『高圧導管指針』

（JGA 指-104-21）

2022 年 3 月改訂版

一部改訂（抜粋）

2024 年 12 月 一部改訂、附属書追加
2023 年 5 月 一部改訂

一般社団法人 日本ガス協会

「高圧導管指針」本編　（2022年3月発行）
一部抜粋 新旧版（2024年12月一部改訂）

第４編 維持管理編

第８章 漏えい等の対応

（P373～P378 略）

（P379）

8.4　ガスの遮断と減圧

高圧導管等からの漏えいにつながると判断した場合及び漏えいが認められた場合には、ガスの遮断、減圧等の措置を講ずる＊1。

【解　説】

＊1.(1)　現場状況の確認の結果、高圧導管等からの漏えいにつながると判断した場合及び漏えいが認められた場合は、供給管理部門、製造管理部門等と供給・製造上の調整を行い、遮断、減圧等の応急処置の方法を速やかに決定する。遮断、減圧は路線上の整圧器、バルブ、圧力逃し装置等を用いて行う。

(2)　減圧は、整圧器等の供給設備を利用するか、放散施設により周辺の安全を確認しながら実施する。

減圧の方法及び留意点については（工事編）　4.5.4「ガスの減圧」による。

(3)　損傷部の調査、応急修理を行う場合には、内圧等による損傷部の被害拡大を防止し、周辺住民及び作業者の安全を確保するため、安全な圧力に減圧し作業を実施する。

8.5　応急修理

漏えい等の箇所及び形態に応じ、応急のための修理を行う＊1。

【関連条項】

法第64条（保安規程）
施行規則第92条・第93条（保安規程）
通達７資公部第239号（一般ガス事業の用に供するガス工作物の工事、維持及び運用に関する保安を確保するための保安規程に係る関係通達の整備に関する通達について）
通達元資公部第665号（ガス漏えい爆発事故の再発防止について）
道路法第32条（道路の占用の許可）
道路交通法第39条～第41条（緊急自動車の通行区分等他）
道路交通法第77条（道路の使用の許可）
道路交通法第85条（第一種免許）

【解　説】

＊1.(1)　応急修理の要否~~の~~判断及び方法~~のを~~決定の~~する~~ために必要な確認事項は以下のとおりである。

(a)　漏えい、損傷箇所の特定（管体部、継手部）

コメントの追加
減肉補修基準の導入により、要否の判断を追記

(b) 漏えい、損傷の形態(腐食、損傷孔、クラック、デント（へこみ)、継手ゆるみ等)

(c) 漏えい、損傷箇所の寸法、形状

(~~e~~d) 圧力(導管等埋設図と照合)

(e) 埋設深さ（土被り）

(~~d~~f) 管体情報（材質、管種、口径、管厚等）

(2) 応急修理の要否の判断方法は以下のとおりである。

(a) 漏えいが確認された場合

応急修理が必要と判断する。

(b) 損傷が確認された場合

損傷部の評価及び応急修理の要否の判断は、附属書３「損傷に対する供用適性の評価手法」に基づき行うことができる。応急修理が不要と評価された場合は、露出させた鋼面に適切な防食措置を施して、供用を継続する。

(~~2~~3) 応急修理の具体的方法を以下に示す。

(a) 管体からの漏えい等の場合

当該箇所付近の管体表面の清掃を素早く行い、応急修理用スリーブ**[1]を取付けるか、またはコンポジット補修**[2]を行う。前者については、減圧の途中で取付け可能な場合は、減圧の途中で取付ける。

(b) フランジ漏えいの場合

増締めを行うか又は応急修理用リング**~~[2]~~[3]を取付ける。

(~~3~~4) 応急修理後の措置を以下に示す。

(a) 応急修理後、昇圧を行う場合には、高圧導管等の漏えい等を修理した箇所及びその付近を調査し、漏えい、異常が無いことを確認する。

(b) マンホールの蓋等を開放した場合は、残留ガスの無いことを確認してから蓋を閉じる。また、漏えい箇所の調査の際にボーリングした穴は補修する。

(c) 火気使用を禁止した場合は、使用禁止解除の広報を行うとともに、交通の制限を行った場合には、必要により警察の協力を得て制限を解除する。

なお、応急修理後、修理までの期間は、安全性が確保される圧力以下で運用する。

コメントの追加
減肉補修基準の導入により、要否の判断を追記

コメントの追加
評価後の取扱いについて、ユーザーに喚起する記載を追記。

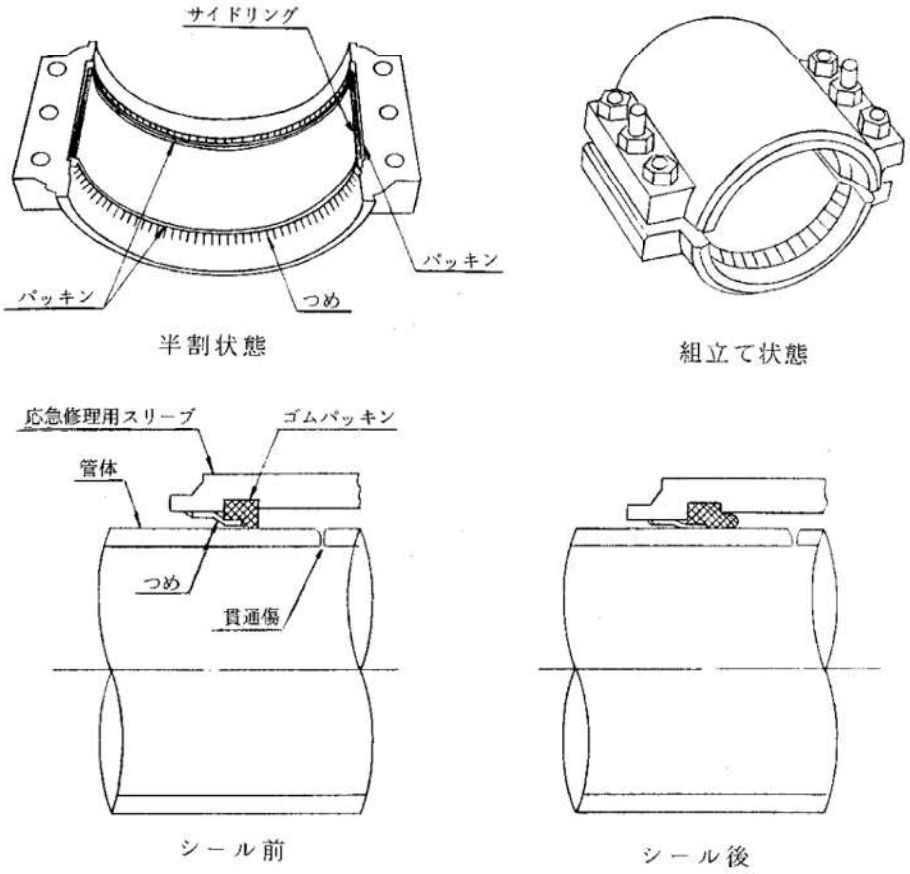
コメントの追加
応急修理にコンポジット補修工法を追記。
減圧の途中での取付けは、応急修理用スリーブが対象となる。

【参　考】

＊＊1.　応急修理用スリーブ

(1) 概　要

応急修理用スリーブは、高圧導管が損傷若しくは貫通に至った場合に、速やかにその機能を回復するため、損傷部の取替えを行うことなく修理するものである。これは、半割状のスリーブ２個が１組となっており、漏えい部に取付けた場合、スリーブ内部に取付けてあるゴムパッキンによりシールする構造となっている。構造及びシール機構について参図８－１に示す。



参図８－１　応急修理用スリーブの構造及びシール機構

(2) 概略仕様

標準品は口径１$^{1}/_{2}$～48インチ、最高使用圧力1,000psi（6.9MPa）であり直管用だけでなく曲管用もある。

(3) 施工上の留意点

(a) 口径の大きいものについては、重量が大きいため、レッカー等によるつり降ろしが必要となる。

(b) 締付けトルクが大きいためパワーレンチ等による締め付けが必要となる。

(c) 設置後は昇圧を徐々に行い、漏えいのないことを確認する。

＊＊2.　コンポジット補修

(1) 概　要

コンポジット補修は、高圧導管が損傷に至った場合に、速やかにその機能を回復するため、損傷部の取替えを行うことなく修理するものである。一例として、~~金属~~補修パテで損傷部を充填し整形した後、~~高分子~~熱硬化性樹脂を含浸させた炭素繊維

コメントの追加
コンポジット補修工法の概要などを追記

やガラス繊維などから成るシートを損傷部に巻き付け、乾燥・硬化させることにより補強するもの等がある。代表的な構造について参図８－２に示す。

(2) 概略仕様

全口径の直管及び異形管に適用できる~~もので、~~。国際規格ISO 24817または~~及び~~ASME PCC-2に~~準拠~~適合~~した~~する製品を~~採用することが望ましい~~対象とする。

(3) 施工上の留意点

(a) ＊1.(1)の確認事項に基づき、適切にコンポジット補修材の選定並びに施工長さ及び厚さの設計を行う。参考文献は以下の通り。

山口，三津谷，今井，大畑，「パイプラインコンポジット補修部の界面剥離を考慮した耐震性能評価手法の構築」，溶接学会溶接構造シンポジウム，(2023).

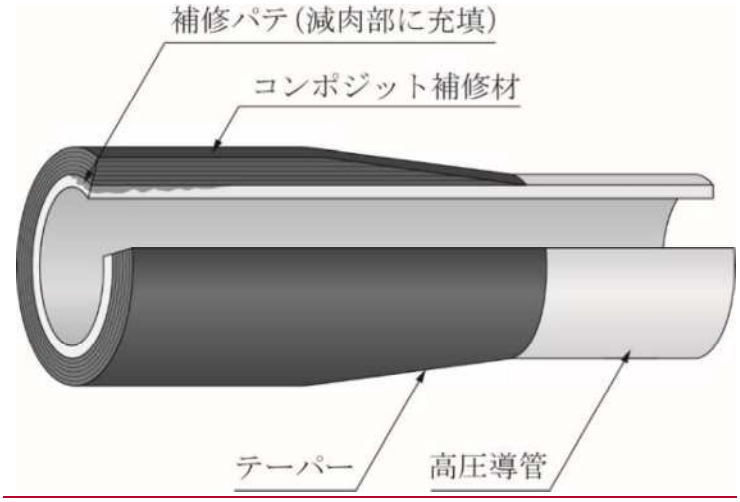
H Yamaguchi, M Mitsuya, Y Imai, M Ohata, ~~”~~ “Development of Earthquake Resistance Evaluation Method for Composite-Repaired Pipeline Considering Interface Delamination”, IPC2024-132803, (2024).

(b) 施工不良及び界面剥離を防止するため、コンポジット補修材を巻き付ける領域の鋼管表面には所定の素地調整処理を行い、端部には１：５より角度の浅いテーパーを設ける。

(c) 施工はコンポジット補修材メーカーの認定するライセンスを保有する認定施工員が、コンポジット補修材メーカーが定める施工手順により行う。施工中に、積層数を適切に管理すること。

(d) 施工後の昇圧は、所定の時間の乾燥により硬化を確認し、コンポジット補修材メーカーが推奨する施工後検査を実施した後に行う。また、昇圧は徐々に行い、漏えいのないことを確認する。

コメントの追加
コンポジット補修工法の概要などを追記



参図８－２　コンポジット補修の構造

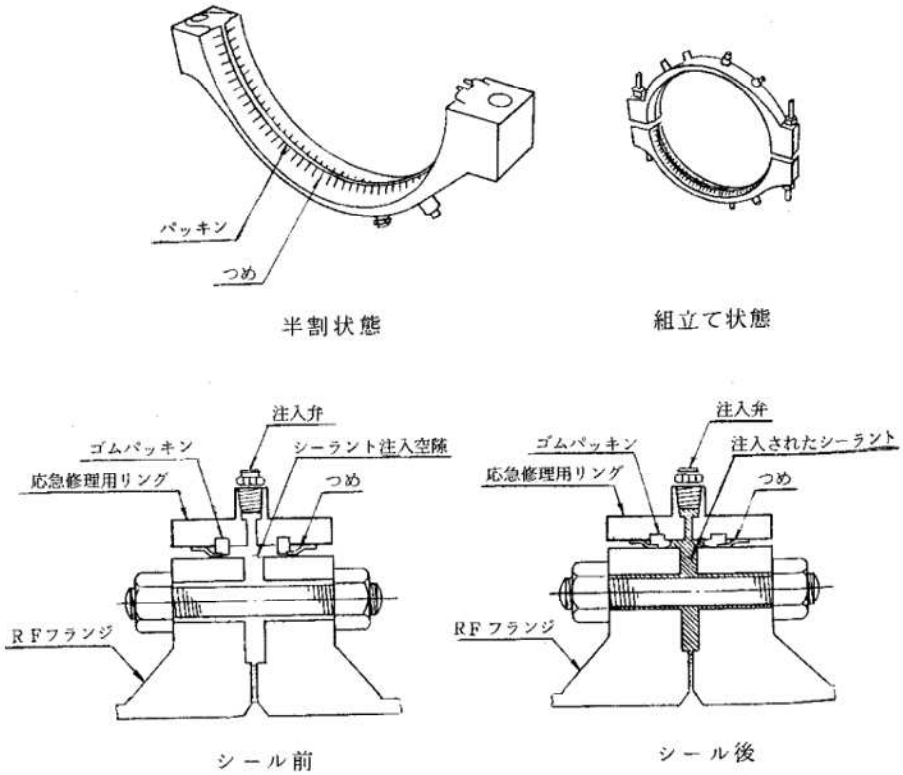
~~＊＊2.　応急修理用リング~~

＊＊3.　応急修理用リング

コメントの追加
番号修正

(1) 概　要

応急修理用リングは、フランジ部分からの漏えいが発生した際にフランジを取替えることなく修理するものである。これは、漏えいの発生しているフランジに、その外側から取付け、注入弁より注入されたシーラントがゴムパッキン、フランジ、応急修理用リングに囲まれた空間へ充てんされることにより、漏えい部、ボルト穴等をふさぎ、漏えいを防止する構造となっている。構造及びシール機構について参図８－~~2~~3に示す。



参図８－~~2~~3　応急修理用リングの構造とシール機構

コメントの追加
番号修正

(2) 概略仕様

標準品は口径1/2～24インチ、ANSI　クラス150～600である。なお、JIS規格のものもある。

(3) 施工上の留意点

(a) 口径の大きいものについては重量が大きいため、レッカー等によるつり降ろしが必要となる。

(b) シーラントの注入の際は、フランジ全体に行きわたるよう均一に注入する。

(c) 設置後は昇圧を徐々に行い、漏えいのないことを確認する。

8.6 修理・復旧

(1) 高圧導管等の漏えい及び損傷は、発生箇所、形態等に応じた適切な方法により修理する*1。
(2) 修理した箇所は、発泡液等を用い、通ずるガスの圧力で漏えいのないことを確認した後、復旧する*2。
(3) 高圧整圧器等の故障等は、その状況に応じて分解点検、部品交換等の修理･復旧を行う*3。

【関連条項】

法第64条（保安規程）
施行規則第92条・第93条（保安規程）
通達７資公部第239号（一般ガス事業の用に供するガス工作物の工事、維持及び運用に関する保安を確保するための保安規程に係る関係通達の整備に関する通達について）
通達元資公部第665号（ガス漏えい爆発事故の再発防止について）
道路法第32条（道路の占用の許可）
道路交通法第39条～第41条（緊急自動車の通行区分等他）
道路交通法第77条（道路の使用の許可）
道路交通法第85条（第一種免許）

【解　説】

＊1.　高圧導管等の漏えい等は、発生箇所及びその形態により、損傷~~当該~~部の健全性を評価し、適切な方法で修理する。損傷部の健全性の評価および修理の要否の判断は、附属書３「損傷に対する供用適性の評価手法」に基づき行うことができる。修理が不要と評価された場合は、露出させた鋼面に適切な防食措置を施して、供用を継続する。

主な修理方法について解表８－１に示す。

コメントの追加
減肉補修基準の導入により、附属書３に基づき評価することを追記。

コメントの追加
評価後の取扱いについて、ユーザーに喚起する記載を追記。

解表８－１　高圧導管等の主な修理方法

発生箇所・形態		修理方法
管体	貫通損傷	管体を切断し取替える。
	貫通に至らない損傷	管体を切断し取替える。 ただし、建設機械等により局部的に生じたすり傷等軽度な損傷の場合で、かつガス輸送・供給上導管を切断し取替えることが困難な場合で切断して取替える必要が無いと判断できる場合にあっては、肉盛溶接工法**1、又は溶接スリーブ工法**2を適用できる。なお、適用にあたっては、耐震性及び溶接部の検査に十分な確認を必要とする。

高圧整圧器等、バルブ及びフランジのシール部からの漏えい、損傷	(a) ボルト等の増締を行う。 (b) ガスケット類の取替を行う。 (c) 損傷の状況によっては、フランジ部を切断し取替える。

肉盛溶接工法及び溶接スリーブ工法は、溶接時の安全性から、溶接部の導管管厚が７㎜以上の場合に適用できる。適用にあたっては、以下の要件を満足しなければならない。

(1) あらかじめ確認された溶接施工方法によること。

(2) 溶接施工要領書及び検査要領書をあらかじめ定めておくこと。特に、以下の点については、溶接時の安全性及び溶接部の品質を確保するため重要であるので、導管の材質、ガスの圧力・流量を考慮した溶接施工法確認試験等により十分評価した上で、具体的に規定しておく必要がある。

(a) 溶接入熱条件（電圧、電流、運棒速度）及びそれらの管理方法

(b) 予熱又は後熱の方法及びそれらの管理方法

なお、肉盛溶接工法については、特に、後熱時の強度低下、後熱後の材質変化の可能性があるので、厳格な作業管理が必要である。

(c) 溶接部の放射線透過試験及び超音波探傷試験の方法

(3) 施工に際しては可能な限り減圧して行うとともに、あらかじめ技量確認試験を実施した溶接士によって行う。溶接時の安全性及び溶接部の品質に関する試験並びに調査結果、溶接施工要領書及び検査要領書の例を肉盛溶接工法については付録３－17、溶接スリーブ工法については付録３－18に示す。

＊2.(1) 修理後は通常の使用状態に復旧させる。復旧時の留意点については、（工事編）4.5.9「ガス開通」による。

(2) 修理した箇所は、通ずるガスの圧力で発泡液又はガス検知器により漏えいのないことを確認する。管体を切断し、取替えた場合の試験・検査方法については、（工事編）第７章「試験・検査」による。

(3) 高圧導管等のガスの輸送・供給を停止した場合の復旧方法等については、供給管理部門、製造管理部門等と供給・製造上の調整を行い供給を再開する。

＊3. 高圧整圧器等の修理にあたって整圧器の運転操作を行う場合は、保安規程に基づき定められた「運転操作要領」に従って操作を行う。

【参　考】

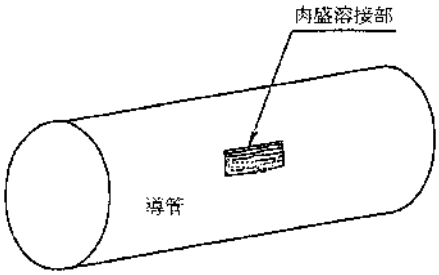
＊＊1. 肉盛溶接工法

(1) 概 要

肉盛溶接工法は、軽微な腐食、傷等により、導管の管厚がガス事業法に規定する管厚を下回っている場合に、損傷~~当該~~部の導管を取替えることなく、ガス供給を継続しながら恒久修理を行うものである。

本工法は、参図８－３に示すとおり、導管の傷部をグラインダーで除去、整形し、肉盛溶接を行うものである。

コメントの追加
「当該部」
⇒「損傷部」
用語の整合



参図８－３　肉盛溶接工法の概要

(2) 施工条件及び留意点

(a) 修理対象導管の肉盛溶接予定部の検査

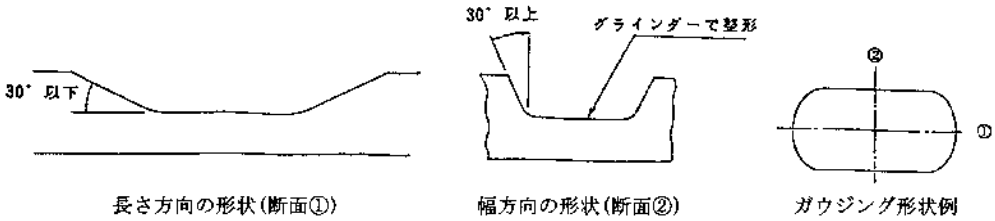
肉盛溶接予定部分の導管管厚が７㎜以上であること、また溶接予定位置において、ラミネーションが無いことを検査する。

(b) 肉盛溶接

(i) 肉盛溶接深さが5㎜未満、長さが60㎜以上150㎜以下の場合に行う。

(ii) 傷は、グラインダー等で参図８－４に示すような形状に整形し、底面を滑らかにする。溶接始終端となる部分は、図に示すように傾斜を小さくする。

(iii) ガウジングの幅は50㎜以下とする。



参図８－４　ガウジング形状の例

(iv) 溶接は、低水素系溶接棒による被覆アーク溶接で行い、定められた入熱条件となるように管理する。

(v) ガス供給を継続しながら溶接を行う場合は、当該溶接部を所定の温度に後熱する。ただし、十分な施工確認試験を実施することを前提とする。

(vi) 余盛はグラインダーにて滑らかに整形する。

(c) 溶接部の検査

(i) 肉盛溶接部は、放射線透過試験、超音波探傷試験及び磁粉探傷試験を行う。

(ii) 各々の判定基準は、放射線透過試験についてはJIS Z 3104による~~2~~２類以上、超音波探傷試験についてはJIS Z 3060による最大エコー高さ（M検出レベルの場合）がM線を越えるものを評価対象とし、割れがないこととする。また、磁粉模様の分類についてはJIS Z 2320-1により、有害なきずがないこととする。

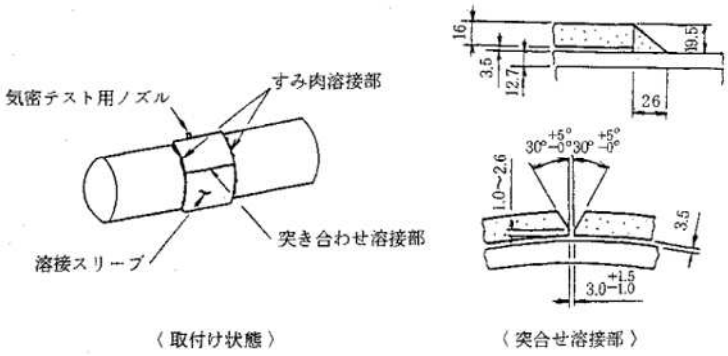
(d) 気密試験等

気密試験は通ずるガスの圧力にて、溶接部からの漏えいの無いことを発泡液等で確認する方法による。

＊＊2. 溶接スリーブ工法

(1) 概　要

溶接スリーブ工法は、未貫通でとどまっている微小な腐食、傷等により、導管の管厚がガス事業法に規定する管厚を下回っている場合に、導管の取替えを行うことなく、ガス供給を継続しながら恒久修理を行うものであり、諸外国で使用されている例が多い。本工法は参図８－５に示すとおり、導管の傷部をカバーする長さの２つ割り鋼製スリーブを高圧導管に取り付け、突合せ溶接及びすみ肉溶接を行うものである。



参図８－５　溶接スリーブ工法の概要（ただし、溶接部詳細は口径600Aの例）

(2) 溶接スリーブの概略仕様

(a) 材　質……API 5L X52相当以下とする。一般的には修理対象導管と同じ材質を用いる。

(b) 板　厚……法に基づく板厚を満足するとともに、内圧による周方向応力の降伏点に対する割合が、修理対象導管と同レベル以下となるように設定する。

(c) 内　径……修理対象導管の外径＋７mm程度とする。

(d) 長　さ……１ｍを標準とする。

(3) 施工条件及び留意点

(a) 修理対象導管のすみ肉溶接予定部の検査

すみ肉溶接予定部分の導管管厚が７mm以上であること、また溶接予定位置において深さ３mm未満にラミネーションがないことを検査する。

(b) すみ肉溶接

修理対象導管の材質がAPI 5L X52相当以上の場合は以下による。

(i) 溶接はCO_2-Arをシールドガスとした半自動溶接法により、定められた入熱条件となるよう管理し、片側ずつ行う。

(ii) ガス供給を継続しながら溶接を行う場合は、当該溶接部を所定の温度に予熱し

行う。

(c) 溶接部検査

（i）突合せ溶接部及びすみ肉溶接部とも放射線透過試験及び超音波探傷試験を行う。

（ii）各々の判定基準は放射線透過試験についてはJIS Z 3104による２類以上、超音波探傷試験についてはJIS Z 3060による最大エコー高さ（M検出レベルの場合）がM線を越えるものを評価対象とし、割れがないこととする。

(d) 気密試験等

（i）気密試験は、使用圧力と同等の圧力を試験圧力とし、溶接スリーブのテストノズル（15㎜φ）から不活性ガスを圧入して溶接部からの漏えいが無いことを発泡液等で確認する方法による。

（ii）気密試験終了後、テストノズルにプラグを挿入し、すみ肉溶接を行う。なお、すみ肉溶接の初層及び最終層終了後の浸透探傷試験等により品質確認を行う。

「高圧導管指針」本編（2022年3月発行）
新規追加（2024年12月）
附属書３ 損傷に対する供用適性の評価手法

附属書３　損傷に対する供用適性の評価手法

1. 一般

本附属書は、外面減肉*1が見つかった際の、供用適性の有無（補修等を行わずにそのまま運用に供しうるか）を判断するための評価手法を示す*2。

【解　説】

＊１　高圧導管の損傷としては様々な形態が考えられるが、ここでは、鋭い割れや損傷部周辺のデント（外部からの押し込みにより管本体が本来の形状から局所的に変形した状態）を伴わない減肉のみを対象とする。減肉部に鋭い割れや硬化層や腐食酸化層が確認された場合は、除去し滑らかな形状にして、本附属書を適用できる状態にする。

＊２　本附属書で規定する供用適性の評価手法は、埋設された高圧導管を対象とする。架管や共同溝等に設置される管であって埋設されていない高圧導管を対象とした供用適性の評価は、日本ガス協会「容器・配管の腐食及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針」を参照のこと。

2. 基本的な考え方

想定される各外力について、設計時と同等の性能要件を満足する場合には、供用適性を有すると評価する*1*2。

【解　説】

＊１　設計時に用いられる各種評価式は減肉等が存在しない状況を前提として構築されているものであり、幾何形状が異なる減肉部に対してそのまま適用することはできない場合がある。そのため、本附属書は、減肉部に特化した評価手法を示すものである。

＊２　設計時の性能要件を解表２－１に示す。維持管理段階において求める性能要件は設計時と同等とする。

解表２－１　想定される荷重に対して求められる性能要件

<table>
<tr><th colspan="2">想定される荷重</th><th>求められる性能要件</th></tr>
<tr><td colspan="2">内圧</td><td rowspan="2">発生応力は弾性範囲内である。</td></tr>
<tr><td colspan="2">上載荷重・路面荷重による土圧</td></tr>
<tr><td rowspan="2">地震動</td><td>レベル１</td><td>被害がなく、修理することなく運転に支障がない。</td></tr>
<tr><td>レベル２</td><td rowspan="2">変形は生じるが、漏えいは生じない。</td></tr>
<tr><td colspan="2">地盤液状化</td></tr>
</table>

3. 用語の定義

本附属書で使用する主な用語の定義は、次による。

(1) 供用適性（FFS: Fitness-For-Service）
減肉を有するなど設計時とは異なる状態にある設備が、補修等を行わずにそのまま供用を継続するに適した状態にあること。

(2) 減肉評価
検査によって発見された損傷を、一様な全面減肉、または局所的な矩形減肉にみなして継続供用可否の判定を行う方法。

(3) 残存強度係数（Remaining Strength Factor）
減肉を有する設備の極限荷重と減肉の無い設備の極限荷重の比で定義されるもので、減肉を有する設備における強度の残存度合い。

(4) 運用上限圧力
本附属書の評価手法により求められる、高圧導管運用時の上限圧力。ガス工作物技術基準の解釈例における最高使用圧力以下、つまり設計圧力以下の値となる。

4. 引用規格

次に掲げる規格は，この規格に引用されることによって，この規格の規定の一部を構成する。なお、引用規格はその最新版を（追補を含む。）を適用しても良い。

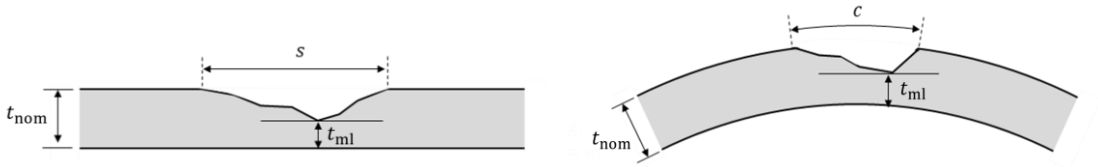
API 579-1/ASME FFS-1(2021)
JGA 指 109-20「容器・配管の腐食及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針」
JGA 指 206-20「高圧ガス導管耐震設計指針」
JGA 指 207-16「高圧ガス導管液状化耐震設計指針」

5. 減肉寸法の設定方法

減肉寸法の設定方法*1を下記(1)及び(2)に示す。

(1) API 579-1/ASME FFS-1 の Part5 Assessment of local metal loss の Level 1 Assessment により減肉寸法を設定する。

具体的には、図５－１に示すように、減肉領域の残厚（最薄部の値）t_{ml}、軸方向減肉長さs及び周方向減肉長さcを設定する。



(a)　減肉領域の軸方向断面　　(b)　減肉領域の周方向断面

図５－１　減肉形状のモデル化の例

(2) 有限要素解析を用いた詳細評価を行う場合は、API 579-1/ASME FFS-1 の Part5 Assessment of local metal loss の Level 3 Assessment により減肉部の残厚プロファイルを減肉形状・寸法として直接設定してもよい*2。

【解　説】

＊１　鋭い割れや硬化層や腐食酸化層などを除去し滑らかな形状にした場合は、滑らかな形状に加工した後の減肉寸法を設定する。

＊２　上記(1)の方法よりも減肉形状及び寸法を詳細に評価するため、より合理的な評価結果が得られる。

6. 内圧に対する評価

内圧についての性能要件を満足する例を下記(1)～(3)に示す。

(1) 減肉部の残厚が解釈例第 41 条のロ式を満足する場合*1

$$t_{\mathrm{ml}} \geq \frac{PD_{\mathrm{o}}}{2\sigma_{\mathrm{a}} + 0.8P} \qquad \text{（式６－１）}$$

t_{ml}：減肉領域の残厚（最薄部の値）（mm）

P：運用上限圧力（MPa）

D_{o}：管外径（mm）

σ_{a}：材料の許容引張応力（MPa）

(2) 簡易評価として、API 579-1/ASME FFS-1 の Part5 Assessment of local metal loss の Level 1 Assessment により供用適性が確認された場合*2*3

具体的には、下記の（式６－２）を満足する場合に供用適性ありと判定される。（式６－２）を満足しない場合には、（式６－３）により供用適性の有無を判定することができる*4*5*6。

$$RSF = \frac{R_{\mathrm{t}}}{1 - \frac{1}{M_{\mathrm{t}}}(1 - R_{\mathrm{t}})} \geq RSF_{\mathrm{a}} \qquad \text{（式６－２）}$$

RSF：内圧に対する残存強度係数

R_{t}：残存肉厚比

M_{t}：フォーリアス係数

RSF_{a}：許容残存強度係数 で 0.9 とする。

$$P \leq \frac{2t_{\mathrm{nom}}\sigma_{\mathrm{a}}}{D_o - 0.8t_{\mathrm{nom}}} \cdot \frac{RSF}{RSF_{\mathrm{a}}} \qquad \text{（式６－３）}$$

t_{nom}：非減肉部の管厚（mm）

(3) 詳細評価として、API 579-1/ASME FFS-1 の Part5 Assessment of local metal loss の Level 3 Assessment により、供用適性が確認された場合*7

【解　説】

＊１　減肉部の残厚が、設計時の要求管厚を下回らない場合には、その減肉は許容することができる。なお、運用上限圧力を低減させることで（式６－１）を満足させても良い。

＊２　API 579-1/ASME FFS-1 の Part5 Assessment of local metal loss は、設計時の許容応力を基準に合否判定を行う評価手法である。一般に、設計時の許容応力は材料の弾性限より十分小さな値が用いられるため、この評価手法を用いることで、内圧に対する性能要件で

ある「発生応力が弾性範囲内に収まること」を満足する。

＊３ API 579-1/ASME FFS-1内のPart5 Assessment of local metal lossのLevel 1 Assessmentでは、簡易計算による評価手法として、（式６－２）と（式６－３）に示す二段階の評価手法が明記されている。（式６－２）は、内圧に対する残存強度係数RSFが許容残存強度係数RSF_{a}以上であれば、継続使用可能と判定する。ここで、RSFは、減肉を有する場合の強度の残存度合いを表し、減肉の大きさ・口径・管厚といった幾何寸法から求められる。（式６－３）は、RSFがRSF_{a}=0.9を下回る場合に適用される。残存強度の低下度合いに応じて運用上限圧力Pを低減させる場合の供用適性を評価することができる。

＊４ API 579-1/ASME FFS-1において、（式６－２）と（式６－３）に示す評価手法は、直管部に限らず、曲管部への適用が認められている。

＊５ （式６－３）により運用上限圧力Pを求める際には、設計時の要求管厚ではなく非減肉部の管厚t_{nom}を用いる。そのため、設計時の要求管厚よりも非減肉部の管厚が大きい場合には、（式６－３）により得られる運用上限圧力Pが、設計時の最高使用圧力より大きな値となる場合がある。このような場合、運用上限圧力Pは、設計時の最高使用圧力とする。

＊６（式６－２）や（式６－３）を用いるにあたって必要となる情報を示す。

$$R_{\mathrm{t}} = \frac{t_{\mathrm{ml}}}{t_{\mathrm{nom}}} \qquad \text{（解式６－１）}$$

$$\begin{aligned} M_{\mathrm{t}} = {} & 1.0010 - 0.014195\lambda_{\mathrm{s}} + 0.29090{\lambda_{\mathrm{s}}}^{2} - 0.096420{\lambda_{\mathrm{s}}}^{3} \\ & +0.020890{\lambda_{\mathrm{s}}}^{4} - 0.0030540{\lambda_{\mathrm{s}}}^{5} + 2.9570(10^{-4}){\lambda_{\mathrm{s}}}^{6} \\ & -1.8462(10^{-5}){\lambda_{\mathrm{s}}}^{7} + 7.1553(10^{-7}){\lambda_{\mathrm{s}}}^{8} - 1.5631(10^{-8}){\lambda_{\mathrm{s}}}^{9} \\ & +1.4656(10^{-10}){\lambda_{\mathrm{s}}}^{10} \end{aligned} \qquad \text{（解式６－２）}$$

$$\lambda_{\mathrm{s}} = \frac{1.285s}{\sqrt{(D_{\mathrm{o}} - 2t_{\mathrm{nom}})t_{\mathrm{nom}}}} \qquad \text{（解式６－３）}$$

なお、$\lambda_{\mathrm{s}} > 20$の場合は、$\lambda_{\mathrm{s}} = 20$として式（解式６－２）により$M_{\mathrm{t}}$を求める。

λ_{s}：シェルパラメータ

s：減肉領域の軸方向長さ（㎜）

ただし、（式６－２）や（式６－３）といった残存強度係数RSFを用いた評価を行う場合には、以下の条件を満足すること。

$$R_{\mathrm{t}} \geq 0.2 \qquad \text{（解式６－４）}$$

$$t_{\mathrm{ml}} \geq 1.3\mathrm{mm} \qquad \text{（解式６－５）}$$

$$L_{\mathrm{msd}} \geq 1.8\sqrt{D_{\mathrm{o}}t_{\mathrm{nom}}} \qquad \text{（解式６－６）}$$

L_{msd}：欠陥の端部から構造不連続部までの長さ（㎜）

$$\frac{g_{\mathrm{r}}}{(1-R_{\mathrm{t}})t_{\mathrm{nom}}} \geq 0.5$$ （解式６－７）

g_{r}：減肉断面の曲率半径（㎜）

$$c \leq 2s$$ （解式６－８）

c：減肉領域の周方向長さ（㎜）

＊７　Level 3 Assessment は、有限要素解析等を用いた詳細な数値解析による判定を行う。上記（２）の方法よりも詳細に評価するため、より合理的な評価結果が得られる。

7. 上載荷重及び路面荷重による土圧に対する評価

上載荷重及び路面荷重による土圧についての性能要件を満足する例を下記(1)～(3)に示す。

(1) 減肉部の残厚が解釈例第 41 条のイ式を満足する場合*[1]

$$t_{\mathrm{ml}} \geq \sqrt{\frac{2.5(K_{\mathrm{f}}W_{\mathrm{f}} + K_{\mathrm{t}}W_{\mathrm{t}})}{\sigma}}D_{\mathrm{o}} \qquad \text{（式７－１）}$$

t_{ml}：減肉部の残厚（最薄部の値）（mm）
K_{f}：係数 （鋼管の場合、$K_{\mathrm{f}} = 0.198$）
W_{f}：上載荷重（MPa）
K_{t}：係数 （鋼管の場合、$K_{\mathrm{t}} = 0.114$）
W_{t}：路面荷重による土圧（MPa）
σ：材料の引張強さであって、日本産業規格で定められた値又は引張試験を行って求めた値（MPa）
D_{o}：管外径（mm）

(2) 下記の（式７－２）を満足する場合に供用適性ありと判定される*[2]。（式７－２）を満足しない場合には、（式７－３）により供用適性の有無を判定することができる*[3]。なお、（式７－２）と（式７－３）はいずれも埋設深さ（土被り）が 2.4 m以上の場合に用いることができる*[4]。

$$RSF_{\mathrm{W_f}} = \frac{R_{\mathrm{t}}}{1 - \frac{1}{M_{\mathrm{t}}}(1 - R_{\mathrm{t}})} \geq RSF_{\mathrm{a}} \qquad \text{（式７－２）}$$

$RSF_{\mathrm{W_f}}$：上載荷重に対する残存強度係数
R_{t}：残存肉厚比
M_{t}：フォーリアス係数
RSF_{a}：許容残存強度係数 で 0.9 とする。

$$W_{\mathrm{f}} \leq \frac{1}{K_{\mathrm{f}}} \cdot \frac{\sigma}{2.5} \cdot \left(\frac{t_{\mathrm{nom}}}{D_{\mathrm{o}}}\right)^2 \cdot \frac{RSF_{\mathrm{W_f}}}{RSF_{\mathrm{a}}} \qquad \text{（式７－３）}$$

t_{nom}：非減肉部の管厚（mm）

(3) 有限要素解析等を用いた詳細評価により、上載荷重及び路面荷重による土圧に対する性能要件を満たすことが確認された場合*[5]

【解　説】

＊１　減肉部の残厚が、設計時の要求管厚を下回らない場合には、その減肉は許容することができる。以下、（式７－１）を用いるにあたって必要となる情報を示す。

$$W_{\mathrm{f}} = 0.001\gamma h \qquad \text{（解式７－１）}$$

$$W_{\mathrm{t}} = \begin{cases} \dfrac{3Q}{2\pi h^2}\left\{1+\left(\dfrac{h}{\sqrt{h^2+X^2}}\right)^5\right\}\times 10^{-6} & (h < 2.4\mathrm{m}) \\ \dfrac{3Q}{2\pi 2.4^2}\left\{1+\left(\dfrac{2.4}{\sqrt{2.4^2+X^2}}\right)^5\right\}\times 10^{-6} = 0.0163 & (h \geq 2.4\mathrm{m}) \end{cases} \qquad \text{（解式７－２）}$$

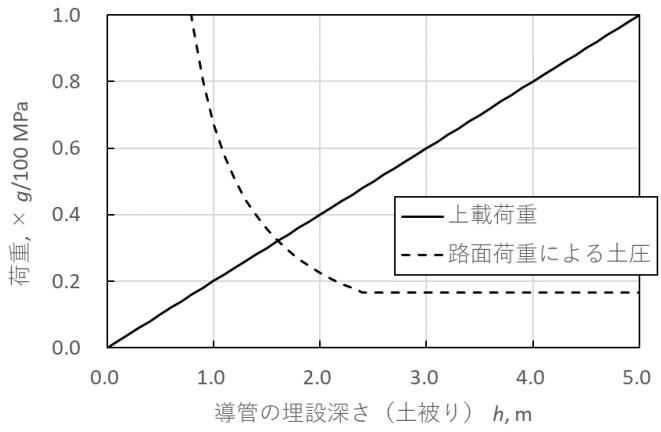
h：管の埋設深さ（土被り）（m）

γ：土の単位体積重量（kN/m³）

一般的に$2g$(kN/m³)とすることができる。ただし、確実な資料がある場合には、上載荷重の平均値(kN/m³)を用いることができる。

Q：20t 車の後輪荷重で、8,000g(N)とし、衝撃荷重 1.5 をみて 12,000g(N)とする。

X：２台同時走行のときの後輪間隔で 1m とする。



解図７－１　上載荷重および路面荷重による土圧

＊２　（式７－２）に示す上載荷重に対する残存強度係数$RSF_{\mathrm{W_f}}$の求め方は、（式６－２）に示す内圧に対する残存強度係数RSFの求め方と同一である。上載荷重のみを対象とした減肉評価では、内圧に対する残存強度係数RSFを用いることで保守的な評価結果が得られる（参考資料２を参照）。ただし、（式７－２）や（式７－３）を用いる場合は、以下の条件を満足すること。

$$s/(\pi D_{\mathrm{o}}) \leq 0.3 \qquad \text{（解式７－８）}$$

$$c/(\pi D_{\mathrm{o}}) \leq 0.3 \qquad \text{（解式７－９）}$$

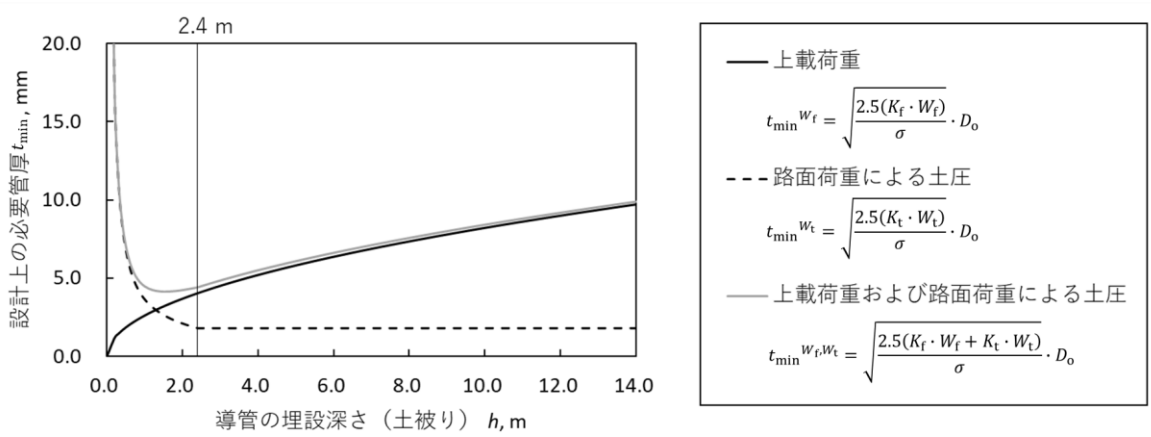
$$(t_{\mathrm{nom}} - t_{\mathrm{ml}})/t_{\mathrm{nom}} \leq 0.3 \qquad \text{（解式７－１０）}$$

s：減肉領域の軸方向長さ（mm）

c：減肉領域の周方向長さ（mm）

＊３　（式７－３）では、上載荷重W_{f}に対する判定の入力条件として、非減肉部の管厚t_{nom}を用いている。設計時の要求管厚よりも非減肉部の管厚t_{nom}が大きい場合には、その裕度が評価結果に反映される

＊４　埋設深さ（土被り）が 2.4 m 以上の場合、上載荷重と路面荷重による土圧の２つの内、前者が荷重として支配的となるため、上載荷重のみを対象とした減肉評価を行うことができる。設計段階における必要管厚の計算例を解図 7-2 に示す。埋設深さ（土被り）が 2.4 m 以上においては、上載荷重のみを考慮した場合と上載荷重と路面荷重による土圧の両方を考慮した場合とで設計上の必要管厚はほぼ変わらない、すなわち、発生応力は上載荷重が支配的になるため、上載荷重のみを考慮した評価を行うことができる。



解図７－２　設計上の必要管厚の比較（外直径D_oが 610.0 mm、材料の引張強さσが 535 MPa の場合）

なお、埋設深さ（土被り）が 2.4 m 未満については、上載荷重と路面荷重による土圧の両方を考慮する必要があるため、(式７－１）による評価を基本とする。通常の埋設深さ（概ね 1～2 m 程度）であれば、一般に内圧による必要管厚の方が大きくなるため、上載荷重と路面荷重による土圧について（式７－２）や（式７－３）のような局部減肉に特化した評価は必要とはならず、(式７－１）による評価で十分である。

＊５　具体的な評価手法の例として参考資料 2 が挙げられる。有限要素解析等を用いた詳細な数値解析による判定を行うことから、上記(２)の方法よりも合理的な評価結果が得られる。

8. 地震動に対する評価

地震動についての性能要件を満足する例を、直管については下記(1)あるいは(3)に、曲管については(2)あるいは(3)に示す。

(1)下記の（式８－１）及び式（式８－２）のいずれも満足する場合*1*2

$$\sigma_{\mathrm{apply}} < \sigma_{cr} \qquad \text{（式８－１）}$$

σ_{apply}：圧縮負荷時に減肉部へ作用する軸応力（MPa）

σ_{cr}：減肉部の座屈開始応力（MPa）

$$M_{\mathrm{apply}} < M_{\mathrm{cr}} \qquad \text{（式８－２）}$$

M_{apply}：圧縮負荷時に減肉部へ作用する曲げモーメント（N・mm）

M_{cr}：減肉部の全塑性モーメント（N・mm）

(2) 設計指針の評価式により曲管の耐震性が確認された場合*3

日本ガス協会「高圧ガス導管耐震設計指針」の「5.6 異形管部の耐震設計」に基づく曲管ひずみの算定を行い、得られた値が 3%以下の場合を耐震性ありとする。ただし、算定の際に用いる曲管の管厚としては、減肉部の残厚t_{ml}を用いること。

(3) 有限要素解析等を用いた詳細評価により、地震動に対する性能要件を満たすことが確認された場合*4

【解　説】

＊１　日本ガス協会「高圧ガス導管耐震設計指針」に規定される繰返し荷重を受けても、減肉管が漏えいに至らない減肉寸法を定式化したものである。減肉部を有する直管が地震動を受けると、減肉部で局所的に座屈して、最終的に塑性崩壊に至る破壊モードと、減肉部が管内面側に局所的に曲げ変形して、最終的に低サイクル疲労破壊に至る破壊モードとの二つの破壊モードが発現する。そこで、評価式ではこれら両破壊モードに対して耐震性が確認できた場合にその減肉を許容する。詳細は参考文献[1]及び[2]を参照のこと。

以下、(式８－１)を用いるにあたって必要となる情報を示す。

$$\sigma_{\mathrm{apply}} = M_{\mathrm{s}}^{\mathrm{c}} \frac{F}{A_{\mathrm{m}} - A_{\mathrm{f}}} \qquad \text{（解式８－１）}$$

$$M_{\mathrm{s}}^{\mathrm{c}} = \frac{1 - \left(\frac{1}{M_{\mathrm{t}}^{\mathrm{c}}}\right)\left(\frac{t_{\mathrm{nom}} - t_{\mathrm{ml}}}{t_{\mathrm{nom}}}\right)}{1 - \left(\frac{t_{\mathrm{nom}} - t_{\mathrm{ml}}}{t_{\mathrm{nom}}}\right)} \qquad \text{（解式８－２）}$$

$$M_{\mathrm{t}}^{\mathrm{c}} = \frac{1.0 + 0.1401(\lambda_{\mathrm{c}})^2 + 0.002046(\lambda_{\mathrm{c}})^4}{1.0 + 0.09556(\lambda_{\mathrm{c}})^2 + 0.0005024(\lambda_{\mathrm{c}})^4} \qquad \text{（解式８－３）}$$

$$\lambda_{\mathrm{c}} = \frac{1.285c}{\sqrt{(D_{\mathrm{o}} - 2t_{\mathrm{nom}})t_{\mathrm{nom}}}}$$ （解式８－４）

$$F = \pi(D_{\mathrm{o}} - t_{\mathrm{nom}})t_{\mathrm{nom}} \cdot \sigma_{\mathrm{Y}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{\mathrm{R}}}{\varepsilon_{\mathrm{Y}}}\right)^{0.11}$$ （解式８－５）

$$\sigma_{\mathrm{cr}} = \sigma_{\mathrm{Y}} \cdot \left\{0.44 \cdot \frac{1}{\varepsilon_{\mathrm{Y}}} \cdot \frac{t_{\mathrm{ml}}}{D_o - 2(t_{\mathrm{nom}} - t_{\mathrm{ml}}) - t_{\mathrm{ml}}}\right\}^{0.11}$$ （解式８－６）

σ_{apply}：減肉領域の軸方向応力（MPa）

F：減肉領域へ作用する軸力（N）

A_{m}：減肉が無い場合の管断面積（mm^2）

A_{f}：管周方向断面における減肉部面積（mm^2）

$M_{\mathrm{s}}^{\mathrm{c}}$：貫通欠陥に対する減肉領域の周方向断面に基づいたフォーリアス係数

$M_{\mathrm{t}}^{\mathrm{c}}$：表面欠陥に対する減肉領域の周方向断面に基づいたフォーリアス係数

λ_{c}：減肉領域の周方向長さに対するパラメータ

σ_{Y}：規格最小降伏応力又は耐力（MPa）

ε_{R}：直管の地震時ひずみで、「高圧ガス導管耐震設計指針」の 5.5.1 による。

ε_{Y}：降伏ひずみで、JIS 材料の場合は$0.002 + \sigma_{\mathrm{Y}}/E$、API 材料の場合は 0.005 とする。

E：ヤング率（MPa）

以下、（式８－２）を用いるにあたって必要となる情報を示す。

$$M_{\mathrm{apply}} = e \cdot \left(\sigma_{\mathrm{apply}} \cdot t_{\mathrm{ml}} \cdot b\right)$$ （解式８－７）

$$e = e_{\mathrm{t}} + e_{\mathrm{d}}$$ （解式８－８）

$$e_{\mathrm{t}} = \frac{1}{2}(t_{\mathrm{nom}} - t_{\mathrm{ml}})$$ （解式８－９）

$$e_{\mathrm{d}} = \frac{M_0 {\lambda_{\mathrm{b}}}^2}{24EI_{\mathrm{ml}}}$$ （解式８－１０）

$$M_0 = \left(\sigma_{\mathrm{apply}} \cdot t_{\mathrm{ml}} \cdot b\right) \cdot e_{\mathrm{t}}$$ （解式８－１１）

$$\lambda_{\mathrm{b}} = 1.72\sqrt{\frac{\{D_{\mathrm{o}} - 2(t_{\mathrm{nom}} - t_{\mathrm{ml}}) - t_{\mathrm{ml}}\} \cdot t_{\mathrm{ml}}}{2}}$$ （解式８－１２）

$$M_{\mathrm{cr}} = \frac{1}{4}\sigma_{\mathrm{Y}} \cdot {t_{\mathrm{ml}}}^2 \cdot b$$ （解式８－１３）

e：偏心距離（mm）

e_{t}：非減肉領域の管厚と減肉領域の残存管厚との管厚差に起因した偏心距離（mm）

e_{d}：減肉領域の曲げに起因した偏心距離（mm）

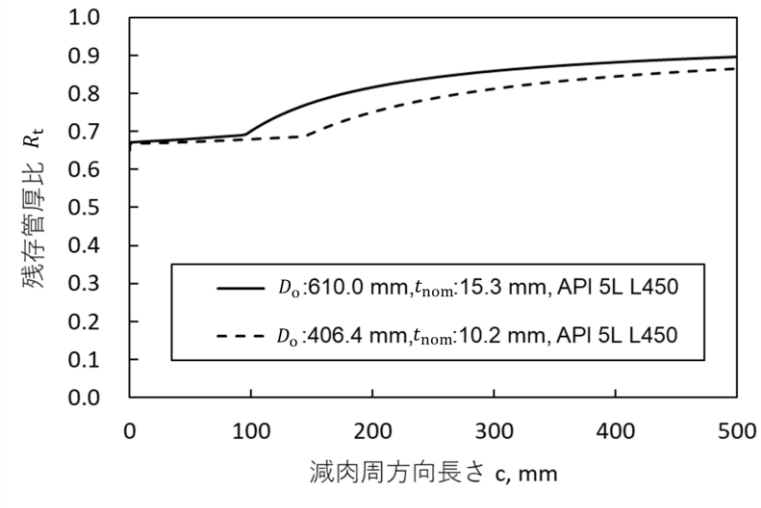
M_0：減肉領域の曲げによるたわみを考慮しない場合の曲げモーメント（N・mm）

λ_{b}：全面減肉を仮定した場合の鋼管の座屈半波長（mm）

b：管周方向の単位長さ＝１（mm）

I_{ml}：減肉部の断面二次モーメントで、$I = \frac{t_{\mathrm{ml}}{}^{3} \cdot b}{12}$（㎜^{4}）

＊２ （式８－１）及び（式８－２）を満足する許容減肉寸法の例を解図 8-1 に図示する。図は地震時ひずみε_{R}を 0.51%と設定した場合の例である。対象とする減肉のR_{t}が、曲線の上側にプロットされる場合に、その減肉は許容される。



解図８－１ 簡易評価式による評価結果の例（地震時ひずみε_Rを 0.51%と設定した場合）

＊３ 減肉している場合であっても、「高圧ガス導管耐震設計指針」の評価式が適用できることが確認されたことに基づく。詳細は参考資料 1 を参照のこと。ただし、有限要素解析により妥当性が確認されている減肉深さ 30%以下（残存肉厚比R_{t}が 0.7 以上）を適用範囲とする。

＊４ 有限要素解析を用いた評価手法の例として参考文献[1]及び[2]が挙げられる。有限要素解析等を用いた詳細な数値解析による判定を行うことから、上記（２）の方法よりも合理的な評価結果が得られる。

9. 地盤液状化に対する評価

地盤液状化についての性能要件を満足する場合の例を下記(1)～(2)に示す。

(1) 日本ガス協会「高圧ガス導管液状化耐震設計指針」に基づく液状化耐震設計を必要とする区間の判定を行い、液状化耐震設計区間の外に、評価対象の鋼管が埋設されている場合

(2) 有限要素解析等を用いた詳細評価により、地盤液状化に対する性能要件を満たすことが確認された場合*1

【解　説】

＊１　例えば、減肉部をモデル化した配管系の変形解析を日本ガス協会「高圧ガス導管液状化耐震設計指針」に従い実施し、得られたひずみが同指針の規定値以下（例えば、直管であれば、曲げ引張側では10%以下、曲げ圧縮側では30%以下）であれば、液状化耐震性ありと評価できる。評価例の一つとして、参考文献[3]があげられる。

10. 供用適性の有無の判定

減肉が以下(1)若しくは(2)を満足する場合は、供用適性を有すると判定する。いずれも満足しない場合は、供用適性が無いと判定する。

(1) 全面減肉評価として、(式６－１)及び(式７－１)を満足する場合

(2) (1)を満足しない場合であって、局部減肉評価として、全ての想定外力について、性能要件を満足する場合

【参考文献】

[1] S. Onuki, and M. Mitsuya, ″ Seismic Assessment Formula for a Buried Pipeline With Local Wall Thinning″, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 146, No. 1, PVT-23-1139, ASME (2024).

[2] M. Mitsuya, and H. Motohashi, ″Cyclic Deformation Behavior and Buckling of Pipeline with Local Metal Loss in Response to Axial Seismic Loading″, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 135, No. 6, PVT-12-1128, ASME (2012).

[3] T. Homma, S. Onuki, M. Mitsuya and Y. Imai, “Critical Strain in Carbon Steel Pipes With Local Wall Thinning Subjected to Large Bending in Soil Liquefaction-Induced Lateral Spreading”, 2024 ASME Pressure Vessels & Piping Conference,PVP2024-123580 (2024).

【参考資料】

1　減肉を有する場合の地震時の曲管のひずみ簡易算定結果と有限要素解析結果との比較

2　上載荷重に対する減肉評価への残存強度係数RSFの適用性

（2024年12月 附属書3 追加）

参考資料 1

減肉を有する場合の地震時の曲管のひずみ簡易算定結果と有限要素解析結果との比較

1. 目的

外面減肉を曲管部に有する場合の地震時の曲管のひずみの算定は、曲管の管厚として減肉部の残厚t_{ml}を用いた上で、日本ガス協会「高圧ガス導管耐震設計指針」の「5.6 異形管部の耐震設計」に基づいた簡易算定式にて行うこととする。この場合の簡易算定結果と有限要素解析結果を比較し、本簡易算定式の妥当性を有限要素解析により検証した。

2. 減肉を有する場合の地震時の曲管のひずみ簡易算定式

日本ガス協会「高圧ガス導管耐震設計指針」の「5.6 異形管部の耐震設計」では、減肉の無い管の地震時の曲管のひずみε_{B}の簡易算定式を、図 1 に示すように 90 度曲管に対して地震波が管軸に平行すなわち入射角 0 度で入射した場合を対象として導出している。この地震時の曲管のひずみε_{B}の簡易算定式は管と地盤の相対変位Δ及び曲管部の変換係数β_{B}を用いた以下の式(1)である。

$$\varepsilon_{\mathrm{B}} = \begin{cases} \beta_{\mathrm{B}} \cdot \Delta & (\text{if } \beta_{\mathrm{B}} \cdot \Delta \leq 1.27\varepsilon_{\mathrm{Y}}) \\ C_{\mathrm{B}} \cdot \beta_{\mathrm{B}} \cdot \Delta & (\text{if } \beta_{\mathrm{B}} \cdot \Delta > 1.27\varepsilon_{\mathrm{Y}}) \end{cases} \tag{1}$$

ここでC_{B}は全塑性域の曲管ひずみに対する修正係数で、鋼管が 600A 未満の場合は 2、600A 以上の場合は 1 である。

曲管部の変換係数β_{B}は以下の式(2)で表される。

$$\beta_{\mathrm{B}} = \frac{2i_{\mathrm{B}}A\bar{\lambda}^2 D\left|\left(5 + R\bar{\lambda}\right)b_1\right| + 4\bar{\lambda}^3 I\left|5(1 + \mathrm{b}_2) - b_1\right|}{10A + 5LI\bar{\lambda}^3(1 + b_2) + 10Ab_3} \tag{2}$$

ここで、

$$b_1 = -\frac{1+2R\bar{\lambda}+(\pi-2)nR^2\bar{\lambda}^2}{(1+R\bar{\lambda})\{2+\pi nR\bar{\lambda}+(4-\pi)nR^2\bar{\lambda}^2\}}$$

$$b_2 = \frac{1-2nR^2\bar{\lambda}^2-(4-\pi)nR^3\bar{\lambda}^3}{(1+R\bar{\lambda})\{2+\pi nR\bar{\lambda}+(4-\pi)nR^2\bar{\lambda}^2\}}$$

$$b_3 = nR^3\bar{\lambda}^3\left|\frac{\pi}{2} + \frac{\pi I_{\mathrm{B}}}{2nAR^2} + \left(1 - \frac{I_{\mathrm{B}}}{nAR^2}\right)b_1 + \left(\frac{2}{R\bar{\lambda}} + \frac{\pi}{2} + \frac{\pi I_{\mathrm{B}}}{2nAR^2}\right)b_2\right|$$

i_{B} ：曲管の曲げ荷重に対する応力指数で、$i_{\mathrm{B}} = \max\left(1.5, \frac{1.95}{h^{\frac{2}{3}}}\right)$

A ：管の断面積

$\bar{\lambda}$ ：$\sqrt[4]{\frac{K_2}{4EI}}$

K_2 ：単位長さ当たりの管軸直角方向の地盤ばね係数

E ：弾性係数

I ：管の断面二次モーメント

L ：地震動の見かけの波長
R ：曲率半径
n ：曲管のたわみ係数で、$n = \frac{1.65}{h}$
h ：パイプファクターで、$h = \frac{tR}{r^2}$
t ：管厚
r ：管平均半径で、$r = \frac{D-t}{2}$
D ：管の外径

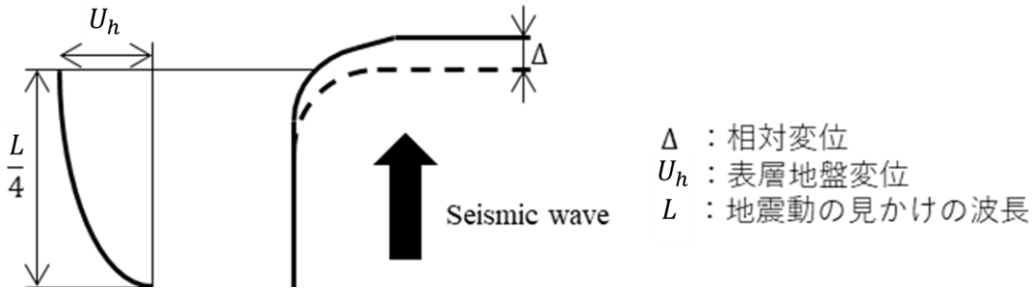


図 1 曲管部に作用する地盤変位分布

この減肉の無い管の地震時の曲管のひずみε_{B}簡易算定式をもとに、減肉部を有する曲管部の地震時ひずみ$\varepsilon_{\mathrm{B}}^{'}$ 簡易算定式を導出する。具体的には、曲管部のみが一様に減肉したものと仮定し、減肉の無い管の地震時の曲管のひずみε_{B}簡易算定式における曲管部の管厚を減肉部の残厚t_{ml}とする。この考え方に基づいた減肉部を有する曲管部の地震時ひずみ$\varepsilon_{\mathrm{B}}^{'}$ 簡易算定式を式(3)に示す。

$$\varepsilon_{\mathrm{B}}^{'} = \begin{cases} \beta_{\mathrm{B}}^{'} \cdot \Delta & \left(\mathrm{if}\ \beta_{\mathrm{B}}^{'} \cdot \Delta \leq 1.27\varepsilon_{\mathrm{Y}}\right) \\ C_{\mathrm{B}} \cdot \beta_{\mathrm{B}}^{'} \cdot \Delta & \left(\mathrm{if}\ \beta_{\mathrm{B}}^{'} \cdot \Delta > 1.27\varepsilon_{\mathrm{Y}}\right) \end{cases} \tag{3}$$

$\beta_{\mathrm{B}}^{'}$ は曲管部に減肉を有する場合の曲管部の変換係数であり、以下の式(4)で表される。

$$\beta_{\mathrm{B}}^{'} = \frac{2i_{\mathrm{B}}^{'} D^{'} \bar{\lambda}^2 A_{\mathrm{S}} I_{\mathrm{S}} \left|\left(5 + R\bar{\lambda}\right) b_1\right|}{I_{\mathrm{B}}\left(10A_{\mathrm{S}} + 5LI_{\mathrm{S}}\bar{\lambda}^3(1 + b_2) + 10A_{\mathrm{S}}b_3\right)} + \frac{4\lambda^3 A_{\mathrm{S}} I_{\mathrm{S}} \left|5(1 + \mathrm{b}_2) - b_1\right|}{A_{\mathrm{B}}\left(10A_{\mathrm{S}} + 5LI_{\mathrm{S}}\bar{\lambda}^3(1 + b_2) + 10A_{\mathrm{S}}b_3\right)} \tag{4}$$

ここで、

$$b_1 = -\frac{1 + 2R\bar{\lambda} + (\pi - 2)n^{'} R^2\bar{\lambda}^2}{(1 + R\bar{\lambda})\left\{2 + \pi n^{'} R\bar{\lambda} + (4 - \pi)n^{'} R^2\bar{\lambda}^2\right\}}$$

$$b_2 = \frac{1 - 2n^{'} R^2\bar{\lambda}^2 - (4 - \pi)n^{'} R^3\bar{\lambda}^3}{(1 + R\bar{\lambda})\left\{2 + \pi n^{'} R\bar{\lambda} + (4 - \pi)n^{'} R^2\bar{\lambda}^2\right\}}$$

$$b_3 = n^{'} R^3\bar{\lambda}^3 \left|\frac{\pi}{2} + \frac{\pi I_{\mathrm{B}}}{2n^{'} A_{\mathrm{B}}R^2} + \left(1 - \frac{I_{\mathrm{B}}}{n^{'} A_{\mathrm{B}}R^2}\right) b_1 + \left(\frac{2}{R\bar{\lambda}} + \frac{\pi}{2} + \frac{\pi I_{\mathrm{B}}}{2n^{'} A_{\mathrm{B}}R^2}\right) b_2\right|$$

$i_{\mathrm{B}}^{'}$ ：曲管の曲げ荷重に対する応力指数で、$i_{\mathrm{B}} = \max\left(1.5, \frac{1.95}{h^{'\frac{2}{3}}}\right)$

A_{S} ：直管の断面積で、$\mathrm{A_S} = \frac{\pi}{4}(D^2 - (D - 2t_{\mathrm{nom}})^2)$

A_{B} ：曲管の断面積で、$\mathrm{A_B} = \frac{\pi}{4}(D^{\prime\ 2} - \left(D^{\prime} - 2t_{\mathrm{ml}}\right)^2)$

D ：直管の外径

t_{nom}：直管部の管厚

$D^{\prime}$ ：曲管の外径

t_{ml} ：曲管部の減肉部残厚

$\bar{\lambda}$ ：$\sqrt[4]{\frac{K_2}{4EI_{\mathrm{S}}}}$

K_2 ：直管部の単位長さ当たりの管軸直角方向の地盤ばね係数

I_{S} ：直管の断面二次モーメントで、$I_{\mathrm{S}} = \frac{\pi}{64}(D^4 - (D - 2t_{\mathrm{nom}})^4)$

I_{B} ：曲管の断面二次モーメントで、$I_{\mathrm{B}} = \frac{\pi}{64}(D^{\prime\ 4} - \left(D^{\prime} - 2t_{\mathrm{ml}}\right)^4)$

$n^{\prime}$ ：曲管のたわみ係数で、$n^{\prime} = \frac{1.65}{h^{\prime}}$

$h^{\prime}$ ：パイプファクターで、$h^{\prime} = \frac{t_{\mathrm{ml}}R}{r^{\prime\ 2}}$

$r^{\prime}$ ：曲管平均半径で、$r^{\prime} = \frac{D^{\prime} - t_{\mathrm{ml}}}{2}$

以上のように、直管部と曲管部を区別し、曲管部の管厚を減肉部の残厚t_{ml}として減肉部を有する曲管部ひずみ$\varepsilon_{\mathrm{B}}^{\prime}$ 簡易算定式を導出した。

3. 減肉を有する場合の地震時の曲管のひずみ簡易算定結果と有限要素解析結果との比較

減肉部を有する場合の地震時の曲管のひずみε_B' 簡易算定式を用いた算定結果と有限要素解析結果を比較し、本簡易算定式の妥当性を有限要素解析により検証した。

解析モデルを図 2 に、解析条件を表 1 に示す。解析には Abaqus ver 6.13 を使用した。90 度曲管とそれに接続する直管からなる配管系とし、一方の直管軸に沿って正弦波状の地震波が作用し、曲管部で最大相対変位が生じた場合を想定したモデルとした。解析モデルの要素はシェル要素とした。地盤変位は日本ガス協会「高圧ガス導管耐震設計指針」の「4.4 地盤拘束力」に則った地盤ばねを介して入力し、地震により管に作用する力を再現した。また、曲管部から 1/4 地震波長離れた位置を固定点とし、曲管部において表層地盤変位が最大となるとした。減肉は曲管部が一様に減肉したケース 1 と、ケース 1 において最大ひずみが発生した箇所に 100mm×100mm の局所矩形減肉が存在するケース 2 の 2 ケース実施した。いずれのケースにおいても減肉深さは管厚の 30%とした。曲管部減肉の代表例としてとして解析 No. B 300A の減肉部モデル図を図 3 に示す。全ての解析について地盤周期を 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.0, 2.0, 5.0 秒の 8 ケース解析し、減肉部最大ひずみが最大となる地盤周期について、減肉部を有する場合の地震時の曲管のひずみε_B' 簡易算定式を用いた算定結果と有限要素解析結果を比較した。

解析結果の代表例として、解析 No. B 300A、地盤周期 0.7 秒における曲管部周方向ひずみを図 4 に示す。また、全解析について各地盤周期における減肉部最大ひずみを図 5～9 に示す。いずれの条件においても地盤周期 0.7sec～1.0sec の範囲で減肉部最大軸方向ひずみまたは最大周方向ひずみが最大となることが確認された。この範囲において、いずれの条件においても有限要素解析結果は減肉部を有する場合の地震時の曲管のひずみε_B' 簡易算定式を用いた算定結果以下であることが確認された。

以上から、簡易算定式を用いた減肉部を有する曲管部の地震動に対する発生ひずみε_B' 算定結果は、有限要素解析結果に対して安全側評価が可能であることが確認された。

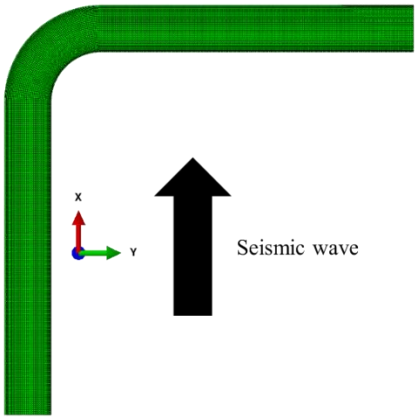


図 2 解析モデル（代表例として解析 No. B 300A 地盤周期 0.1 秒のケース）

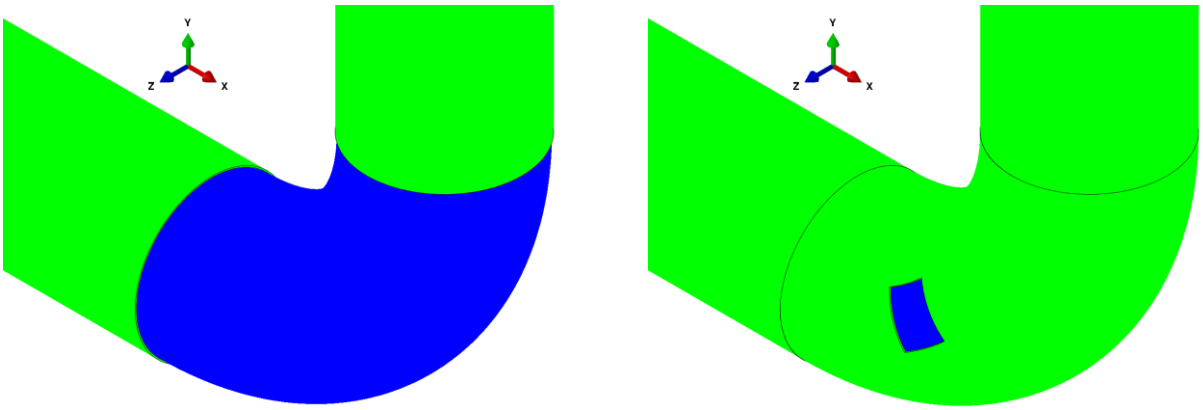
表 1 解析条件

解析 No.	減肉 ケース※	外形 D [mm]	非減肉部管厚 t_{nom} [mm]	減肉部残厚 t_{ml} [mm]	材料	降伏応力 σ_Y [N/mm²]	引張強さ σ_t [N/mm²]	曲率 R
A	1	165.2	7.1	4.97	STPG410	245	410	1.5D
	2	165.2	7.1	4.97	STPG410	245	410	1.5D
B	1	318.5	8.4	5.88	STPG410	245	410	1.5D
	2	318.5	8.4	5.88	STPG410	245	410	1.5D
C	1	406.1	11.9	8.33	X60	414	517	3.0D
	2	406.1	11.9	8.33	X60	414	517	3.0D
D	1	610.0	15.1	10.57	X65	448	531	1.5D
	2	610.0	15.1	10.57	X65	448	531	1.5D
E	1	610.0	15.1	10.57	X65	448	531	3.0D
	2	610.0	15.1	10.57	X65	448	531	3.0D

※減肉ケース 1：曲管部一様減肉

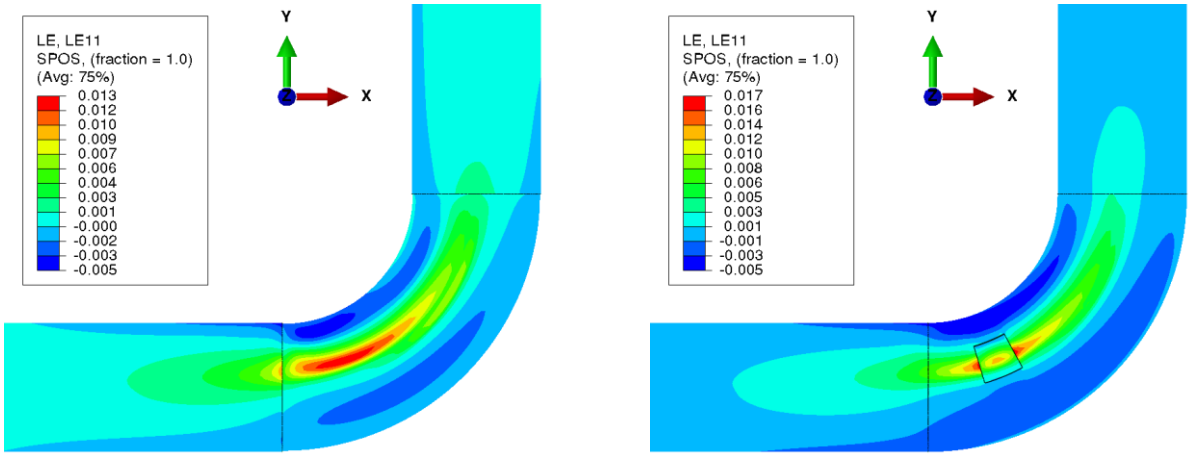
減肉ケース 2：ケース 1 において最大ひずみが発生した箇所に 100mm×100mm 局所矩形減肉

（局所矩形減肉部以外の曲管部管厚は直管部同様、非減肉部の管厚t_{nom}）



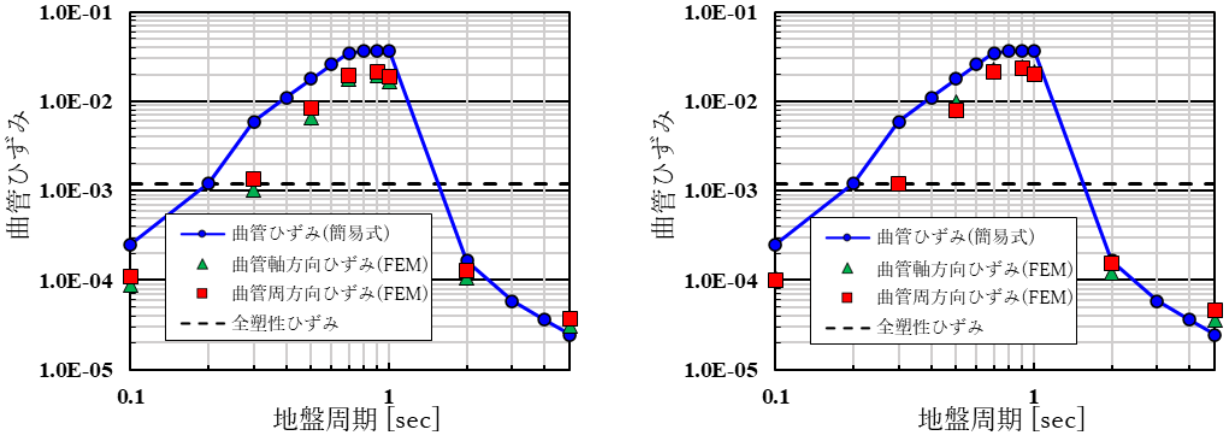
減肉ケース 1　一様減肉　　減肉ケース 2　局所矩形減肉

図 3 減肉部モデル（代表例として解析 No. B 300A のケース）



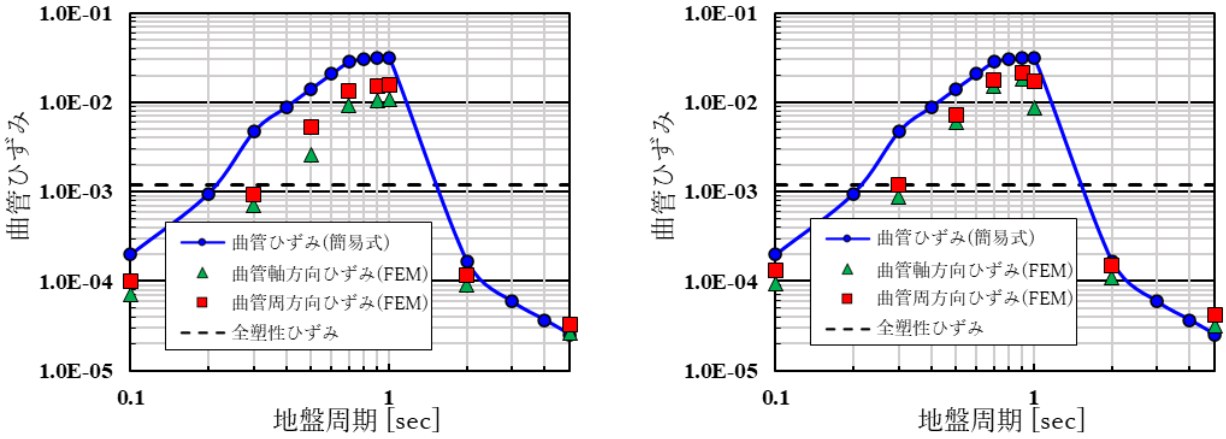
減肉ケース１　一様減肉　　減肉ケース２　局所矩形減肉

図４ 曲管部周方向ひずみ（代表例として解析 No. B 300A 地盤周期 0.7 秒のケース）



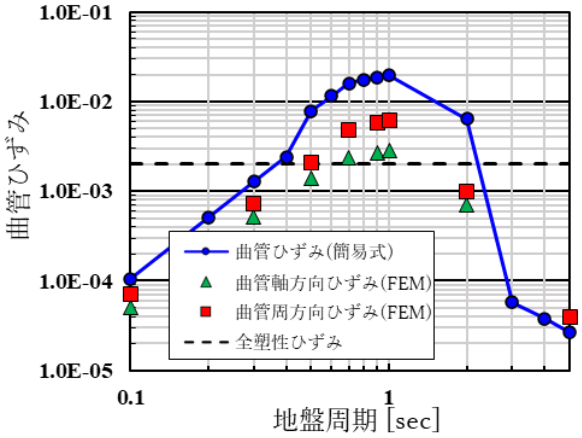
減肉ケース１　曲管部一様減肉　　減肉ケース２　曲管部局所矩形減肉

図５ 解析 No. A 150A

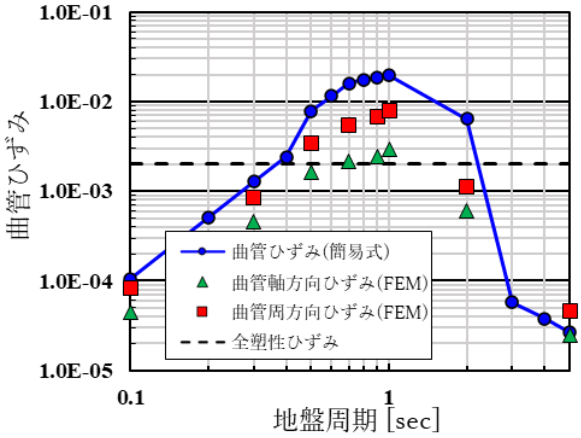


減肉ケース１　曲管部一様減肉　　減肉ケース２　曲管部局所矩形減肉

図６ 解析 No. B 300A

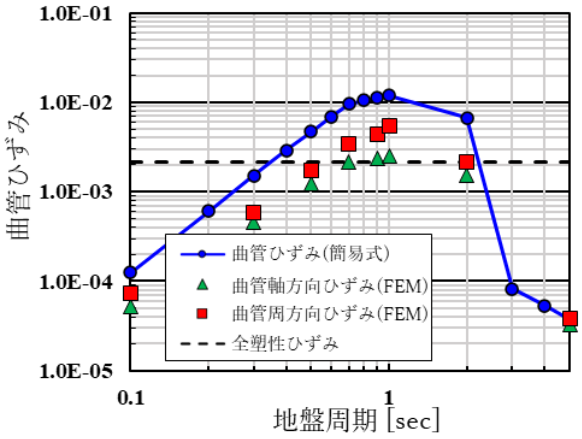


減肉ケース１　曲管部一様減肉

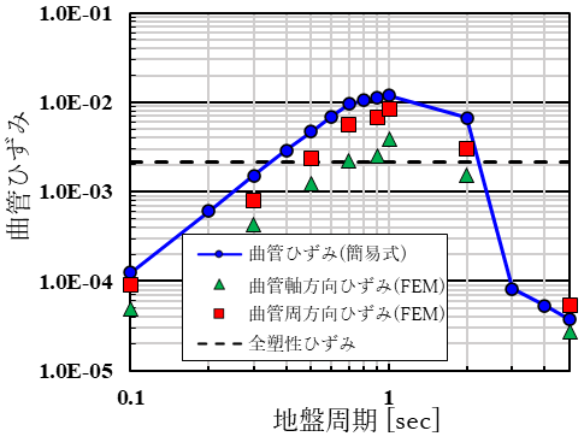


減肉ケース２　曲管部局所矩形減肉

図７ 解析 No. C 400A

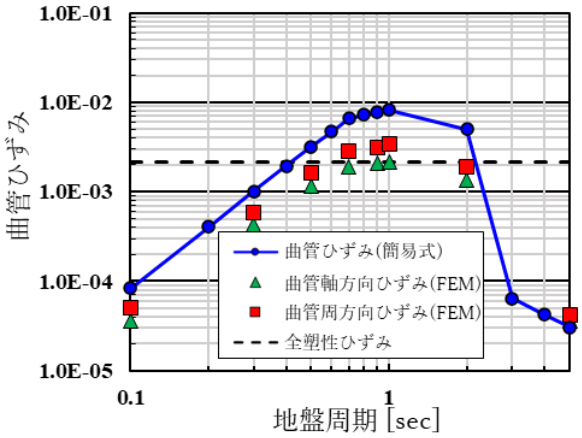


減肉ケース１　曲管部一様減肉

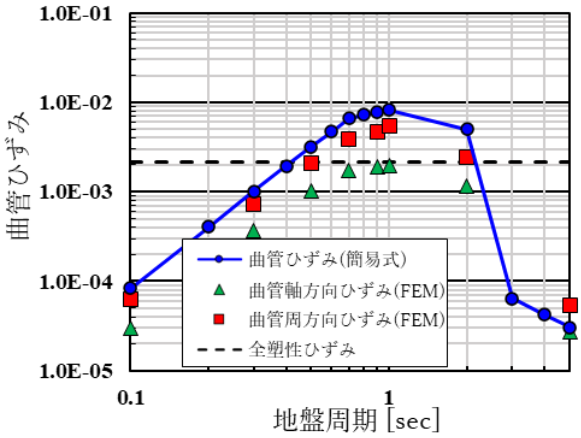


減肉ケース２　曲管部局所矩形減肉

図８ 解析 No. D 600A 曲率 1.5D



減肉ケース１　曲管部一様減肉



減肉ケース２　曲管部局所矩形減肉

図９ 解析 No. E 600A 曲率 3.0D

参考資料 2

上載荷重に対する減肉評価への残存強度係数RSFの適用性

1. 概要

内圧に対する減肉評価では残存強度係数RSFが用いられる。ここで、RSFは、内圧を想定外力とした場合の減肉管の塑性崩壊荷重と非減肉管の塑性崩壊荷重との比、すなわち、減肉管の残存強度比として定義されたパラメータで、減肉の大きさ・口径・管厚といった幾何寸法のみを入力値とする。

$$RSF = \frac{R_{\mathrm{t}}}{1 - \frac{1}{M_{\mathrm{t}}}(1 - R_t)} \geq RSF_{\mathrm{a}} \tag{1}$$

本稿では、内圧を対象としたRSFを適用することで、上載荷重に対する減肉管の残存強度比を評価できるか検証した。なお、ここでは、埋設深さが深い場合を想定し、上載荷重と路面荷重による土圧のうち、上載荷重が支配的となる範囲を対象とした。

2. 上載荷重に対する減肉管の残存強度評価

FEM 解析を用いて、上載荷重に対する減肉管の残存強度比を評価した。解析モデルを図１に示す。解析には Abaqus ver 6.13 を用いた。減肉形状は、管軸方向長さs、管周方向長さc、深さdをパラメータとした三次元の矩形形状とした。減肉の周方向位置は、減肉が無い場合に管底で最大応力が生じることを考慮して管底とした。解析対象は、減肉が無い場合には、表 1 に示す管の緒元とした。減肉を有する場合には、4 ケース（表 1 に示す管の緒元）×3 ケース（減肉の軸方向長さ$s/(\pi D_{\mathrm{o}})$：0.1、 0.2、 0.3）×3 ケース（減肉の周方向長さc：0.1、 0.2、 0.3）×3 ケース（減肉の深さd/t_{nom}：0.1、 0.2、 0.3）＝計 108 ケースとした。上載荷重として、解釈例第 41 条で参照されている埋戻し土圧分布を管外表面に直接作用させ、最大荷重となるときの荷重を塑性崩壊荷重と定義した。残存強度比は、減肉管の塑性崩壊荷重と非減肉管の塑性崩壊荷重の比として求めた。

非減肉管及び減肉管の最大荷重時における変形図を図２に示す。図２(a)に管モデルの軸方向の中央対称面における変形図を示す。非減肉管及び減肉管のどちらのケースについても、その変形挙動は鉛直方向につぶれるように扁平するモードとなった。図２(b)に荷重変位応答を示す。減肉管では非減肉管と比較して塑性崩壊荷重が小さくなり、減肉寸法が大きくなるほど、残存強度比は低下した。

表１　管断面形状及び材料強度

Pipe No.	外径 D_{o} [mm]	非減肉部管厚 t_{nom} [mm]	材料	降伏応力 σ_{Y} [N/mm^2]	引張強さ σ_{t} [N/mm^2]
A	610.0	15.1	X65	450	535
B	406.4	11.9	X52	360	460
C	267.4	7.8	STPG370	215	370
D	610.0	9.5	X65	450	535

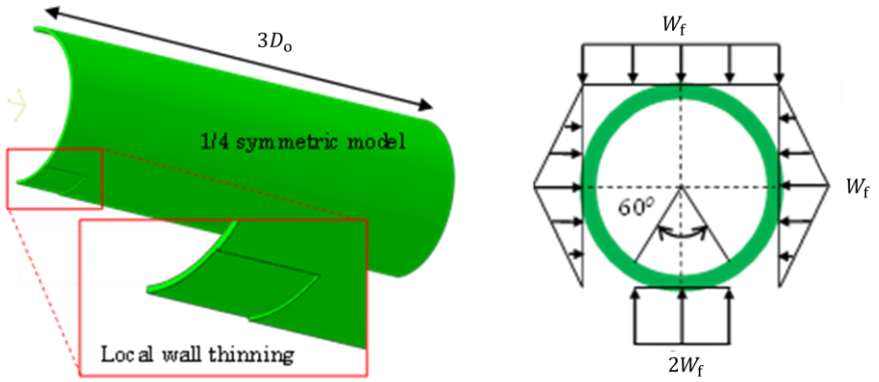
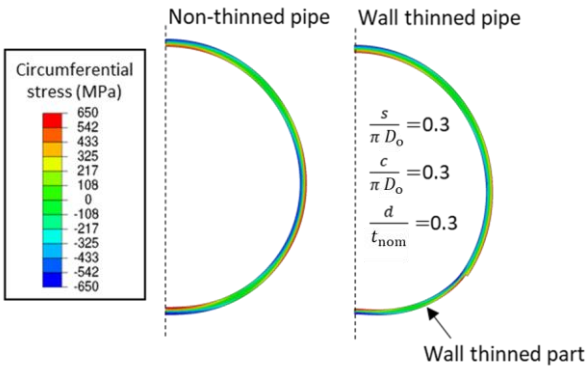
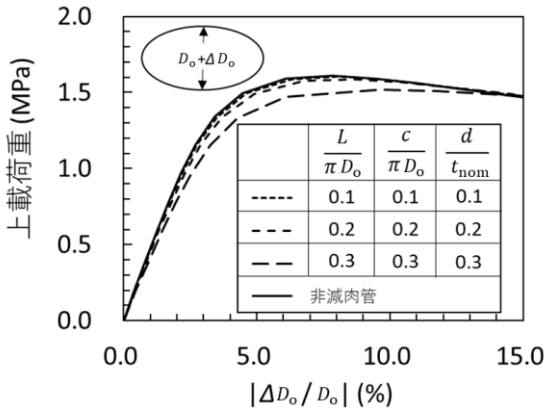


図１ 解析モデルの例



(a) 変形挙動



(b) 荷重変位応答

図２ 上載荷重が作用した場合の減肉管の変形挙動（Pipe A の例）

3. 上載荷重に対する残存強度評価への*RSF*の適用性

残存強度係数*RSF*（(1)式）より計算した内圧に対する残存強度比の計算結果と FEM 解析より取得した上載荷重に対する残存強度比との比較を図３に示す。図の横軸は、*RSF*（(1)式）を用いて、内圧に対する残存強度比を計算したものである。図中の縦軸は、FEM 解析より評価した、上載荷重に対する残存強度比である。評価対象は、３項に示した全解析ケースとした。図３に示すように、いずれの減肉寸法においても、上載荷重に対する残存強度比（縦軸の値）は、内圧に対する残存強度比（横軸の値）よりも大きい。したがって、上載荷重を対象とした残存強度評価へ内圧に対する*RSF*を適用することで、上載荷重を対象とした残存強度比を保守的に評価できる。なお、その適用範囲は図中に示す減肉寸法の条件内に限定される。

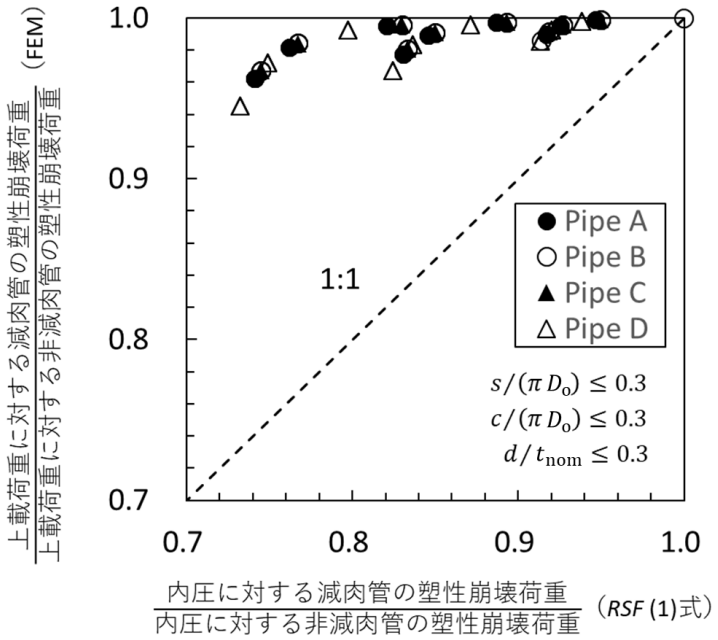


図３ 内圧と上載荷重に対する残存強度比の比較

新旧対照表（2023 年 5 月）
「高圧導管指針」2022 年 3 月発行
一般社団法人　日本ガス協会

「高圧導管指針」（JGA 指 204-21）一部改訂 新旧対照表（2023 年 5 月）

一部改訂（2023 年 5 月）	改訂理由

本編 P56

2.2.3.4　機械的接合（絶縁継手）

> 機械的接合による絶縁継手は、設計上要求される強度を満足する構造でなければならない*1。

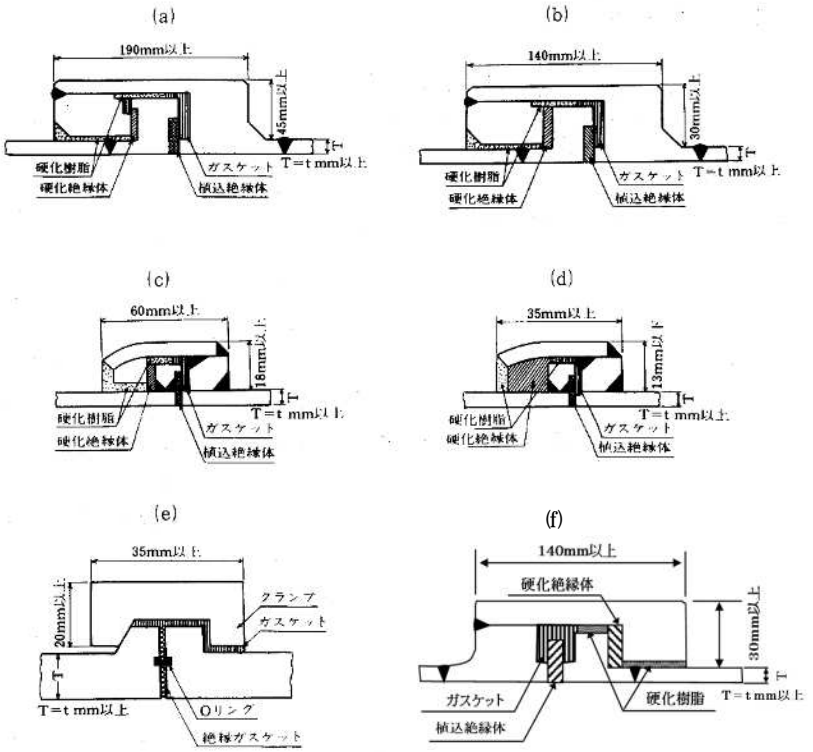
【関連条項】
省令第 15 条（構造等）
　解釈例第 41 条（導管の構造）
省令第 47 条（防食措置）
　解釈例第 103 条（防食措置）

【解　説】

＊1.（1）　機械的接合は、管路絶縁のために使用される絶縁継手のみであり、設計上要求される強度を満足する構造例と適用外径を解図２－６及び解表２－18に示す。これらは溶接を含む全体のものとして構造が解釈例に規定若しくは解図2-6に示されているので溶接施工法等の事前確認は不要である。また、溶接部分の一部を一体成形で製作した場合も、強度上及び構造上何ら劣るものではないことから、製造工程上、溶接部にかえて一体成形したものもここに規定された構造に適合するものである。

解釈例化されていないが、ガス工作物等技術基準調査委員会にて承認されたため、継手を追加

本編 P57



継手の追加。

（備考）
1　図中のｔは 2.3.2.3「一般構造設計における設計」による導管の最小厚さである。
2　(e)については２つ割りのクランプをボルトで締め付けることによりＯリング及びガスケットを押しつけ、ガスの気密性を保持する機能を有するものであること。
3　適用できる管の外径は解表２－18 に示すとおりである。

解図２－６　高圧用機械的接合の構造例

新旧対照表（2023 年 5 月）
「高圧導管指針」2022 年 3 月発行
一般社団法人　日本ガス協会

一部改訂（2023 年 5 月）	改訂理由
本編 P57 解表２－18　適用外径 （構造図 / 適用外径） (a) / 250 ㎜以上 1,050㎜ 以下 (b) / 125 ㎜以上 1,050㎜ 以下 (C) / 10 ㎜以上 350 ㎜以下 (d) / 10 ㎜以上 76 ㎜以下 (e) / 100 ㎜以上 800 ㎜以下 (f) / 125㎜ 以上 1,050㎜ 以下 (2) 絶縁継手の設置に際しては、絶縁性の確保及び強度上の配慮が必要であり、接合部に諸応力（軸、曲げ、ねじり）、振動、衝撃等が作用しないように、配管形状及び支持・固定方法について考慮しなければならない。	継手の追加。