面の水平変位振幅， U_h ）と，表層地盤ひずみ（一様地盤の場合， ε_G ）の関係は，以下の式で表される。

$$\varepsilon_G = \frac{2\pi \cdot U_h}{L} \quad (5.7)$$

ε_G ：一様地盤の表層地盤ひずみ

U_h ：表層地盤変位 (m)

L ：地震動の見かけの波長 (m)

次に，表層地盤ひずみから管ひずみを計算する。直管の地震時ひずみ ε_P は下記の式で求める。

$$\varepsilon_P = \alpha \cdot \varepsilon_G \quad (5.8)$$

ここで， ε_P ：直管の地震時ひずみ

α ：直管のひずみ伝達係数

ε_G ：地盤ひずみ

なお， α は管と地盤とのすべりおよび摩擦係数を考慮して計算した値で1を超えない。具体の α の算出の詳細は，高圧ガス耐震を参照頂きたい。

一様な地盤の場合でレベル1地震動，レベル2地震動それぞれで地盤ひずみ ε_G ，直管の地震時ひずみ ε_P を計算した結果の一例を，図-5.5 に示す。図の横軸は地盤の固有周期 T_G である。なお，鋼管パイプラインとして，米国石油協会規格準拠の鋼管（API 5L L360）で呼び径 600A の場合，埋設深さは 1.8m の場合で算出している。このとき， ε_P の最大値は，レベル1地震動では 0.07%，レベル2地震動では 0.22% となった。

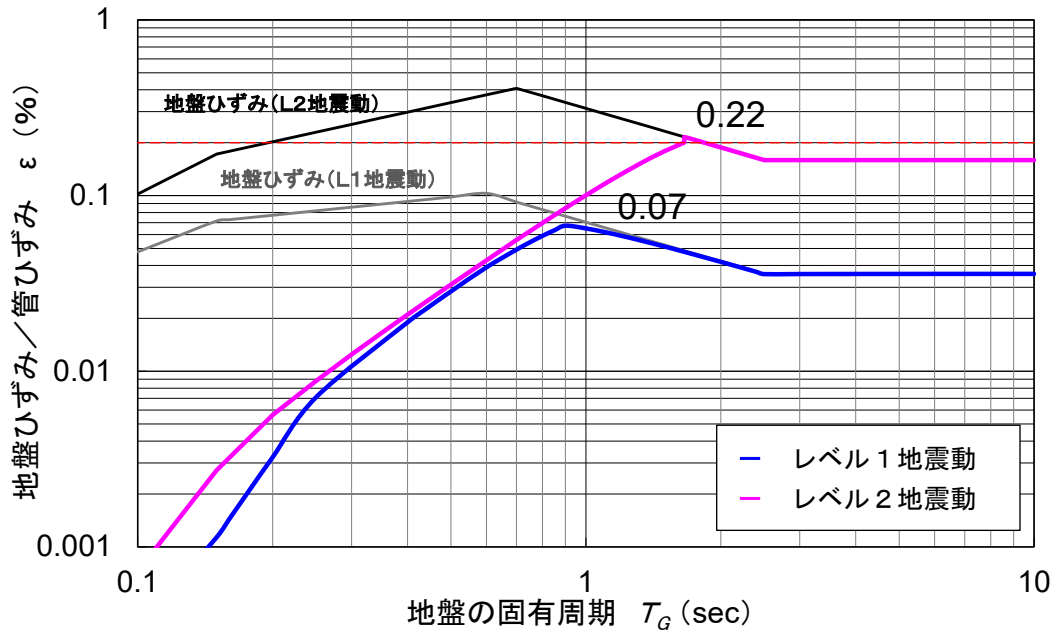


図-5.5 高圧ガス導管耐震設計指針にて計算される直管の地震時ひずみ
(米国石油協会規格準拠の鋼管：API 5L L360 呼び径 600A, 埋設深さ 1.8m の場合)

5.4 耐震性の判定方法

5.3 で算出した管ひずみの値から，鋼管パイプラインの耐震性を判定する方法について述べる。

高圧ガス耐震では，耐震性の判定尺度として「許容ひずみ」を定めた上で，鋼管パイプラインに発生するひずみはその許容ひずみを下回れば耐震性を有し，上回れば耐震性が不足すると判定される．その値は，レベル1地震動の場合とレベル2地震動の場合で異なり，レベル1地震動に対しては，

(a) 1.0%

(b) $35 \cdot t/D_m$ (%) (t : 管厚, D_m : 管の平均直径), もしくは実測により求めた座屈開始ひずみ

のいずれか小さい方であり，またレベル2地震動に対しては，一律 3%と定めている．なお上記 (b) は，デントの無い健全な鋼管パイプラインの軸圧縮座屈開始ひずみの値を表していることが高圧ガス耐震[30]には記されている．

しかしながら，加藤ら[24]によると，鋼管の軸圧縮変形のモードでは，座屈が始まると，座屈の進展は不安定に進み，ひずみ値の制御が困難となることが知られている．

以上から，本論文では，鋼管パイプラインの軸圧縮座屈の発生の有無に着目し，レベル1およびレベル2両方の地震動に対して，鋼管パイプラインに発生する軸圧縮ひずみが軸圧縮座屈開始ひずみを下回れば耐震性を有し，上回れば耐震性が不足すると捉えて議論を進めることとする．

5.5 耐震性検討対象の鋼管パイプライン

第3章のパラメータスタディから、線状デントを有する鋼管パイプラインの方が面状デントを有するものより軸圧縮座屈への耐性が低くなることが明らかになった。デントを有する鋼管パイプラインの耐震性の判定事例を多くするため、第3章で紹介した2種類の鋼管パイプラインに加え、新たに米国石油協会規格準拠の鋼管 API 5L L360 および API 5L L450 の軸圧縮座屈解析を行った。管径は両方とも 600A である。第3章のパラメータスタディの結果と合わせ、本章で耐震性を検討するデントを有する鋼管パイプラインを、あらためて表-5.2 にまとめておく。いずれも、都市ガス事業者の主要な鋼管パイプラインとして使用されているものである。

表-5.2 耐震性を検討する鋼管パイプライン一覧

No	材質・仕様	呼び径	管厚 (mm)	埋設深さ (mm)	解析 結果
1	日本産業規格準拠 配管用炭素鋼鋼管 JIS G 3452 (SGP)	400A	7.9	1,200	第3章
2	米国石油協会規格準拠 (API 5L L415)	400A	11.9	1,200	第3章
3	米国石油協会規格準拠 (API 5L L360)	600A	10.3	1,800	第5章
4	米国石油協会規格準拠 (API 5L L450)	600A	15.1	1,800	第5章

米国石油協会規格準拠の鋼管 API 5L L360 および API 5L L450 の解析条件を表-5.3 にまとめる。3.3 同様、有限要素解析には汎用構造解析コード Altair HyperWorks OptiStruct ver 2017.1 を使用し、鋼管は4節点シェル要素で分割した。3.3.7 および 3.3.10 と同様、線状デントを解析モデルに付加し、鋼管パイプラインの運用圧力（内圧）および埋設条件（土圧および地盤ばね）を同時に考慮した場合の軸圧縮座屈解析を行った。これらの鋼管に対するデントの形状を、API 5L L360 の場合は図-5.9 および図-5.10、API 5L L450 の場合は図-5.11 および図-5.12 に示す。

表-5.3 軸圧縮座屈解析条件：

(米国石油協会規格準拠の鋼管：API 5L L360 および API 5L L450)

	米国石油協会規格準拠の鋼管 (API 5L L360)	米国石油協会規格準拠の鋼管 (API 5L L450)
解析形式	非線形静解析 (接触解析および大変形解析)	
メッシュ形式	線荷重治具：ビーム要素 (剛体)， 鋼管：シェル要素，地盤：ばね要素	
メッシュサイズ	長さ 30.5mm×幅 29.9mm	
境界条件	両端を剛体化して拘束，上下方向のみ回転可能	
デント深さ	外径に対し 3%，6%，10% (d3%，d6%，d10%と呼称)	
外径	610.0mm (呼び径：600A)	610.0mm (呼び径：600A)
鋼管肉厚	10.3mm	15.1mm
埋設深さ	1,800mm	1,800mm
ヤング率	177GPa 注1)	206GPa 注5)
応力-ひずみ曲線	図-5.6 参照 注1)	図-5.8 参照 注6)
降伏点	真応力 314MPa 注1) 真ひずみ 0.17% 注1)	真応力 205MPa 注6) 真ひずみ 0.10% 注6)
応力-ひずみ曲線の 終点	真応力 487MPa 注1) 真ひずみ 12% 注1)	真応力 535MPa 注6) 真ひずみ 8.0% 注6)
管内内圧 注2)	2.0MPa	
上方からの土圧 注3)	埋設深さ 1,800mm：0.0317 MPa	
地盤ばね強さ 注4)	図-5.7 参照	

注1) 第2章の2.2.2の実管実験の際に実施した材料特性試験およびその結果から描いた応力-ひずみ曲線から読み取った値。

注2) 都市ガス輸送導管内を流れるガスによる圧力。

注3) 「石油パイプライン技術基準 (案) (日本道路協会)」[29]の計算式を基に設定。

注4) 高压ガス耐震より引用。

注5) 「高压ガス導管液状化耐震設計指針 (日本ガス協会)」[28]で，導管材料特性として定められた値。

注6) 米国石油協会の規格で定める最低レベルの強度を満たす応力-ひずみ曲線 (図-5.8) を描いて定めた。

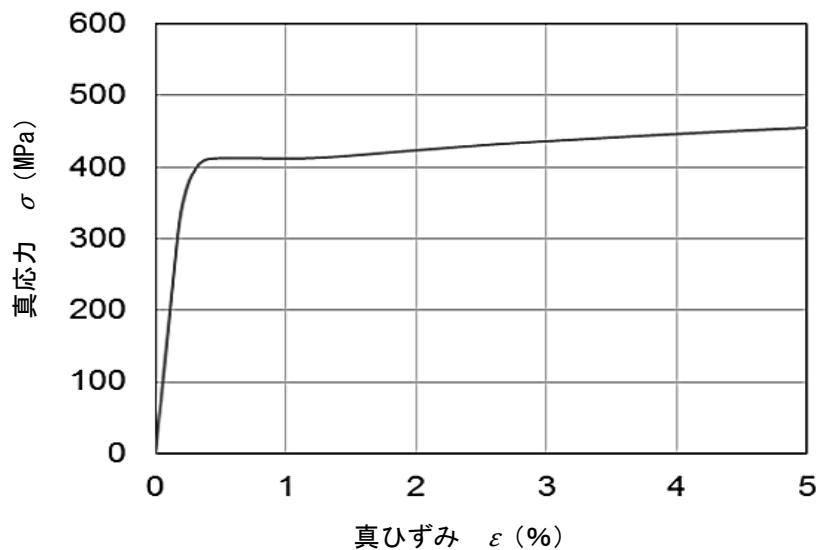


図-5.6 応力-ひずみ曲線 (米国石油協会規格準拠の鋼管：API 5L L360)

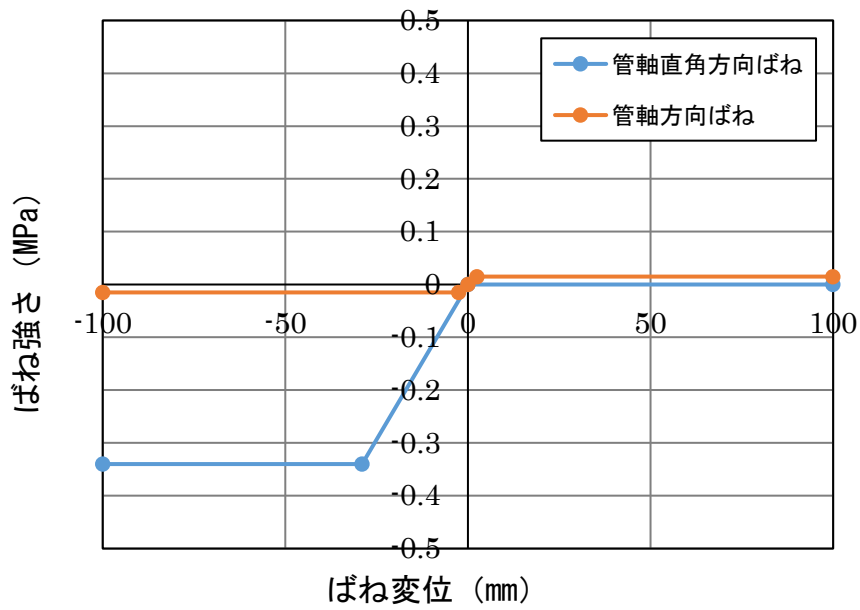


図-5.7 地盤ばね強さ (埋設深さ 1800mm)

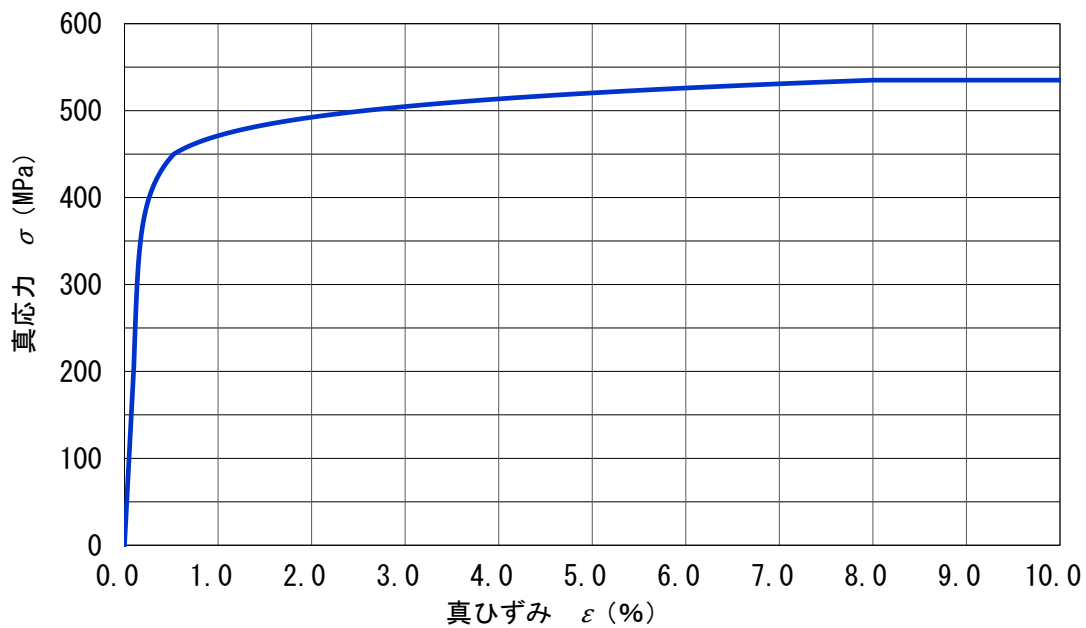


図-5.8 応力-ひずみ曲線 (米国石油協会規格準拠の鋼管 : API 5L L450)

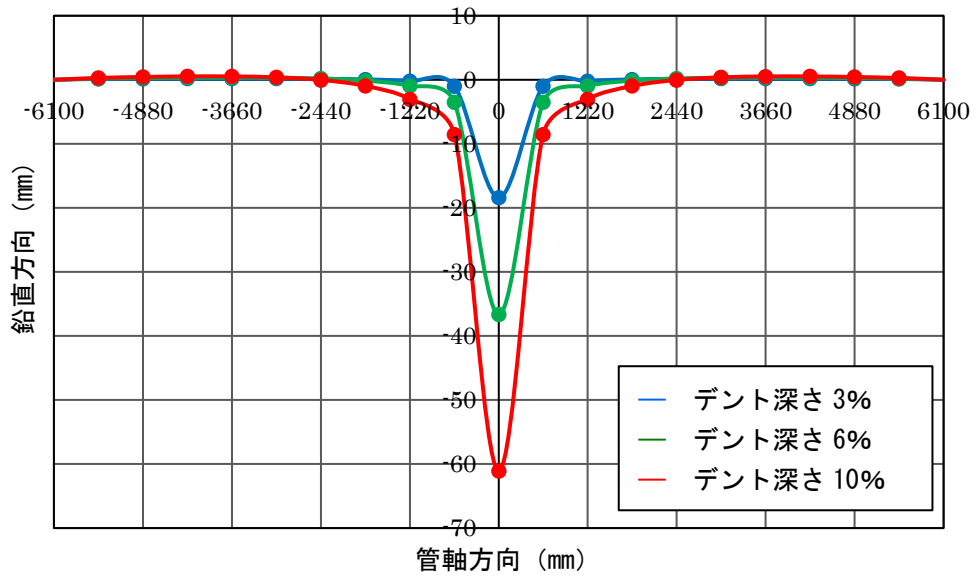


図-5.9 解析モデル上に付加した線状デントの形状 (API 5L L360, 管軸方向)

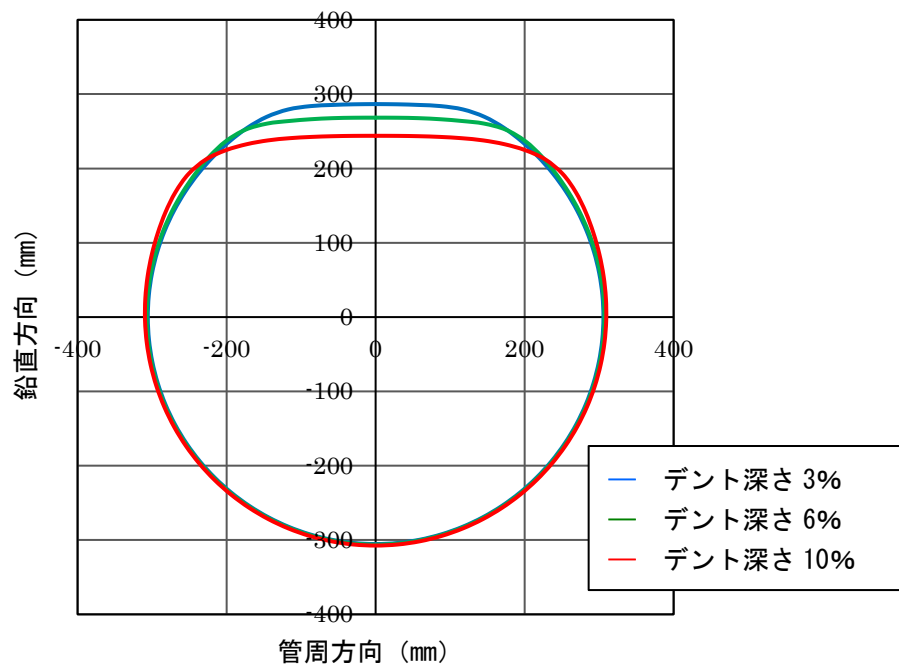


図-5.10 解析モデル上に付加した線状デントの形状 (API 5L L360, 管周方向)

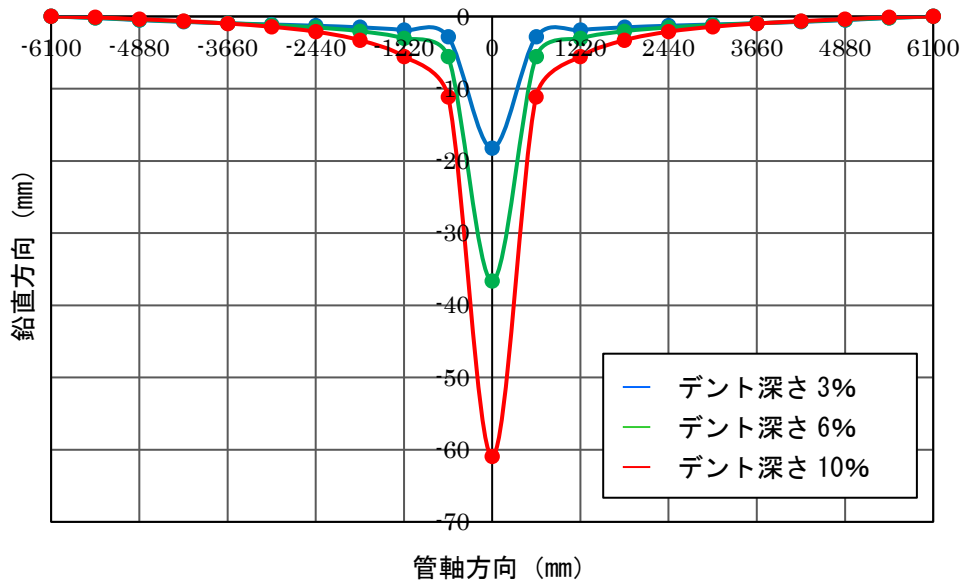


図-5.11 解析モデル上に付加した線状デントの形状 (API 5L L450, 管軸方向)

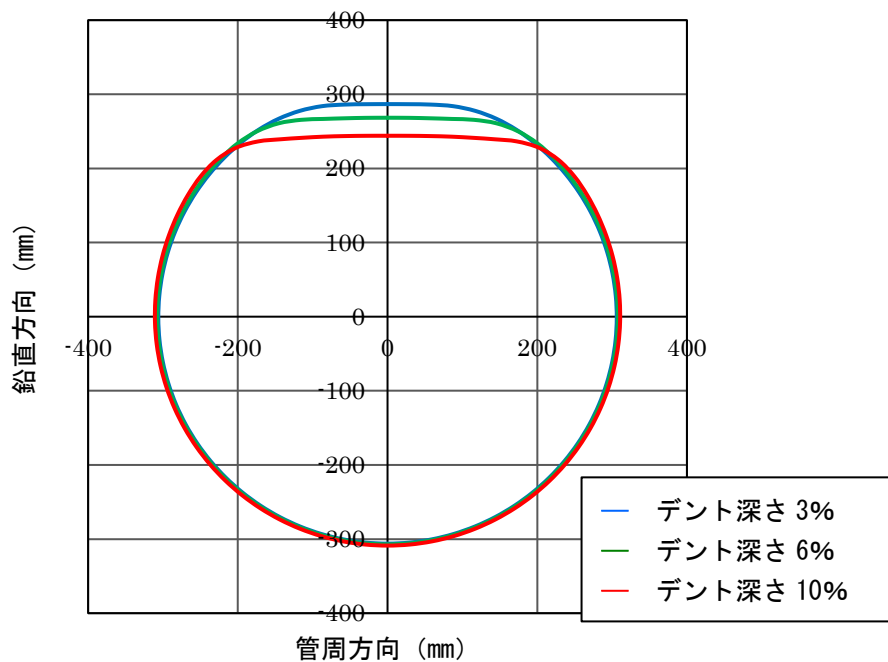


図-5.12 解析モデル上に付加した線状デントの形状 (API 5L L450, 管周方向)

図-5.13 および図-5.14 はそれぞれ, API 5L L360 および API 5L L450 の軸ひずみ分布 (デント深さ 3% の場合) を示す. なお, 3.3.2 同様, デント深さ 6%, 10% の場合の軸ひずみ分布図は付録 4 に掲載する (図-5.13 付図 1 のように表記). これらの図においては, 平均圧縮軸ひずみ ϵ_{ncr} の 0.5 倍圧縮した時 ($0.5\epsilon_{ncr}$) と 1.0 倍に達した時 ($1.0\epsilon_{ncr}$) の 2 つの時点での分布図を示す. それぞれ, デントの上方から見た図と側方から見た図を載せることも 3.3.2 と同様である. 表-5.4, 表-5.5 にそれぞれの結果の総括を示す. この結果を, 5.6 以降の耐震性検討に用いる.

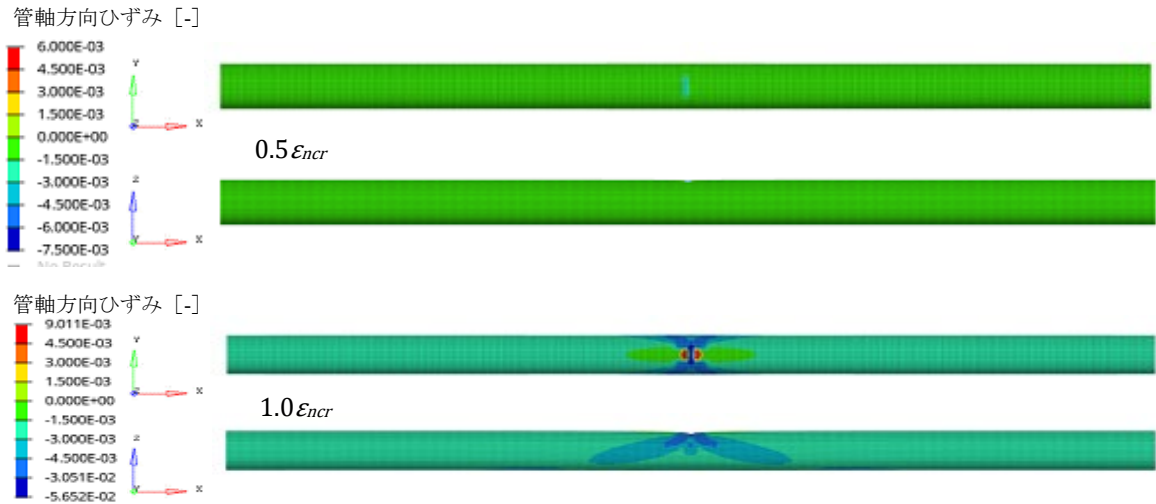


図-5.13 軸ひずみ分布図 (API 5L L360, 線状デント : 深さ 3%, 内圧, 埋設条件を両方考慮)

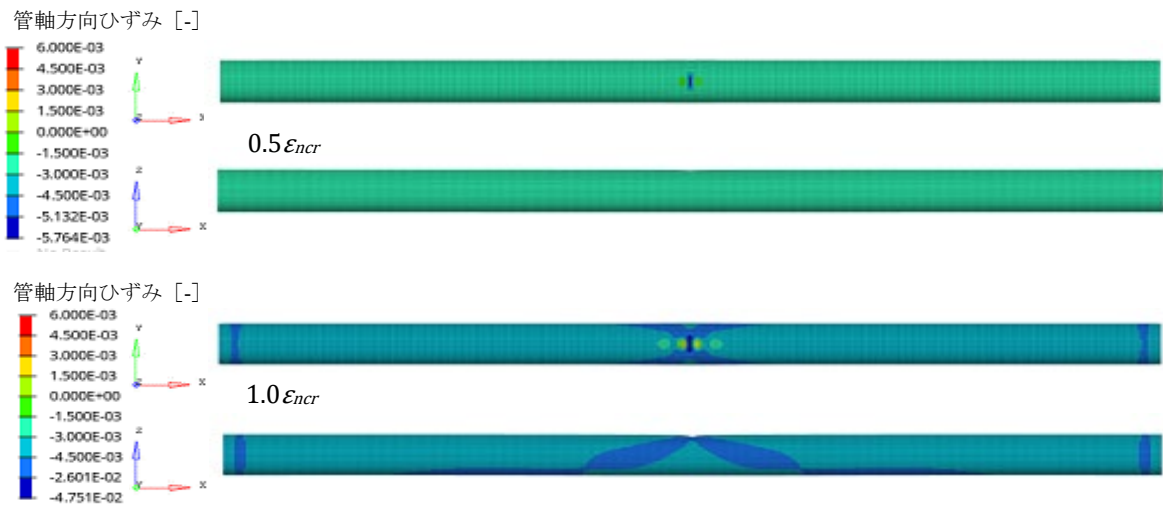


図-5.14 軸ひずみ分布図 (API 5L L450, 線状デント : 深さ 3%, 内圧, 埋設条件を両方考慮)

表-5.4 軸圧縮座屈解析結果 (API 5L L360, 内圧, 埋設条件を両方考慮)

デント形状	d/D (%)	内圧 埋設条件	P_{max} (MN)	δ_{cr} (mm)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{ncr} (%)	ϵ_{Rcr} (%)
線状デント	3	考慮	6.83	32.86	352	0.27	0.25
	6	考慮	6.39	30.19	329	0.25	0.21
	10	考慮	5.91	28.36	305	0.23	0.18

表-5.5 軸圧縮座屈解析結果 (API 5L L450, 内圧, 埋設条件を両方考慮)

デント形状	d/D (%)	内圧 埋設条件	P_{max} (MN)	δ_{cr} (mm)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{ncr} (%)	ϵ_{Rcr} (%)
線状デント	3	考慮	11.95	53.66	424	0.44	0.44
	6	考慮	11.03	51.26	391	0.42	0.33
	10	考慮	10.48	53.01	371	0.44	0.28

5.6 耐震性の判定

5.6.1 レベル1地震動に対する耐震性

高圧ガス耐震では、5.4で述べたように、鋼管パイプラインに発生するひずみが「許容ひずみ」を下回れば耐震性を有し、上回れば耐震性が不足すると判定している。デントを有する鋼管パイプラインでは、この許容ひずみは、第3章のパラメータスタディで明らかになった軸圧縮座屈開始ひずみ ε_{Rcr} に相当する。ここでは、対象となる4種類の鋼管パイプラインの埋設環境や材質により計算されるひずみ ε_P を、 ε_{Rcr} と比較して耐震性を判定することとする。

レベル1地震動における直管の地震時ひずみは、5.4.3でも示した通り、高圧ガス耐震では、式(5.8)で計算する。

$$\varepsilon_P = \alpha \cdot \varepsilon_G \quad (5.8)$$

ここで、 ε_P : 直管の地震時ひずみ
 α : 直管のひずみ伝達係数
 ε_G : 地盤ひずみ

この式を用いて、本節で耐震性を判定する4種類の鋼管パイプライン（表-5.2参照）について、一様地盤を想定した場合の地震動に対する管ひずみを求めた。その結果を図-5.15に示す。表層地盤の固有周期に応じて変動する。

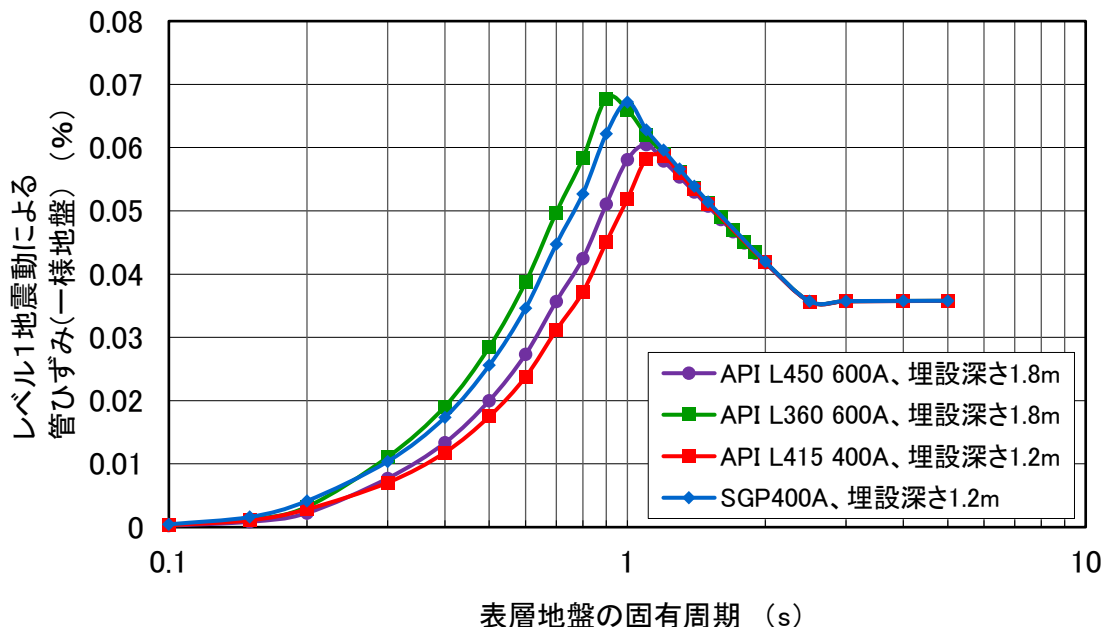


図-5.15 レベル1地震動で鋼管パイプラインに発生する管ひずみ

図-5.15 に対し，局部座屈開始ひずみ ϵ_{Rcr} との大小の比較を行うことで，耐震性を判定することができる．第3章のパラメータスタディの結果からは，内圧と埋設条件を共に考慮した解析結果を耐震性の判定に使用し，表-5.4，表-5.5の解析結果と合わせて4種類の耐震性の判定を行った．その結果として図-5.16～図-5.19に比較を示す．

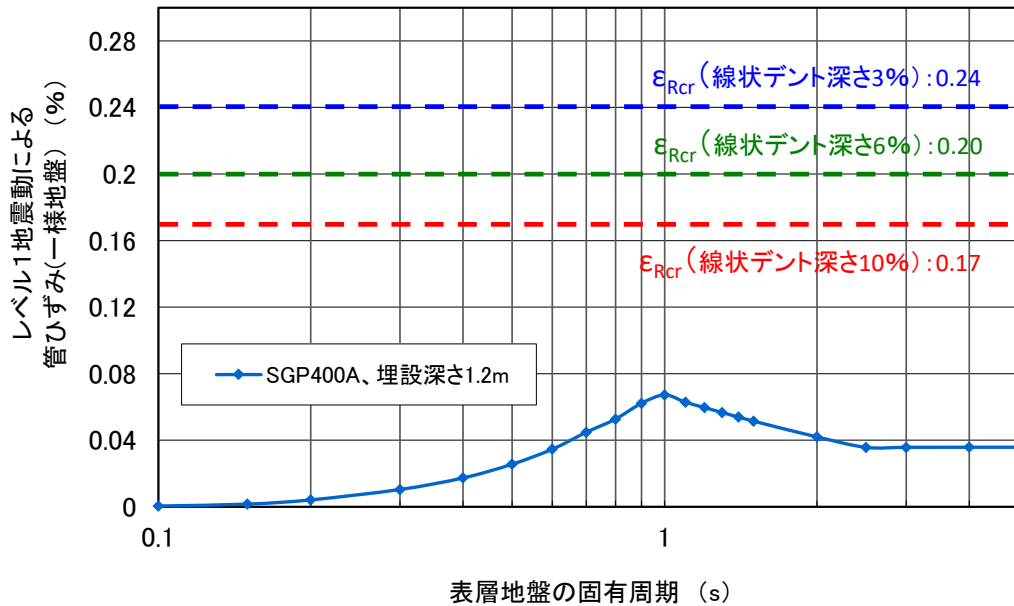


図-5.16 レベル1地震動で発生する管ひずみ ϵ_p と局部座屈開始ひずみ ϵ_{Rcr} の比較
(日本産業規格準拠の鋼管 SGP，管径 400A)

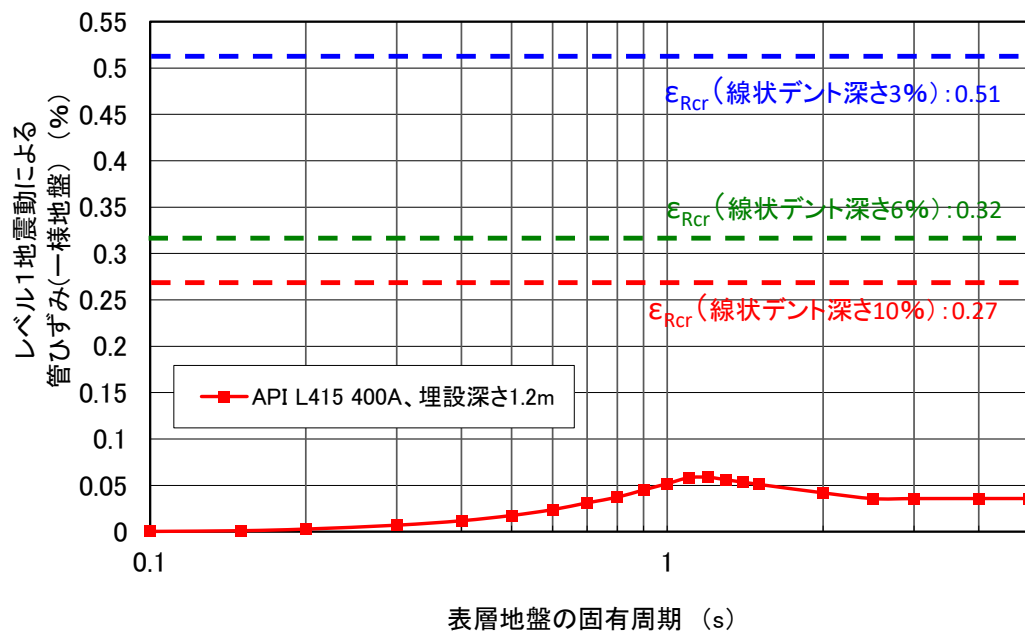


図-5.17 レベル1地震動で発生する管ひずみ ϵ_p と局部座屈開始ひずみ ϵ_{Rcr} の比較
(米国石油協会規格準拠の鋼管 API 5L L415，管径 400A)

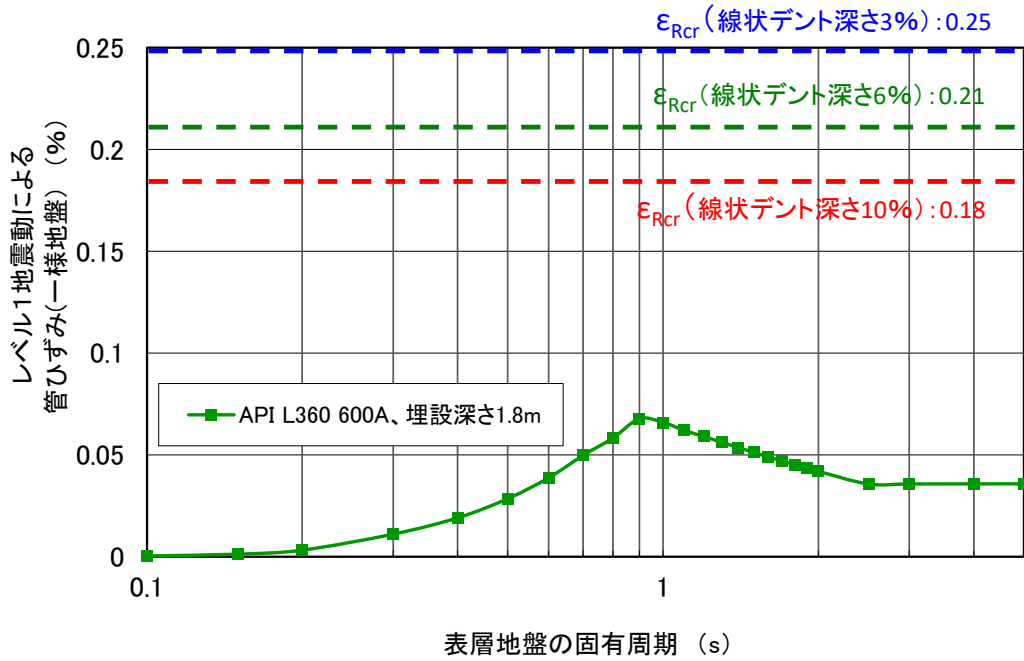


図-5.18 レベル1地震動で発生する管ひずみ ε_p と局部座屈開始ひずみ ε_{Rcr} の比較 (米国石油協会規格準拠の鋼管 API 5L L360, 管径 600A)

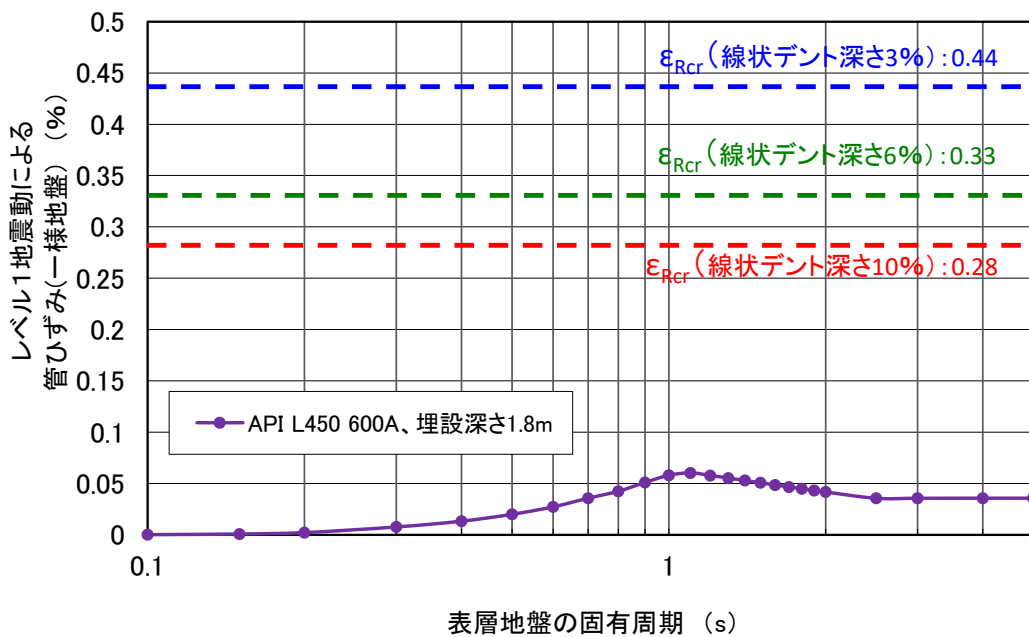


図-5.19 レベル1地震動で発生する管ひずみ ε_p と局部座屈開始ひずみ ε_{Rcr} の比較 (米国石油協会規格準拠の鋼管 API 5L L450, 管径 600A)

図-5.16～図-5.19に示すように、4通りの全てのケースで管ひずみ ε_p は局部座屈開始ひずみ ε_{Rcr} を下回っており、レベル1地震動によって発生する管ひずみが局部座屈開始ひずみに達しないこととなる。全てのケースがレベル1地震動に対して耐震性を有することがわかる。

5.6.2 レベル2地震動に対する耐震性

レベル2地震動に対する耐震性についても、5.6.1と同様に判定する。一様地盤の場合で、レベル2地震動に対する管ひずみを求めた。その結果を図-5.20に示す。

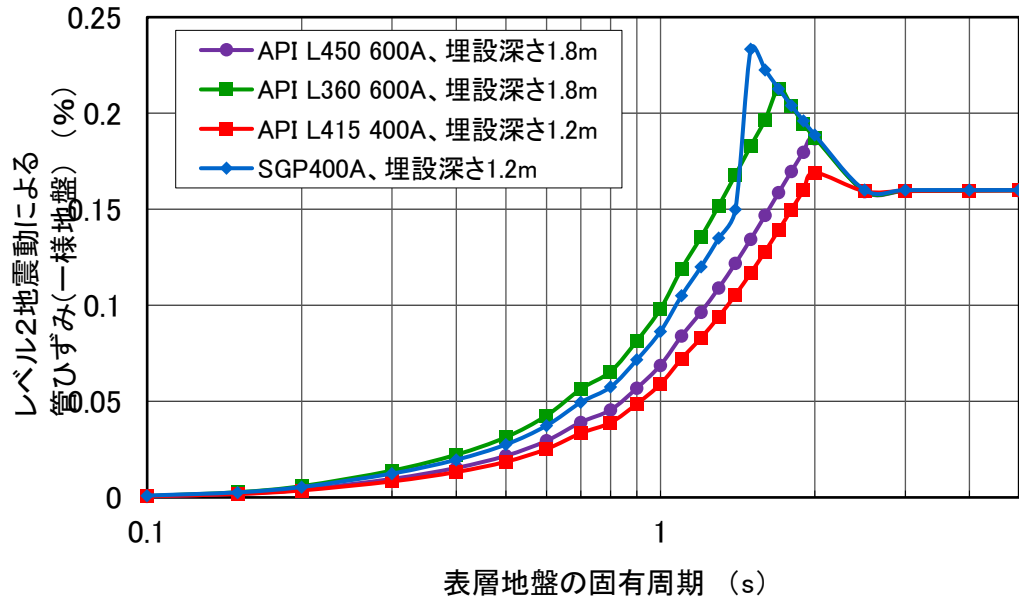


図-5.20 レベル2地震動で鋼管パイプラインに発生する管ひずみ

図-5.20を用いて、局部座屈開始ひずみ ϵ_{Rcr} との大小の比較を行った結果を図-5.21~図-5.24に示す。

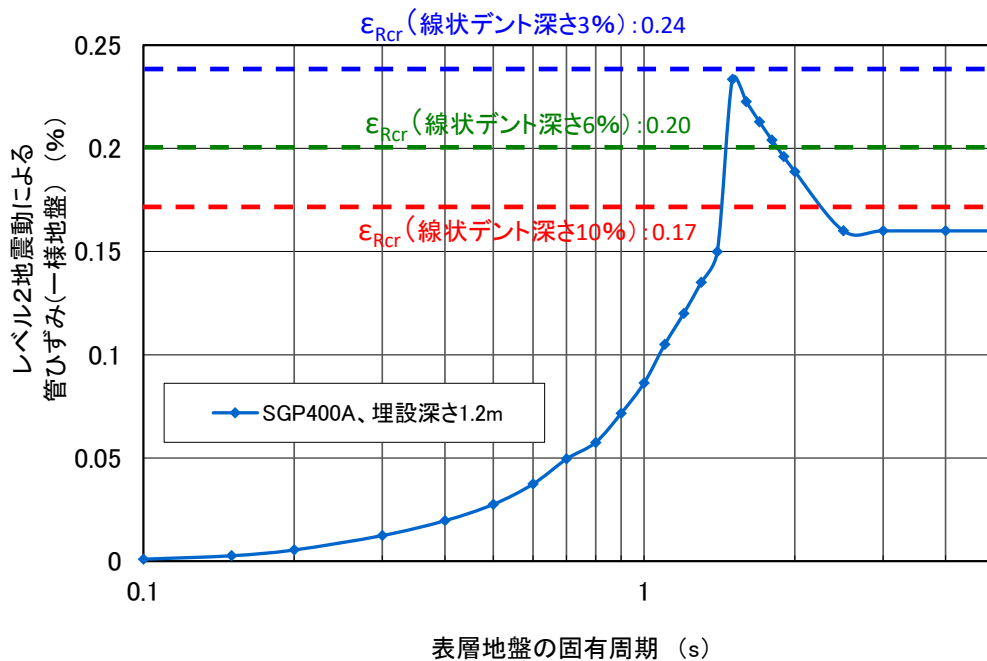


図-5.21 レベル2地震動で発生する管ひずみ ϵ_p と局部座屈開始ひずみ ϵ_{Rcr} の比較
(日本産業規格準拠の鋼管 SGP, 管径 400A)

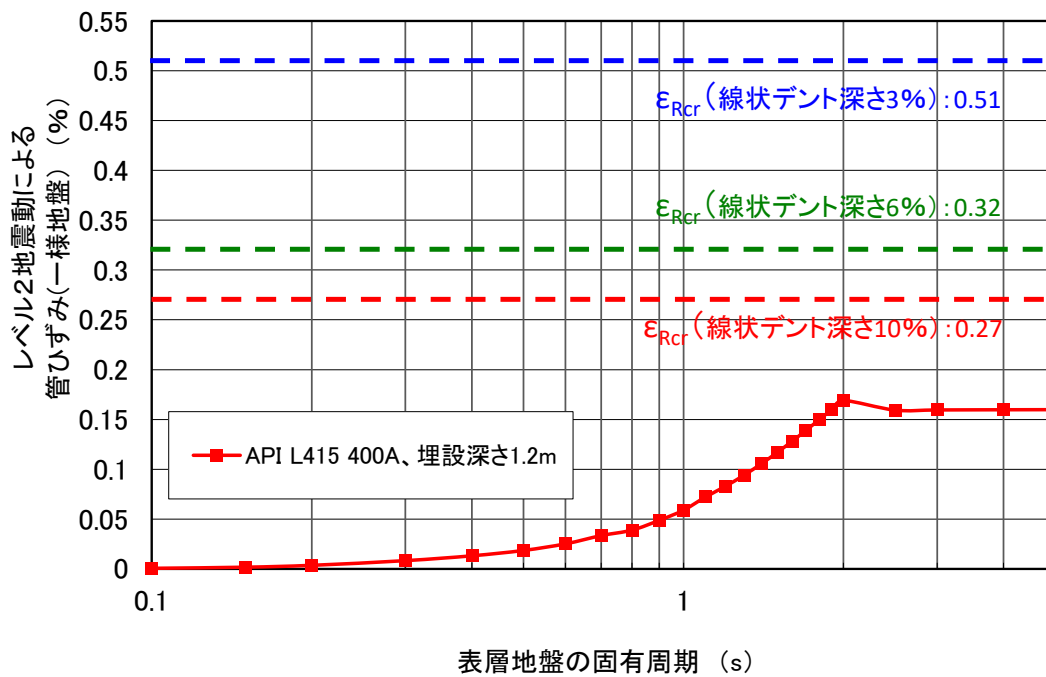


図-5.22 レベル2地震動で発生する管ひずみ ϵ_p と局部座屈開始ひずみ ϵ_{Rcr} の比較
(米国石油協会規格準拠の鋼管 API 5L L415, 管径 400A)

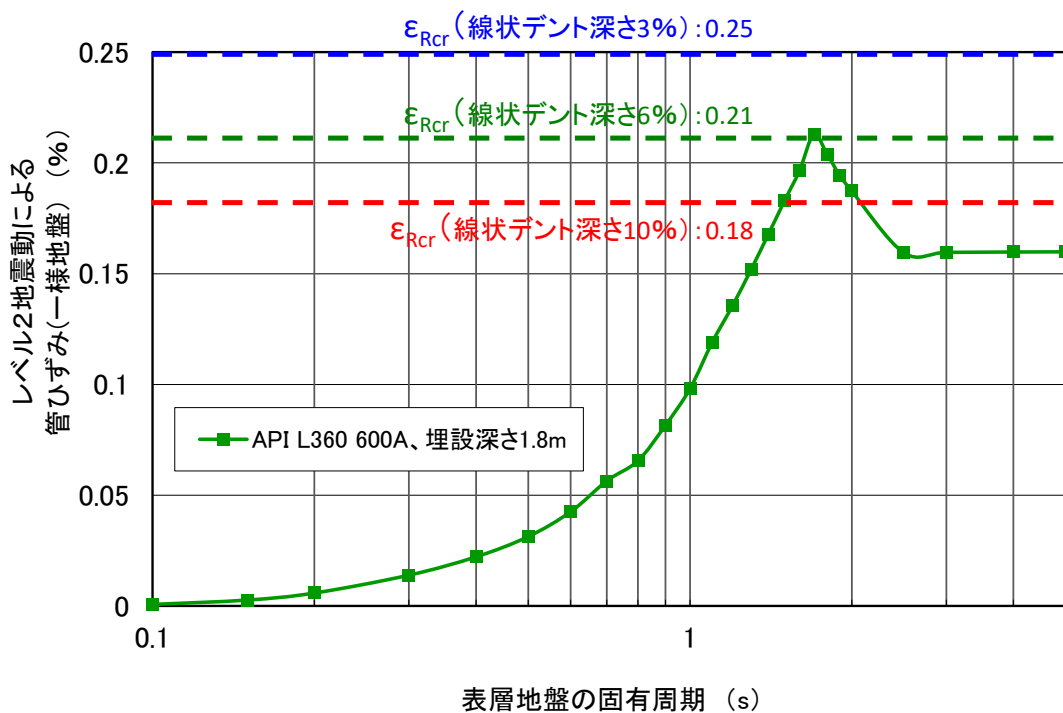


図-5.23 レベル2地震動で発生する管ひずみ ϵ_p と局部座屈開始ひずみ ϵ_{Rcr} の比較
(米国石油協会規格準拠の鋼管 API 5L L360, 管径 600A)

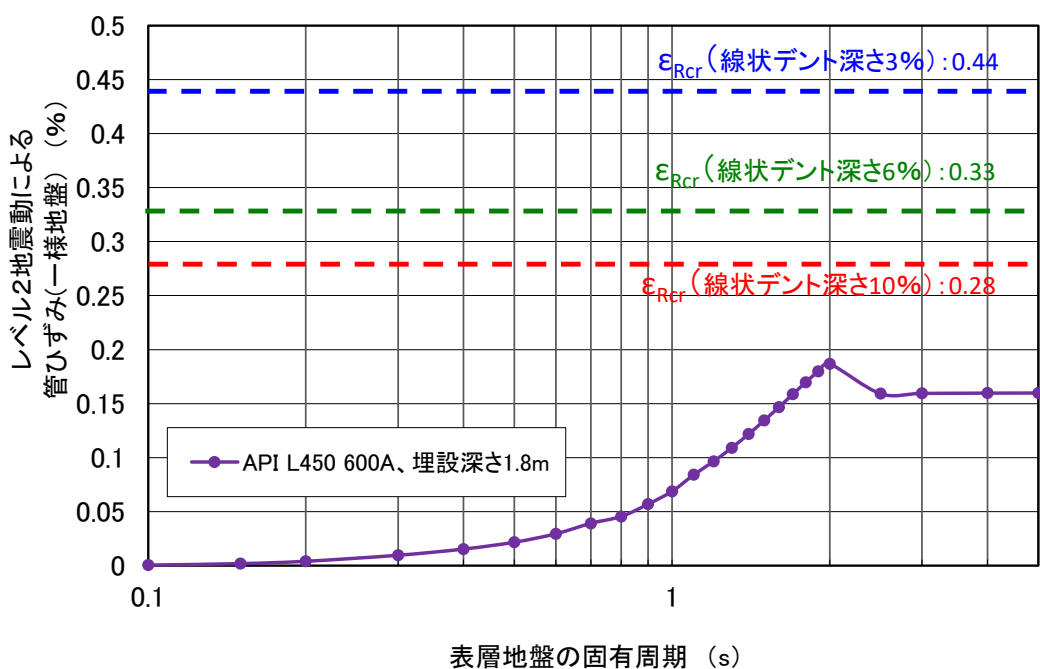


図-5.24 レベル2地震動で発生する管ひずみ ϵ_p と局部座屈開始ひずみ ϵ_{Rcr} の比較
(米国石油協会規格準拠の鋼管 API 5L L450, 管径 600A)

図-5.21 および図-5.23 では、管ひずみ ϵ_p が局部座屈開始ひずみ ϵ_{Rcr} を上回る地盤固有周期の範囲が存在している。これは、当該の鋼管パイプラインが軸圧縮座屈する可能性のあることを示している。つまり図-5.21 から、日本産業規格準拠の鋼管 (SGP) の場合ではデント深さ 3% の場合は耐震性を有するが、6%、10% の場合は耐震性を有しない表層地盤固有周期の範囲が認められる。その範囲は、デント深さ 6% では 1.5~1.8 秒、デント深さ 10% では 1.5~2.5 秒と読み取れ、比較的軟弱な地盤が該当することを意味している。一方、耐震性を有しないケースは限定的となる。図-5.23 の場合は、デント深さ 6% ではごく限定的な範囲でわずかに ϵ_p が ϵ_{Rcr} を上回るが、ほぼ耐震性を有していると考えてよい。デント深さ 10% で 1.5~2 秒で ϵ_p が ϵ_{Rcr} を上回り、これも軟弱地盤の場合に対応する。図-5.22 および図-5.24 では、常に管ひずみ ϵ_p が局部座屈開始ひずみ ϵ_{Rcr} を下回っており、レベル2地震動に対して耐震性を有する。

以上の結果を表-5.6 にまとめる。

表-5.6 耐震性評価結果の総括

材質・仕様		呼び径	管厚 (mm)	埋設深さ (mm)	デント管の耐震性 (レベル2地震動)
1	日本産業規格準拠の鋼管 (SGP)	400A	7.9	1,200	デント 3% 超で不足
2	米国石油協会規格準拠の鋼管 (API 5L L415)	400A	11.9	1,200	あり
3	米国石油協会規格準拠の鋼管 (API 5L L360)	600A	10.3	1,800	デント 6% 超で不足
4	米国石油協会規格準拠の鋼管 (API 5L L450)	600A	15.1	1,800	あり

5.7 まとめ

デントを有する鋼管パイプラインの耐震性検討について、以下の通り、箇条書きでまとめる。

- 我が国の各種地中管路の耐震設計の考え方の基礎となっている「石油パイプライン技術基準（案）」[29]の考え方，鋼管パイプラインの耐震設計に広く用いられている「高圧ガス導管耐震設計指針」[30]の要点を紹介した。
- 耐震性の判定方法について，鋼管パイプラインに発生するひずみが「高圧ガス導管耐震設計指針」[30]に定める許容ひずみを下回れば耐震性を有する，という考え方を示した上で，軸圧縮座屈が発生してしまうと制御が困難となることを鑑み，許容ひずみ＝軸圧縮座屈開始ひずみと捉えて耐震性を判定することとした。
- 耐震性の検討対象として，軸圧縮座屈解析のパラメータスタディの結果（3章）に加え，別途2種類の鋼管パイプラインも解析を追加で行い，耐震性の判定基準に照らして耐震性を判定した。パイプラインの実際の運用状況，敷設環境を考慮し，内圧と，土圧および地盤ばねを両方考慮した場合の解析結果を耐震性の判定に使用した。
- 結果として，表-5.6に示す検討対象の鋼管パイプラインについて，レベル1地震動に対しては全ての条件で耐震性を有しており，レベル2地震動に対しては表-5.6に示される一部の条件で耐震性が不足する結果となった。

第6章 結論

6.1 各章の成果

本論文を取りまとめるにあたり、各章で得られた研究成果を以下に示す。

第1章では、パイプラインにおけるデントの定義を説明し、デントの存在でパイプラインに想定されるリスクを明らかにした上で、我が国で特に留意しなくてはならない地震に対するリスクを本論文で取り上げることがを明記した。また、デントを有するパイプラインの耐荷重に対する既往の研究を調査し、デントが他の欠陥を伴うことが多いため、多くの変数をもたらす影響は予備的に解明されつつあるものの、デントを有する鋼管パイプラインの安全性を総括的に評価することはいまだ困難であることを紹介した。その上で、研究の目的を明示し、本論文の構成を示した。

第2章では、デントを有する実際の鋼管2種類（日本産業規格準拠の鋼管：SGP，米国石油協会規格準拠の鋼管：API 5L L360）を用いた軸圧縮座屈実験を紹介し、実験結果を再現できる有限要素解析モデルを構築し、その妥当性を示した。また、適切な解析モデル長さを決定した結果、パイプラインの管径の20倍、20Dモデルが解析長さとして妥当であることを示した。その上で、部分的にデントを含んだ鋼管パイプラインの耐震性を評価する場合の留意点として、軸圧縮の際、デント部の激しい変形の影響を受けない十分に離れた位置のひずみに着目して鋼管パイプライン全体の耐震性を評価することを解説した。

第3章では、第2章で構築した解析モデルを用いて、デントの深さの変化、パイプラインの運用圧力（内圧）の有無、埋設条件の考慮・未考慮の別で、軸圧縮座屈解析のパラメータスタディを実施した。パイプの種類は2種類（日本産業規格準拠の鋼管：SGP，米国石油協会規格準拠の鋼管：API 5L L415）、デント形状も線状デント（建設重機のバケットなどから衝撃を受けた場合に形成されることを想定）、面状デント（地中で玉石などに乗り上げ、長期間に土圧を受けた場合に形成されることを想定）の2種類を想定してパラメータスタディを実施した。

第4章では、デントを有する鋼管パイプラインの曲げによる局部座屈に関する研究成果を述べた。実管を用いた曲げによる局部座屈実験と、実験結果を再現できる有限要素解析モデルを構築し、妥当性を検討した。実験は、健全管および線状デントを与えた供試体を用意し、地盤の液状化による沈下あるいは側方流動を想定した曲げ変形を与え、曲げモーメントが最大を示した後、局部座屈が発生するまで曲げ変形を与えた。また、その実験結果を有限要素解析で再現すると共に、軸圧縮座屈解析の場合と異なり、デント部の残留ひずみを考慮した解析モデルの方が実験結果をより忠実に再現できることを明らかにした。その原因は、金属の塑性力学の理論における「ひずみ硬化」の発現と捉えて定性的には考察したが、今後、詳細な分析が必要であることを述べた。

第5章では、デントを有する鋼管パイプラインの耐震性について、現在我が国で主流となっているパイプライン耐震設計基準の内容を紹介した。その上で、第3章で得られた軸圧縮座屈解析のパラメータスタディの結果に対して、耐震性の判定基準に基づいて、具体的に耐震性を判定した。ここではパイプラインの実際の運用状況、敷設環境を考慮し、内圧と、土圧および地盤ばねを両方考慮した場合の解析結果を耐震性の判定に用いた。なお、第3章での2種類の鋼管パイプ

ラインだけでなく、別途 2 種類（米国石油協会規格準拠の鋼管：API 5L L360, および API 5L L450）の鋼管パイプラインに内圧と土圧および地盤ばねを共に考慮した場合の解析を追加で行い、計 4 種類のデントを有する鋼管パイプラインの耐震性を判定した。結果として、日本産業規格準拠の鋼管：SGP（管径 400A）はデント深さ 3%を超えた場合、米国石油協会規格準拠の鋼管：API 5L L360（管径 600A）はデント深さ 6%を超えた場合で一部の軟弱地盤に埋設されている場合は耐震性が不足し、米国石油協会規格準拠の鋼管：API 5L L415（管径 400A）および API 5L L450（管径 600A）は耐震性を確保できていることと判定した。

6.2 今後の課題と展望

本論文では、都市ガス輸送導管を意識した 4 種類の鋼管パイプラインに対して、デントを有する場合の軸圧縮座屈パラメータスタディを実施し、耐震性が不足する場合の条件を確認することができた。ただし、軸圧縮座屈に対する耐荷重の観点からは最も厳しくなると思われる線状デントの場合を考えて、安全側に耐震性の判定をしている。今後は、デントの形状や深さなどをさらに変化させた解析ケース数を増やして、耐震性の判定手法をより合理的なものとしていきたいと考える。さらに、仕様の異なる鋼管パイプラインでもパラメータスタディを実施し、データを十分に蓄積した上で、デントを有する鋼管パイプラインの軸圧縮座屈条件を簡易な数式で導出できれば、鋼管パイプライン運用事業者が速やかに耐震性を判断することが可能になるため、その数式の価値は高いと考えている。加えて、石油や水道などの他の鋼管パイプラインにも運用が可能な耐震性の判断基準が策定されることが期待される。

また、本論文では、地震動の繰り返しの影響は考慮していない。高圧ガス導管耐震設計指針[30]に記載されている許容ひずみの値は、極低サイクルの繰り返し変位に対する疲労損傷の観点から定められている。極低サイクルの繰り返し変位が、デント部の強度にどれ程の影響を与えるか、そしてその影響が、本論文で定義した局部座屈開始ひずみにも影響を及ぼすのかどうか。今後、確認する必要があると考える。

デントを有する鋼管パイプラインの曲げによる局部座屈に対する耐震性の検討は、まだ研究の初期段階と言わざるを得ない。今後、本論文で紹介した鋼管とは材料強度や管厚などの仕様が異なる鋼管を用いた実験や、その実験結果の再現解析を積み重ねた上で、パラメータスタディを多数実施して、軸圧縮座屈の場合と同様に曲げによる局部座屈に関する耐震性の判断基準が策定されることが必要であると考えている。

付録 1

第 1 章 序論 関連資料

1.1 研究の背景

1.1.1 パイプラインの重要性

本研究で研究対象とした鋼管について、予備知識のため、準拠している規格の条件や製造方法の違いなどで現れる性能面での特徴・傾向について考察する。

(1) 本研究で使用した鋼管一覧

付表-1.1 本研究で使用した鋼管

	材質・仕様	適用規格 ^{注)}	呼び径	管厚 (mm)	埋設深さ (mm)	主な製造方法
1	配管用炭素鋼鋼管 (SGP)	JIS	400A	7.9	1,200	電縫鋼管
2	ラインパイプ (API 5L L415)	API	400A	11.9	1,200	継目無鋼管
3	ラインパイプ (API 5L L360)	API	600A	10.3	1,800	UOE鋼管
4	ラインパイプ (API 5L L450)	API	600A	15.1	1,800	UOE鋼管

注) JIS は日本産業規格, API は米国石油協会規格を表す

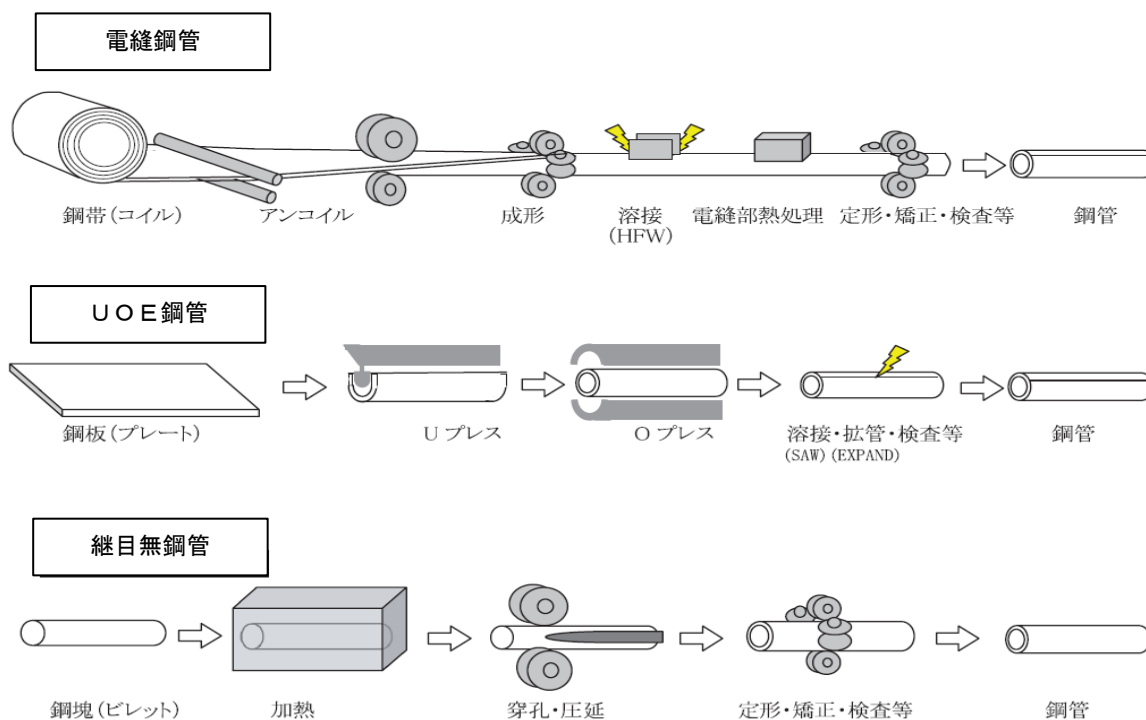
(2) 適用規格, 強度の規定に関して

配管用炭素鋼鋼管 (SGP) は, 日本産業規格 (JIS) に JIS G 3454 として規定された鋼管である。350°C以下の温度の蒸気, 上水以外の水, 油, ガス, 空気などの配管として広く一般的に使用される。強度の規定に関しては, 引張強さ (290N/mm²以上), 伸び (縦方向 30%以上, 横方向 25%以上) のみが規定され, 降伏点が決まっていないところが特徴である。よって製品ごとの強度の差もばらつきが大きくなるが, 本研究では, 図-2.51 に示したように, 数多くの製品の強度の実力値を包含した最低限の強度を用いてパラメータスタディを行っているので, 強度の評価・耐震性の評価において安全側の評価ができていているといえる。

ラインパイプ (API) の 3 種類の鋼管は, API により, 高い信頼性を要求された仕様になっている。強度としては, 降伏応力, 引張強さにはグレードごとに上限値・下限値が設定され, その範囲に入っていなければならない。また, 母材部と製造時溶接部も両方, 同じ強度規定を満たす必要がある。また, 延性破壊の抑制, 低温靱性の確保などのためにも規定があり, 化学成分の含有率の規定も定められ, 現地での溶接接合時の溶接部割れの防止などを実現している。

(3) 製造方法に関して

付表-1.1 に示した製造方法を, 付図-1.1 に示す。



※「高圧ガスパイプラインへの電縫鋼管適用性に関する検討」(新日鉄エンジニアリング技報 vol.2 (2011))より引用

付図-1.1 鋼管の製造方法(電縫鋼管, UOE鋼管, 継目無鋼管)

電縫鋼管は熱間圧延コイルを素材として、成型機で管状に成型し、高周波溶接機で管軸方向の溶接を高速溶接で行い、製管している。製造時、成型のために塑性変形を受けることにより材料特性が変化する。材料はこの変化を考慮して製造される。また、電縫溶接部は、溶接時に急速に加熱され、その後冷やされるため、溶接部の特性が母材と異なる場合がある。これを解消するために溶接部の熱処理を高周波加熱によって行う。

UOE鋼管は厚板を素材として用い、素材は、プレスにてU型、O型に成型され、内外からサブマージアーク溶接によりシーム溶接される。その後、拡管機で所定の外径に仕上げる。成型過程で塑性変形するため、素材の特性と差が出る。素材はこの変化を考慮して製造している。

継目無鋼管はピレットという丸棒状の素材を加熱し、穿孔するような形で製造する。そのため、他の2種類の製造方法とは違い、製造後の管体には溶接部は残らない。

(4) まとめ

上記より、付表-1.1のNo.2~4のラインパイプについては、API規格の厳格な規定により、鋼管の性能は安定し、製造時溶接部も含んだ材料強度の均質性が保たれていると考えられる。No.1のSGP管は、準拠する規格上の性能規定はラインパイプより緩く、製造法上も母材と製造時溶接部には差が生じる可能性があるが、製造者の長年の経験則や製造方法の進化もあり、最近では母材と製造時溶接部の強度の差が著しいという報告は、都市ガス事業者からは挙がってきていない。

以上から、本研究においては、鋼管パイプラインの性能評価にあたって、鋼管の母材と製造時溶接部の性状の違いは考慮せずに評価を進めることとする。

【参考文献】 正村克身：鋼管の基礎知識，JFE技報 No.17, pp.7-13, 2007.8.

以上

付録 2

第 2 章 鋼管の軸圧縮座屈実験と解析による再現 関連資料 (1)

2.3 軸圧縮座屈実験の有限要素解析による再現

2.3.3 デント部の残留ひずみが軸圧縮座屈特性に及ぼす影響

[軸圧縮座屈実験結果の再現解析]

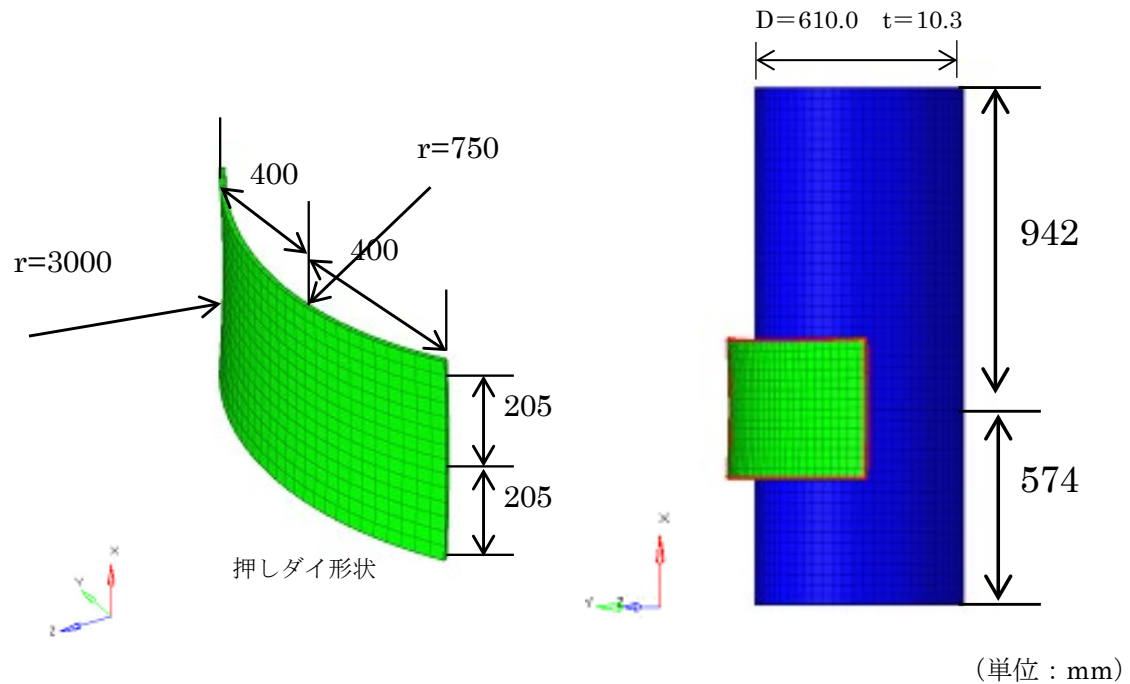
汎用構造解析コード ADINA-9.1.2 (ADINA R&D Inc : ADINA USERS MANUAL ver. 9.1.2, 2015) を用いた軸圧縮座屈実験結果の再現解析

(1) はじめに

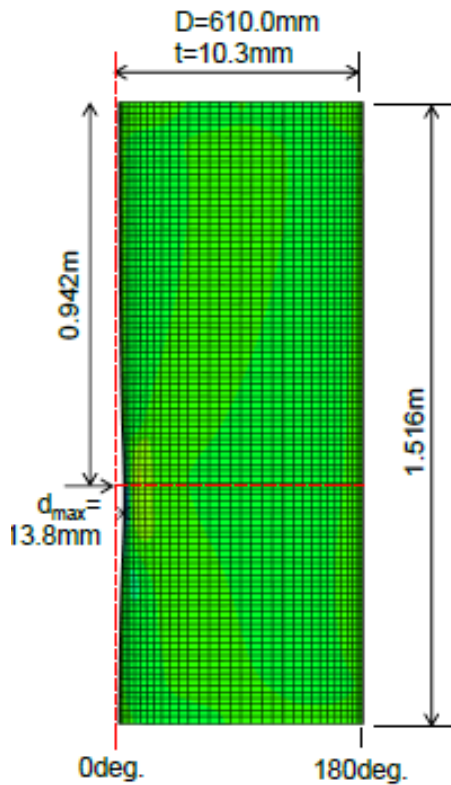
論文の 2.2.2 で紹介した米国石油協会規格準拠の鋼管を使用した実験について、論文の 2.3.3 中では、汎用構造解析コード Altair HyperWorks OptiStruct ver 2017.1 を使用して実験結果の再現を行っているが、以前に、ADINA-9.1.2 (ADINA R&D Inc : ADINA USERS MANUAL ver. 9.1.2, 2015) を使用しての実験結果の再現も行っている。その結果と、論文中の解析結果との比較を行う。

(2) デントの形状

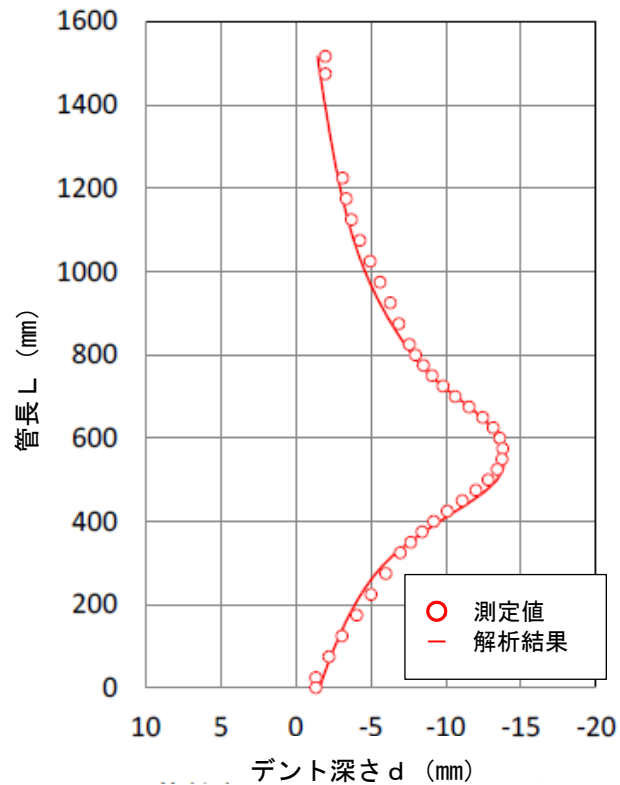
デントの再現方法を付図-2.1 に示す。論文中の方法と同じである。



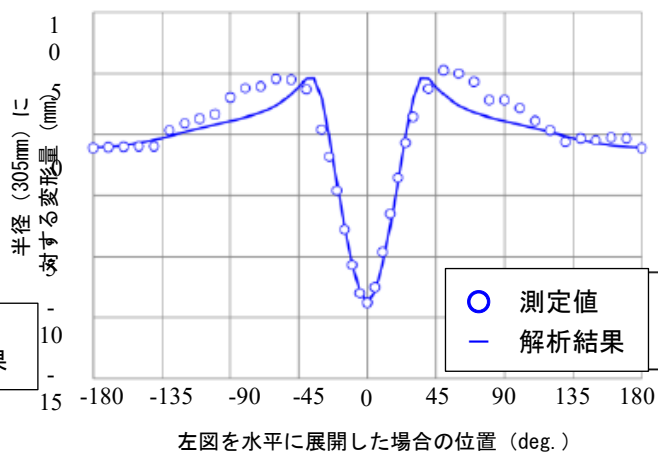
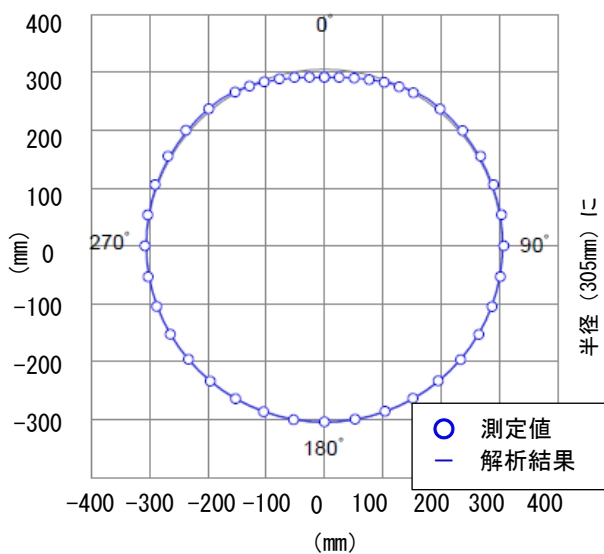
付図-2.1 有限要素解析モデル図およびデントの再現方法



付図-2.2 デント部分の変形状況



付図-2.3 デント部分の再現状況（管軸方向）



付図-2.4 デント部分の再現状況（管周方向）

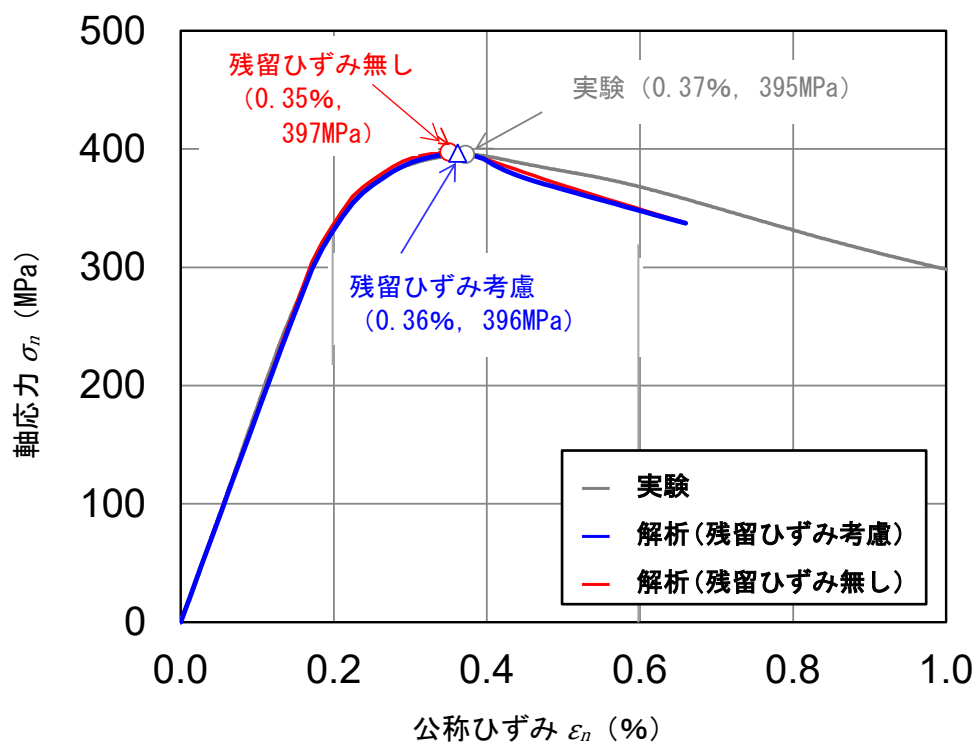
デント部分の変形状況を付図-2.2に、再現状況を付図-2.3、付図-2.4に示す。付図-2.4の右図は、左図の管周方向の断面を、管中心からの角度180°の位置で左右に開き、横軸に角度、縦軸に変形量を表したものである。解析モデルの変形（実線）と、デントの実測値（プロット）では、デントの管軸方向の再現（付図-2.3）は精度よく再現できている。管周方向の再現（付図-2.4）では、「両肩」（付図-2.4における±90°～45°の部分）では若干の乖離が見られる。デントの最深部の深さおよび最深部付近の形状は再現できており、実際のデントを解析モデル上でほぼ再現させることができたと考える。

(3) 軸圧縮座屈実験結果の再現性

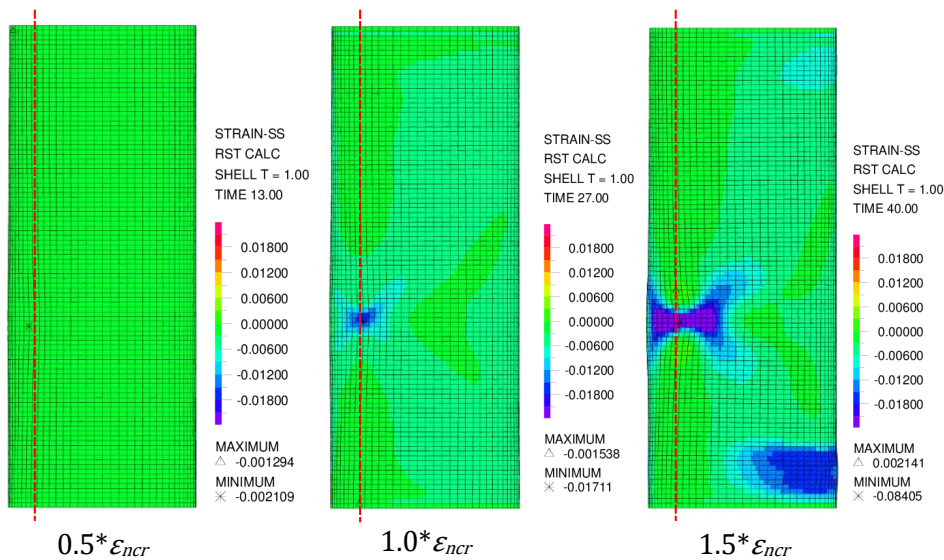
次に、この解析モデルによる軸圧縮座屈実験結果の再現性について示す。2.2.2の実管実験と同様、解析モデルの下部を完全拘束し、上部を変位させて解析を実行した。論文と同様に残留ひずみの影響の有無も確認した。

付図-2.5に、応力-ひずみ線図の比較（軸圧縮座屈実験結果、解析結果2通り）を示す。解析結果2通り（残留ひずみ考慮/無し）の曲線は、いずれも実験結果とほぼ同じ軌跡を描いている。付図-2.6、付図-2.7は、それぞれのモデルでの軸ひずみの分布と変形状況である。

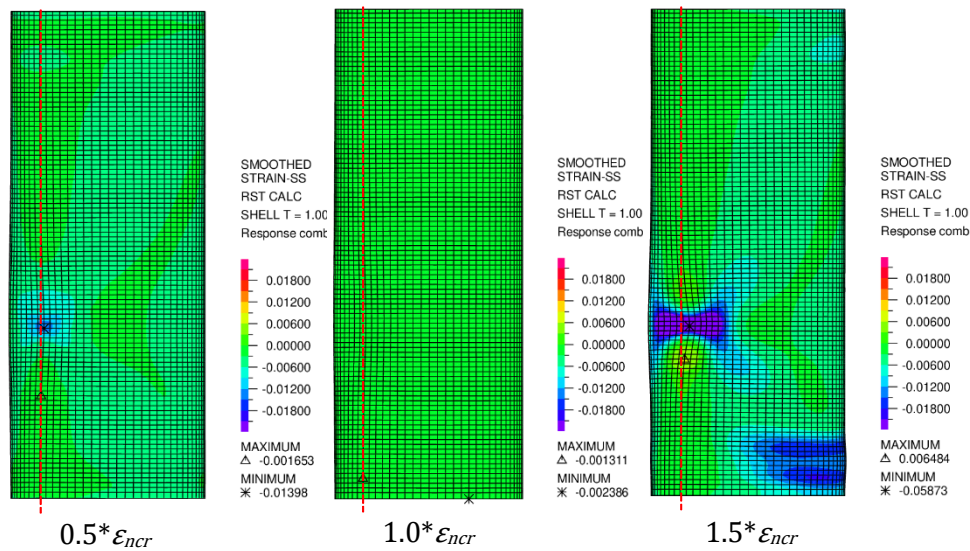
付表-2.1に、結果のまとめを示す。ADINA-9.1.2での結果に加え、論文中のAltair HyperWorks OptiStruct ver 2017.1を用いた解析結果も併せて示す。応力、ひずみについて、3通りの結果が良く一致している。この結果から、解析コードAltair HyperWorks OptiStruct ver 2017.1を用いた有限要素解析モデルは、解析コードADINA-9.1.2と精度は同様で、パラメータスタディでの使用に問題はないと判断する。



付図-2.5 デントを有する鋼管の軸圧縮座屈実験結果と有限要素解析結果の比較
(米国石油協会規格の鋼管 API 5L L360, 面状デント: 深さ 2.4%)



付図-2.6 デントを有する鋼管の軸ひずみ分布（面状デント：深さ2.4%，残留ひずみ無し）



付図-2.7 デントを有する鋼管の軸ひずみ分布（面状デント：深さ2.4%，残留ひずみ考慮）

付表-2.1 軸圧縮座屈解析結果まとめ

（米国石油協会規格の鋼管 API 5L L360 面状デント：深さ2.4%）

解析コード	条件	P_{max} (MN)	δ_{cr} (mm)	σ_{max} (MPa)	ϵ_n (%)
	実験	7.63	5.64	395	0.37
ADINA	FEA（残留ひずみ無し）	7.65	5.49	396	0.36
	FEA（残留ひずみ考慮）	7.67	5.32	397	0.35
Optistruct	FEA（残留ひずみ無し）	7.76	5.52	400	0.36
	FEA（残留ひずみ考慮）	7.70	5.53	397	0.36

以上

付録 3

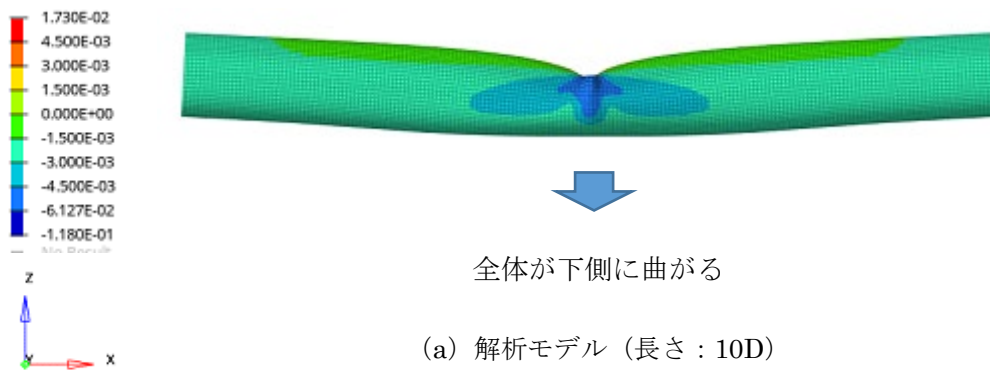
第 2 章 鋼管の軸圧縮座屈実験と解析による再現 関連資料 (2)

2.4 軸圧縮座屈解析モデルの長さの検討

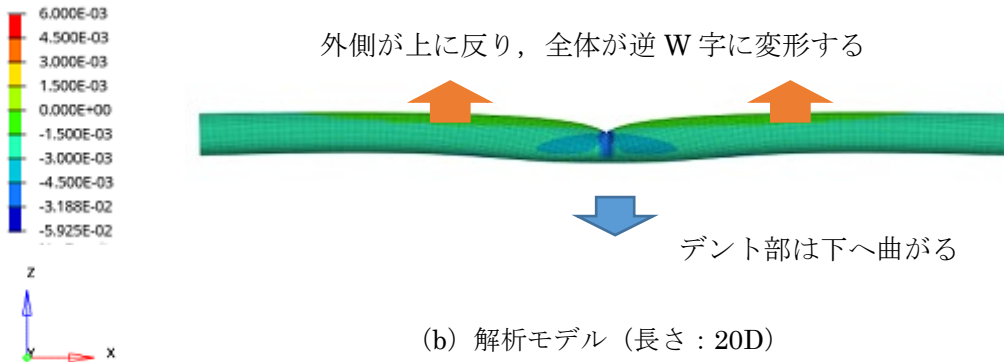
2.4.3 妥当な解析モデル長さ

米国石油協会規格準拠の鋼管 (API 5L L360) を対象として軸圧縮座屈解析を実行した場合も、日本産業規格準拠の鋼管 (SGP) の場合と同様な傾向が発現するかを確認した。

管軸方向ひずみ (中立面) [-]



管軸方向ひずみ (中立面) [-]



管軸方向ひずみ (中立面) [-]

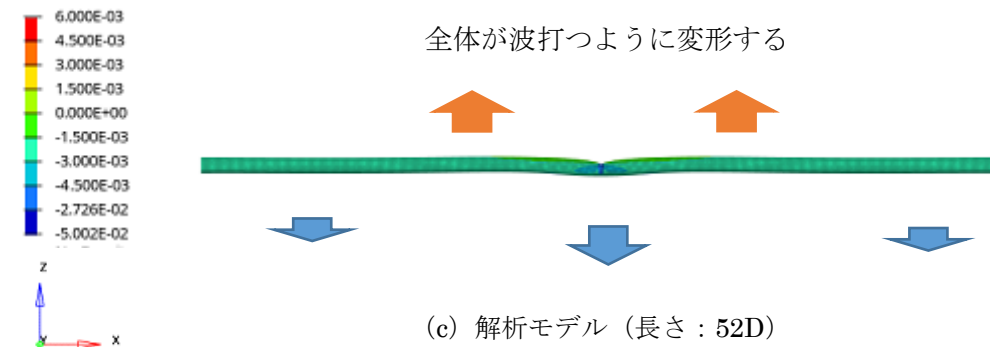


図-2.62 付図 各モデルの座屈開始時点での変形の様子 (変形を 10 倍に拡大表示)
(API 5L L360, 線状デントでデント深さ 10% の場合)

付録 4

第 3 章 デントを有する鋼管パイプラインの軸圧縮座屈パラメータスタディ 関連資料

3.3 軸圧縮座屈パラメータスタディ

3.3.2 デントの深さの変化

デント深さ 6%, 10% の場合の軸ひずみ分布図を掲載する.

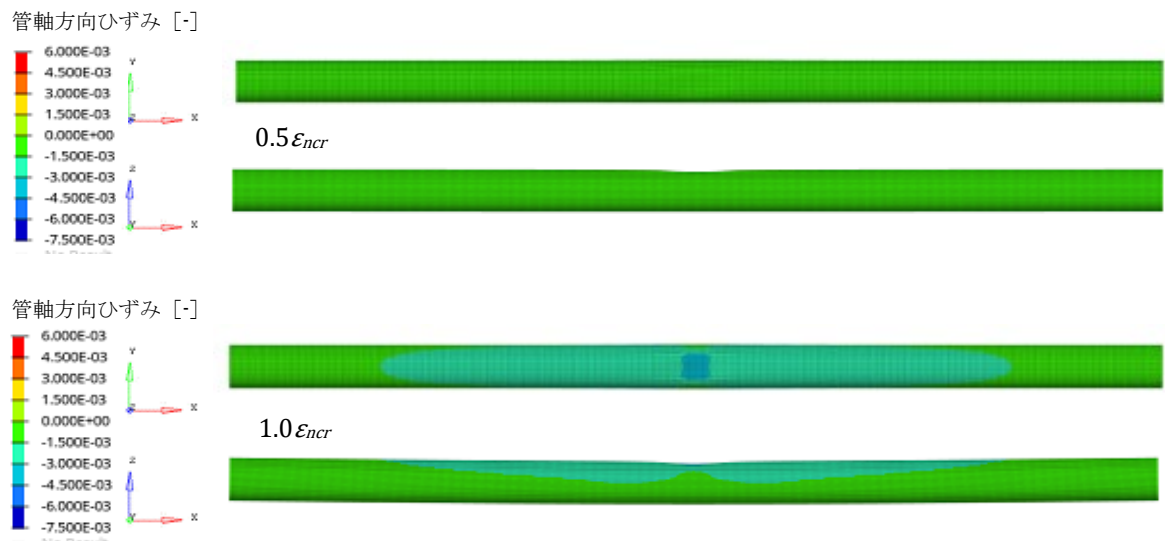


図-3.18 付図 1 軸ひずみ分布図 (SGP, 面状デント : 深さ 6%, 内圧無し, 埋設条件未考慮)

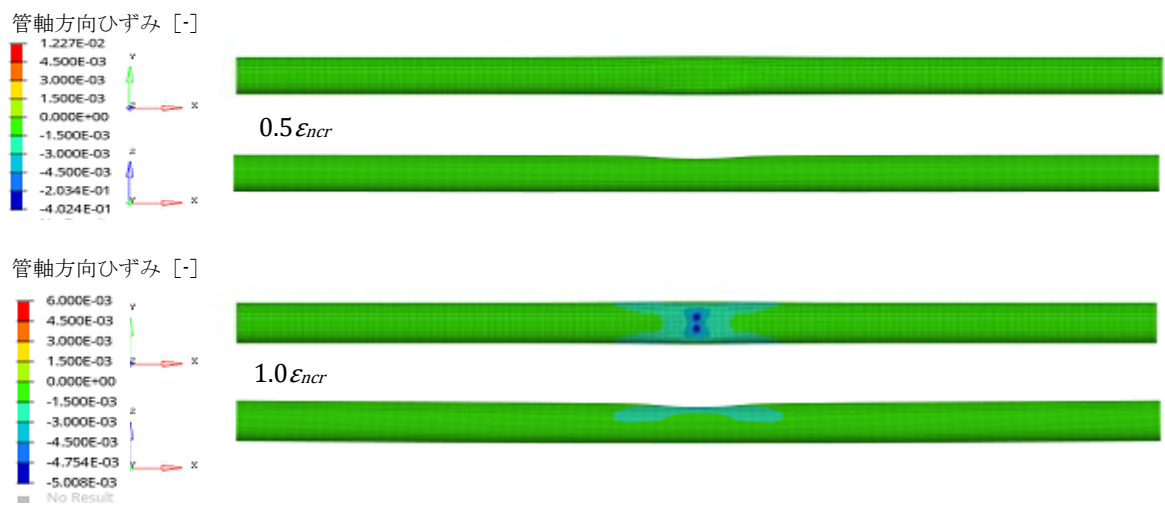


図-3.18 付図 2 軸ひずみ分布図 (SGP, 面状デント : 深さ 10%, 内圧無し, 埋設条件未考慮)



図-3.19 付図1 軸ひずみ分布図 (API 5L L415, 面状デント: 深さ 6%, 内圧無し, 埋設条件未考慮)

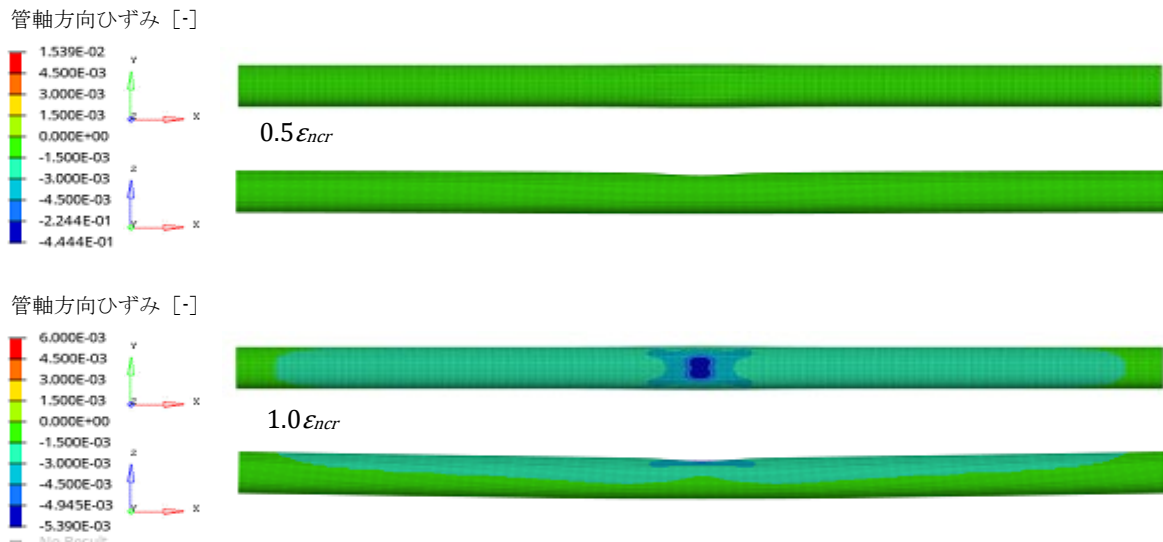


図-3.19 付図2 軸ひずみ分布図 (API 5L L415, 面状デント: 深さ 10%, 内圧無し, 埋設条件未考慮)



図-3.20 付図1 軸ひずみ分布図 (SGP, 面状デント : 深さ 6%, 内圧あり, 埋設条件未考慮)



図-3.20 付図2 軸ひずみ分布図 (SGP, 面状デント : 深さ 10%, 内圧あり, 埋設条件未考慮)

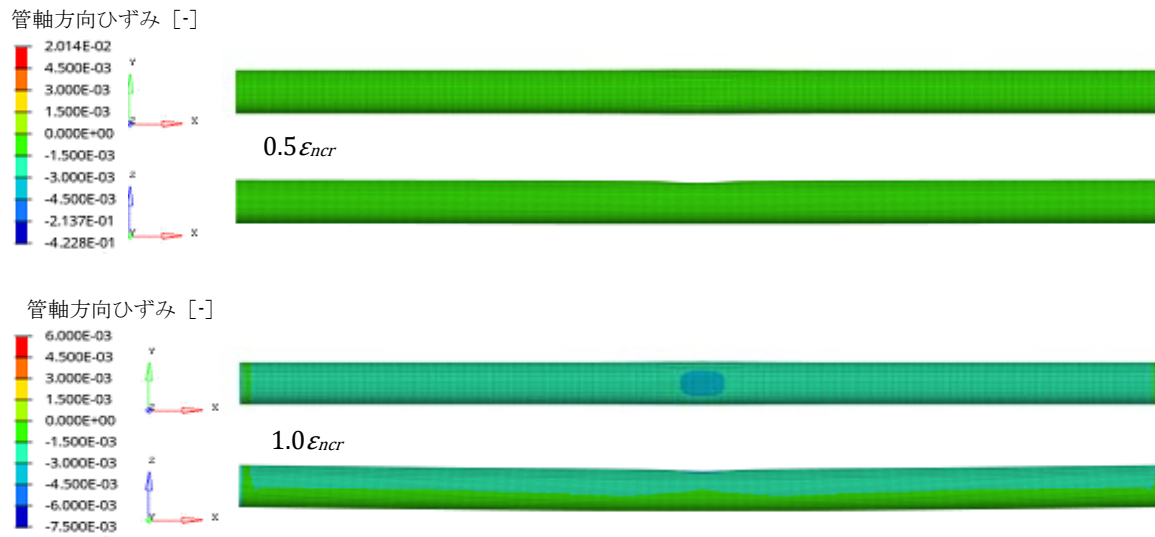


図-3.21 付図1 軸ひずみ分布図 (API 5L L415, 面状デント: 深さ 6%, 内圧あり, 埋設条件未考慮)

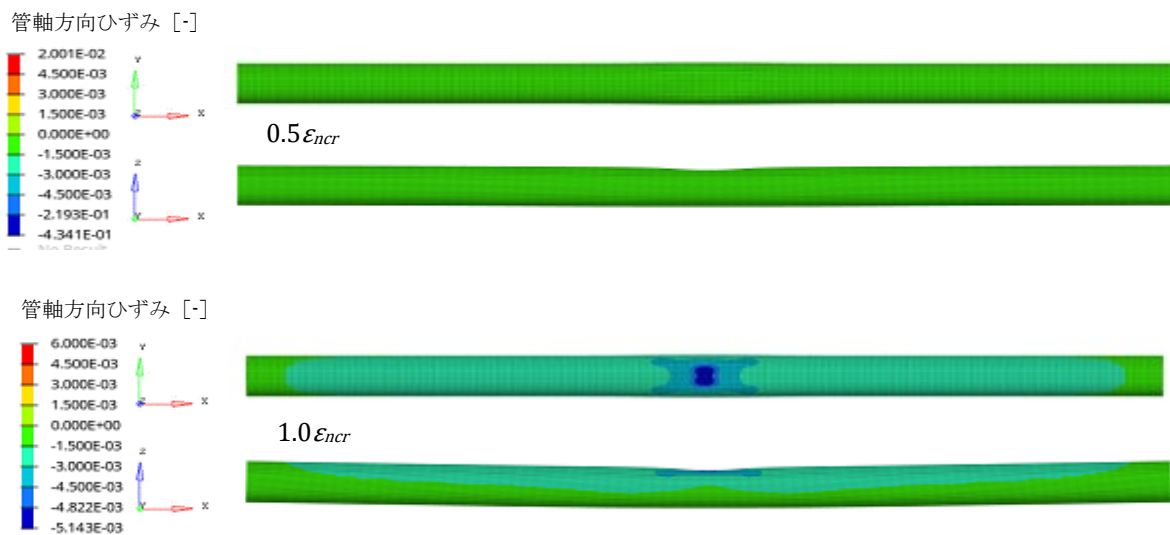


図-3.21 付図2 軸ひずみ分布図 (API 5L L415, 面状デント: 深さ 10%, 内圧あり, 埋設条件未考慮)

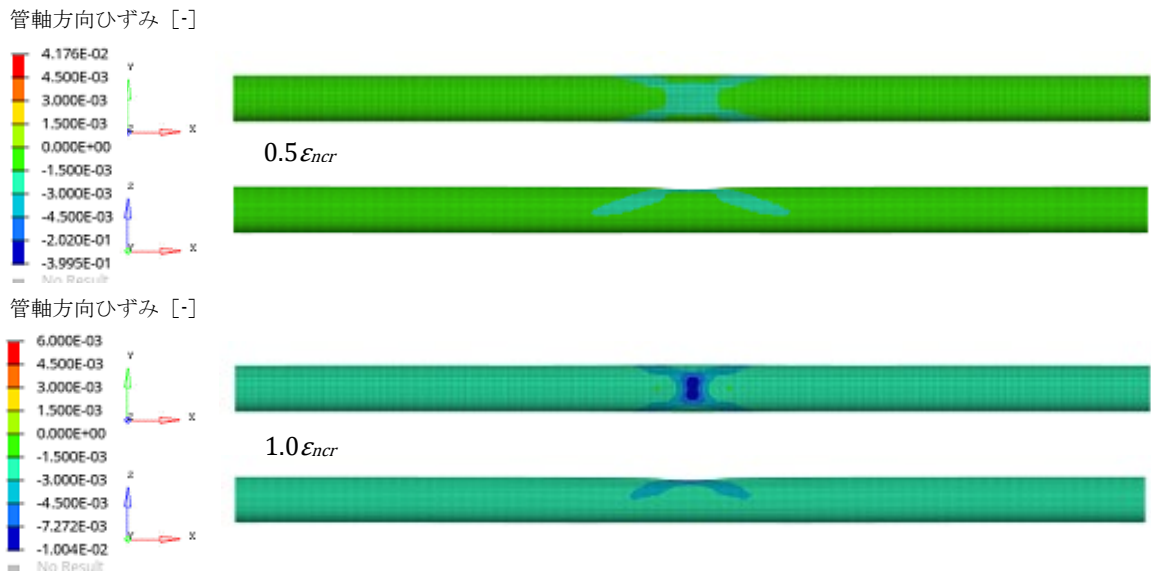


図-3.22 付図1 軸ひずみ分布図 (SGP, 面状デント : 深さ 6%, 内圧無し, 埋設条件考慮)

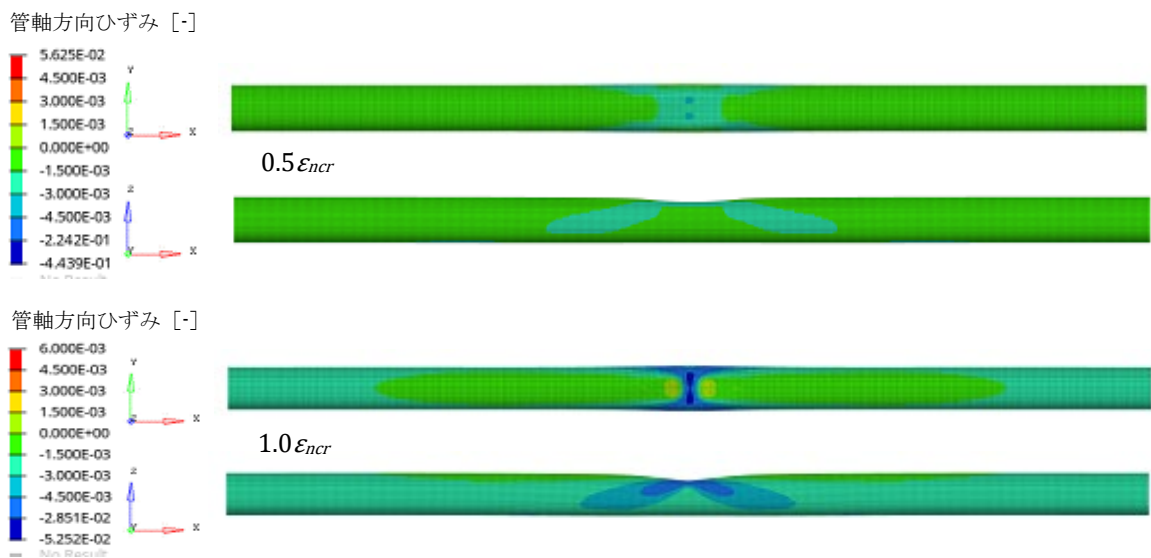


図-3.22 付図2 軸ひずみ分布図 (SGP, 面状デント : 深さ 10%, 内圧無し, 埋設条件考慮)

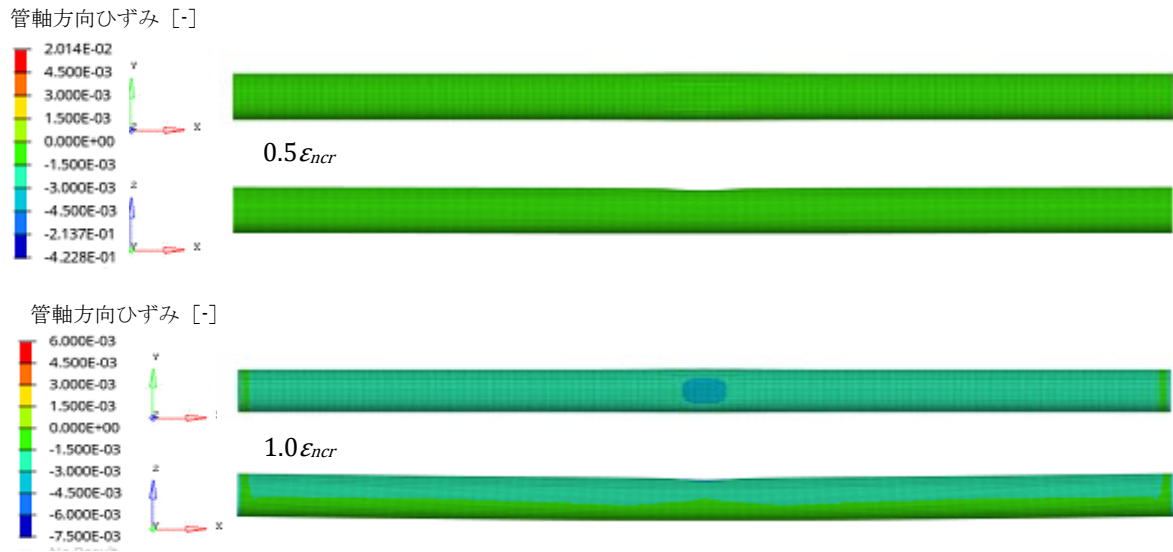


図-3.23 付図1 軸ひずみ分布図 (API 5L L415, 面状デント : 深さ6%, 内圧無し, 埋設条件考慮)

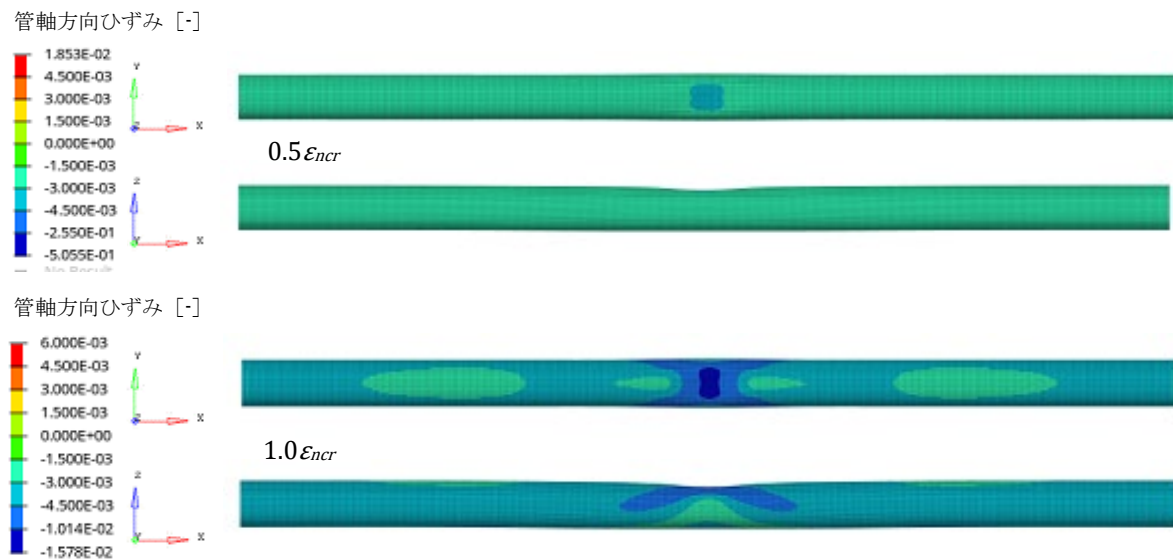


図-3.23 付図2 軸ひずみ分布図 (API 5L L415, 面状デント : 深さ10%, 内圧無し, 埋設条件考慮)

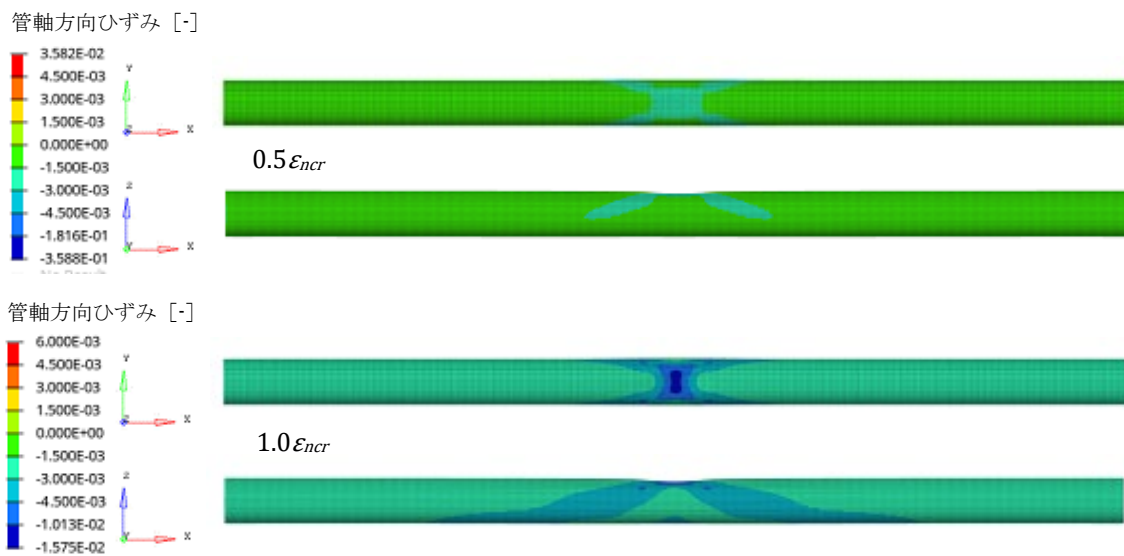


図-3.24 付図1 軸ひずみ分布図 (SGP, 面状デント : 深さ 6%, 内圧, 埋設条件を両方考慮)

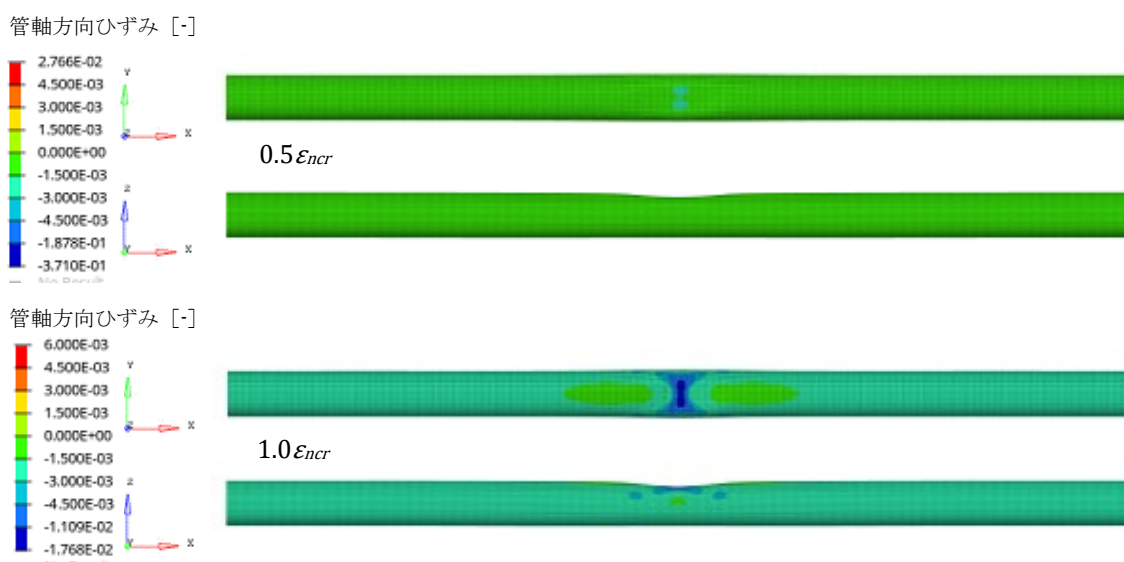


図-3.24 付図2 軸ひずみ分布図 (SGP, 面状デント : 深さ 10%, 内圧, 埋設条件を両方考慮)



図-3.25 付図1 軸ひずみ分布図 (API 5L L415, 面状デント: 深さ 6%, 内圧, 埋設条件を両方考慮)

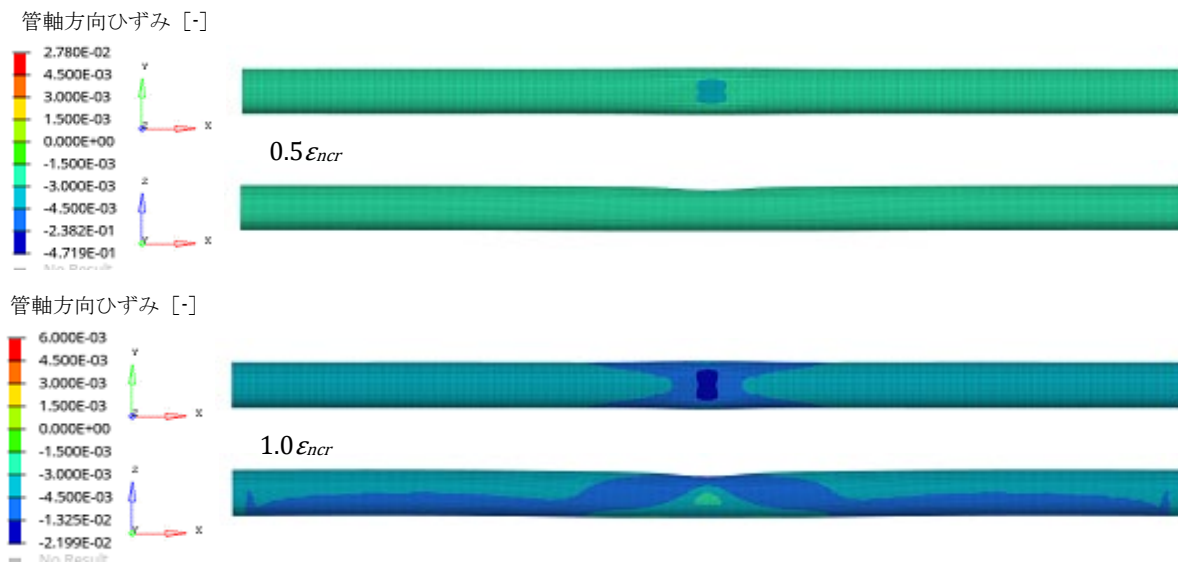


図-3.25 付図2 軸ひずみ分布図 (API 5L L415, 面状デント: 深さ 10%, 内圧, 埋設条件を両方考慮)



図-3.43 付図1 軸ひずみ分布図 (SGP, 線状デント: 深さ 6%, 内圧無し, 埋設条件未考慮)

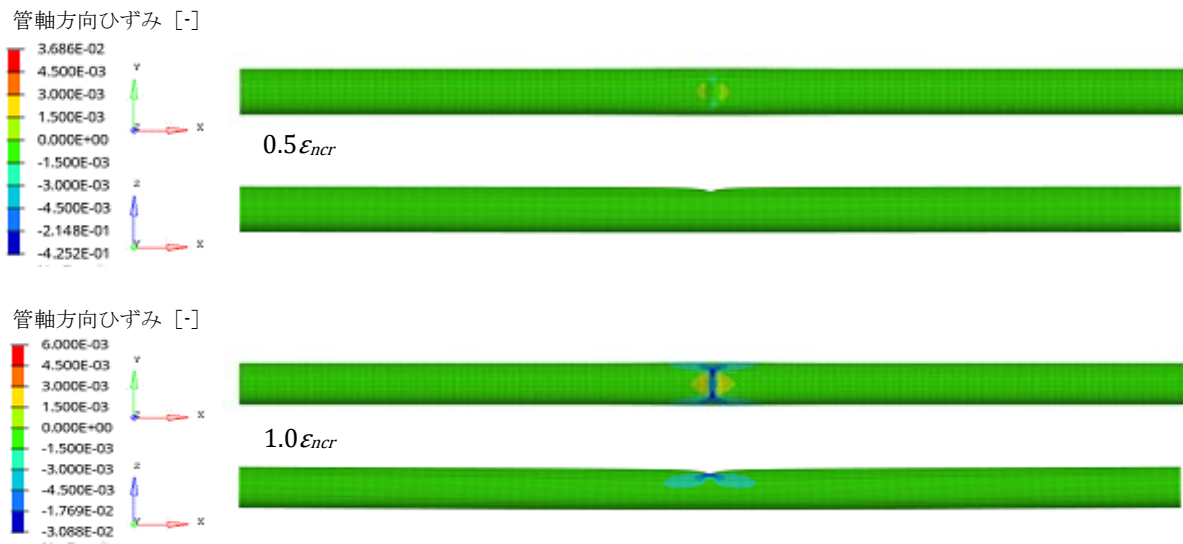


図-3.43 付図2 軸ひずみ分布図 (SGP, 線状デント: 深さ 10%, 内圧無し, 埋設条件未考慮)

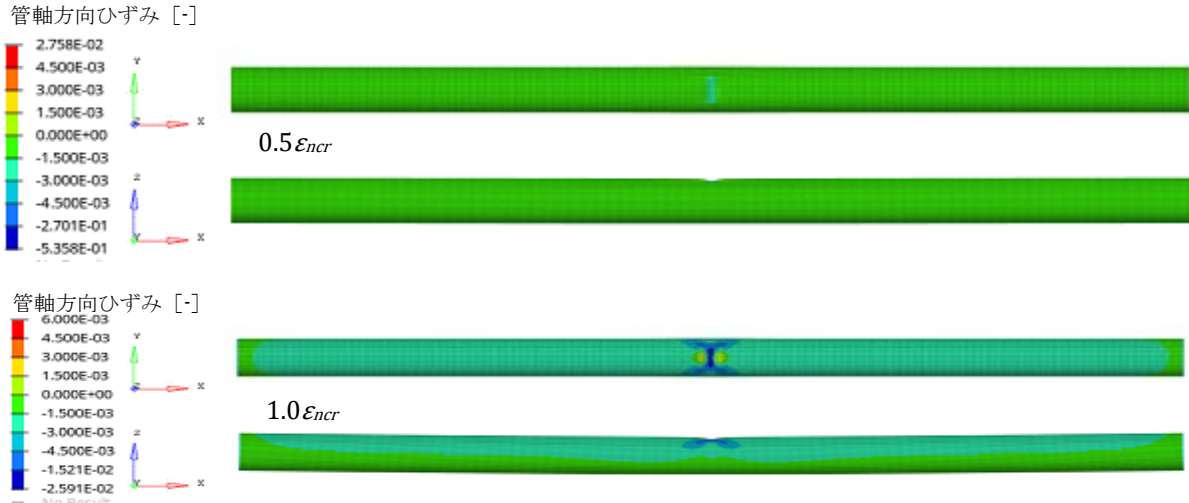


図-3.44 付図1 軸ひずみ分布図 (API 5L L415, 線状デント: 深さ 6%, 内圧無し, 埋設条件未考慮)

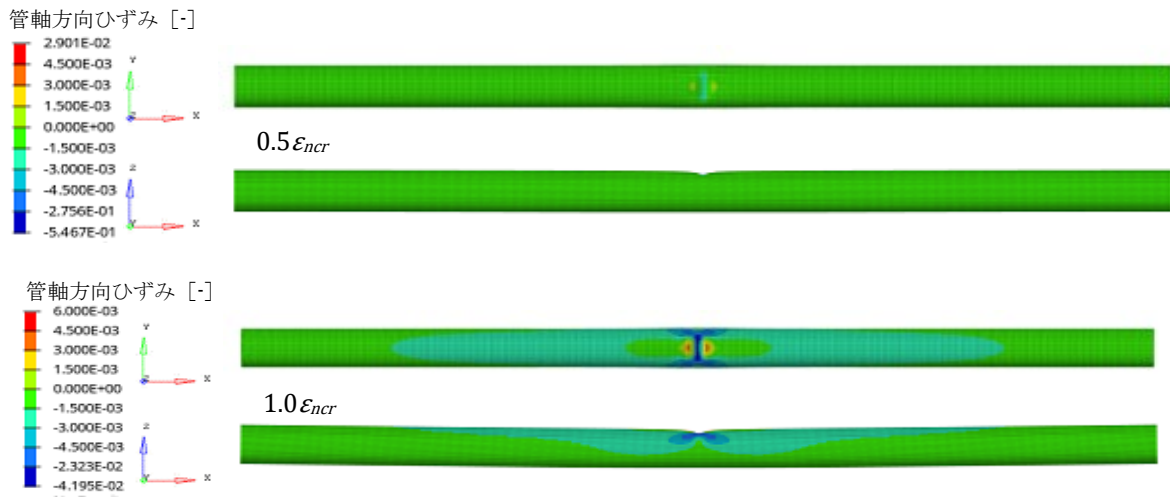


図-3.44 付図2 軸ひずみ分布図 (API 5L L415, 線状デント: 深さ 10%, 内圧無し, 埋設条件未考慮)



図-3.45 付図1 軸ひずみ分布図 (SGP, 線状デント : 深さ 6%, 内圧あり, 埋設条件未考慮)

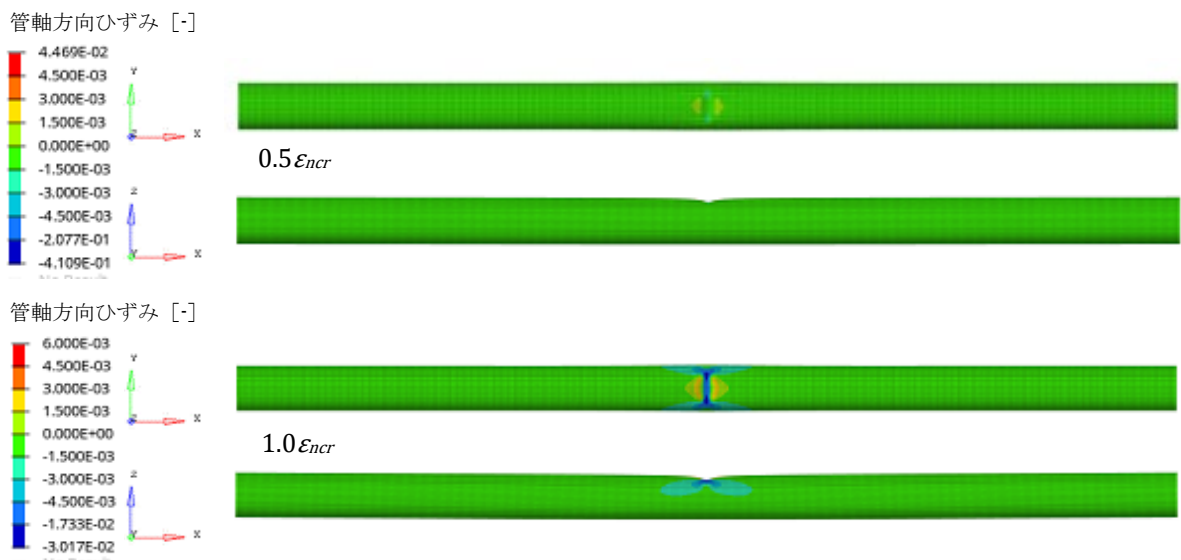


図-3.45 付図2 軸ひずみ分布図 (SGP, 線状デント : 深さ 10%, 内圧あり, 埋設条件未考慮)

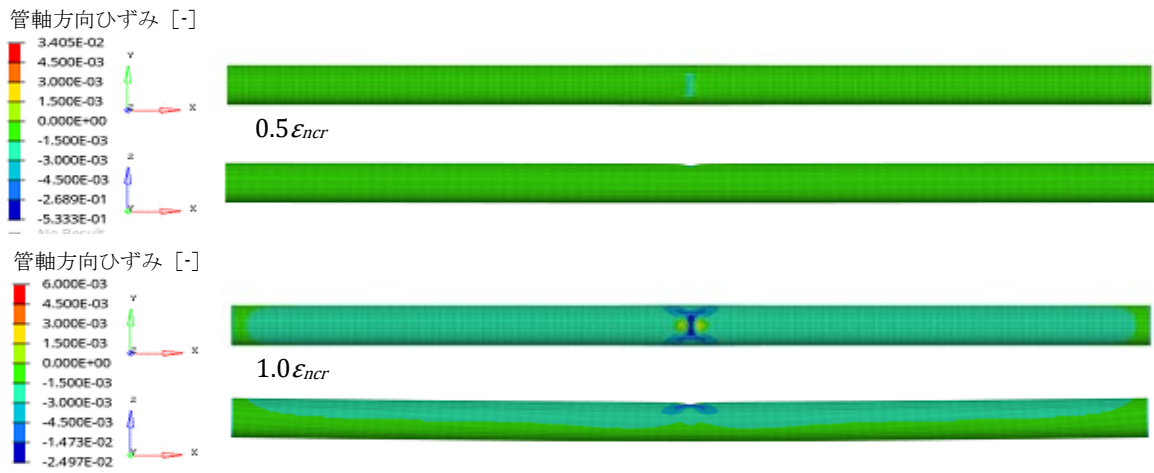


図-3.46 付図1 軸ひずみ分布図 (API 5L L415, 線状デント: 深さ 6%, 内圧あり, 埋設条件未考慮)

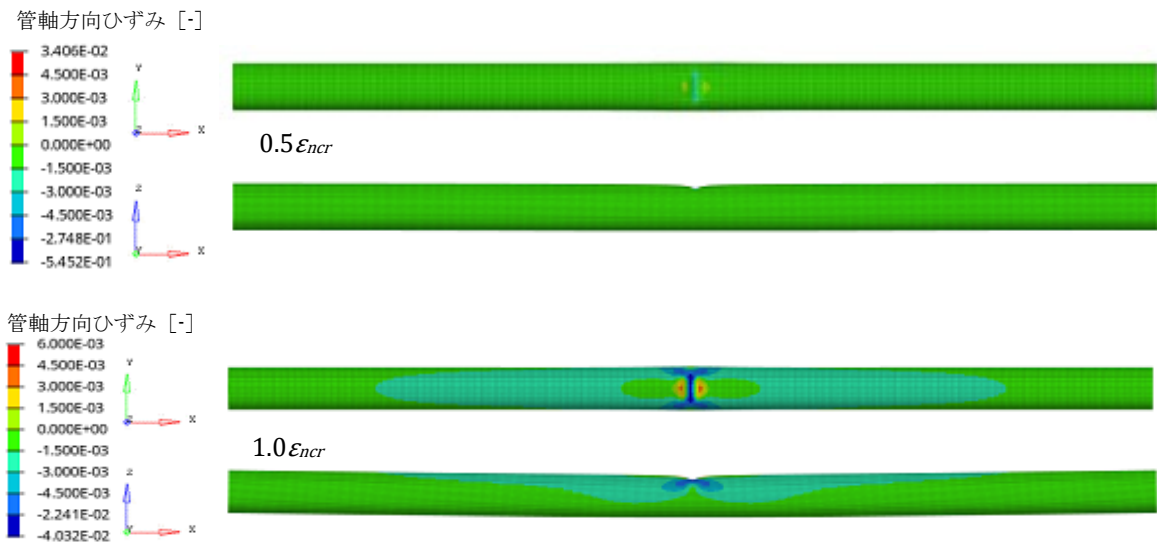


図-3.46 付図2 軸ひずみ分布図 (API 5L L415, 線状デント: 深さ 10%, 内圧あり, 埋設条件未考慮)

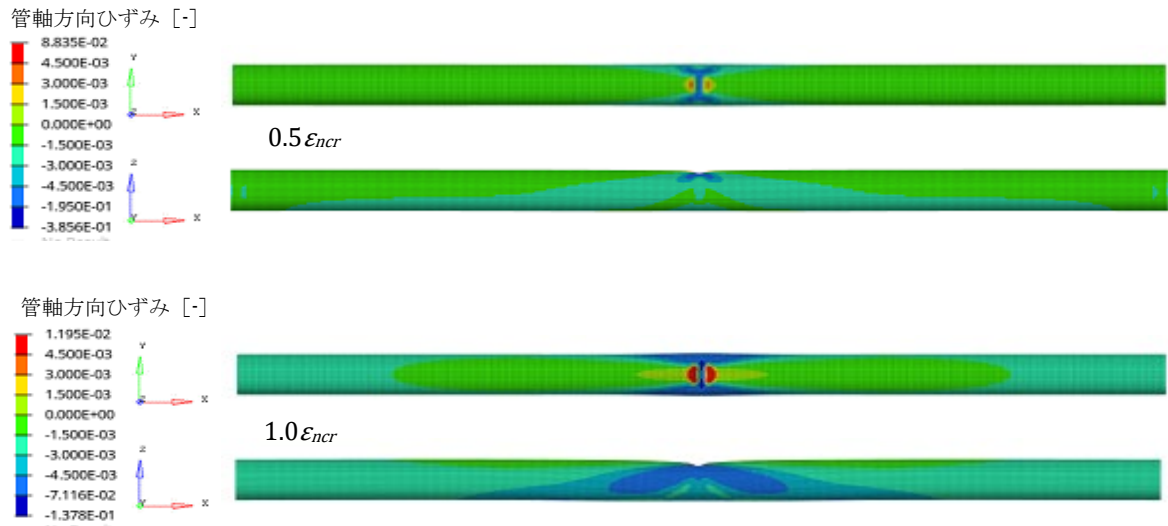


図-3.47 付図1 軸ひずみ分布図 (SGP, 線状デント : 深さ 6%, 内圧無し, 埋設条件考慮)

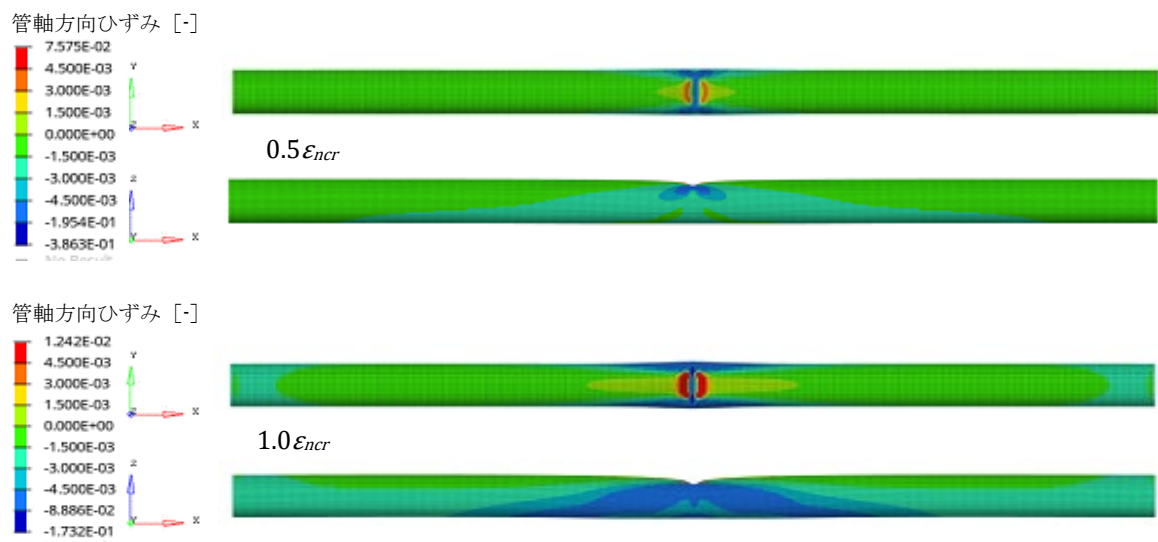


図-3.47 付図2 軸ひずみ分布図 (SGP, 線状デント : 深さ 10%, 内圧無し, 埋設条件考慮)

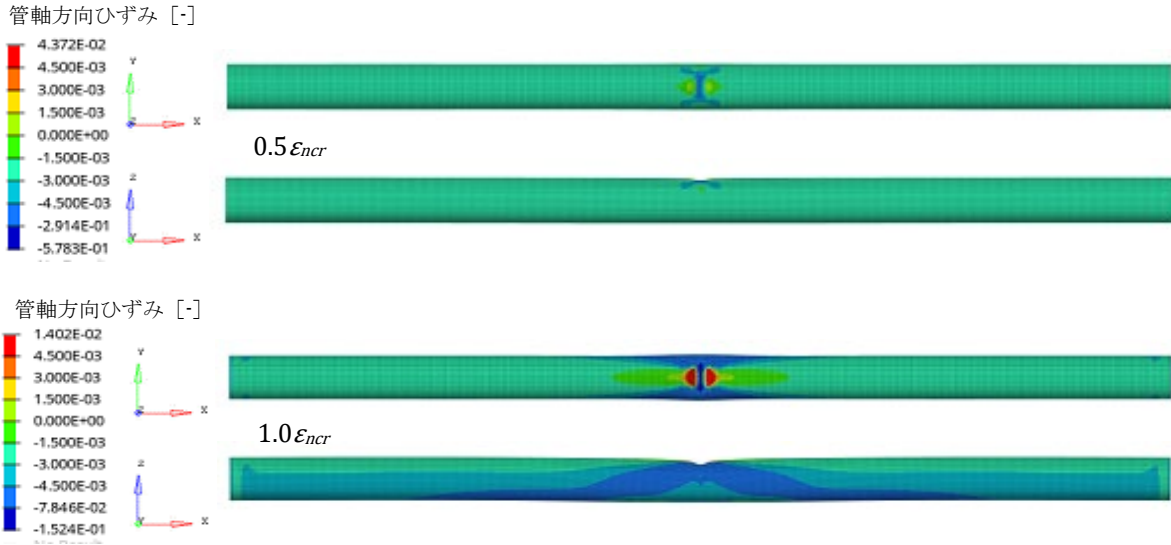


図-3.48 付図1 軸ひずみ分布図 (API 5L L415, 線状デント: 深さ6%, 内圧無し, 埋設条件考慮)

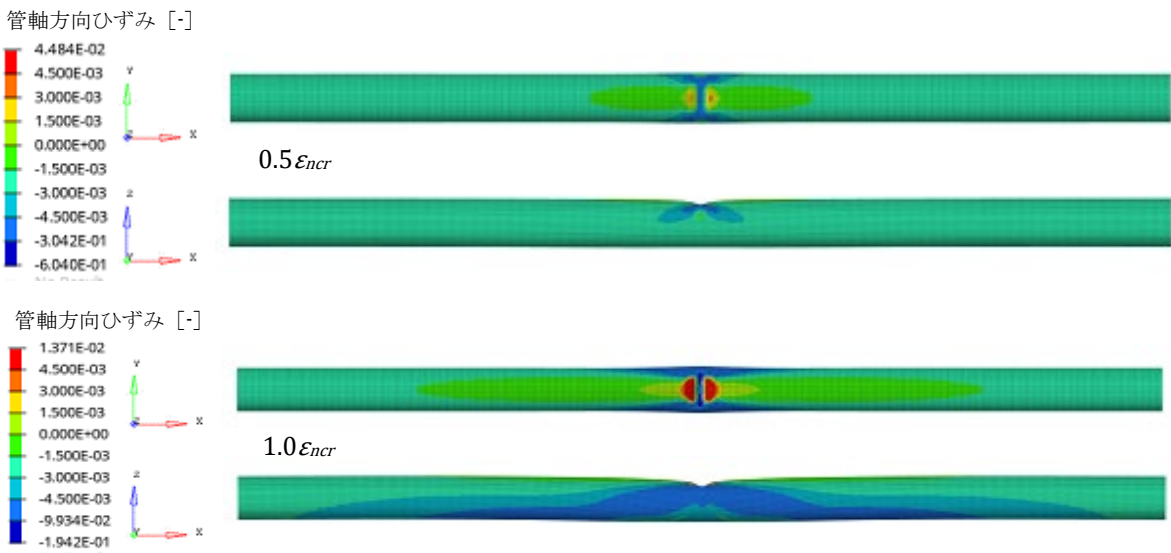


図-3.48 付図2 軸ひずみ分布図 (API 5L L415, 線状デント: 深さ10%, 内圧無し, 埋設条件考慮)

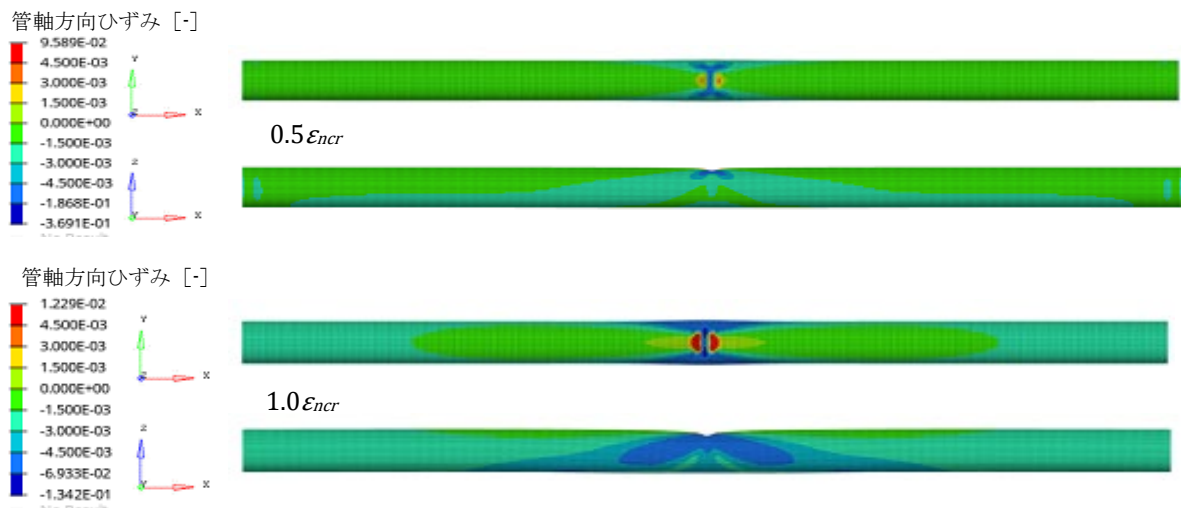


図-3.49 付図1 軸ひずみ分布図 (SGP, 線状デント : 深さ 6%, 内圧, 埋設条件を両方考慮)

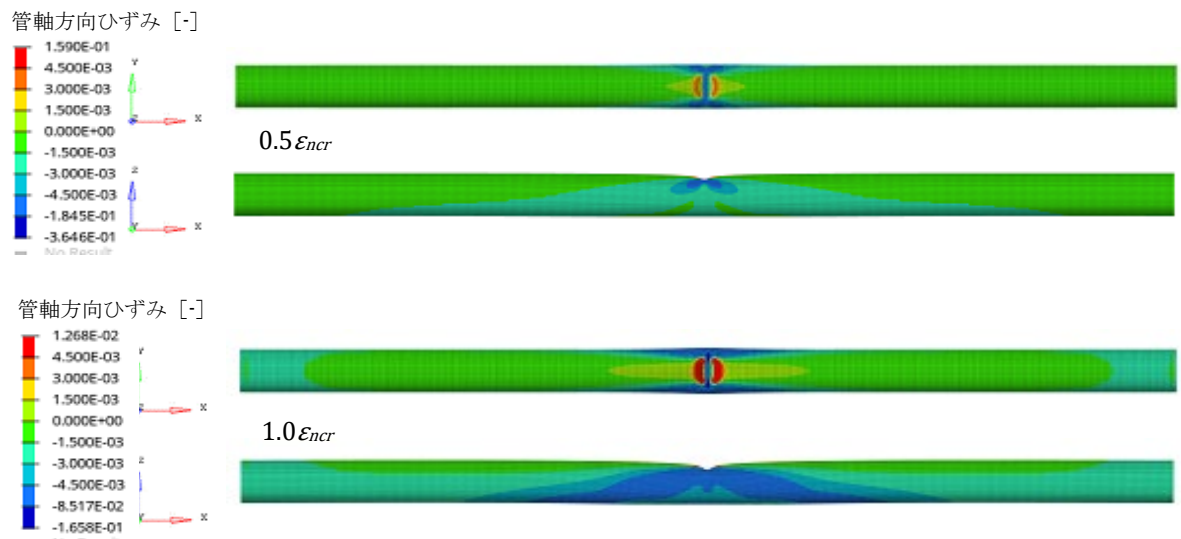


図-3.49 付図2 軸ひずみ分布図 (SGP, 線状デント : 深さ 10%, 内圧, 埋設条件を両方考慮)

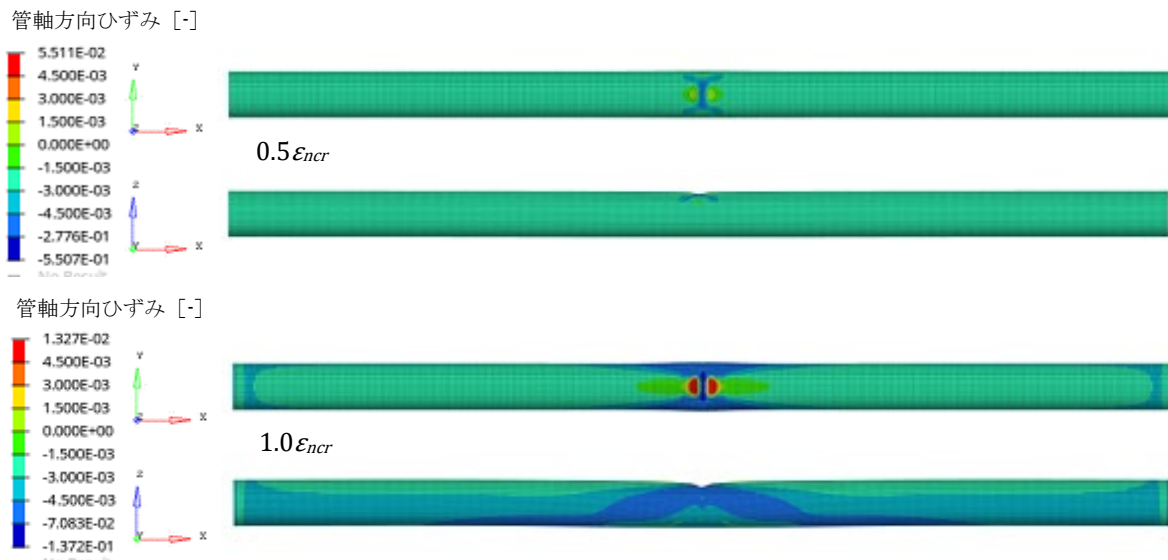


図-3.50 付図1 軸ひずみ分布図 (API 5L L415, 線状デント : 深さ 6%, 内圧, 埋設条件を両方考慮)

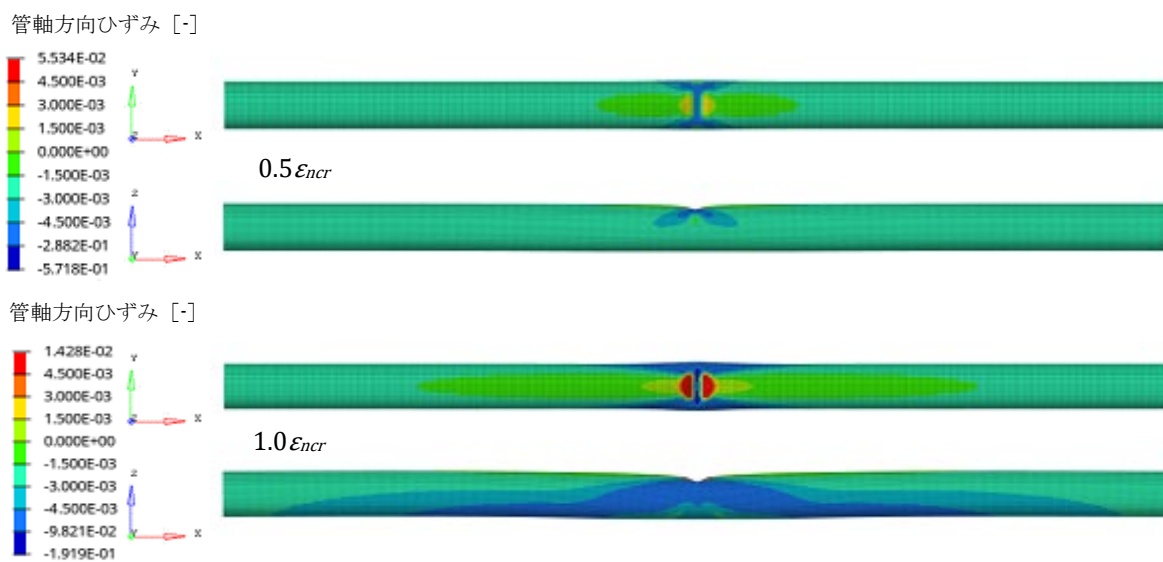


図-3.50 付図2 軸ひずみ分布図 (API 5L L415, 線状デント : 深さ 10%, 内圧, 埋設条件を両方考慮)

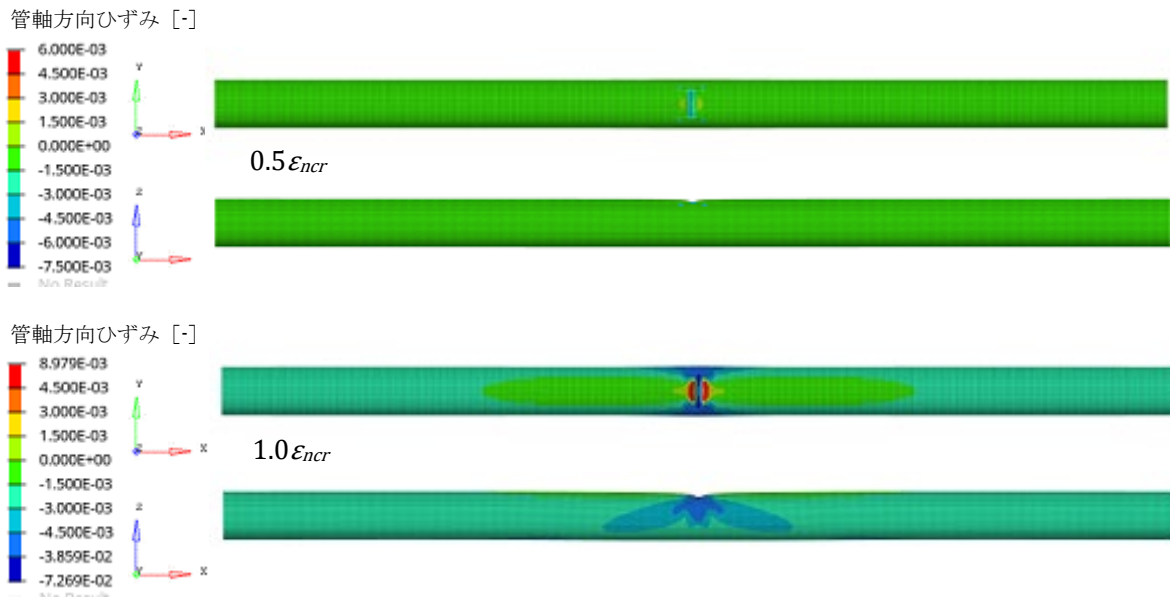
付録 5

第 5 章 デントを有する鋼管パイプラインの耐震性検討 関連資料

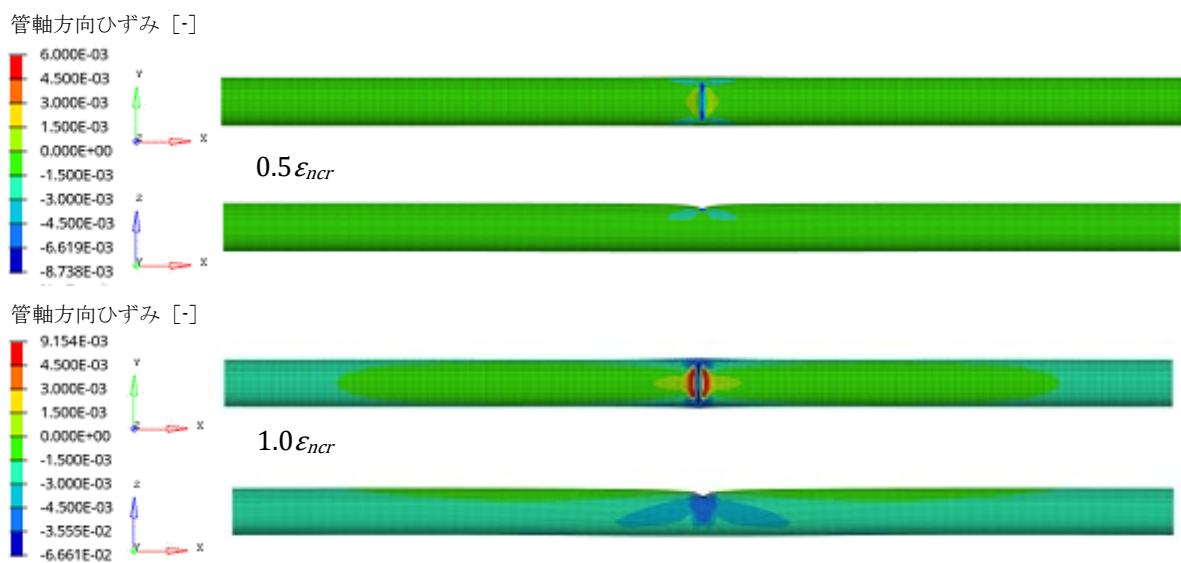
5.6 耐震性検討対象の鋼管パイプライン

5.6.1 米国石油協会規格準拠の鋼管の軸圧縮座屈解析の追加

デント深さ 6%、10% の場合の軸ひずみ分布図を掲載する。



図—5.15 付図 1 軸ひずみ分布図 (API 5L L360, 線状デント : 深さ 6%, 内圧, 埋設条件を両方考慮)



図—5.15 付図 2 軸ひずみ分布図 (API 5L L360, 線状デント : 深さ 10%, 内圧, 埋設条件を両方考慮)

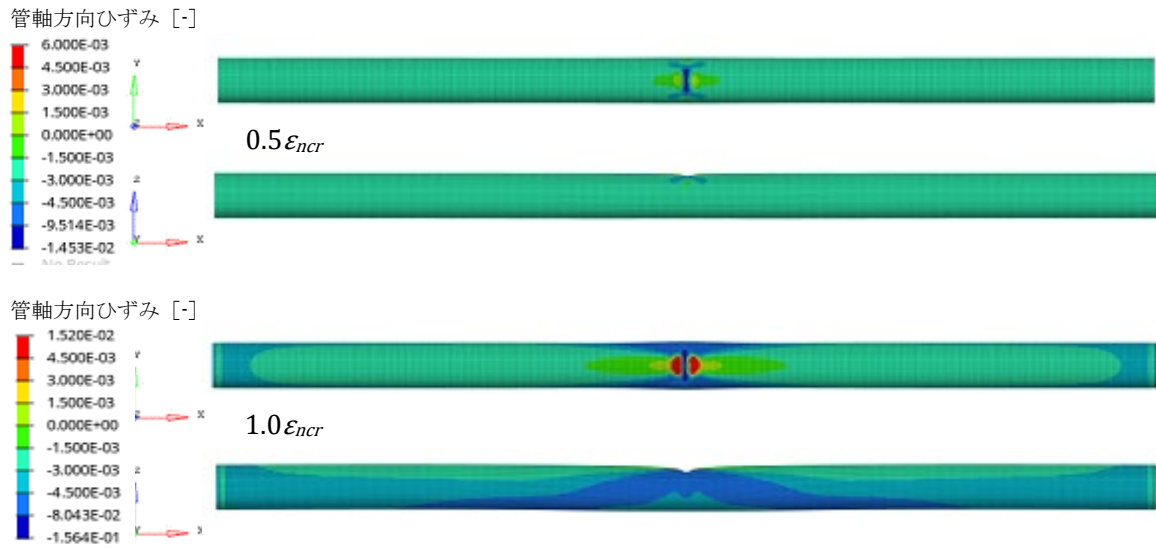


図-5.16 付図1 軸ひずみ分布図 (API 5L L450, 線状デント : 深さ 6%, 内圧, 埋設条件を両方考慮)

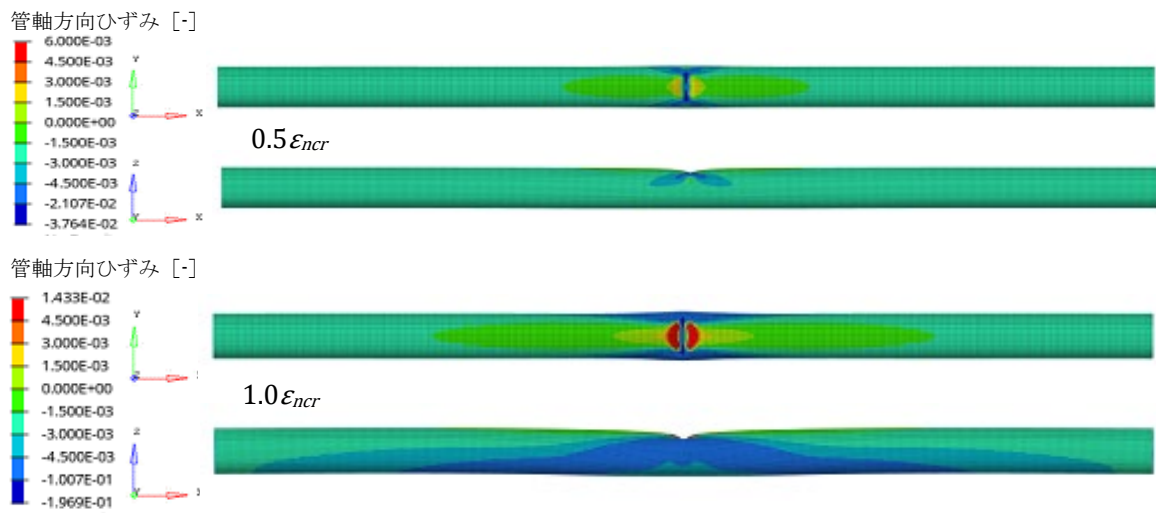


図-5.16 付図2 軸ひずみ分布図 (API 5L L450, 線状デント : 深さ 10%, 内圧, 埋設条件を両方考慮)

参考文献

- [1] Y. Shuai, J. Shuai, X. Zhang: Experimental and numerical investigation of the strain response of a dented API 5L X52 pipeline subjected to continuously increasing internal pressure, *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 56, pp.81–92, 2018.
- [2] X. Ma, T. Xue, T.H. Shi, Y. Xu: Analysis on influence factors of dent pipeline safety, *J. Saf. Sci. Technol.* 12 (6), pp.123–127, 2016.
- [3] J.X. Yu, X. Li, L.X. Xu: Denting mechanism of deepwater pipeline, *J. Tianjin Univ.* 48 (11), pp.1009–1013, 2015.
- [4] 経済産業省資源エネルギー庁電力・ガス事業部:ガス導管網などガス供給インフラの整備促進のあり方について (資料3), 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 ガスシステム改革小委員会 (15回), pp.2, 2014.
- [5] M. Baker Jr. Inc: Mechanical Damage – Final Report – Submitted to U.S. Department of Transportation, Integrity Management Program, Under Delivery Order DTRS56-02-D-70036, 2009.
- [6] ASME: Gas Transmission and Distribution Piping Systems, ASME B31.8- 2012.
- [7] E.R. Lancaster, S.C. Palmer: Bursting pressures of pipes containing dents and gouges, *P I Mech. Eng. E- J Pro* 210 (1), pp.19–27, 1996.
- [8] ANSI/API: Specification for Line Pipe, 4th edition, March, 2015.
- [9] 土木学会耐震工学委員会:サンフェルナンド地震 (1971年2月) の震害について, 土木学会論文報告集第195号, pp.131, 1971.
- [10] 日本溶接協会機械部会・パイプライン小委員会:最近のパイプラインの溶接施工技術とその将来, 日本溶接協会, pp.2-33, 2014.
- [11] P. Zhang, H. Lan, X. Dou, J. Wang, S. Zha, : Review of load-bearing capacity of dented pipes under typical loads, *Engineering Failure Analysis* 120, 2021.
- [12] T.G. Ghazijahani, H. Showkati, : Experiments on conical shell reducers under uniform external pressure, *J. Constr. Steel Res.* 67 (10) pp.1506–1515, 2011.
- [13] T.G. Ghazijahani, H. Showkat,: Bending experiments on thin cylindrical shells. In *Materials with complex behaviour II*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp.119-139, 2012.
- [14] T.G. Ghazijahani, H. Showkati,: Experiments on cylindrical shells under pure bending and external pressure, *J. Constr. Steel Res.* 88 pp.109–122, 2013.
- [15] T.G. Ghazijahani, H. Showkati,: Locally imperfect conical shells under uniform external pressure, *Strength Mater+* 45 (3) pp.369–377, 2013.
- [16] T.G. Ghazijahani, H. Jiao, D. Holloway,: Experiments on dented steel tubes under bending, *Adv. Struct. Eng.* 18 (11) pp.1807–1817, 2015.
- [17] J.H. Beak, Y.P. Kim, W.S. Kim, J.M. Koo, C.S. Seok,: Load bearing capacity of API X65 pipeline with dent defect under internal pressure and in-plane bending, *Mater. Sci. Eng.* 540 pp.70–82, 2012.
- [18] M. Liu, Y.Y. Wang, M. Sen, P. Song,: Integrity assessment of post-peak-moment wrinkles, in: 2016 11th International Pipeline Conference, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2016.

- [19] G.B. Wang, Y.Y. Wang, B. Ayton, M. Stephens, S. Nanney,: Assessment of dents under high longitudinal strain, in: 2018 12th International Pipeline Conference, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2018.
- [20] T.G. Ghazijahani, H. Jiao, D. Holloway,: Plastic buckling of dented steel circular tubes under axial compression: an experimental study, *Thin Wall Struct.* 92 pp.48–54, 2015.
- [21] T.G. Ghazijahani, H. Jiao, D. Holloway,: Structural behavior of shells with different cutouts under compression: an experimental study, *J. Constr. Steel Res.* 105 pp.129–137, 2015.
- [22] M. Zeinoddini, M. Ezzati, G.A.R. Parke,: Plastic buckling, wrinkling and collapse behaviour of dented X80 steel line pipes under axial compression, *J. Loss Prevent Proc.* 38 pp.67–78, 2015.
- [23] M. Stankovi'c, M. Risti'c, A. Simonovi'c, M. Jovanovi'c, Buckling behaviour of dented aluminium alloy cylindrical shell subjected to uniform axial compression, *FME Trans.* 45 (3) pp.441–447, 2017.
- [24] 加藤勉, 秋山宏, 鈴木弘之, 軸圧縮力を受ける鋼管の塑性局部座屈耐力, 日本建築学会論文報告集第 204 号 pp.9-17, 1973.
- [25] A. Cosham, and P. Hopkins: The effect of dents in pipelines—guidance in the pipeline defect assessment manual, *International journal of pressure vessels and piping*, 2003.
- [26] Discussion by Y.L.Chang on “Lateral Pile-Loading Tests” by Feagin, A.S.C.E, 1937.
- [27] 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV下部構造編, 2017.
- [28] 日本ガス協会：高圧ガス導管液状化耐震設計指針, 2016.
- [29] 日本道路協会：石油パイプライン技術基準（案）, 1974.
- [30] 日本ガス協会：高圧ガス導管耐震設計指針, 2020.
- [31] C.H. Trautmann, and T.D. O'Rourke: Lateral force-displacement response of buried pipe, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.111, No.9, pp.1077-1092,1985.
- [32] N. Suzuki.: An overview of strain-based seismic design of high pressure gas pipeline, *Journal of Pipeline Engineering*, Vol. 13 (3), pp.211-222, 2014

謝辞

本論文は、私が名古屋大学減災連携研究センターライフライン地盤防災産学協同研究部門に東邦ガスから出向してきた2017年度から2021年度までの5年間で行ってきた研究成果を主にまとめたものです。なお各種の実管実験は、それに先立って東邦ガス株式会社・供給管理部幹線建設グループ（現・導管部幹線センター）で2016年度以前に行われました。

名古屋大学・館石和雄教授には、私の研究が佳境に入った2019年度から3年間ご指導を賜りました。2019年度当初が初対面であったにもかかわらず、ある意味都市ガス業界に特化しているとも言える私の研究テーマのご指導のお願いを快くお受け頂き、たいへんありがたく、救われた思いがいたしました。その後も、私からの研究計画や進捗の報告に対しては、必ず私の考えを尊重して頂いた上で、いつも適切なお助言を賜っておりました。研究予算の都合で研究計画の変更を余儀なくされた際にも、どのように変更すれば学位に値する研究となり得るか、ご一緒に考えて頂きました。本論文の執筆の際には、要領を得ていない私に、論文の構成や「作法」のご指導も頂き、何とか博士論文の形にまとめることができました。館石先生のこのような温かいご指導によって、今ここに謝辞を記すところまでお導き頂きました。初めて経験する研究活動のこの3年間、一方ならぬご指導を頂き、誠にありがとうございました。心より感謝申し上げます。

京都大学・北根安雄准教授には、名古屋大学にいらっしゃられた頃の2017年度から2年間ご指導を賜りました。東邦ガスから持ち込んだ私の研究テーマと研究計画が、博士論文を執筆するに値する内容となっているか不安でしたが、北根先生から、実管実験も再現解析もデータが取れているので大丈夫であろうとの見立てをして頂けたので、安心して研究を進めることができました。その2年間で査読論文を執筆しましたが、2編の論文が北根先生のご指導の下、査読を通過することができました。研究者としての基礎を私に授けて頂いたものと思っております。心より感謝申し上げます。

名古屋大学・野田利弘教授、判治剛准教授、愛知工業大学・鈴木森晶教授には、本論文の内見指導を賜りました。野田先生には、私が論文を書き慣れていないことを慮って下さり、まさに手取り足取りの心のこもったご指導を頂きました。誠にありがとうございました。野田先生のおかげで博士論文の形にすることができました。判治先生は、都市ガス業界の耐震設計基準のポイントをご理解されており、私が十分考慮できていなかった安全率の有無の確認についてご示唆頂き、また、今後の研究課題として地震動の繰り返しの影響を挙げて頂くなど、たいへん有り難く感謝しております。鈴木先生には、後に続く研究者が本論文を参照して理解を深めるためには割愛してはいけない記述や説明について、特に解析の条件設定や鋼管材料の特徴説明などについてご指摘を頂き、強く納得することができました。副査の先生方からはこのように私の研究の本質をとらえた着目点や修正点のご指摘を下さり、本論文のレベルを大きく引き上げて頂きました。親身なご指導を頂き、心より感謝申し上げます。

JFEスチール株式会社の鈴木信久さんには、私が名古屋大学で研究を始めることになった当初、相談をさせて頂きましたが、JFEグループとは違う組織に属する私に対する指導は普通なら難しいところを、二つ返事でお受け下さり、本研究を軌道に乗せて頂きました。特に、実管実験の結果を再現する解析モデルの作成にあたっては、デントが形成された部分の残留ひずみに着目することや、局所的にデントを含んだ鋼管パイプラインの全体として軸圧縮座屈特性を評価す

る際にはデントの影響を受けない部分に着目することなど、私の研究を進める上での極めて重要な指摘を頂きました。ご相談の際には名古屋にもたびたびお越し頂き、たいへんご負担を頂きながら親身なご指導を賜りました。また、海外の学会での発表の際にも、ご自身のご発表を控えながらも私の発表にもご指導を下さり、たいへん助けて頂きました。心より感謝申し上げます。

JFEエンジニアリング株式会社の浅野加南子さん、森健さん、PINテクノロジーズ株式会社の久保泉さんには、曲げによる局部座屈の実験の実施と、実験結果を再現できる解析モデルの作成にあたり、たいへんお世話になりました。鈴木信久さんが示される方針に従い、綿密に打ち合わせを実施して、解析のお手本を示して頂きました。深く感謝申し上げます。

東邦ガス株式会社・技術研究所の伊奈孝さんには、軸圧縮座屈のパラメータスタディでは一方ならぬご尽力を頂きました。2年前、東邦ガスでの研究発表会でお声を掛けて頂き、鋼管パイプラインを対象とした解析には技術研究所のリソースが使用できるということがわかり、私の研究計画を遂行できる見通しを立てることができました。その後すぐに私どもの産学協同研究部門の研究協力員に就任を頂き、解析を一手に実施して頂きました。私の研究が暗礁に乗り上げそうになったところを救って頂きました。伊奈さんは私の研究活動にとっての大恩人です。心より、深謝申し上げます。

東邦ガス株式会社・幹線建設グループ（現・総務部）の河野順平さんには、2017～2018年度に私の研究に対して東邦ガスの研究費を頂くことの社内了解を取得して頂きました。こちら、研究初期での非常に大きな支援となりました。また、研究成果の論文発表の際には東邦ガスの立場として監修を頂き、東邦ガス社内への報告にもご尽力頂きました。心より感謝申し上げます。河野さんの後任の小沢裕治さんにも、2019年度から、同じく研究成果の論文発表・社内へのご報告にご尽力を頂き、こちら、感謝申し上げます。

東邦ガス株式会社・供給防災部長（現・設備部長）の井上信さん、後任の森田裕之さん、供給防災センター所長（現・東邦ガスオーストラリア社出向）の梶田弘さん、後任の栗田謙介さん、供給防災課長（現・導管企画部チーフ）の林口暢高さん、後任の柴田大輔さんには、私どもの産学協同研究部門の活動全般をサポートして頂きました。定例報告会議や研究進捗報告会議の場で、ありがたいご助言を頂き、心より感謝申し上げます。

私の所属した産学協同研究部門で机を並べた田代喬特任教授には、研究の進め方、博士論文の執筆に至るまでになすべきことなど、常に適切なお指摘やご助言を頂きました。私どもの産学協同研究部門の長として活動を牽引して頂き、たいへん有り難かったです。また田代先生は、学生向けの講義、外部での講演、マスコミからの取材対応などの日々の実務をこなしながら、自らの研究活動も計画的・継続的に実行されておりました。この姿勢は、私が研究活動を遂行するにあたっての模範となりました。まさに私どもの産学協同研究部門の大黒柱でした。心より深謝いたします。

私と一緒に東邦ガスから出向してきた北川夏樹特任助教には、研究テーマは違えども学位取得という同じ目標を持った同僚としてお互いに情報交換し、切磋琢磨してきました。身近にそのような存在がいたことで、研究活動に対する悩みや不安が大きく和らいだと思います。ありがとうございました。

最後に、私がこの5年間名古屋大学減災連携研究センターで勤務した間、家庭を守り、私が仕事を最優先できるように諸般を整えてくれていた、妻、娘ふたりの家族に感謝します。