

再処理施設の配管等に関する
接着材補修工法についての
確性試験報告書

平成 26 年 2 月

一般財団法人 発電設備技術検査協会

この報告書は、再処理施設の配管等に関する接着材補修工法についての確性試験委員会（以下、委員会という）の検討及び審議の結果をまとめたものです。

なお、委員会での検討及び審議で用いた資料から、プラント情報、依頼者と協力者のノウハウのみを除いてまとめています。

この報告書の著作権は、依頼者である日本原燃株式会社 再処理事業部が有しています。

序

再処理設備の容器及び配管等（以下、機器という。）で介在物の溶解、引け巣及び溶接施工不良によるピンホール等の欠陥により内部流体の漏洩が生じた場合、事後保全対策としては、漏洩個所を交換することにより機器の機能を回復させる取替工法と漏洩個所を交換せずに熱的方法、機械的方法又は他の適切な方法により機器の機能を回復させる補修工法がある。取替工法は設計製作時の技術要求を満足するように設計製作されるが、補修工法については、種々の工法があり、それらに対する技術要求は定まっていない。

上述の欠陥からの漏洩を防止する一つの補修工法として、機器の外表面から欠陥を含んだ対象範囲にチタニウムパテを塗布する接着材補修工法がある。この工法は、比較的容易に接着材を機器の外表面に塗布することができ、内部流体が滴下程度に漏洩している状態でも一次止水することにより内部流体をドレンせずに施工することが可能な合理的な工法である。

この工法の類似工法は、発電用原子力設備規格 維持規格 補修章で既に規定されているが、再処理設備では発電用原子力設備と内部流体が相違するなど技術的に検討を必要とする要素が存在しており、技術要求が定まっていないのが現状である。

この工法は、欠陥を含んだ対象範囲に熱を加えないため、母材を変質させないという長所を有しており、同一な欠陥を含んだ対象範囲に何度でも再施工が容易に実施できる特徴を有している。反面、熱的補修工法の代表である溶接補修工法より内部流体、特に硝酸溶液による影響を受けやすく、接着材の剥離や溶出という短所も有しており、1回の施工での耐用年数が溶接補修工法より短いという特徴がある。このため、これらの長所及び短所を技術的に理解した上で特徴を生かした技術要求を定めることが重要である。

このような背景の下、日本原燃株式会社は、再処理設備の機器への事後保全対策として漏洩を防止する接着材補修工法を適用する技術的な妥当性確認に関する確性試験の実施を、一般財団法人発電設備技術検査協会（以下、協会という。）に依頼した。

協会はこの依頼を受け「再処理施設の配管等に関する接着材補修工法についての確性試験委員会」（以下、委員会という。）を設置し、その確性を試験確認することとした。

依頼内容に対する審議にあたって事前確認試験の結果、試験実施場所における試験体や試験状況の確認を含めて慎重に審議を重ねた。その結果、適用計画される機器に対する漏洩防止工法として、接着材補修工法は技術的に妥当なものであると判断し、本報告書にまとめて報告する。

本報告書に述べる工法が、漏洩防止に有効な補修工法として実機に適切に適用され、再処理設備の運転においてその信頼性の向上が図られることを期待するところである。

最後に、本報告書を作成するにあたり、委員会での審議を始めとする試験の実施及び検討にご協力頂いた本委員会の委員並びに関係各位に対し、深甚な謝意を表す。

平成 26 年 2 月
一般財団法人 発電設備技術検査協会
再処理施設の配管等に関する
接着材補修工法についての確性試験委員会
委員長 黛 正己

再処理施設の配管等に関する接着材補修工法についての確性試験委員会

委員名簿

1. 委員長及び委員

委員長

黛 正己 一般財団法人 電力中央研究所 軽水炉保全特別研究チームリーダー

委員（順不同）

小野 拓邦 東京大学名誉教授

鈴木正昭 東京工業大学大学院 理工学研究科 化学工学専攻 教授

水谷義弘 東京工業大学大学院 理工学研究科 機械物理工学専攻 准教授

2. オブザーバ

独立行政法人 原子力安全基盤機構 核燃料廃棄物安全部

3. 依頼者

日本原燃株式会社 再処理事業部

4. 協力者

三菱重工業株式会社 原子力事業本部

5. 事務局

一般財団法人 発電設備技術検査協会 規格基準室

目 次

1. はじめに	1
1.1 背景	1
1.2 接着材補修工法の概要	2
1.3 漏洩場所・漏洩発生原因	3
1.4 適用範囲	4
2. 確性試験の目的	5
3. 確性試験の検討範囲	6
4. 実施内容	7
4.1 一次止水適用によるドライな施工表面の確保について	7
4.2 接着材塗布範囲と厚さ	9
4.3 接着材材料物性測定	12
4.4 内部流体浸透試験	14
4.5 塗布範囲と厚さに対する最高適用圧力の確認試験	22
4.6 実機施工後の検査方法の決定	29
4.7 実機施工要領の策定	29
4.8 実機条件による実証(実機模擬試験)	30
5. 試験結果と考察	32
5.1 接着材材料物性測定	32
5.2 内部流体浸透試験	32
5.3 欠陥部先端近傍の応力分布解析	33
5.4 内圧保持試験	33
5.5 実機条件による検証(実機模擬試験)	34
6. 実機施工要領	35
7. 結論	37

添付資料－1 試験結果と考察

添付資料－2 実機施工要領

補足資料－1 試験体形状

補足資料－2 表面粗さと接着強さの関係、研磨紙の選定

補足資料－3 界面方向への硝酸浸透距離の判定方法

補足資料－4 欠陥部先端近傍の応力分布解析 解析モデル、境界条件及び荷重条件

補足資料－5 テーパー形状解析、接着材端部に生じる熱応力の低減効果

補足資料－6 水 2MPa の内圧保持試験用平板試験体の模擬欠陥径選定理由

補足資料－7 一次止水用接着材の寸法確認試験

補足資料－8 無漏洩可能期間設定に関する試計算

補足資料－9 鋳物の研磨処理について

補足資料－10 補修用接着材チタニウムパテのメーカー公表仕様

1. はじめに

1.1 背景

商用再処理施設の設計・建設、溶接規格に続き、施設の本格的な運転に備え、設備の維持に関する規格整備のニーズが高まっている。また、設備の維持の規格では検査、評価で補修が必要となった場合に備え、補修工法が重要な記載項目になると考えている。

商用再処理施設ではその工程上、硝酸をはじめ多くの酸、又はアルカリ及び有機溶媒などの薬品が口径の異なる様々な配管系統により輸送される。この系統の一部に漏洩の原因となる貫通孔が発生した場合には、配管系統を隔離して溶接による補修を行うことが一般的である。

ここで、流体圧力が比較的低い配管系統で発生する漏洩には、工数を要する溶接補修に代わるものとして、ある程度の前処理を含む接着材による漏洩防止補修が適用可能と考えられる。

接着材による補修は一般的に用いられる溶接による補修と比べ、熱的なプロセスを用いないこと、流体の漏洩状態においても系統を隔離することなく施工可能であることから、応急補修工法として有効な補修工法と考えられる。

しかし、接着材による補修では内部流体の浸透による接着界面の劣化などが補修部の耐久性に影響すると推定され、この影響に対応する管理基準の確立が重要な課題となる。

そこで本確性試験では、金属用として定評のある金属配合エポキシ樹脂を接着材として選定し、水（蒸気を除く）、硝酸を対象とした接着材の劣化特性の定量化、施工要領の確認と実機模擬試験を行い、接着材補修工法の妥当性と漏洩防止可能な期間（目安）を確認する。

確性試験の実施にあたり、以下に確性試験の結果をまとめた。

1.2 接着材補修工法の概要

接着材は、チタニウムパテ（金属配合エポキシ樹脂；DEVCON 社製）を用い、漏洩防止機能を維持するように塗布する。

接着材の塗布範囲は、配管等の外面に部分塗布もしくは全周塗布とする。接着材補修工法の適用後のイメージを図 1-1 に示す。

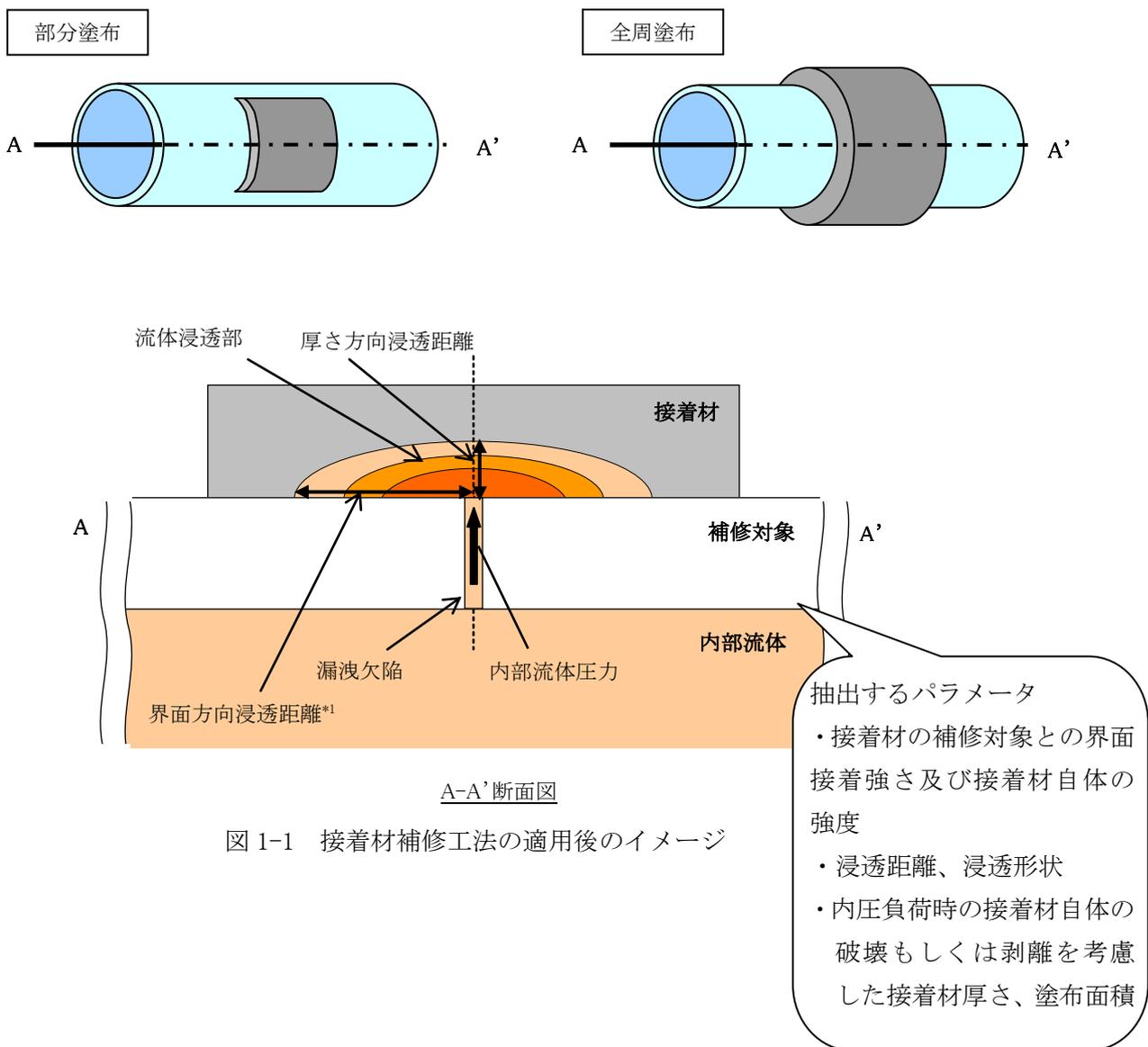


図 1-1 接着材補修工法の適用後のイメージ

*1：流体の浸透形状は実際には複雑形状となるが、最も長い界面方向浸透距離を半径とする包絡円にて評価を行う。

1.3 漏洩場所・施工対象漏洩欠陥

漏洩場所 : セル内など通常人が立ち入らない高線量エリアで発生したものは除く。

対象漏洩欠陥 : 商用再処理施設の試運転において、鍛造品の介在物による母材の貫通及び鋳造品の引け巣をはじめとする母材の貫通漏洩を経験している。また、溶接施工不良によるピンホールなどの欠陥による漏洩の可能性もある。本確性試験における対象の漏洩欠陥は上記のような「非進展性の貫通欠陥」とする。

1.4 適用範囲

本補修工法は、恒久補修または取替えまでの間、漏洩を防止するための応急補修工法として扱う。本補修工法は補修対象面がドライの場合に加え、漏洩（滴下漏洩）中で湿潤状態の場合においても適用する。表 1-1 に示す適用範囲は商用再処理施設の運転使用条件および安全上の観点、並びに試験結果から定めた。なお、本補修工法の漏洩防止可能期間（目安）は本確性試験にて推測するが、補修後の設備安全性は漏洩監視にて担保することとする。

表 1-1 適用範囲整理表

	適用範囲	選定理由
機器クラス	<現行法令> ・再処理第 3～5 種機器 ・溶接検査対象外機器 <再処理設備規格 設計規格> ・再処理クラス 3～5 機器 ・再処理クラス SIF 機器 ・規格規定対象外機器	応急補修のため、機器クラスの制限は設けない。但し、再処理第 1, 2 種機器（再処理クラス 1, 2 機器）はセル内のみを設置されるため、対象外とする。
適用部位	容器、配管、継手、弁、ポンプ、トラップ、ストレーナ	商用再処理施設における主要機器
適用材質	オーステナイト系ステンレス鋼及び炭素鋼	商用再処理施設における主要材質を対象にする
内部流体*1	水 硝酸 （濃度 10% (1.7mol/L) 以下*2）	安全上の観点から可燃性流体、蒸気は除いた。また、放射線の影響の確認を行わないため、放射性系統は除くこととする。
適用温度*3	内部流体温度*4 水：10～50℃ 硝酸：10～50℃	補修適用範囲であるセル外の内部流体温度の適用下限(10℃)以上、接着材のガラス転移温度(55℃)未満
適用圧力	水：1.96MPa 以下 硝酸：0.98MPa 以下	設計圧力（実際に使用される圧力を包絡した圧力）を採用する。
適用接着材	チタニウムパテ（DEVCON 社製；金属配合エポキシ樹脂）	試験実績による（特に硝酸に対する耐性）
表面状態	ドライな接着面を確保すること	接着材性能を保証するため
適用期間*5	6 ヶ月程度(目安)…暫定値	本試験結果から最終的に推測する
漏洩程度	滴下状態の漏れまたはにじみ程度の漏洩状態	施工安全上の観点から決定
その他の制限	補修対象は進展性のない欠陥であること	

*1 放射性系統は適用対象外。

*2 内部流体が硝酸である場合の適用濃度は、事前検討試験の接着材の耐硝酸性より設定した。

*3 施工時の雰囲気温度は 10℃～50℃を確保すること。

*4 施工時及び使用時の温度を示す。

*5 適用期間は漏洩しないことを保証する期間ではないため、補修箇所は監視対象とする。

2. 確性試験の目的

漏洩監視により補修後の設備安全性を担保することとする漏洩監視を前提とした上で、事前に接着材補修工法の特徴として概ねの無漏洩可能期間や圧力、施工対象部の形状等による影響の知見を充実することは設備安全性の向上に対して有意になるものと考えられるため、本補修工法においては、材料特性、内包流体の浸透による接着材劣化、内圧保持期間の検証に関する試験を行う。また、実機へ施工する際の要領を定め、実機施工での品質を確保する。

なお、接着材への放射線の影響の確認を行わないため、補修対象は非放射性流体の系統とする。

3. 確性試験の検討範囲

補修に係る一連の工程のうち、本確性試験の検討範囲について下記フローに示す。

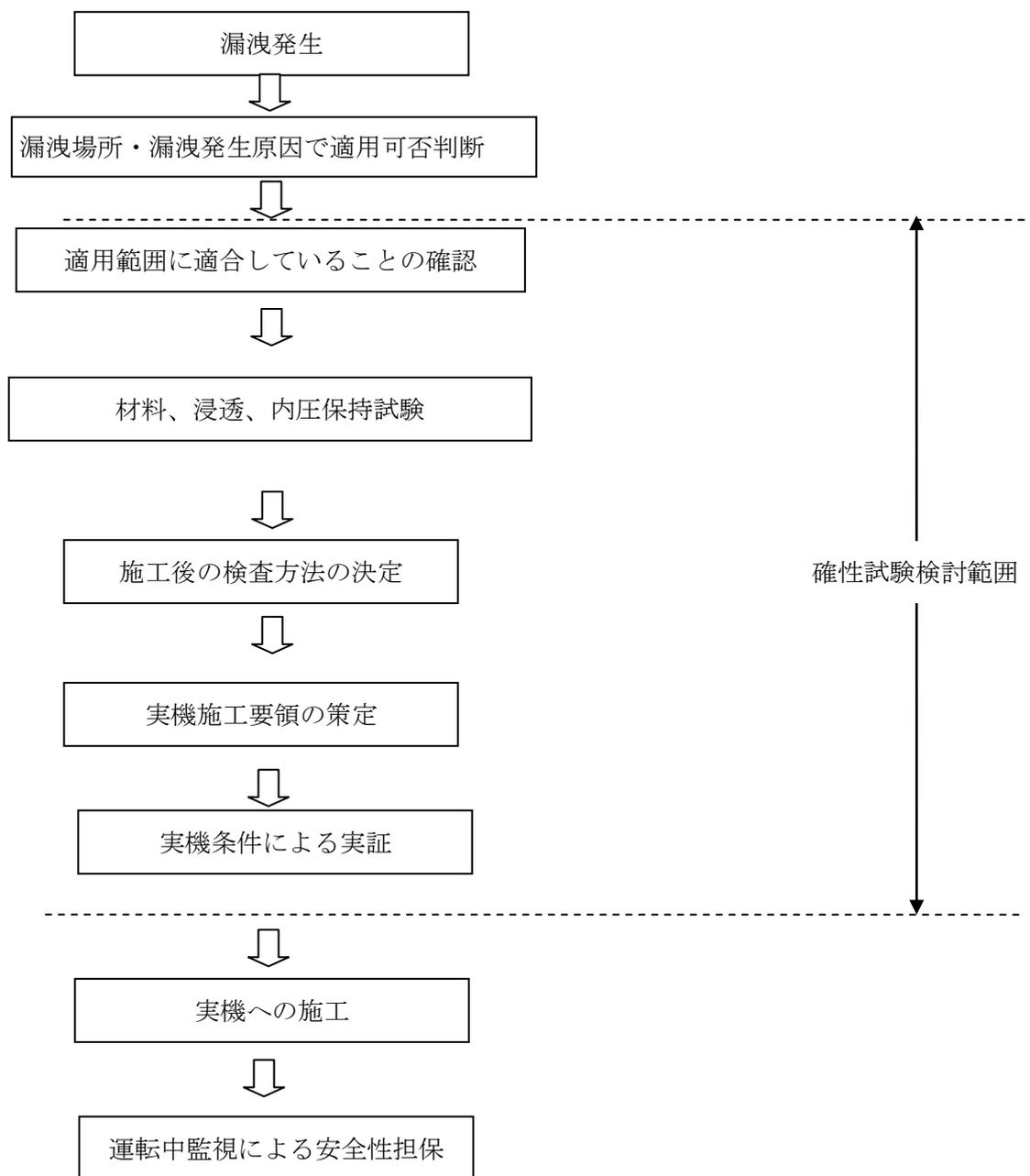


図 3-1 確性試験検討範囲・内容の概要

4. 実施内容

本補修工法に求める機能は漏洩防止機能(内部流体が無漏洩の状態を維持する機能)である。設備内圧に応じた使用期間の知見を充実するため、要素試験、及び実機模擬試験を行う。すなわち、接着材の破壊及び剥離を防止するために必要なパラメータとして、接着材の接着強さ及び強度、内部流体の浸透距離、内圧負荷時の破壊もしくは剥離を試験にて確認することにより、本補修工法の適用範囲において漏洩防止可能な期間の知見を得る。

また、施工が目的通り実施されたことを確認するための検査(完成検査)の方法を定める。さらに、施工時における作業者の安全性を確保するための工法の適用条件等を検討する。

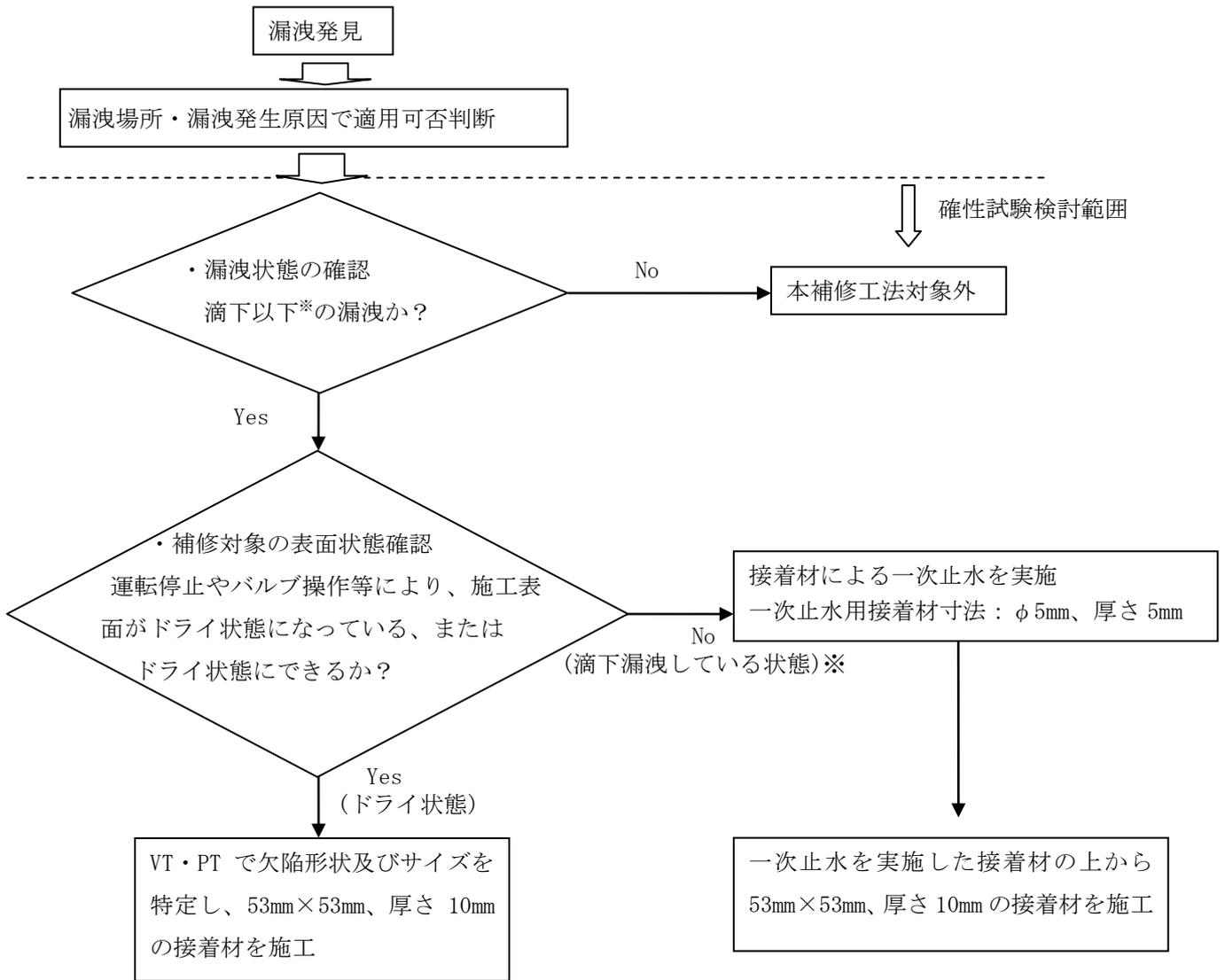
上記内容について、本確性試験にて確認すべき事項を下記にまとめる。

- ①適用範囲に適合していることの確認
- ②材料、浸透、内圧保持試験
 - 1)接着材の接着強さ及び強度：接着材の材料物性測定
(6ヶ月経過後の接着材の物性評価を含む)
 - 2)内部流体の浸透距離：内部流体浸透試験
 - 3)応力解析、圧力に対する漏洩発生までの時間確認
(塗布形状は補修部位に応じて予め定まった接着材厚さ、塗布面積を用いる)
- ③施工後の検査方法の決定
- ④実機施工要領の策定
- ⑤実機条件による実証

4.1 一次止水適用によるドライな施工表面の確保について

接着部が濡れた状態では接着材の接着力が著しく低下するため、施工表面がドライであることを適用条件としている。従って、漏洩している状態における補修では、施工に先立ち局部的に接着材を塗布する一次止水を実施することで、補修用接着材の施工表面の乾燥状態を確保する。

なお、漏洩している場合に一次止水として施工した接着材部分は非接着部として扱うこととする。一次止水の判断フローを図4-1-1に、ドライ状態および漏洩状態での接着材補修工法の概要図を図4-1-2, 図4-1-3に示す。



※滴下状態とは、漏洩欠陥から液体が液滴状となって落下する状態であり、目視によって確認する。

図 4-1-1 一次止水適用の判断フロー

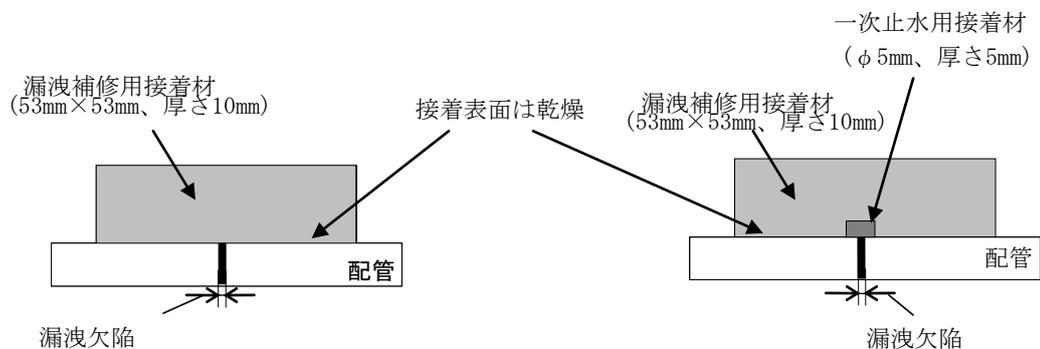


図4-1-2 ドライ状態における接着材施工概要図

図4-1-3 漏洩状態における接着材施工概要図

4.2 接着材塗布範囲と厚さ

接着材は配管等の欠陥から所定の圧力で漏洩してくる硝酸または水の漏洩を防止する。そのため、構造強度として接着面が内部流体の圧力で剥がれないこと、接着材そのものが圧力から生じる応力で破壊しないことの確認が必要である。

また、内部流体の浸透による接着面と接着材の剥がれを経時変化として織り込む必要がある。

ただし、後述するように、本件の条件では浸透による経時劣化の範囲は小さく、また、許容範囲の欠陥の寸法も限られている。そこで、本件では縦横それぞれ 53mm、厚さ 10mm の範囲に接着材を塗布（寸法固定）し、それが漏洩防止機能を維持できることを確認することにする。

なお、周軸方向に曲率等がある場合は、接着材/補修対象界面でそれに沿った面において上記寸法を確保する。周方向等で全周状に塗布した場合は 53mm に満たなくてよい。

検討のフローを図 4-2-1 に、試験マトリクスを表 4-2-1 に示す。

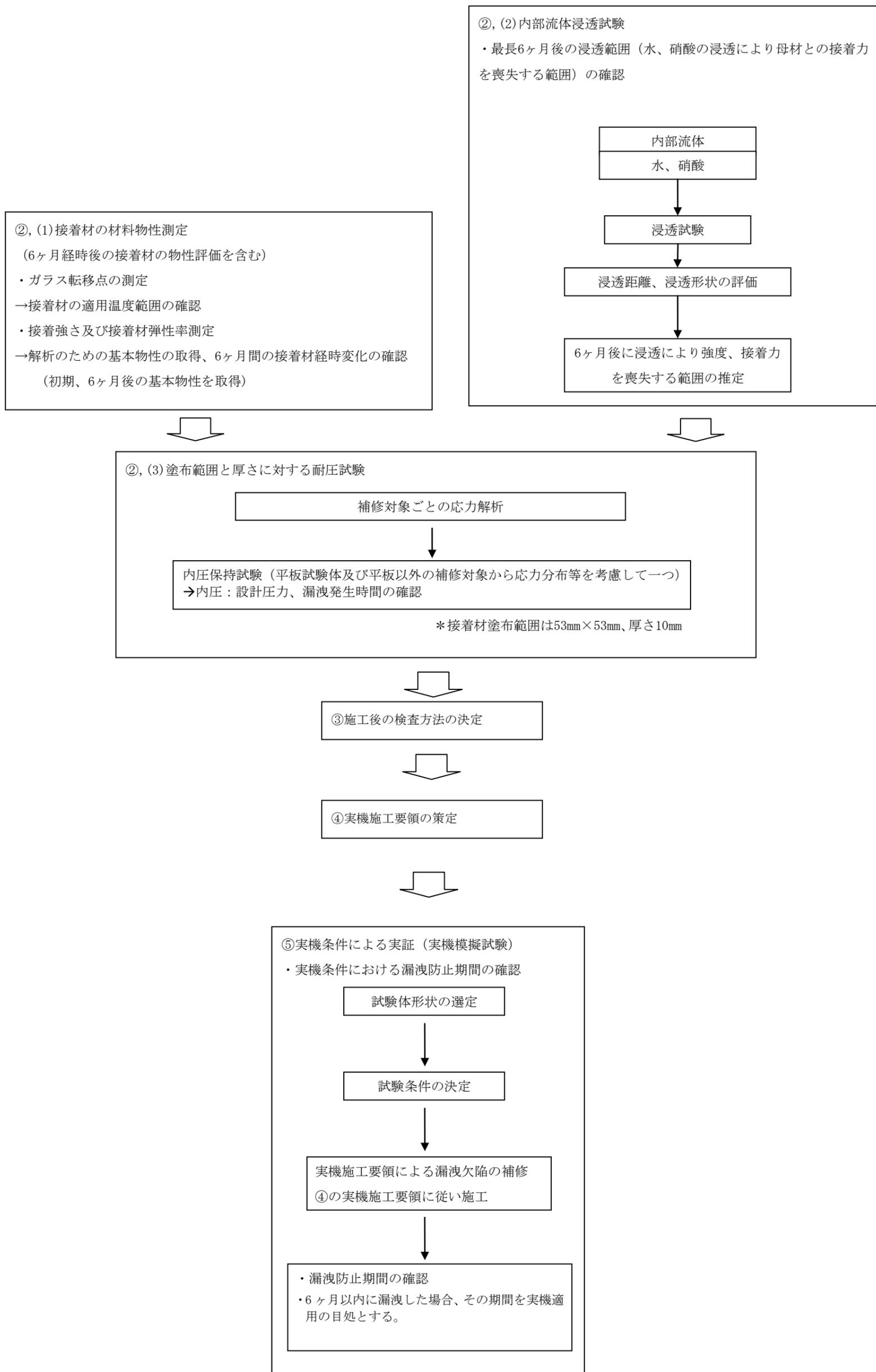


図 4-2-1 接着材補修工法 検討フロー

表 4-2-1 試験マトリックス (FEM 解析を含む)

試験片、試験体及び解析No. (試験マトリックス)	検討項目	試験及び解析名称	試験または解析目的	試験条件または解析条件						調査項目 (○：調査項目, —：調査対象外)					試験条件または解析条件の設定根拠	試験の保守性
				試験体・数または解析対象	温度(°C)	圧力(MPa)	内部流体	評価時間	その他	引張	せん断	圧縮	外観	その他		
1-1	②, (1) 接着材の接着強さ及び強度	接着材の材料物性測定	ガラス転移点測定	平板 1 体	RT-200°C	—	—	—	—	—	—	—	—	○	適用最高温度 (50°C) を超える温度域まで測定し、ガラス転移温度を確認する。	◎
2-1-1~30			引張り接着強さ測定 (JIS K6849)	各 n = 5 (計 30 体)	50, 100	—	—	初期, 3, 6 ヶ月	—	○	—	—	—	—	実機適用最高温度 50°C、及び参考データとして 100°C で測定	○
2-2-1~30			引張せん断接着強さ測定 (JIS K6850)	各 n = 5 (計 30 体)	50, 100	—	—	初期, 3, 6 ヶ月	—	—	○	—	—	—		○
2-3-1~30			引張特性測定 (JISK7113)	各 n = 5 (計 30 体)	50, 100	—	—	初期, 3, 6 ヶ月	—	○	—	—	—	○ (弾性率及びポアソン比測定)		○
2-4-1~30			圧縮特性測定 (JISK7208)	各 n = 5 (計 30 体)	50, 100	—	—	初期, 3, 6 ヶ月	—	—	—	○	—	○ (弾性率及びポアソン比測定)		○
3-1-1~9	②, (2) 内部流体の浸透距離	硝酸浸透試験	経時変化 (浸透距離、浸透形状)	25A 配管 各 n = 3 (計 9 体)	50	1	硝酸 10% (約 1.7mol/L)	1, 3, 6 ヶ月	漏洩欠陥サイズ; φ 0.3(mm)	—	—	—	○ (硝酸浸透距離、浸透形状)	—	温度、圧力、硝酸濃度は適用範囲の最高値とする。	○
															滴下状態の漏洩を考慮すると模擬欠陥径は、対象としている漏洩より安全側の値として設定。	◎
															実機における漏洩形状が円でない場合は最も厳しい (有効接着長さが不利になる) 位置から円形状で求めた浸透距離を用いる。一次止水工法を用いる場合は一次止水の端部からの浸透距離として適用する。	◎
3-2-1~3	②, (2) 内部流体の浸透距離	水浸透試験	経時変化 (浸透距離、浸透形状)	25A 配管 各 n = 3 (計 3 体)	50	1.96	水	1 ヶ月	漏洩欠陥サイズ; φ 0.3(mm)	—	—	—	○ (水浸透距離、浸透形状)	—	温度、圧力は適用範囲の最高値とする。	○
															滴下状態の漏洩を考慮すると模擬欠陥径は、対象としている漏洩より安全側の値として設定。	◎
															実機における漏洩形状が円でない場合は最も厳しい (有効接着長さが不利になる) 位置から円形状で求めた浸透距離を用いる。一次止水工法を用いる場合は一次止水の端部からの浸透距離として適用する。	◎
4-1-1~5	②, (3) 塗布範囲と厚さに対する耐圧試験 FEM 解析	FEM 解析	補修対象の形状効果の確認	25A 直管、25A エルボ、25A ティー、平板、8A 直管 各 1 ケース (計 5 ケース)	50	2.0	—	—	—	—	—	—	○ (応力の大小を比較)	金属と接着材との界面の剥離の進展しやすさは、応力にて比較する。	—	
4-2-1~15	②, (3) 塗布範囲と厚さに対する耐圧試験 内圧保持試験	内圧保持試験	実機適用可能な条件 (内圧、欠陥寸法、期間) の目処付け	平板形状 (初期欠陥 φ 8mm、内圧 2 条件) × 保持期間 6 ヶ月、N=5 計 10 ケース 平板以外の形状 (初期欠陥 φ 8mm、内圧 1 条件) × 保持期間 6 ヶ月、N=5	50	1, 2.0MPa の 2 条件	水 (トレーサー入り)	6 ヶ月 (6 ヶ月後も無漏洩の場合、試験期間延長し、保持期間の知見充実)	漏洩欠陥サイズ; φ 0.3(mm)	—	—	—	—	○ (漏洩有無、漏洩発生までの時間)	圧力は適用範囲内を考慮して設定 内圧を負荷する欠陥寸法は一次止水寸法+6 ヶ月間の硝酸浸透距離とする	○
5-1-1~5	⑤ 実機条件による実証 (接着材により一次止水施工)	実機模擬試験	硝酸浸透条件で漏洩防止期間確認	ティー (FEM 解析で最も高い応力分布が認められた補修対象) N=5	50	1	硝酸 10% (約 1.7mol/L)	最長 6 ヶ月	施工姿勢; 漏洩欠陥が下向き (上向きの作業姿勢) での施工	—	—	—	—	○ (6 ヶ月後の漏洩の有無)	内圧保持試験状況により、試験条件 (圧力、無漏洩維持期間) を確定する。 1 次止水施工時の内部流体は水。	○
5-2-1~5			接着材硬化完了後の耐圧性能確認	ティー (FEM 解析で最も高い応力分布が認められた補修対象) N=5	50	3 (実機適用最高圧力の 1.5 倍)	水	10 分間	—	—	—	—	—	○ (10 分後の漏洩の有無)	水の適用最高圧力 2MPa で、10wt% (約 1.7mol/L) 硝酸ラインの適用最高圧力 1MPa を包絡するため、負荷圧力は 3MPa の 1 条件とする。	◎

試験の保守性

○：そのものの値または安全側

◎：実際の値よりも必ず安全側

—：参考情報としての扱い

4.3 接着材材料物性測定

接着材の特性を把握するとともに、FEM解析のインプット条件に使用するため、適用条件における6ヶ月経過後の接着材の材料物性を測定する。なお、試験期間の6ヶ月は当該接着材の予備試験等から目途を得たものである。

また、途中経過のデータを取得することが信頼性向上の観点から望ましいため、6ヶ月後の試験結果に加え、初期、3ヶ月経過の材料物性も測定する。

(1) ガラス転移点測定（表4-2-1：試験マトリックス 1-1 項）

① ガラス転移点測定条件

- 1) 測定手法 : 動的ねじり粘弾性測定（ひずみ：0.1%）（JIS K 7244-2）
- 2) 測定温度範囲：RT～200℃
- 3) 昇温速度 : 2℃/分
- 4) 周波数 : 1 Hz
- 5) 試験片形状 : 補足資料-1、補足図 1-1 参照

② 評価項目

温度に対する粘弾性の変化からガラス転移点を推定し、使用温度域内における特異点の有無を確認する。

(2) 接着強さ測定（引張り接着強さ測定及び引張せん断接着強さ測定）

（表4-2-1：試験マトリックス 2-1、2-2 項）

① 接着強さ測定条件

- 1) 加熱温度 : 50℃（実機適用最高温度、参考データとして100℃も測定）
- 2) 加熱保持時間 : 初期、3ヶ月、6ヶ月
- 3) 適用規格 : 引張り接着強さ測定（JIS K6849）
引張せん断接着強さ測定（JIS K6850）
- 4) 前処理条件 : 粗さが#400の研磨紙を用いて表面の面粗しを実施する。
*接着強さの試験では、面粗しに#400の研磨紙を使用した。
ただし、4.4項、4.5項の試験および実機施工では、鋳物等の研磨も考慮し、#80で研磨する。
なお、#80で研磨した方が#400より接着強さはやや強いが、ほぼ同等レベルで大きな差はないことを確認済。（補足資料-2参照）
- 5) 試験片形状 : 補足資料-1、補足図 1-2, 1-3 参照

② 評価項目

塗布後6ヶ月間加熱保持した接着材について引張り接着強さ、引張せん断接着強さを測定し、6ヶ月加熱保持後の接着強さを考慮した接着材構造の設計を行う。

(3) 接着材弾性率測定（引張弾性率測定及び圧縮弾性率測定）

（表 4-2-1：試験マトリックス 2-3, 2-4 項）

① 弾性率測定条件

1) 加熱温度 : 50℃（実機適用最高温度、参考データとして 100℃も測定）

2) 加熱保持時間：初期、3 ヶ月、6 ヶ月

3) 適用規格 : 引張弾性率測定（JISK7113）

圧縮弾性率測定（JISK7208）

4) 試験片形状 : 補足資料-1、補足図 1-4-1～1-4-4 参照

② 評価項目

塗布後 6 ヶ月間加熱保持した接着材について引張弾性率、圧縮弾性率の測定、及びポアソン比を測定し、6 ヶ月加熱保持後の接着材弾性率を設計に適用する。

4.4 内部流体浸透試験（表 4-2-1：試験マトリックス 3-1、3-2 項）

6ヶ月後の接着材に対する硝酸、および水の浸透距離、浸透形状を調査する。なお、途中経過のデータを取得することが望ましいため、6ヶ月後の試験結果に加え、1ヶ月、3ヶ月経過の浸透距離、浸透形状も調査する。

① 硝酸浸透試験

- 1) 硝酸濃度 : 10wt% (適用条件最高濃度) $\approx 1.7 \text{ mol/L}$
- 2) 硝酸温度 : 50°C (適用条件最高温度)
- 3) 流体圧力 : 1.0MPa (適用条件最高圧力)
- 4) 漏洩欠陥径 : $\phi 0.3\text{mm}$ (以下同様)
- 5) 試験体形状 : 補足資料-1、補足図 1-5 参照
- 6) 接着材塗付範囲と厚さ : 実機施工と同じ 53mm×53mm、厚さ 10mm とする。ただし、1ヶ月、3ヶ月は浸透距離が小さいことを考慮し、それより小さい寸法: 36mm×36mm (耐圧試験の観点からは安全側) とする。
- 7) 試験期間 : 1、3、6ヶ月
- 8) 計測項目

接着材又は配管材/接着材界面への硝酸浸透距離、浸透形状

本試験における浸透距離の計測方法は以下にて実施する。

a) 配管/接着材界面への硝酸浸透距離、浸透形状

配管から接着材を剥離後、硝酸により黄色～褐色に変色した接着材範囲を目視にて評価し、浸透距離を測定する。硝酸浸透のイメージを図 4-4-1 に示す。

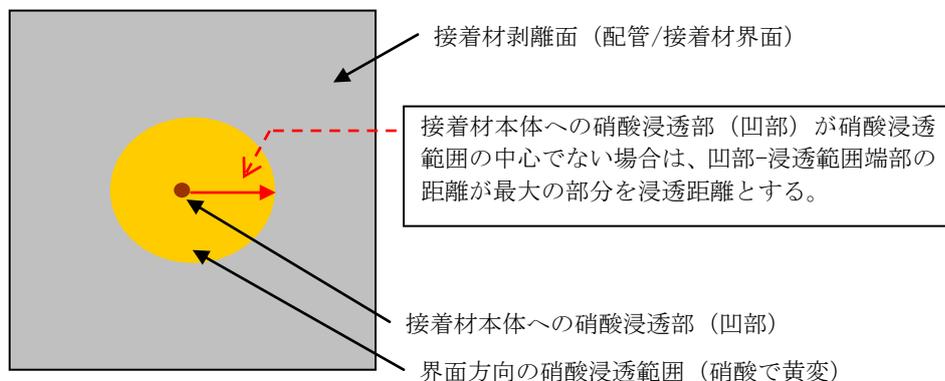


図 4-4-1 硝酸浸透 イメージ図

ただし、変色部分が硝酸とエポキシ樹脂の反応生成物であるニトロ化合物（ニトロ基 NO_2 を含有する黄色～褐色化合物）であることを赤外分光分析にて確認しておく（補足資料-3 を参照）。

b) 接着材本体への硝酸浸透距離、浸透形状

接着材を切断することなく接着材本体への硝酸浸透距離を測定するため、配管から接着材を剥離し、硝酸によって接着材が溶解し窪んだ部分（凹部）の深さを、レーザ変位計を使用して非破壊で測定する。レーザ変位計による測定方法を図 4-4-2 に示す。

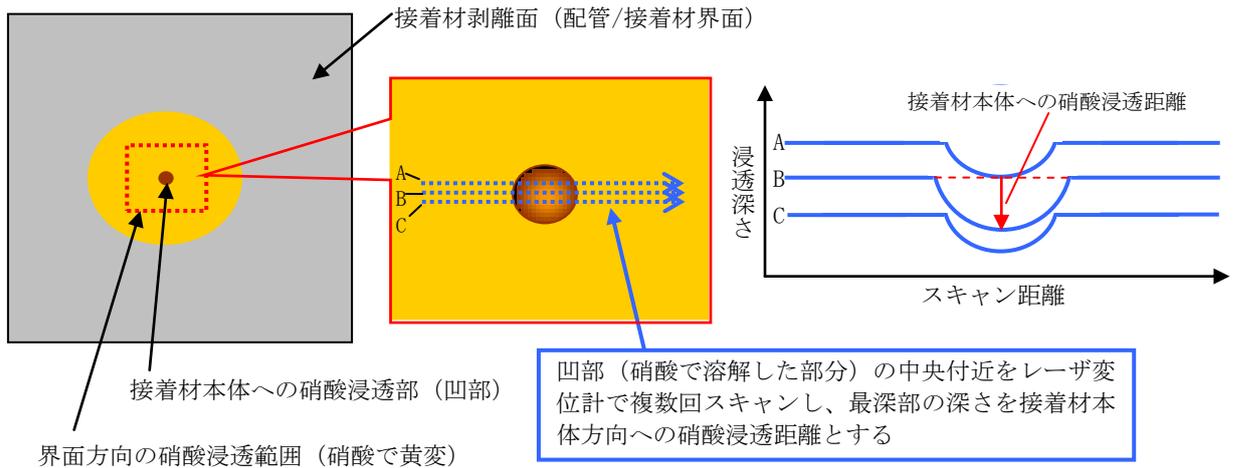


図 4-4-2 レーザ変位計による測定方法

② 水浸透試験

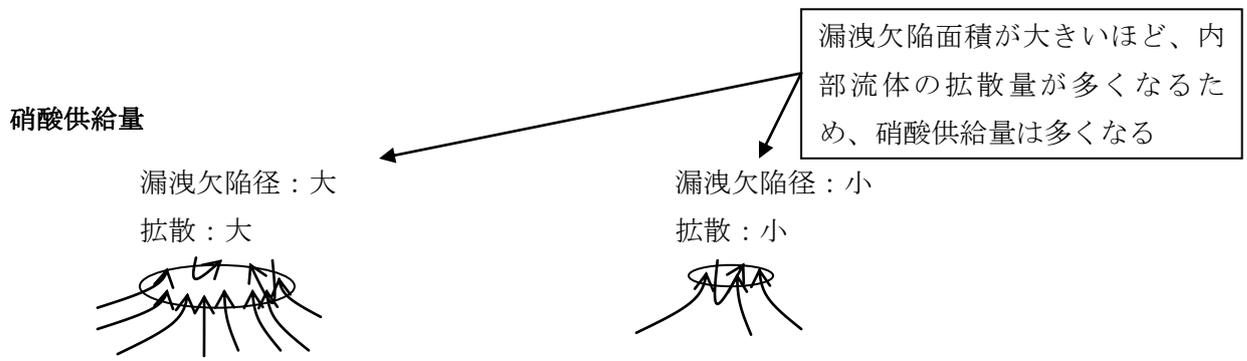
- 1) 水温度 : 50℃（実機適用最高温度）
- 2) 流体圧力 : 1.96MPa（適用条件最高圧力）
- 3) 漏洩欠陥径 : $\phi 0.3\text{mm}$ （以下同様）
- 4) 試験体形状 : 補足資料-1、補足図 1-6 参照
- 5) トレーサー : 硝酸セシウム等
- 6) 接着材接着材塗付範囲と厚さ : 実機施工は 53mm×53mm、厚さ 10mm とするが、本件は浸透距離が小さいことを考慮し、それより小さい寸法 : 36mm×36mm（耐圧試験の観点からは安全側）とする。
- 7) 試験期間 : 1 ヶ月
- 8) 計測項目
 - a) 配管/接着材界面への水浸透距離、浸透形状
電子線励起型蛍光 X 線分析を用いてトレーサー元素（セシウムなど）または蛍光探傷液の付着範囲を確認する。

4.4.1 漏洩欠陥形状の考え方

欠陥形状については、配管表面と接着材との界面への硝酸浸透を想定すると、界面への浸透は漏洩欠陥外周エッジ部分が起点となるため、漏洩欠陥の総断面積に対して外周が最も小さい真円形状の漏洩欠陥の場合が、単位長さ当りの外周に供給される硝酸量が最も多く、硝酸浸透速度が最も大きくなる。従って、真円形状の漏洩欠陥を想定すれば接着材への硝酸の浸透距離が最大となり、例えば真円形状と同面積の楕円形状を考えた場合、総面積に対する外周は真円形状よりも大きく、硝酸の浸透速度は小さくなる。従って、接着材への硝酸の浸透距離を保守的に評価できると考えられる。(図 4-4-3 参照)

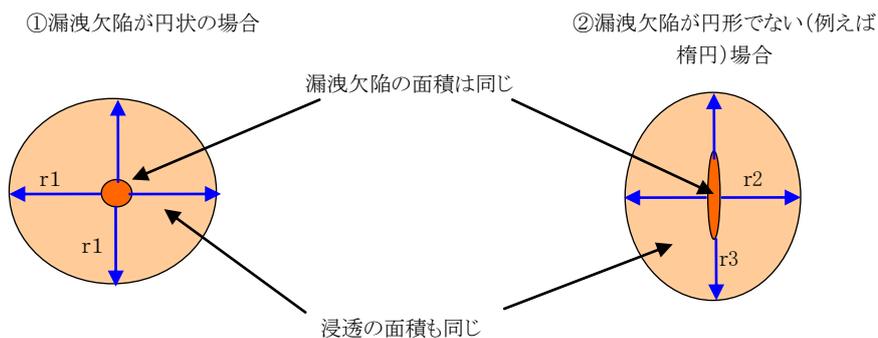
漏洩欠陥形状が線状の場合や極微小漏洩孔が点在する場合においても、同じ断面積の真円形状の漏洩欠陥の方が断面積に対する外周が短いため、保守的に評価することができる。

一次止水を実施する場合は漏洩欠陥形状に関係なく、一次止水をした接着材端部から、真円形状の漏洩欠陥にて求めた硝酸浸透速度から得られる硝酸浸透距離を漏洩欠陥端部に適用することで、実際の補修対象よりも保守的に評価することができる。(図 4-4-4 参照)



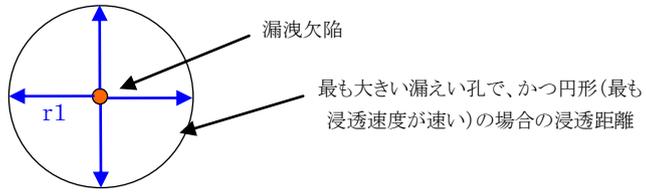
漏洩孔径は適用条件を包絡する大きさ ($\phi 0.3\text{mm}$) を採用

浸透速度



浸透形状が楕円化することで、浸透距離は $r1 > r2, r3$ となる
漏洩孔形状は浸透距離が最大となる円形を採用

図 4-4-3 漏洩欠陥面積及び硝酸浸透速度



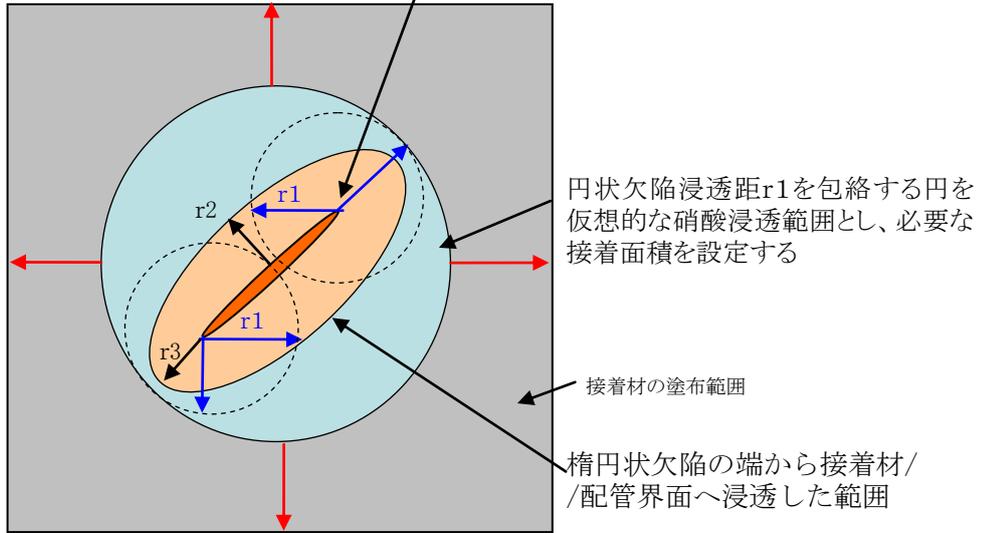
①円形漏洩欠陥における
試験より求めた硝酸浸透距離



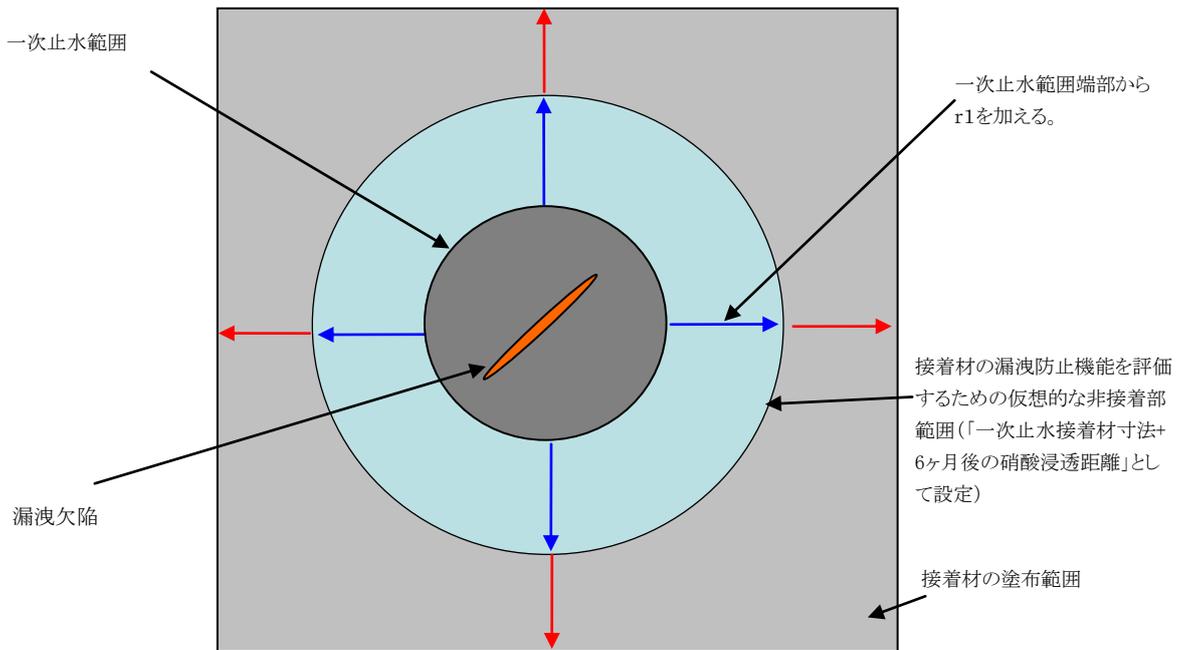
- ← 漏洩防止に必要な接着材塗布長さ
- ← 円形漏洩欠陥の場合の硝酸浸透距 r_1

楕円状欠陥の端から、同じ断面積の円形欠陥の浸透距 r_1 と同距離浸透したとみなす

漏洩量は欠陥の総面積に依存するため、欠陥の総面積が同じであれば漏洩量は形状に依存しない



楕円状欠陥に対する接着材塗布寸法の考え方(ドライ状態)



一次止水の場合の接着材塗布寸法の考え方(漏洩している状態)

図 4-4-4 漏洩欠陥形状と接着材塗布寸法の考え方

4.4.2 試験時の漏洩欠陥径の考え方

浸透試験での漏洩欠陥径は $\phi 0.3 \text{ mm}$ を使用する一方、実機での適用条件の制限は「滴下漏洩であること」としている。また、実機では内部流体が流れていることに対し、試験体は滞留となる。そのため、実機で想定される漏洩欠陥径と本試験での試験体の漏洩欠陥径の相違に対し、以下の事項を検証することにより本試験での試験体の漏洩欠陥径が保守的であることを確認した。

- ・実機の滴下漏洩の状態では、欠陥寸法が $\phi 0.1 \text{ mm}$ の穴径以下(断面積基準)であること
- ・実機で想定される対流状態における欠陥寸法 $\phi 0.1 \text{ mm}$ より、本試験での滞留状態における $\phi 0.3 \text{ mm}$ が硝酸浸透の観点で保守的であること

(1) 滴下漏洩と穴径の関係について

接着材への硝酸の浸透距離は、浸透速度に依存する。このため、接着材への硝酸の浸透距離は、接着材への硝酸の浸透速度を評価することで、評価できる。

接着材への硝酸の浸透速度は、漏洩欠陥を通して接着材に供給される単位時間当たりの硝酸量に依存する。この硝酸供給量は漏洩欠陥孔中の硝酸拡散によって支配されるため、漏洩欠陥の総断面積 S が大きいほど、供給量も大きくなる。総断面積 S を通過する硝酸供給量は、単位時間に単位面積当たり通過する硝酸供給量を流速 J 、経過時間を Δt とすれば、 $J S \Delta t$ と表現できる*。

* 参考文献 花井哲也(1978). 膜とイオン-物質移動の理論と計算- (株)化学同人

すなわち、漏洩欠陥の面積の観点からは、適用対象中の最も断面積が大きな漏洩欠陥を試験条件とすれば、最も安全側の評価となる。

本補修工法は、安全上の観点から滴下状態の漏洩を想定している。図 4-4-5 に示す予備試験において、 $\phi 0.3 \text{ mm}$ の模擬漏洩欠陥では、内圧約 0.001 MPa を超えると滴下状態の漏洩から連続的な漏洩となる。この結果から、滴下状態における圧力と欠陥径の関係を考えると、実機における滴下程度の漏洩孔は $\phi 0.3 \text{ mm}$ で十分安全側に包絡できると考えられる。

また、計算から漏洩欠陥径 $\phi 0.1 \text{ mm}$ の時の漏洩量と内圧の関係を求めた。滴下状態の漏洩から連続的な漏洩に変わる内部流体圧は約 0.06 MPa と推定されることから、今回の補修対象条件に比べて漏洩欠陥径 $\phi 0.1 \text{ mm}$ でも保守側と考えられる。

なお、 $\phi 0.3 \text{ mm}$ を超える欠陥が発見された場合は当確性試験の結果は適用対象外とする。

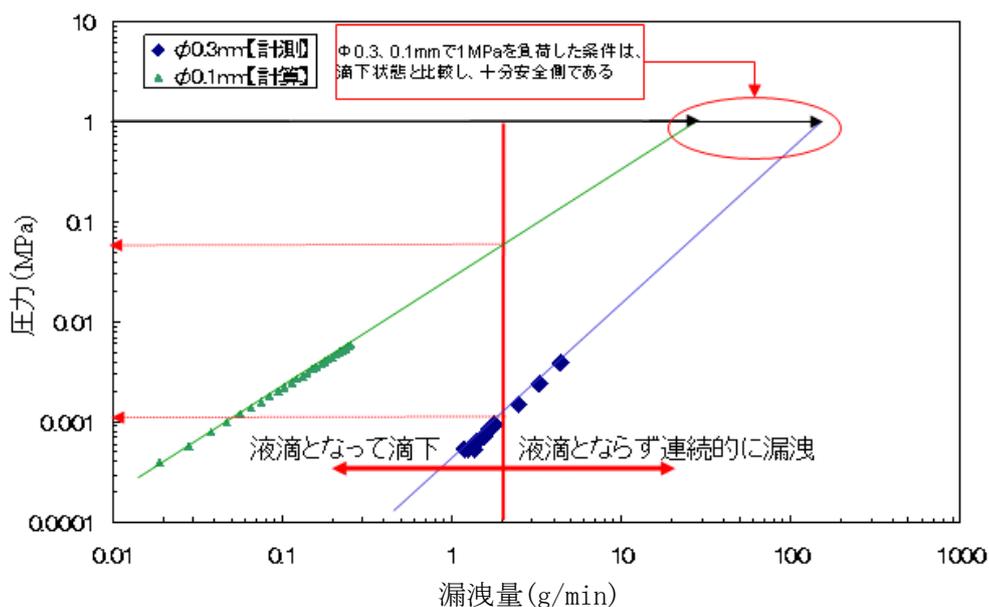


図 4-4-5 漏洩量と圧力の関係性 (漏洩欠陥径 $\phi 0.3 \text{ mm}$ 及び 0.1 mm)

(2) 対流有無による硝酸濃度への影響について

内部流体浸透試験では、内部流体は流れのない滞留状態での試験を予定している。そのため、漏洩欠陥径、及び配管肉厚をパラメータとして、内部流体の流れの有無による接着材への硝酸供給量への影響について検討した。

流れがあるときの漏洩欠陥部の物質対流量と、滞留状態での物質拡散量を数値解析によって求め比較した。図 4-4-6 に解析モデル、表 4-4-1 に解析条件を示す。

a. 配管の流れによる欠陥内部の対流流速

漏洩欠陥入口での主流 u によるせん断力及び、き裂での圧力損失 を考慮し、欠陥内部の対流流速 V は次式で求められる。

$$V = \frac{1}{128} \frac{\lambda m^2 u^2}{\nu l k} \dots \textcircled{1}$$

- V_0 : 欠陥内部流速
- λ : 管摩擦係数
- m : 流力平均深さ ($m = \pi D/4 (\pi + 2)$)
- u : 配管流速 (1.67m/s)
- ν : 動粘性係数
- l : 漏洩欠陥長さ (配管肉厚)
- k : 異形管補正係数

b. 物質拡散流量

欠陥内部の対流及び分子拡散を考えると②及び③が得られる。対流の影響がある (欠陥内部の対流流速が有限の値を取る) 場合と対流がない状態 (欠陥内部の対流流速が 0) の場合のそれぞれをインプットとし、②、③式より硝酸濃度の変化量を求め、物質拡散流量 Q_c を求めた。

$$-VA \frac{dC_1}{dx} + KA \frac{d^2C_1}{dx^2} + 2K(C_2 - C_1) = 0 \dots \textcircled{2}$$

$$VA \frac{dC_2}{dx} + KA \frac{d^2C_2}{dx^2} + 2K(C_1 - C_2) = 0 \dots \textcircled{3}$$

- V : 欠陥内部流速
- A : 漏洩欠陥断面積
- C_1, C_2 : 漏洩欠陥両端での硝酸濃度
- K : 拡散係数 ($1E-9 \text{ m}^2/\text{s}$)
- x : 配管肉厚方向の距離

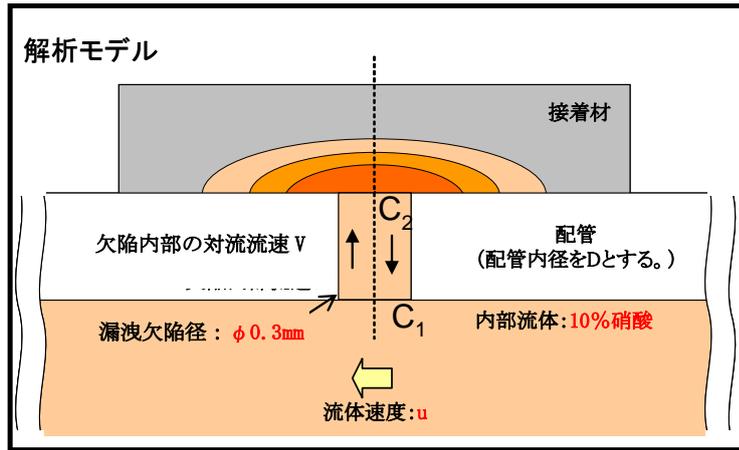


図 4-4-6 欠陥内部の対流影響の解析モデル

表 4-4-1 対流影響の解析条件

項目	値	備考
漏洩欠陥両端での濃度差	1 m ³ /m ³	無次元化した最大濃度差
配管流速	1.67 m/s	実機最大流速
主流配管直径	9.8mm	8A 配管内径
	106.3mm	100A 配管内径
	305.5mm	300A 配管内径
漏洩欠陥長さ (配管厚み)	2mm	8A 配管肉厚
	4mm	100A 配管肉厚
	6.5mm	300A 配管肉厚
拡散係数	1E-9 m ² /s	(液体に対する物質の拡散係数の代表値)

c. 計算結果

計算結果を表 4-4-2、図 4-4-7 にまとめた。対流の有無にかかわらず、物質拡散流量 Q_c は肉厚が大きい程小さくなる。最も流れの影響が大きい 8A 配管においても、配管内部から接着材への硝酸供給量（硝酸拡散流量）については、

$\phi 0.3\text{mm}$ (対流なし) > $\phi 0.1\text{mm}$ (対流あり) の関係が成り立つと推定される。

表 4-4-2 欠陥内部の対流による影響の解析結果

肉厚 (mm)	漏洩欠陥径:D (mm)	物質拡散流量: Qc1 (対流あり) (m ³ /s)	物質拡散流量: Qc0 (対流なし) (m ³ /s)
2	0.1	2.47E-14	3.92E-15
	0.2	2.24E-12	1.57E-14
	0.3	1.86E-11	3.53E-14
4	0.1	3.47E-15	1.96E-15
	0.2	1.77E-13	7.84E-15
	0.3	2.60E-11	1.76E-14
6.5	0.1	1.67E-15	1.21E-15
	0.2	3.15E-14	4.82E-15
	0.3	5.84E-12	1.09E-14

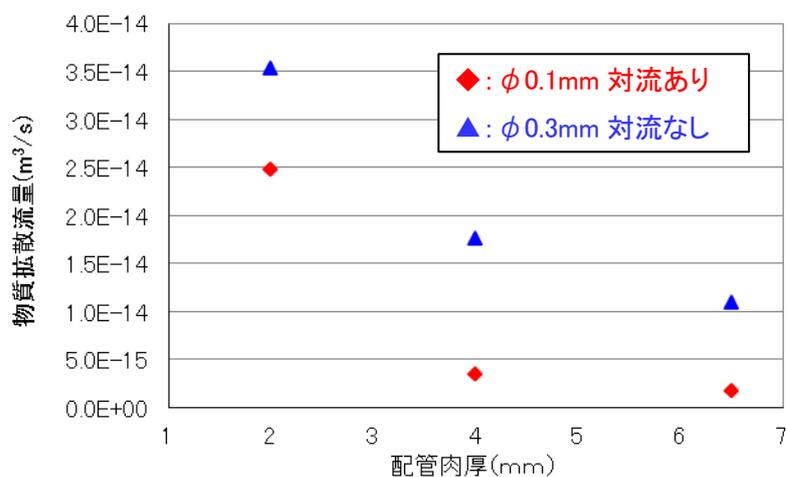


図 4-4-7 欠陥内部の対流影響の解析結果

(3) 検討結果

(1)及び(2)の検討により、以下について確認した。

- ・実機の内部流体圧を考慮すると、滴下程度の漏洩欠陥径としてはφ0.1mmでも安全側であり、φ0.3mmは十分に安全側である
- ・漏洩欠陥径φ0.1mm以下で配管内の流れがある状態での接着材への硝酸供給量は、φ0.3mmで流れがない場合の硝酸供給量で包絡できると考えられることから、内部流体浸透試験に関する本試験条件（φ0.3mm；流れ無し）は十分保守的である。

4.5 塗布範囲と厚さに対する最高適用圧力の確認試験

実機の温度、内圧、補修対象の形状を考慮して試験体を決定し、耐用期間の当面の目安である6ヶ月間の内圧保持試験を実施して適用期間（無漏洩可能期間）の目処付けを行う。なお、接着材塗布範囲は53mm×53mm（テーパ部を除く寸法）、厚さ10mmとする。

はじめに、FEM解析により、一次止水寸法+6ヶ月間の硝酸浸透距離を非接着部（以後、欠陥部と記す）とし、補修対象ごとに非接着部の先端近傍における応力分布または、応力値の相対比較を行う。

続いて、最も単純な形状である平板を代表形状として、内圧をパラメータとした6ヶ月程度の内圧保持試験を実施し、接着材補修を適用可能な内圧と欠陥部寸法との関係について検討を行う。

さらに、応力分布または、応力値の相対比較の結果を考慮（平板と差が大きいものなど）して、平板以外の補修対象を一つ選び、試験内圧を決め、内圧保持試験を実施して平板の試験結果と比較検討する。

適用条件、接着材形状の検討フローを図4-5-1に、試験体の各部名称を図4-5-2に示す。

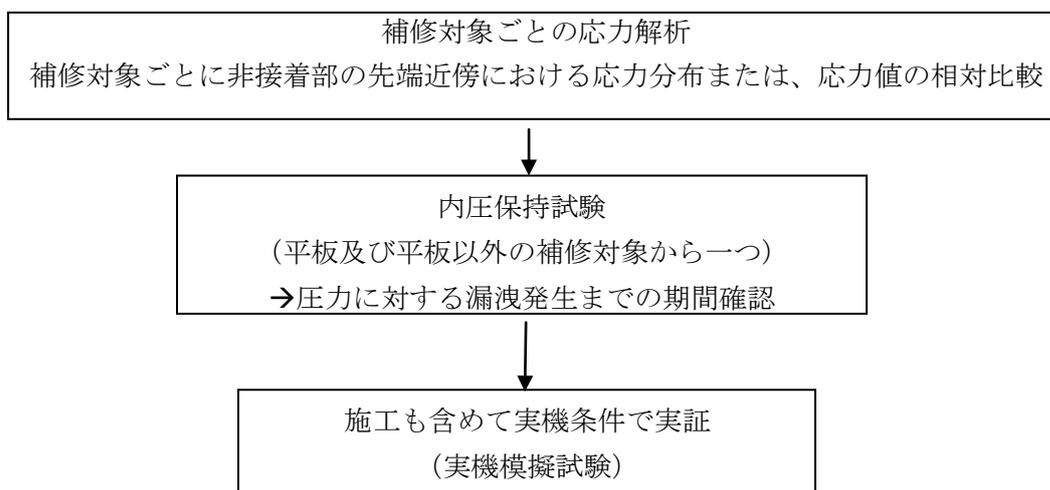


図 4-5-1 適用条件・接着材形状の検討フロー

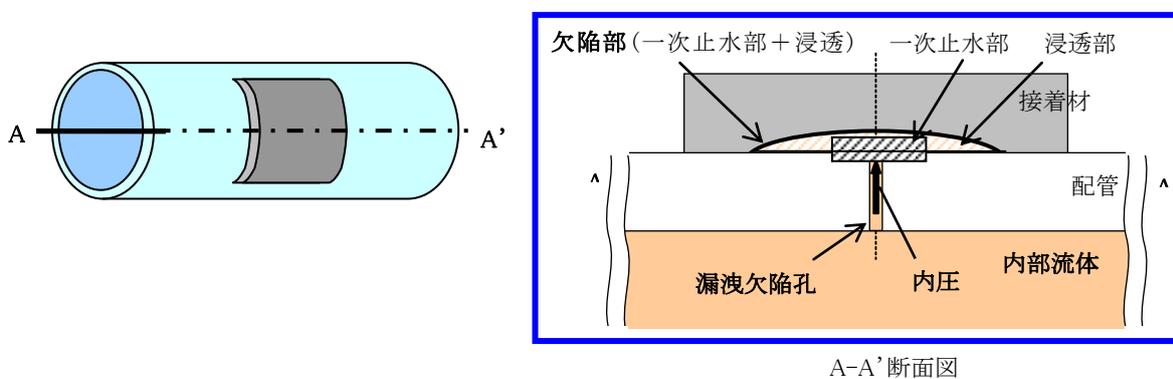


図 4-5-2 試験体各部の名称

4.5.1 補修対象の接着材の欠陥部先端近傍の応力及び応力分布解析（表 4-2-1：試験マトリックス 4-1-1～5 項）

補修対象の代表形状（直管、エルボ、ティー、容器(平板で模擬)）に対し、補修後に接着材に負荷される荷重条件（内圧による剥離モード）を与えた解析を行う。応力解析により接着材の剥離の進展しやすさを評価できるかは保証できないものの、補修対象による応力の類似性や特徴について把握し、無漏洩可能期間の違いの程度を検討する。

(1) 解析方法

補修対象の金属側には SUS304 の材料物性、接着材の材料物性には 4.3 項で計測する物性値を用い、補修対象ごとに FEM 解析を実施し、接着材の欠陥部先端近傍における界面の応力を求める。材料力学では応力が大きい方が破壊に対して厳しいことから、金属と金属に塗布した接着材の界面も剥離進展（破壊）しやすいと考え、接着材の欠陥部先端近傍の応力及び応力分布の大小を比較することで、補修対象の形状による界面の剥離しやすさを検討することとする。

なお、形状による応力及び応力分布の大小の比較が目的なので、接着材が固まる過程において接着材に生じると考えられる残留応力及び温度変動により生じる熱応力については、本解析では考慮しないものとする。評価結果のイメージ図を図 4-5-3 に示す。

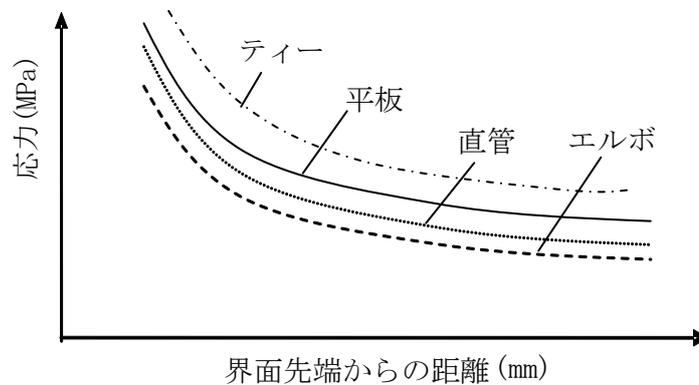


図 4-5-3 評価結果のイメージ

(2) 解析条件

本試験における解析条件を以下に示す。なお、解析条件の詳細は補足資料-4 を参照のこと。

①解析実施数：5 ケース (形状をパラメータに 5 ケース)

②補修対象：25A 直管、25A エルボ、25A ティー、平板、8A 直管

※補修対象の選定基準を表 4-5-1 に示す。

表 4-5-1 解析モデルの選定理由

適用範囲	対象製品 (対象部位)	解析モデル形状	選定理由
配管	配管	<ul style="list-style-type: none"> ・ 8A 配管 ・ 25A 配管 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 対象製品と同様のモデルを選定 ・ 口径の相違による影響確認のため、8A, 25A の 2 ケース選定
継手	エルボ	・ エルボ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 曲率が凸部となる部位に対してエルボを選定 ・ 曲率が凹部となる部位に対してティーを選定
	ティー	・ ティー	
	管台		
	レジューサ		
弁	弁		
容器	胴	<ul style="list-style-type: none"> ・ 8A 配管 ・ 25A 配管 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 配管と同様 (大口径配管と同様の扱いとする)
	鏡	<ul style="list-style-type: none"> ・ エルボ ・ 平板 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 継手と同様 (大口径の継手と同様の扱いとする) ・ 但し、曲率が限りなく大きいモデル (平面形状)として平板を選定

③荷重条件

適用条件の最高圧力が 1.96MPa であり、試験では圧力の管理値を 2.0MPa としていることから、圧力 2.0MPa を荷重条件とする。

④欠陥部の模擬形状及び寸法

確性試験で実験的に確認した 6 ヶ月間の硝酸浸透形状から、硝酸への溶出部の界面先端形状は $\theta = 2^\circ \sim 6^\circ$ のノッチ状になっていたが、解析では保守側に欠陥部をスリット ($\theta = 0^\circ$) で模擬する (図 4-5-4)。

また、応力の相対比較であるため、欠陥部寸法は、一次止水部寸法 (社内試験で $\phi 5\text{mm}$ に決定) + 6 ヶ月硝酸浸透試験で確認した硝酸浸透距離 1.25mm を安全側に丸めた値 ($\phi 3\text{mm}$) = $\phi 8\text{mm}$ とする。なお、水の浸透距離は 0mm と確認されたため、内部流体浸透距離として硝酸浸透距離を適用する。

⑤接着材塗付範囲と厚さ

実機の施工性等を勘案し、53mm×53mm×厚さ 10mm を接着材の塗布寸法（実機でもこの寸法で固定）として解析を行う。ただし、補修対象の形状によって接着材塗布部の曲面が異なることから、上記の 53mm については、接着材厚さ方向の中心線上における距離とする。8A 直管等全周塗布形状となる場合は、全周方向の剥離が発生しても漏洩しないため、軸方向のみ 53mm の塗布寸法とする。

また、社内試験（解析）にてテーパ付与が熱応力低減に対して有利であることが確認された（補足資料-5 参照）ことから、接着材端部には 45° のテーパを付与する。

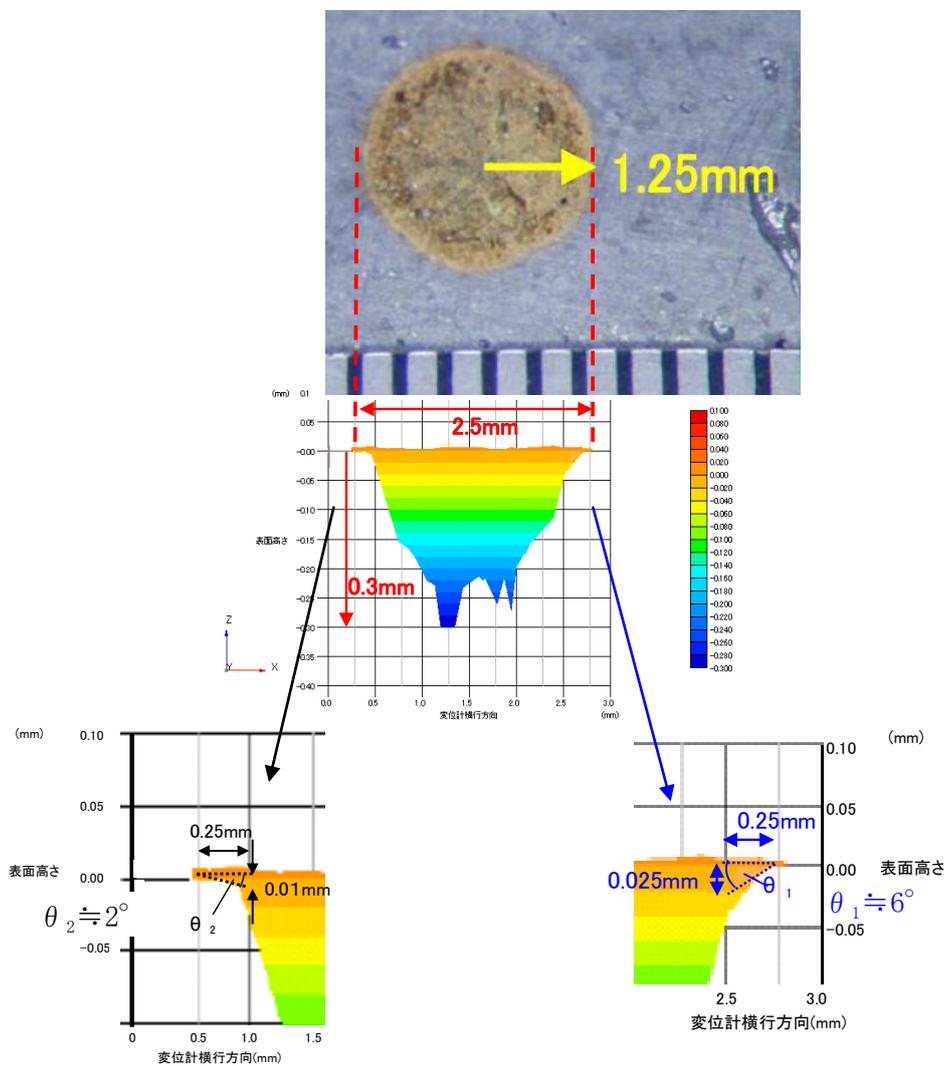


図 4-5-4 硝酸浸透 6 ヶ月後の接着材溶出部と溶出エッジ部の形

4.5.2 内圧保持試験 (表 4-2-1: 試験マトリックス 4-2-1~15 項)

実機適用を想定している条件で内圧保持試験を実施し、内部流体圧力、補修適用期間の関係を検討する。試験体は応力の特性が捉えやすいよう、主に形状と応力分布が比較的単純な平板を用い、その他に応力分布等の異なる補修対象から一つ選んで試験を行い、応力分布等と補修適用期間の関係を検討する。

(1) 試験方法

所定の内部流体圧力を負荷した状態で、耐用期間の当面の目安である 6 ヶ月間内圧を保持し、接着材補修部からの漏洩の有無、漏洩発生時間を確認する。なお、知見拡充の観点から、6 ヶ月経過後も無漏洩の場合は内圧保持試験の試験期間を延長する。実機模擬試験は内圧保持試験 6 ヶ月経過後に開始する。

(2) 試験条件

① 内圧保持試験体作製条件

1) 模擬欠陥孔径 $\phi 0.3\text{mm}$

2) 欠陥部寸法

社内試験で確認した一次止水部寸法 ($\phi 5\text{mm}$) に 6 ヶ月間の硝酸浸透距離 (模擬欠陥中心と浸透領域端部の距離 1.5mm (1.25mm を安全側に丸めた値) $\times 2=3\text{mm}$) を加えた寸法 ($\phi 8\text{mm}$) を欠陥部寸法として設定する。

ただし、6 ヶ月間の硝酸浸透距離を付与するために、実際に硝酸を浸透させて欠陥形状を制御するのは困難であるため、欠陥部寸法の金属箔 (厚さ 0.1mm) を試験体表面に設置し、試験体/接着材の界面に非接着領域 (金属箔と試験体表面は非接着) を形成して模擬的な欠陥部とする。

内部流体として水を想定し最高使用圧力 2MPa を負荷する平板試験体については、非接着領域は $\phi 5\text{mm}$ (一次止水寸法) となるが、4.5.1 項の検討にて平板よりも高い応力が確認されたテー形状と同等の応力を発生させるため、未接着領域を $\phi 8\text{mm}$ に広げる。(補足資料-6 参照)

3) 接着材範囲と厚さ $53\text{mm} \times 53\text{mm} \times$ 厚さ 10mm (テーパ部を除く寸法)
テーパ付与 (テーパ角約 45°)

4) 表面処理条件 #80 で研磨

② 内圧保持試験実施条件

1) 内部流体 水 (トレーサー入り)

内部流体の浸透は $\phi 8\text{mm}$ の金属箔で模擬し、内部流体は圧力を負荷する目的だけに使用するため、内部流体は水とする。

界面剥離状況を確認しやすくするため、トレーサーを添加する。

2) 試験温度 50°C * 施工終了までは室温

3) 試験条件 2条件

接着材補修の実機適用を想定している条件とする。

- 内部流体圧力：1MPa、2MPa（ただし平板以外の補修対象は平板との比較として1MPaのみ実施する）
 - *施工終了までは大気圧
- 内圧保持期間：6ヶ月（6ヶ月後、無漏洩の場合は期間延長する）
- 欠陥部寸法：一次止水部直径5mm^{*1} + 硝酸浸透距離1.5mm^{*2} × 2 = φ8mm
- N数：5

漏洩監視により設備安全性を担保する場合、補修部位の適用期間を事前に厳密または統計的に評価する必要は必須ではなく、設備内圧等に応じた使用期間の知見を充実することを主な目的とするため、試験体数はN=5とする。

試験マトリックスを以下に示す。

表 4-5-2 内圧保持試験マトリックス

補修対象		平板	平板以外の1種
欠陥部寸法		一次止水部直径5mm ^{*1} + 硝酸浸透距離1.5mm ^{*2} × 2 = φ8mm	
内圧(MPa)	1	○	○
	2	○	—
保持期間(月)		6(6ヶ月後、無漏洩の場合は期間延長する)	

*1)一次止水部直径5mmと設定した理由を補足資料-7に示す。

*2)6ヶ月の硝酸浸透距離1.5mm(1.25mmを安全側に丸めた値)。硝酸による浸透試験は1MPaで実施しており、前記1.5mmの中には硝酸による劣化と内圧1MPaによる剥離進展とが含まれていると考えられる。なお、水の浸透試験は2MPaで実施しており、浸透距離≒0であることを浸透試験にて確認済み。

4) 試験体形状 補足資料-1、補足図1-7参照

本試験に用いる試験装置を図4-5-5に示す。

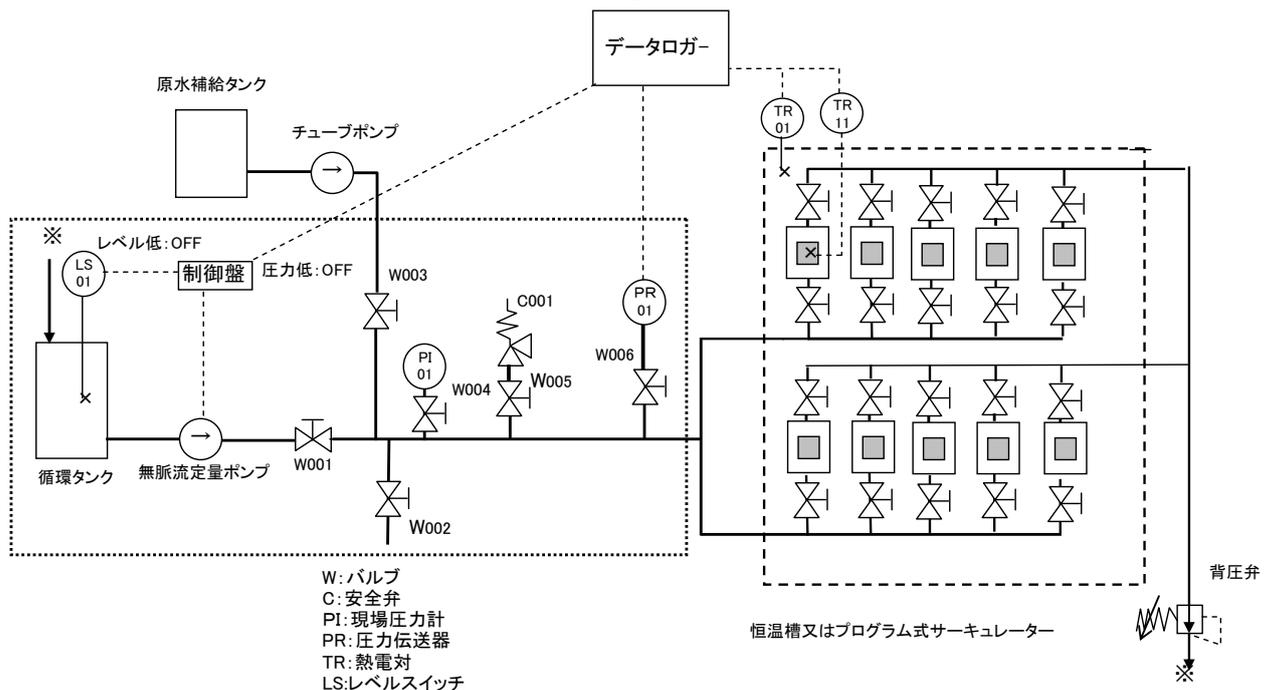


図 4-5-5 内圧保持試験装置系統図

③計測項目

- 1) 保持内圧（漏洩が発生した場合は、圧力低下までの時間）
- 2) 漏洩位置（漏洩が発生した場合）
- 3) 試験終了後、接着材を強制剥離し接着界面観察

④適用可能期間（設計寿命）の評価方法

○ケース 1：試験期間中に 2 体以上漏洩した場合

本試験の試験体数(N=5)は厳密な統計処理を行える試験体数ではないが、接着補修部分の最も弱い部分から漏洩開始するため、最弱リンクモデルであるワイブル解析を試みると以下となる。

<推測例>

試験体 5 体の内 3 体が漏洩し、漏洩するまでの期間はそれぞれ 8 ヶ月、8.5 ヶ月、9 ヶ月であった場合のワイブルプロットを図 4-5-6 に、無漏洩可能期間の推測例を表 4-5-3 に示す。

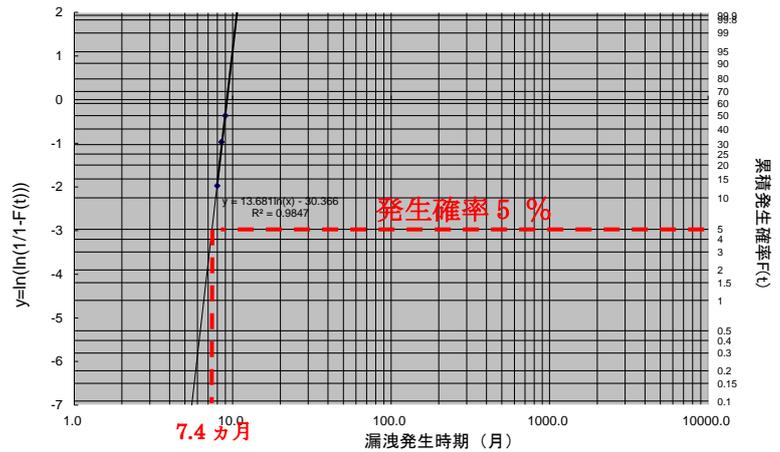


図 4-5-6 ワイブルプロットの例

表 4-5-3 ワイブル解析での推測例

	発生確率	無漏洩可能期間
ワイブル解析	5%	7.4 ヶ月

○ケース 2：1 体だけ漏洩した場合

保守的に 2 体目が 12.0 ヶ月で漏洩したと仮定し、上記と同様にワイブル解析により無漏洩可能期間を試算する。

【推測例】

10.5 ヶ月に 1 体だけ漏洩し、他は漏洩無しの場合、2 体目が 12.0 ヶ月に漏洩したと仮定すると、発生確率 5%における無漏洩可能期間は 9.1 ヶ月と推測される。

○ケース 3：12 ヶ月間、全試験体で無漏洩を維持した場合

ケース 1, 2 と同様に試験体毎の無漏洩期間のバラつきを評価し、無漏洩可能期間を試算する必要があるが、全試験体で無漏洩を維持した場合はバラつきに対する評価を行うことができない。

この場合は、全試験体 5 体が 12 ヶ月間無漏洩を維持したことを踏まえ、保守的な観点から無漏洩可能期間の目安は 6 ヶ月*1と推測する。

*1：参考として、保守的に試験体 5 体中の 3 体が 11 ヶ月、11.5 ヶ月、12 ヶ月で漏洩発生したと仮定すると、ワイブル解析における漏洩発生確率 5%の無漏洩可能期間は約 10 ヶ月となる。（補足資料-8 参照）

4.6 実機施工後の検査方法の決定

接着材の施工により漏洩を防止できることの確認のため、以下に示すような実施工後の検査方法を検討する。

- ・接着材施工後の目視確認（接着材の塗布範囲と厚さ(テーパ部を除いて 53mm×53mm、厚さ 10mm)、外観（異常の無いこと））
- ・施工時点で流体を内包する場合（1次止水を行った場合）は、施工終了直後に漏洩が無いことを目視で確認
- ・施工後の試運転時に漏洩がないことを目視で確認

なお、施工後は商用再処理施設の日常点検で漏洩監視する。補修箇所は日常点検で重要箇所として注意深く点検するよう情報が共有される（既存の業務の仕組みによる）。

4.7 実機施工要領の策定

施工要領については、前項までの検討において決定した接着材構造が、補修対象の形状、漏洩状態、施工姿勢等を考慮して実機施工できる手順を明確にし、この手順で実機模擬試験を実施し、必要があれば、実機模擬試験結果を実機施工要領にフィードバックする。

4.8 実機条件による実証（実機模擬試験）（表 4-2-1：試験マトリックス 5-1、5-2 項）

実機補修を模擬して接着材を施工し、内部流体として硝酸を使用して実機適用条件と同条件において「4.5.2 内圧保持試験」で確認した無漏洩可能期間を検証する。

また、実機補修では適用最高圧力以上の圧力を負荷する耐圧試験は困難であるが、本確性試験では実機適用最高圧力を超える内圧を負荷して補修部分の耐圧性能を確認する。

- ・漏洩状態において接着材による一次止水施工
- ・最長 6 ヶ月保持の内部流体は 10wt%硝酸（約 1.7mol/L）、内圧 1MPa、温度 50℃を使用し、硝酸浸透環境とする
- ・実機適用最高圧力の 1.5 倍の内圧負荷による耐圧性能確認

(1) 6 ヶ月無漏洩可能期間の確認試験

表 4-8-1 に示す試験条件で、内部流体が 10wt%硝酸（約 1.7mol/L）の場合の無漏洩可能期間を検証する。

表 4-8-1 実機模擬による無漏洩可能期間の確認試験条件

	試験条件	試験条件の設定根拠
補修対象	ティー	FEM 解析で最も高い応力が認められた補修対象
接着材範囲と厚さ	形状：テーパ付与（テーパ角 45°） 寸法：53mm×53mm×厚さ 10mm （テーパ部を除く寸法）	一律に採用する寸法。これで内圧保持試験も実施。
試験体数	N=5	使用期間の知見を充実することを主な目的とするため、試験体数は N=5 とする
施工姿勢	上向き	塗布作業が最も困難な姿勢
内部流体	硝酸（10wt% ≒ 1.7mol/L） * 1 次止水を含む施工終了まで内部流体は水	6 ヶ月で接着界面方向へ半径 1.5mm 浸透する 10wt%硝酸（約 1.7mol/L）を、より厳しい条件として選定
内圧	硝酸：1MPa * 1 次止水を含む施工終了まで圧力は滴下状態に保持	実機適用最高圧力
温度	硝酸：50℃ * 1 次止水を含む施工終了まで温度は室温	実機適用最高温度
漏洩欠陥孔	φ 0.3mm	滴下状態の漏洩を考慮し、適用対象とする最大の欠陥寸法
一次止水寸法	φ 5mm	事前検討で決定した一次止水の最適寸法
試験時間	6 ヶ月（漏洩監視を前提とする）	内圧保持試験結果に基づいて設定した無漏洩可能期間

無漏洩期間の確認試験の判定基準は、圧力監視（圧力保持試験と同じ方法）にて漏洩のないこととする。

【計測項目】

- ① 保持内圧（漏洩が発生した場合は、圧力低下までの時間、漏洩位置）
- ② 試験終了後、接着材を強制剥離し接着界面を観察する。

(2) 耐圧性能確認試験

前項の無漏洩期間確認試験と同時に作製した試験体について、内部流体が水の場合を想定して、接着材硬化完了後に耐圧性能を確認する。

- 1) 再処理設備規格溶接規格の耐圧試験に準じて、水の適用最高圧力 1.96MPa の 1.5 倍を包絡する圧力 3MPa を 10 分間負荷する。
- 2) なお、10wt%硝酸（約 1.7mol/L）、内圧 1MPa、温度 50℃を 6 ヶ月間保持した場合の硝酸浸透範囲は、接着界面方向には $\phi 0.3\text{mm}$ の漏洩欠陥孔を中心として半径 1.5mm、接着材内部方向には深さ 0.3mm であったことから、10 分間の耐圧確認試験では硝酸による接着材の劣化の影響は無視できると推定される。

従って、接着材硬化完了後の耐圧確認試験は、水への適用を想定した 3MPa の耐圧確認試験で、10wt%硝酸（約 1.7mol/L）ラインの耐圧確認試験の圧力条件を包絡するため、試験は内圧 3MPa の 1 条件とする。

表 4-8-2 耐圧性能確認試験条件

内部流体	水
試験体形状	ティー
漏洩欠陥孔	$\phi 0.3\text{mm}$
一次止水寸法	$\phi 5\text{mm}$
接着材範囲と厚さ	形状：テーパ付与（テーパ角 45°） 寸法：53mm×53mm×厚さ 10mm （テーパ部を除く寸法）
内圧	3MPa
温度	50℃
圧力保持時間	10 分
実施時期	接着材硬化完了後
試験体数	5

耐圧性能確認試験の判定基準は、圧力監視（圧力保持試験と同じ方法）にて漏洩のないこととする。

【計測項目】

- ① 保持内圧（漏洩が発生した場合は、圧力低下までの時間、漏洩位置）
- ② 試験終了後、接着材を強制剥離し接着界面を観察する。

5. 試験結果と考察

5.1 接着材材料物性測定試験

5.1.1 ガラス転移温度測定

動的ねじり弾性率測定法によりチタニウムパテのガラス転移温度(Tg)を測定した結果、Tgは55°Cであった。

Tg以上の温度では機械的特性が低下することを考慮して、最高使用温度を50°Cとした。詳細は添付資料-1「2.2 ガラス転移温度測定結果」を参照。

5.1.2 接着強さの経時変化

50°C環境下において引張せん断接着強さ、及び引張接着強さの6ヶ月間の経時変化を確認した。50°Cにおけるエージング効果で、接着施工から6ヶ月後まで各接着強さは徐々に上昇した。すなわち、環境温度50°Cにおいては、施工後6ヶ月以内に熱劣化による接着強さの低下は無いことを確認した。詳細は添付資料-1「2.3 接着強さの経時変化」を参照。

5.1.3 接着材の機械的特性の経時変化

50°Cで6ヶ月間保持した場合の機械的特性(引張強さ、圧縮強さ、弾性率、ポアソン比)の変化を測定し、各機械的特性は6ヶ月後も初期値と同レベル以上を維持することを確認した。詳細は添付資料-1「2.4 機械特性の経時変化」を参照。

接着強さ(平均値)、機械的特性の値は、6ヶ月後も初期と同等レベル以上を維持していることから、確性試験では接着材塗布直後(初期状態)にて試験を実施することで、安全側の評価ができると考える。

5.2 内部流体浸透試験

5.2.1 硝酸浸透試験

50°Cの条件で6ヶ月間に内部流体が接着材へ浸透する距離と形状を確認した。内部流体には濃度10wt%(約1.7mol/L)の硝酸を使用した。

6ヶ月間の硝酸浸透範囲(試験体3体の最大値)は、φ0.3mmの漏洩欠陥孔を中心として接着界面方向に半径1.25mm浸透し、接着材内部方向に0.3mm溶出していた。

この硝酸浸透範囲は、接着材の最小塗布範囲53mm×53mm(テーパ部除く)、厚さ10mmに対して十分小さく、硝酸浸透が接着材自体の強度低下に及ぼす影響は無視しうると推定された。詳細は添付資料-1「3.1 硝酸浸透試験」を参照。

ただし、接着界面方向の浸透距離は6ヶ月後の非接着部面積に対し、わずかではあるが影響を与えることが考えられるため、内圧保持試験においては、接着界面方向の硝酸浸透距離(半径)1.25mmを保守的に半径1.5mmとして、模擬欠陥径に反映することとした。

5.2.2 水浸透距離

水の浸透距離についても測定したが、接着界面方向、接着材内部方向とも浸透は確認できなかった。詳細は添付資料-1 「3.2 水浸透試験」を参照。

5.3 欠陥部先端近傍の応力分布解析

25A 直管、25A エルボ、25A ティー、平板、8A 直管における未接着部近傍の界面に垂直な方向の応力の比較を行った結果、25A ティー(Case-5)が最も高い応力を示した。また、すべての Case で、ほぼ同様の傾向を示した。

25A ティー(Case-5)が最も高い応力を示したのは、内圧により接着材塗布部のティールの肩部がオーバル変形(楕円状に変形)し、この変形は未接着部が開き勝手になる変形(応力が高くなる変形)であるためと考えられる。

以上から、平板、直管、エルボ及びティールの応力分布は同様の傾向を示すが、ティールについては、局部変形の影響により他の補修対象よりも大きな発生応力が生じていると考えられる。

本解析結果を踏まえて、内圧保持試験では代表形状として平板および最も応力が高いティールを使用することとし、実機模擬試験ではティールを使用することとした。

詳細は添付資料-1 「4. 欠陥部先端近傍の応力分布解析」を参照。

5.4 内圧保持試験

形状と応力分布が比較的単純な平板、及びFEM解析の結果、最も高い応力を示したティールの2種を補修対象の試験体に選定し、内部流体を水(温度 50℃)として、内圧保持試験を実施した。

試験体の漏洩欠陥孔は $\phi 0.3\text{mm}$ とし、更に接着材一次止水部($\phi 5\text{mm}$)に6ヶ月間の硝酸浸透範囲(半径方向 1.5mm)を加えた範囲($\phi 8\text{mm}$)を非接着部位とみなして、漏洩欠陥孔を中心に $\phi 8\text{mm}$ の金属箔(厚さ 0.1mm)を模擬欠陥として設置した。テーパを除く塗布範囲 53mm \times 53mm(テーパ角 45°)、厚さ 10mmの接着材を施工した。

内圧 1MPa については、平板、ティールの各 5 体とも 6 ヶ月無漏洩を達成した。内圧 2MPa の平板試験体 5 体については、試験期間を延長して 12 ヶ月無漏洩を達成した。また、接着材を強制剥離して接着界面を観察した結果、内部流体圧に起因する接着材剥離の兆候は認められなかった。詳細は添付資料-1 「5. 内圧保持試験」を参照。

全ての試験体について、試験期間内に漏洩発生しなかったため、統計的処理による無漏洩可能期間の推定はできない。そこで、内圧保持試験結果で全て無漏洩であったことを踏まえ、保守的な観点から無漏洩可能期間の目安は6ヵ月と判断した。

5.5 実機条件による検証（実機模擬試験）

5.5.1 硝酸を用いた無漏洩可能期間の確認試験

FEM 解析の結果、最も高い応力を示したティーを試験体として選定し、実機補修を模擬して滴下漏洩状態で接着材による一次止水実施後、テーパを除く塗布範囲 53mm × 53mm（テーパ角 45°）、厚さ 10mm の接着材を施工した。

内部流体として濃度 10%の硝酸（約 1.7mol/L）、温度 50°C、内圧 1MPa を用いて、前項で設定した 6 ヶ月間の無漏洩維持が可能か検証した。

結果、試験体 5 体とも 6 ヶ月間無漏洩であることを確認した。更に試験終了後、接着材を強制剥離して接着界面を観察したが、硝酸は $\phi 0.3\text{mm}$ の漏洩欠陥孔を中心として接着界面方向に $\phi 1.4\sim 1.6\text{mm}$ 程度浸透していたが、内部流体圧に起因する接着材の剥離は認められなかった。すなわち、前項で設定した無漏洩可能期間 6 ヶ月を経過しても、漏洩および接着材剥離の兆候がないことを検証した。詳細は添付資料-1 「6 実機条件による検証（実機模擬試験） 6.1 無漏洩期間の確認試験」を参照。

5.5.2 耐圧性能確認試験

実機補修では最高適用圧力以上の圧力を負荷する耐圧試験は困難であるが、本確性試験では実機適用最高圧力 2MPa の 1.5 倍の内圧 3MPa を 10 分間負荷する試験を実施した。

ティーを試験体として、内圧 3MPa を 10 分間負荷し、試験体 5 体とも無漏洩で試験を終了した。また、試験終了後、接着材を強制剥離して接着界面を観察したが、内部流体が接着界面に浸透した痕跡は認められなかった。これにより本接着材補修工法により施工した接着材補修部が内部流体圧力 2MPa に対して耐圧性能を有することを検証した。詳細は添付資料-1 「6. 実機条件による検証（実機模擬試験） 6.2 耐圧性能確認試験」を参照。

6. 実機施工要領

本接着材施工法について、5章で確認された無漏洩可能期間6ヶ月を再現性よく施工できるようにするため、実機施工要領を策定した。

実機施工の概要は以下となる。

図4-1-1に示した判定フローにより、本補修工法を実施する際には、施工表面が漏洩している状態とドライ状態との二通りが考えられる。

漏洩している状態においては、前述の通りVT・PTによる漏洩欠陥の大きさが特定できないため、一次止水施工により漏洩が止まる場合は、一次止水用接着材寸法が漏洩欠陥を包絡しているとみなす。この一次止水で施工した接着材を中心として、一次止水端部から漏洩補修に必要な接着材塗布範囲に対して補修用接着材を塗布する。

具体的な施工方法として、接着材施工面の表面処理実施後、接着材に対して離型性の良いシリコンゴムシート等で予め一次止水用型枠を設置し、型枠に沿って欠陥孔の周囲から接着材を塗布していく。その際、漏出した内部流体が接着材に混入しないよう、小型のポンプ等につないだチューブを用いて流体を吸出しながら接着材を塗布していく。

チューブを差し込んだ部分以外への接着材施工が終わった後、チューブを外すとほぼ同時に、予め半硬化させた接着材を漏洩部に設置し、結束バンド等で締め付け、接着材を硬化させる。この一次止水の状態でも漏洩がないことを確認し、漏洩補修に必要な接着材を追加塗布する。

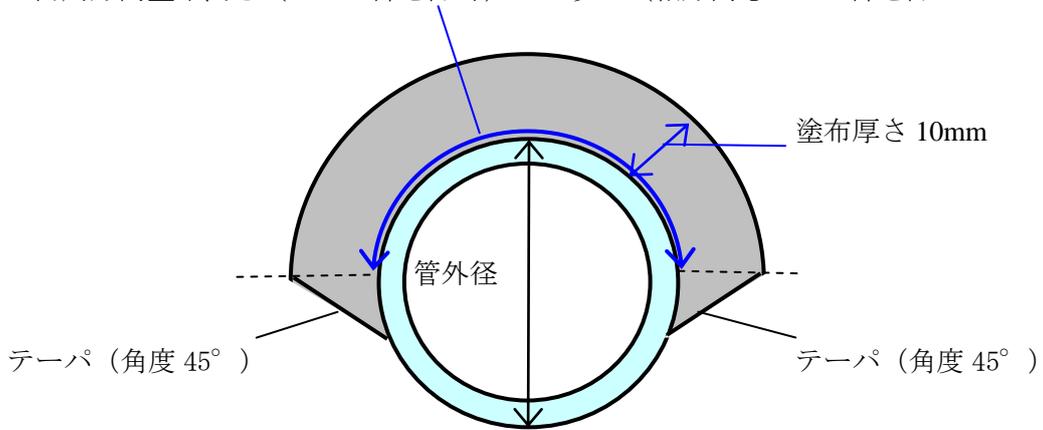
ドライの状態においては一次止水を実施する必要がないため、VT、PTにて漏洩欠陥の大きさを特定した後、表面処理を実施し、欠陥部を中心として必要寸法分の漏洩補修用接着材を塗布する。

いずれの場合も、接着材の寸法は53mm×53mm以上(テーパ部を除く寸法)、厚さ10mm以上とする。

ただし、テーパ部を含む接着材塗布長さが補修対象の周長を越える場合は、全周を覆う構造を採用する。(図6-1参照)

塗布範囲

円周方向塗布長さ（テーパ部を除く）53mm以上（軸方向もテーパ部を除いて53mm以上）



全周塗布

(テーパ部を含む円周方向塗布長さ) \geq (補修対象の周長) の場合、全周を覆う
(軸方向はテーパ部を除いて53mm以上)

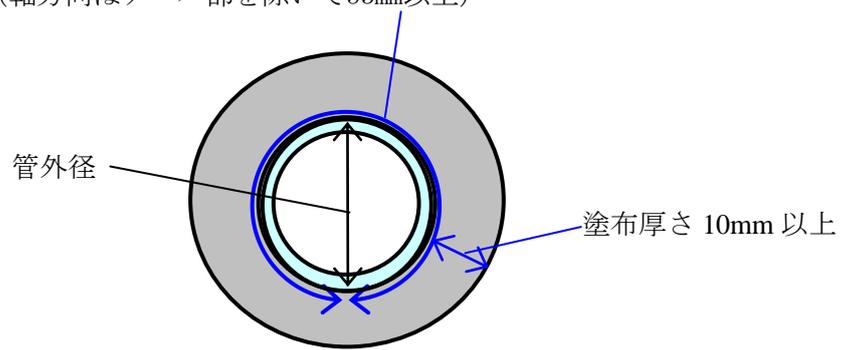


図 6-1 補修範囲と接着材補修構造の関係（配管断面図）

鋳鋼品は圧延鋼等の表面と同程度まで研磨する（補足資料-9 参照）。
実機施工要領の詳細な手順は添付資料-2 「実機施工要領」を参照。

7. 結論

7.1 接着材物性測定

- ・ ガラス転移温度測定結果により、使用接着材(チタニウムパテ)の最高使用温度を50℃に設定した。また、50℃においては6ヶ月間で接着強さ及び機械的特性は低下しないことを確認した。

7.2 内部流体浸透試験

- ・ 6ヶ月間の硝酸浸透範囲は、接着界面方向に半径1.25mm浸透し、接着材内部方向に0.3mm溶出していた。これは、接着材の最小塗布範囲53mm×53mm(テーパ部除く)、厚さ10mmに対して十分小さいため、硝酸浸透が接着材自体の強度低下に及ぼす影響は無視しうると判断した。
- ・ ただし、接着界面方向の浸透距離は有効接着面積に対し、わずかではあるが影響を与えることが考えられるため、保守的に半径1.5mmの円形状を未接着部として、評価モデルに反映することとした。
- ・ 水の浸透距離については、接着界面方向、接着材内部方向とも浸透が無いことを確認した。

7.3 欠陥部先端近傍の応力分布解析

- ・ 平板(胴を模擬)、直管、エルボ及びティーにおける未接着部近傍の界面に垂直な方向の応力の比較を行った結果、ティーの発生応力が最も高いことを確認した。また、ティーを除く他の形状については、ほぼ同様の発生応力であることを確認した。

7.4 内圧保持試験

- ・ 一次止水寸法(5mm)に硝酸浸透距離(3mm)を加えた直径8mmの未接着部(金属箔)を設定した試験条件にて内圧1MPaを負荷し、平板、ティーの各5体とも6ヶ月の間、無漏洩を維持する結果を得た。
- ・ 内部流体が水の条件で、平板形状、未接着部(金属箔)φ8mmの試験体に対し、内圧2MPaを負荷し、全試験体5体について12ヶ月間無漏洩を維持する結果を得た。
- ・ 内圧2MPaの全試験体について、試験期間内に漏洩が発生しなかったため、無漏洩可能期間の目安は6ヶ月と推測した。

7.5 実機条件による検証（実機模擬試験）

- ・ 実機条件を模擬した硝酸適用条件（内圧：1MPa、温度：50℃、内部流体：濃度 10% 硝酸（約 1.7mol/L）、試験体形状：ティー【滴下漏洩中に施工】）において 6 ヶ月間の保持試験を実施し、全試験体（5 体）で無漏洩を維持する結果を得た。
- ・ 実機適用最高圧力 1.96MPa×1.5 倍を包絡する内圧 3MPa を 10 分間負荷する耐圧性能確認試験を実施し、試験体 5 体とも無漏洩を維持する結果を得た。

7.6 実機施工要領

- ・ 本確性試験にて無漏洩維持期間（目安）を 6 ヶ月と推測した接着材補修を再現性良く施工可能とするために、実機施工要領を策定した。

7.7 結論のまとめ

- ・ 7.1～7.5 項の確認結果より、本接着材補修工法の無漏洩可能期間の目安は 6 ヶ月と推測した。
- ・ 本接着材補修工法を再現性良く施工可能とするため、実機施工要領を策定した。

以上

添付資料- 1

試験結果と考察

目次

1.	はじめに	1
2.	接着材物性測定試験	2
3.	内部流体の浸透距離確認試験	6
4.	欠陥部先端近傍の応力分布解析	12
5.	内圧保持試験	18
6.	実機条件による検証（実機模擬試験）	24

1. はじめに

接着材物性測定試験、内部流体の浸透距離確認試験、欠陥部先端近傍の応力解析、内圧保持試験及び実機模擬試験について、結果をまとめている。

2. 接着材物性測定試験

2.1 測定項目と条件

接着材の物性値を把握するとともに、FEM解析の入力パラメータとして、付表1-2-1に従い適用温度条件における初期、3ヶ月、6ヶ月経過後の物性を測定した。

付表 1-2-1. 物性測定試験項目と試験条件

試験目的		試験条件	試験条件の設定根拠
ガラス転移温度測定 (粘弾性測定 (JIS K7244-2))		・ 温度 : RT-200°C	適用範囲 (RT~50°C) を包絡する温度幅で特異点の有無を確認する
界面	引張り接着強さ測定 (JIS K6849)	・ 温度 : 50°C, 100°C ・ 評価期間 : 初期, 3, 6 カ月	適用範囲の最高温度 50°C、及び参考データとして 100°C
	引張りせん断接着強さ測定 (JIS K6850)	・ 温度 : 50°C, 100°C ・ 評価期間 : 初期, 3, 6 カ月	
接着材 本体	引張り特性測定 (JISK7113)	・ 温度 : 50°C, 100°C ・ 評価期間 : 初期, 3, 6 カ月	
	圧縮特性測定 (JISK7208)	・ 温度 : 50°C, 100°C ・ 評価期間 : 初期, 3, 6 カ月	

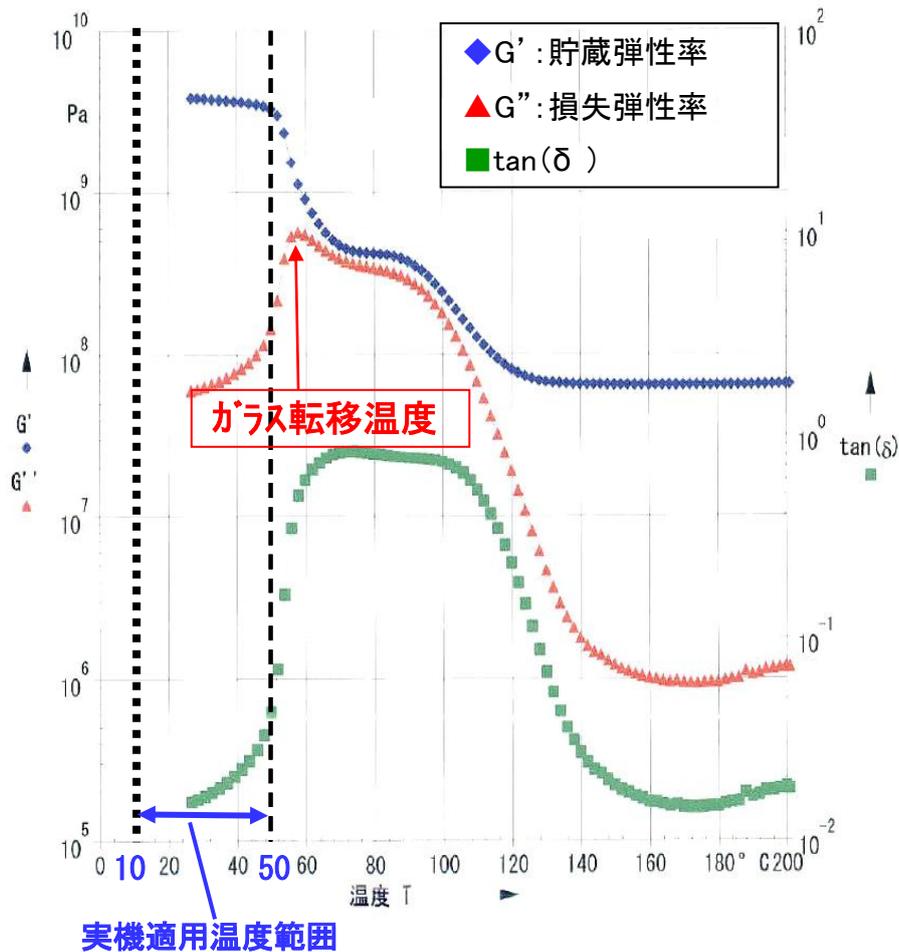
2.2 ガラス転移温度測定結果

適用温度領域において接着材特性の急激な変化が無いことを確認するため、JIS K 7244-2 に準拠し以下の条件にてガラス転移温度 (T_g) の測定を実施した。試験片の形状を補足資料-1、補足図 1-1 に示す。

- ・ 測定方法 : 動的ねじり粘弾性測定 (ひずみ 0.1%)
- ・ 測定温度範囲 : RT~200°C
- ・ 昇温速度 2°C/分
- ・ 周波数 1Hz

計測結果を付図 1-2-1 に示す。損失弾性率 G'' のピーク温度から T_g は 55°C と評価した。

T_g 以上の温度域では接着材の機械的特性が低下することを考慮して、安全側から最高適用温度を 50°C とすることとした。



付図 1-2-1 接着材のガラス転移温度測定結果

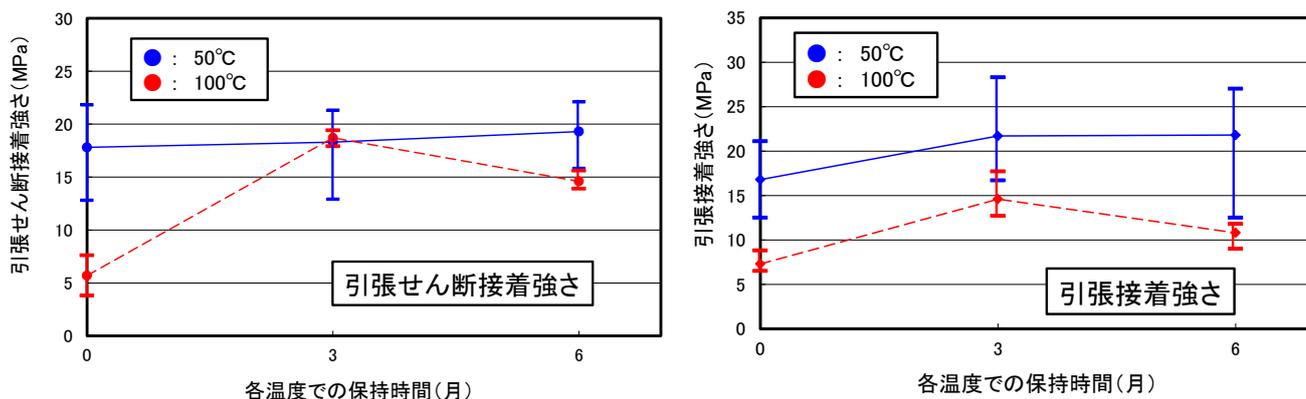
2.3 接着強さの経時変化

接着材塗布後から6ヶ月間における接着強さの変化を把握し、実施する試験の条件に反映するために、実機適用最高温度50°C、及び参考として100°Cにおいて、引張接着強さ（JIS K 6849）、引張せん断接着強さ（JIS K 6850）の経時変化（6ヶ月）を測定した。試験片の形状を補足資料-1の補足図1-2及び補足図1-3に示す。

付図1-2-2に試験結果を示す。50°C保持では、5体の試験片の平均では、経時における接着強さの増大が観察される。

100°Cでは、初期の接着強さが50°Cより明らかに小さいだけでなく、3ヶ月から6ヶ月にかけては熱劣化の影響と考えられる接着強さの低下が観察された。

100°Cよりも50°Cの方が保持期間に係わらず、接着強さのバラツキが大きい。50°Cのバラツキはガラス転移温度（55°C）に近いことの影響が出ていると考えられる。



付図 1-2-2 保持期間と接着強さの関係

2.4 接着材の機械的特性の経時変化

実機適用最高温度 50°C で 6 ヶ月間保持した場合の接着材の機械的特性（引張強さ、圧縮強さ、弾性率、ポアソン比）の変化を確認した。なお、参考データとして 100°C で保持した場合についても測定を実施した。試験片の形状を補足資料-1 の補足図 1-4-1～補足図 1-4-3 に示す。

結果を付図 1-2-3～1-2-5 に示す。

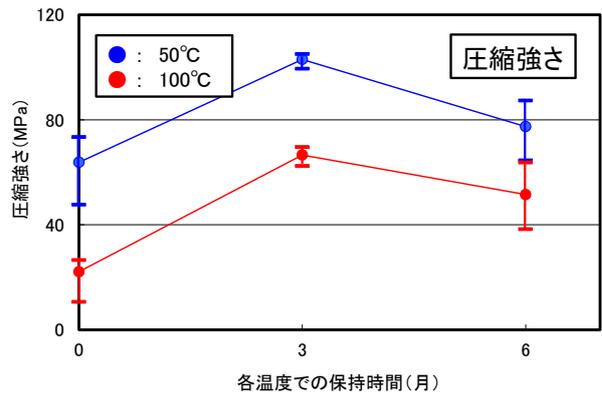
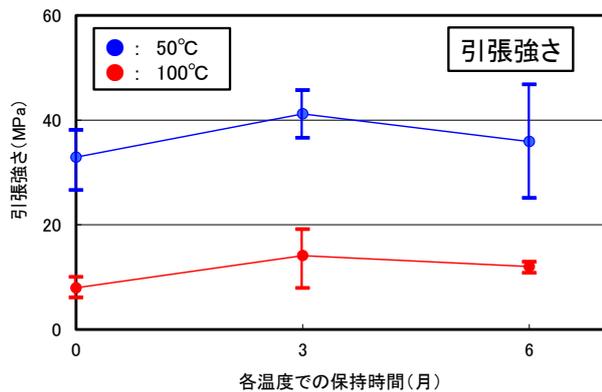
50°C 保持の機械的特性については、例えば、ポアソン比は 6 ヶ月間あまり変化がみられないなど、100°C よりも相対的に経時変化が小さい。

ただし、50°C の場合も、3 ヶ月から 6 ヶ月の間で低下が始まる特性項目もあるが、6 ヶ月経過後でも初期値を下回ることはないため、50°C の場合は 6 ヶ月後も初期の機械的特性と同レベル以上を維持していると考えられる。

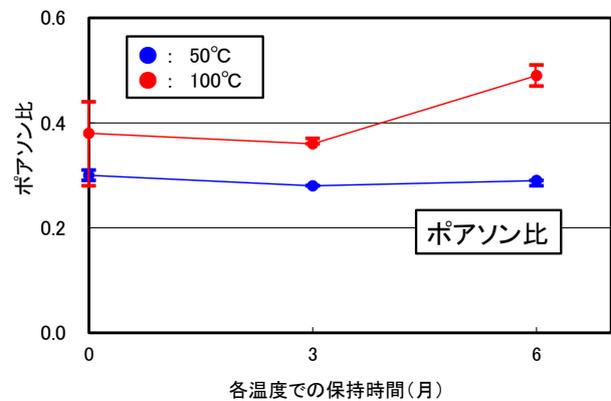
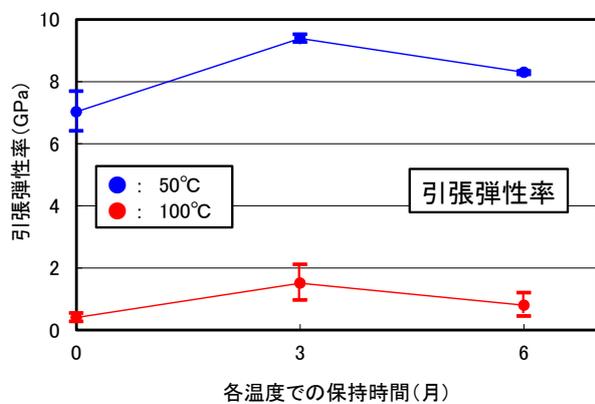
初期から 6 ヶ月間を通して 100°C の方が 50°C よりも引張強さ、圧縮強さ、及び弾性率が明らかに低い。接着材の T_g が 55°C であることに起因して、 T_g を大幅に超えている 100°C では機械的特性が低下したものと考えられる。

界面接着強さの方が接着材本体の機械的特性より数値のバラツキが大きい傾向があることから、接着材本体よりも界面特性の方が不安定であると推定される。また、接着材本体の機械的特性については、50°C よりも 100°C の方がバラツキはやや大きい傾向がある。

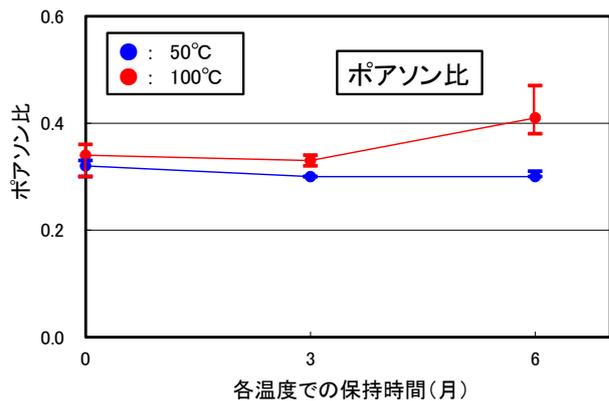
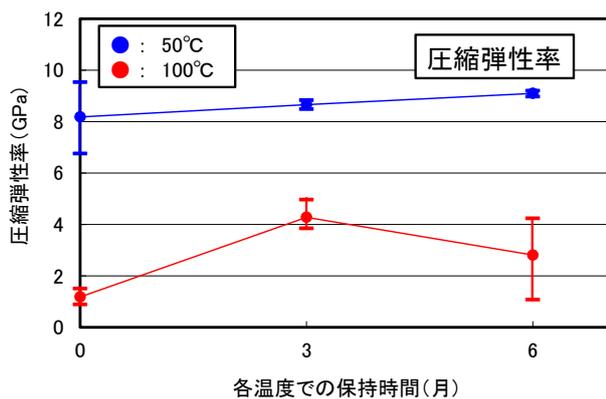
接着強さ（平均値）、機械的特性の値は、6 ヶ月後も初期と同等レベル以上を維持していることから、今後の試験では接着材塗布直後（初期状態）にて試験を実施することで、安全側の評価ができると言える。



付図 1-2-3 引張強さ、圧縮強さの経時変化



付図 1-2-4 引張弾性率とポアソン比の経時変化



付図 1-2-5 圧縮弾性率とポアソン比の経時変化

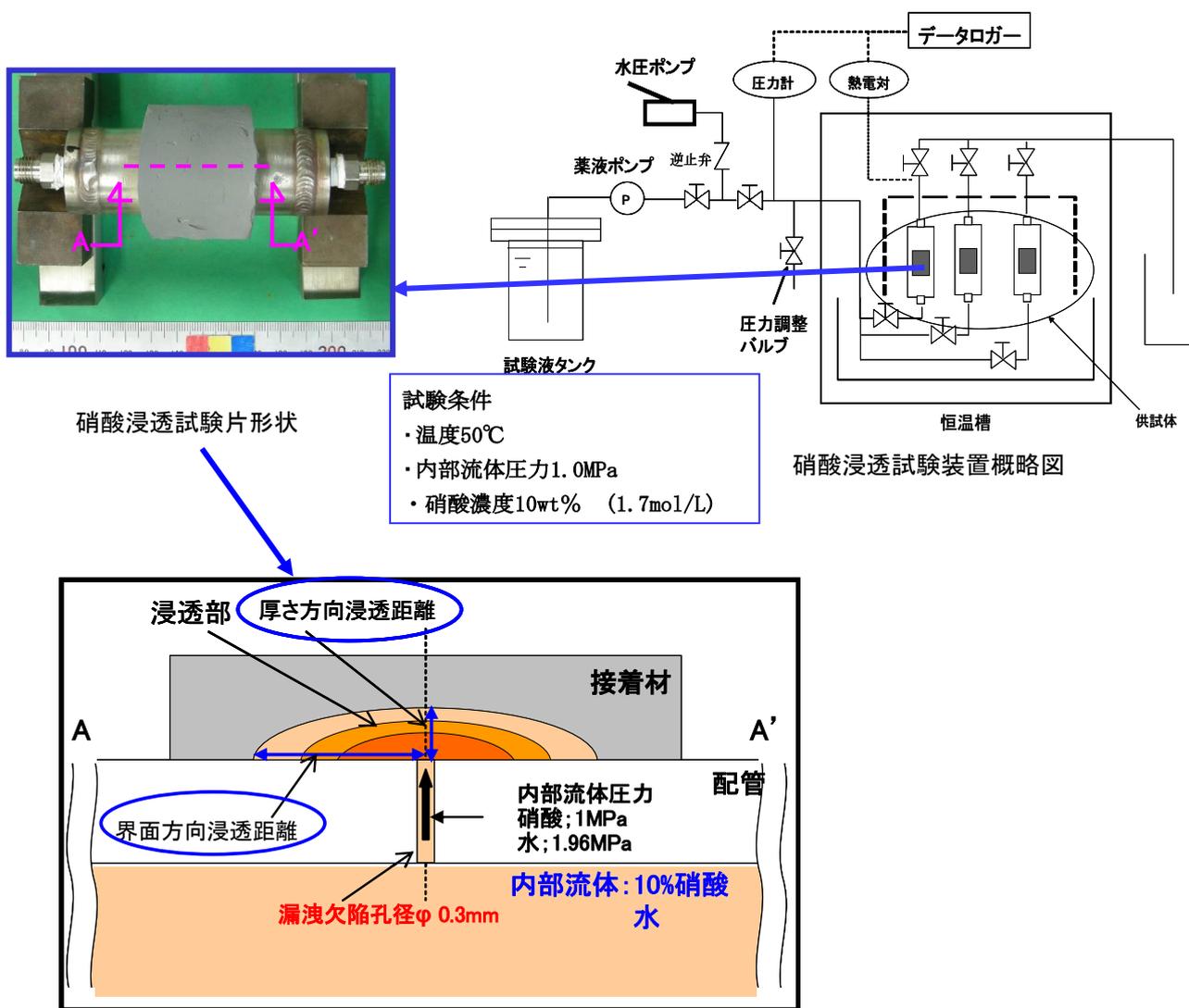
3. 内部流体の浸透距離確認試験

6ヶ月後における接着材への内部流体浸透距離・形状を確認するため、50℃における内部流体浸透試験を実施した。内部流体浸透範囲は、接着材/母材の接着力、及び接着材本体の機械的強度が喪失する範囲、とみなす。

なお、水の浸透距離についても確認するため、1ヶ月間の水の浸透試験を追加実施した。

3.1 硝酸浸透試験

硝酸浸透試験方法の概要を付図 1-3-1 に示す。試験体の形状を補足資料-1、補足図 1-5 に示す。試験体は、所定期間の硝酸浸透後、配管から接着材を剥離させ、浸透距離を計測した。



A-A'断面図

付図 1-3-1 硝酸浸透試験方法の概要

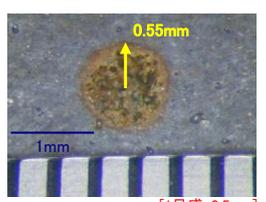
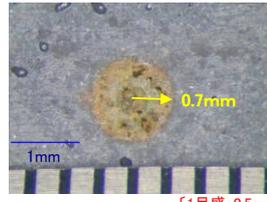
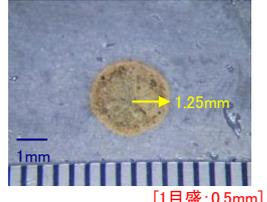
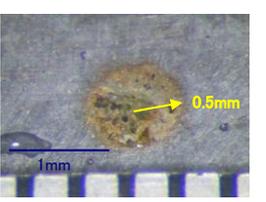
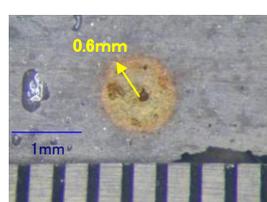
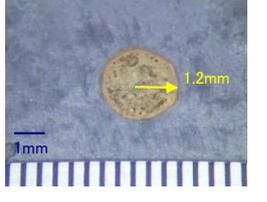
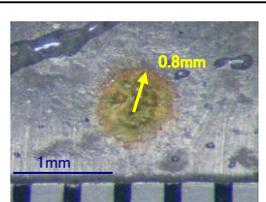
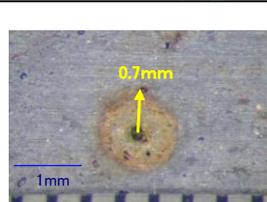
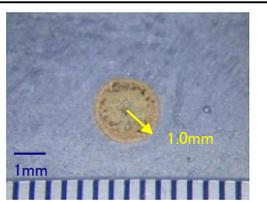
1) 界面方向への浸透

エポキシ系接着材であるチタニウムパテは硝酸との反応により黄色～褐色に変色することから、界面方向の浸透距離は、母材/接着材界面（剥離面）の変色部分の大きさを測定して求めた。

なお、この黄変が硝酸とエポキシ樹脂の反応生成物であるニトロ化合物の色に起因することを赤外分光分析により事前に確認している*¹。

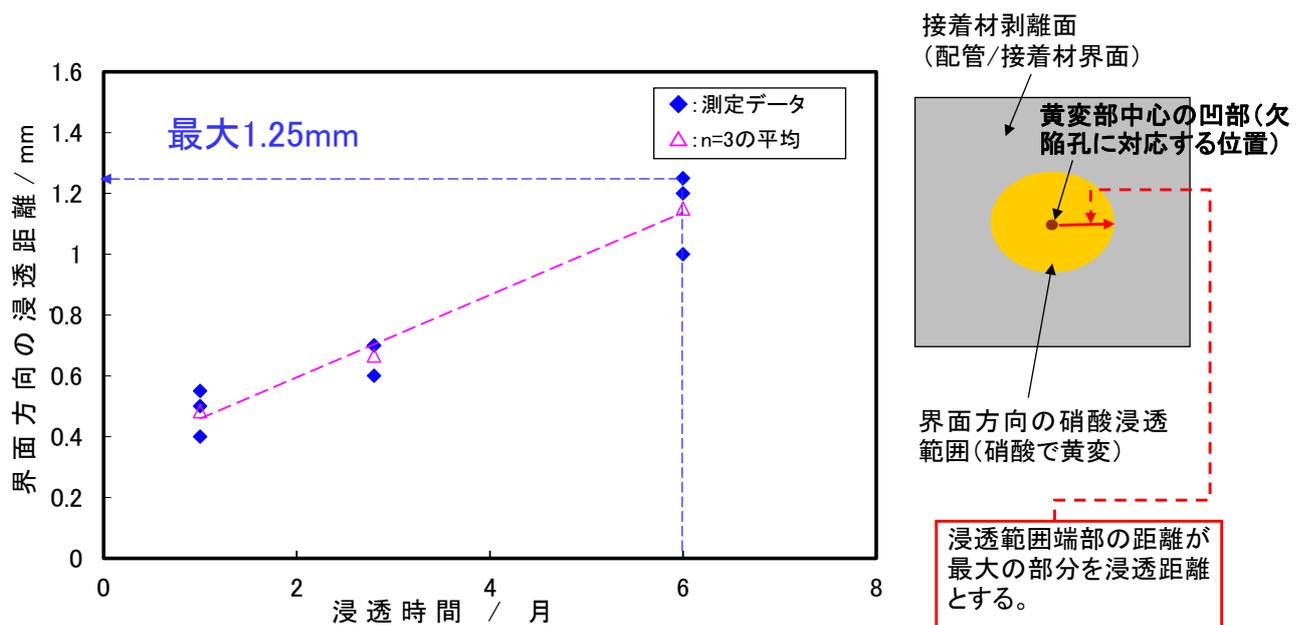
* 1) 事前確認の結果を補足資料-3 に記載

付図 1-3-2 には、硝酸浸透 1, 3, 6 ヶ月後における母材/接着材界面（剥離面）の硝酸浸透形状を示す。界面方向の硝酸浸透形状は、配管の漏洩欠陥孔を中心とし、ほぼ円形であることを確認した。

1か月後			3か月後			6か月後		
No	浸透距離 (mm)	写真	No	浸透距離 (mm)	写真	No	浸透距離 (mm)	写真
1-1	0.55		3-1	0.7		6-1	1.25	
1-2	0.5		3-2	0.6		6-2	1.2	
1-3	0.4		3-3	0.7		6-3	1.0	

付図 1-3-2 6 ヶ月間の硝酸浸透形状

付図 1-3-2 の変色部分について、界面方向の硝酸浸透距離を浸漬時間に対してプロットしたグラフを付図 1-3-3 に示す。6 ヶ月後の硝酸浸透距離は、各 3 体の試験体で測定データの最大値を採用し、浸透距離 1.25mm と見積もった。

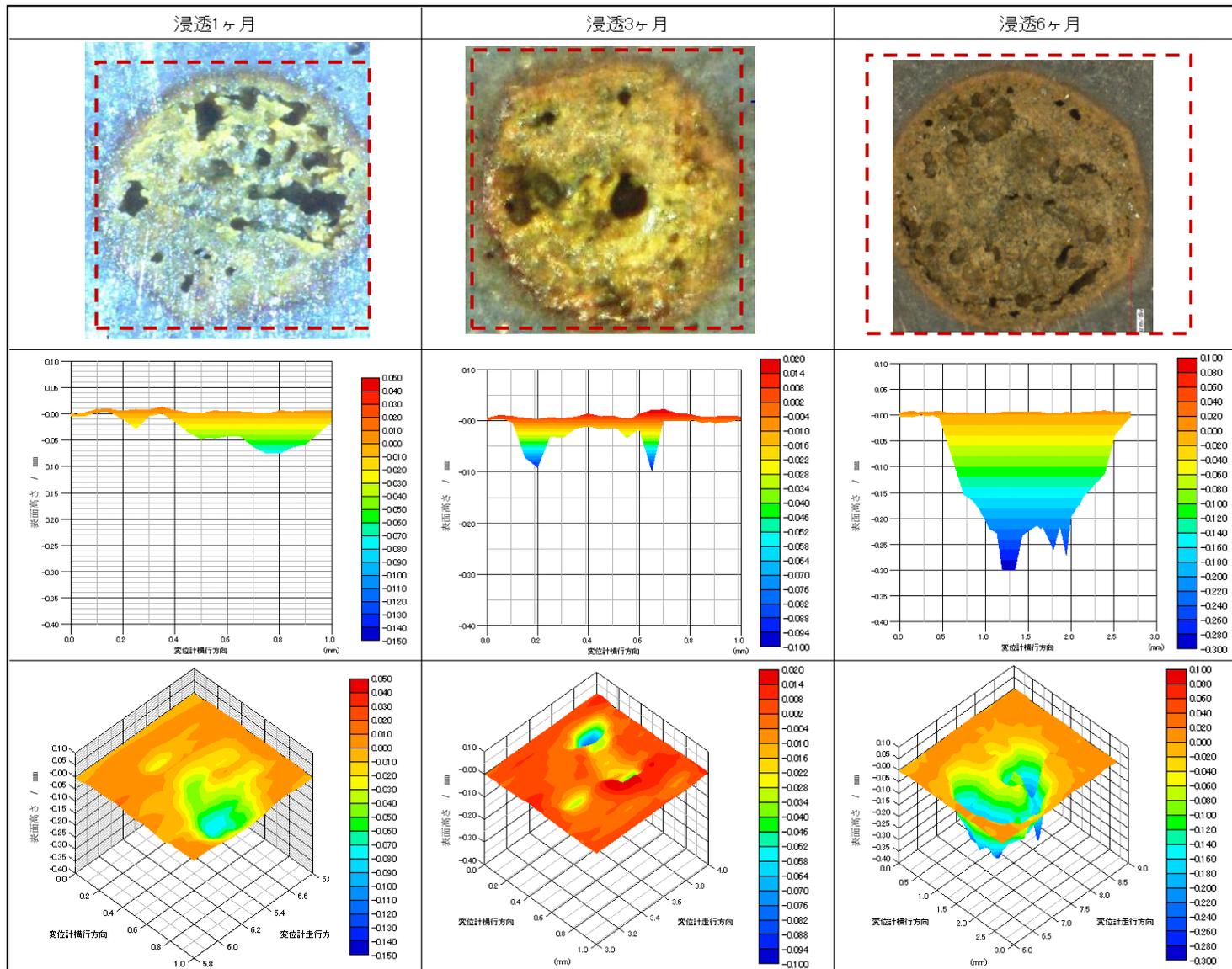


付図 1-3-3 浸漬時間と硝酸浸透距離の関係

2) 接着材厚さ方向への浸透

非破壊で計測できるレーザ変位計（スポット径 $30\mu\text{m}$ 、深さ方向分解能 $1\mu\text{m}$ 以下）による硝酸溶出深さを測定した。結果を付図 1-3-4 に示す。

浸透期間6ヶ月における接着材深さ方向への硝酸によって溶出した深さは最大0.3mmである。断面方向への硝酸浸透は、安全側に仮定して、界面方向と同様の距離を同一円状になるとすれば、硝酸浸透深さは0.3mmに、界面方向の最大浸透距離1.25mmを足した1.55mmとなるが、接着材の厚さ10mmよりも十分に小さな値となる。



付図 1-3-4 レーザ変位計を用いた硝酸溶出深さ測定結果

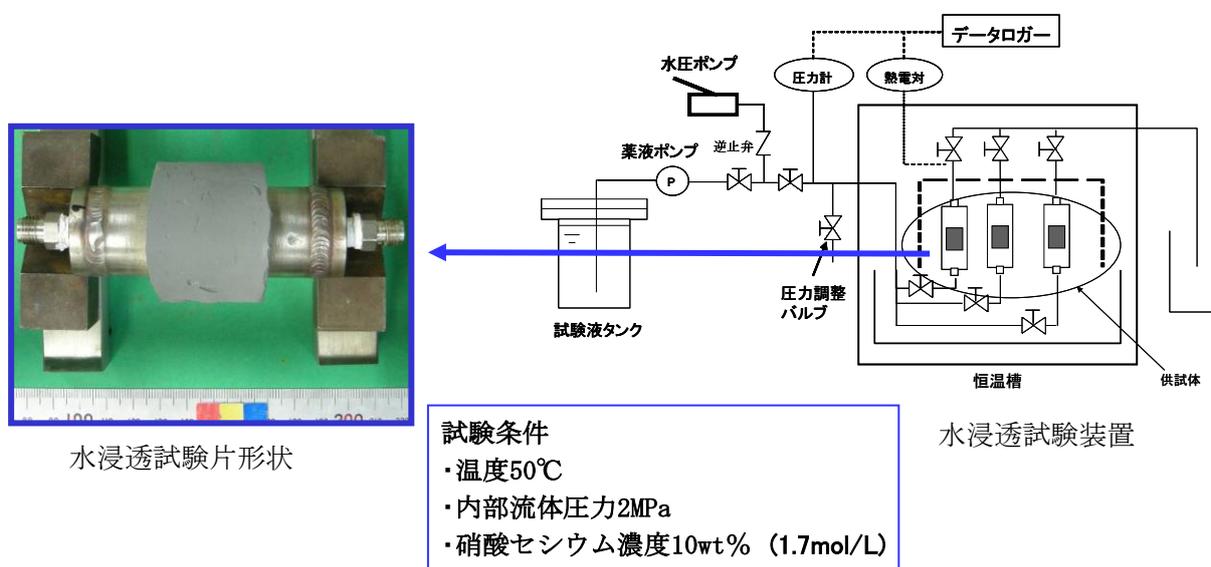
3.2 水浸透試験

硝酸の浸透試験と同様にして、水の浸透試験を実施し、水はほとんど浸透しないこと確認した。

1) 試験条件

- ・試験温度：50℃
- ・内圧：2MPa
- ・内部流体：水(トレーサとして硝酸セシウムを添加)
- ・浸透期間：1ヶ月
- ・試験装置：硝酸浸透確認試験と同じ

水浸透試験方法の概要を付図 1-3-5 に示す。試験体の形状を補足資料-1、補足図 1-6 に示す。

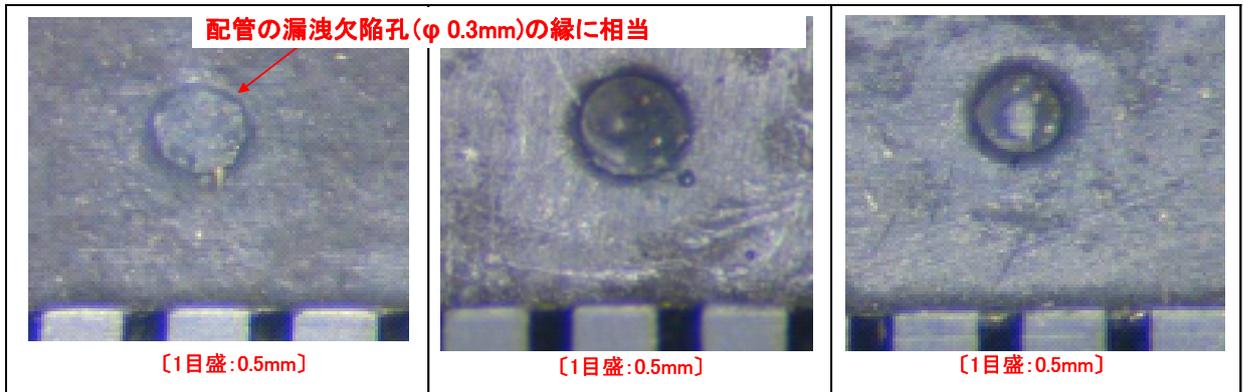


付図 1-3-5 水浸透試験方法の概要

2) 試験結果

①目視観察

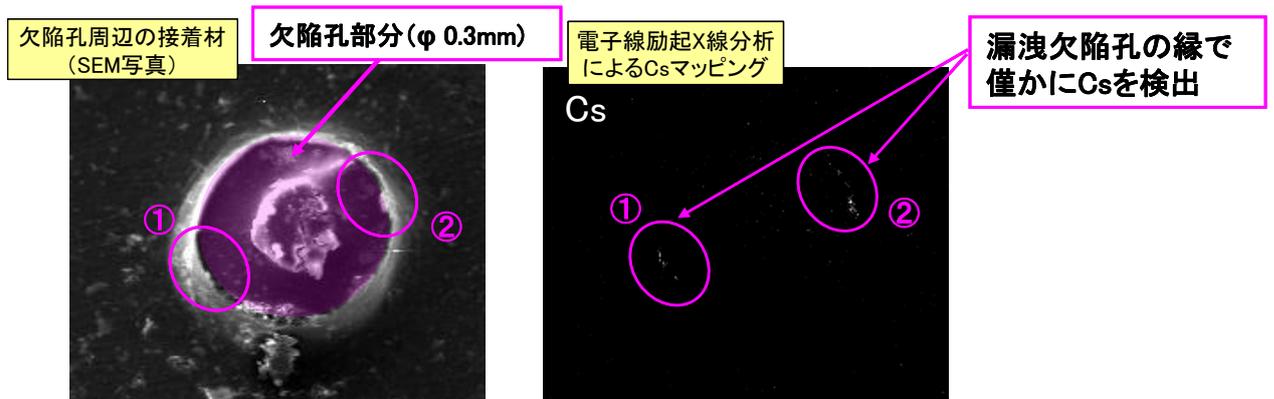
1ヶ月間の浸透試験終了後、十分に試験体を乾燥させて配管から接着材を剥離させ、接着界面を目視観察した結果を付図 1-3-6 に示す。水が浸透した痕跡は確認できなかった。



付図 1-3-6 1ヶ月間の水浸透試験結果（目視観察）

②セシウム Cs の分析

目視では水の浸透有無の確認が困難であるため、トレーサとして添加した硝酸セシウム中のセシウム Cs について電子線励起 X 線分析を用いて分析を行った。接着界面の漏洩孔周辺を Cs マッピング分析した結果を SEM 観察と合わせて付図 1-3-7 に示す。



付図 1-3-7 セシウム Cs のマッピング分析結果

Cs は漏洩欠陥孔の縁に相当する①と②の部分のみに僅かに検出されたが、接着界面方向への浸透は確認されなかった。欠陥孔縁で検出されたのは、欠陥孔内に残留した水滴が付着した状態で乾燥したためと推定される。

さらに、電子線励起 X 線分析法では検体の厚さ方向約 $10\mu\text{m}$ までの情報が得られるが、欠陥孔部分（ 50°C 、 2Pma の水に 1ヶ月間接していた部分）でも Cs は検出されなかったことから、接着材厚さ方向への水浸透はないと考えられる。

上記結果により、接着材の界面方向、厚さ方向へ水は浸透してないと言える。

4. 欠陥部先端近傍の応力分布解析

1) 概要

実機の補修対象部は様々な形状になると考えられることから、直管、エルボ、ティー、容器(平板で模擬)を例として、補修後に接着材に負荷される内圧を与えた解析を実施し、この解析結果から、内圧保持試験及び実機模擬試験を実施する補修対象の形状選定を行う。

2) 評価方法

- ・直管、エルボ、ティー、容器(平板で模擬)に対し、硝酸による接着材の界面方向浸透寸法 $\phi 3\text{mm}$ (6ヶ月の浸透寸法 $\phi 2.5$ を切上げた寸法) $+$ $\phi 5\text{mm}$ (1次止水に必要な接着材寸法) $=\phi 8\text{mm}$ の未接着部が接着界面に存在するとして、この未接着部をスリットで模擬して、内圧を負荷した解析を実施する。
- ・評価は未接着部の内圧による剥離モードを対象とする。
- ・力学的には応力が大きい方が破壊に対して厳しいことから、金属に塗布した接着材の界面も剥離進展(破壊)しやすいと考え、接着材の欠陥近傍の界面に垂直方向の応力分布の大きさを比較し、補修対象の形状による界面の剥離しやすさを評価する。

3) 解析条件

a. 前提条件

本解析は、以下の前提条件に基づき解析を実施した。

- ・接着材は弾性体としての挙動を示すとして扱う。
- ・接着材が固まる際に生じる残留応力及び温度変動により生じる熱応力は主としてせん断モードに負荷され、未接着部の内圧による剥離モードへの寄与は僅少であると考えられることから、これらについては考慮しない。
- ・接着材の欠陥近傍の応力及び応力分布の大きさを比較することが目的のため、劣化や収縮による経時的な物性値の変化は考慮しない。
- ・配管(直管、エルボ、ティー)には配管反力が負荷されないものとする。

b. 解析コード

解析には汎用 FEM 解析コード Abaqus 6.8-4 を用いた。

c. 解析タイプ

3次元弾性解析とした。

d. 接着材の塗布形状

接着材の塗布形状は、接着材と補修対象の界面において $53\text{mm}\times 53\text{mm}$ とし、外周部に熱応力低減対策のためのテーパを脚長 10mm 設けた形状とした(補足資料-5参照)。

e. 解析ケース

付表 1-4-1 に示す 5 ケースに対し解析を実施した。以下に解析ケース選定の概略説明を示す。

- ・補修対象の形状をパラメータにした評価を行うため、解析は平板、直管、エルボ(背側に接着材塗布)、ティー(肩部に接着材塗布)を対象とした。
- ・配管径はプラント内で多く使われている 25A 直管とした。
- ・d. で示す接着材の塗布寸法が周方向に確保できない場合は、接着材を全周に塗布する補修方法とすることから、この場合の補修例として配管径 8A を対象とした。

f. 解析モデル及び境界条件

解析形状の対称性を考慮し、1/4 モデルまたは 1/2 モデルとした。また、未接着部の応力特異点における解析を実施することから、未接着部の端部近傍のメッシュは 0.1mm 程度とした。解析モデル、境界条件及び荷重条件を補足資料-4 に示す。

g. 荷重条件

本補修工法の適用圧力の上限が 1.96MPa であることから、負荷する内圧は 2MPa とした。

h. 材料定数

解析に使用した材料定数を付表 1-4-2 に示した。

4) 解析結果

各ケースにおける未接着部近傍の界面に垂直な方向の応力の比較結果を付図 1-4-1(長手方向)及び付図 1-4-2(周方向)に示す。

解析を実施した 5 ケースのうち、25A ティー(Case-5)が最も高い応力を示した。また、全ての Case で、同様の傾向を示した。25A ティー(Case-5)が最も高い応力を示したのは、付図 1-4-3 に示すように内圧により接着材塗布部のティーの肩部がオーバル変形(楕円状に変形)し、この変形は未接着部が開き勝手になる変形(応力が高くなる変形)であるためと考えられる。

5) まとめ

以上から、平板、直管、エルボ及びティーの応力分布は同様の傾向を示すが、ティーについては、局部変形の影響により他の補修対象よりも大きな発生応力が生じていると考えられる。このため、実機模擬試験は、ティー形状で行う。

付表 1-4-1 解析ケース一覧

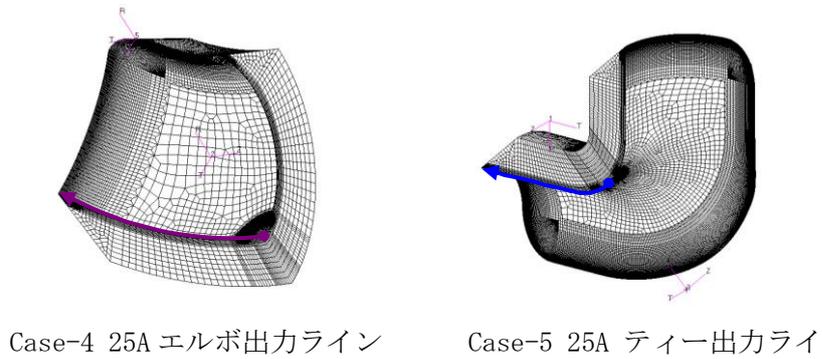
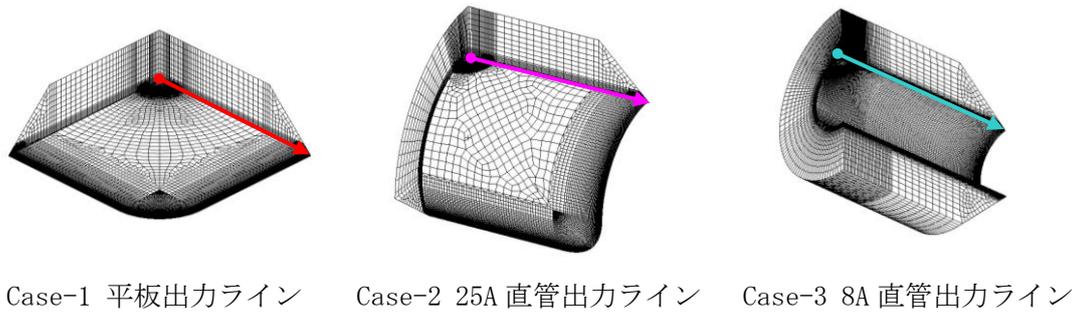
	補修対象	接着材の塗布形状	荷重条件	備考
Case-1	平板	部分塗布	内圧 2MPa (内圧による軸力なし)	容器を模擬
Case-2	25A 直管			
Case-3	8A 直管	全周塗布	内圧 2MPa (内圧による軸力あり)	
Case-4	25A エルボ	部分塗布		補修箇所は背側を 対象
Case-5	25A ティー			補修箇所は肩部を 対象

付表 1-4-2 材料定数まとめ

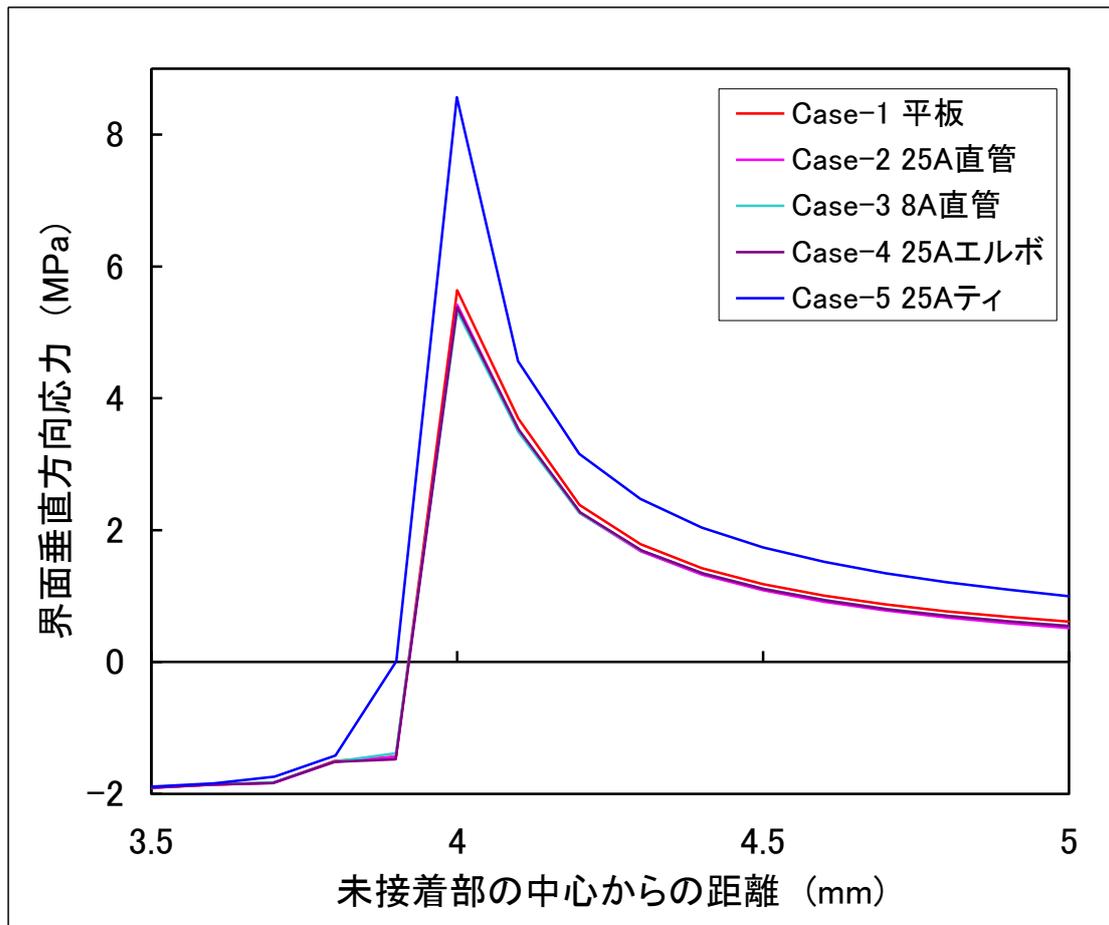
材料		温度 (°C)	ヤング率 (MPa)	ポアソン比
補修対象	SUS304	50	193000 ^{※1}	0.3
接着材	デブコン チタニウムパテ	50	7030 ^{※2}	0.3

※1：JSME 再処理設備規格 設計規格(2010年版)より引用

※2：計測値(本確性試験において計測した引張り側の値を使用)

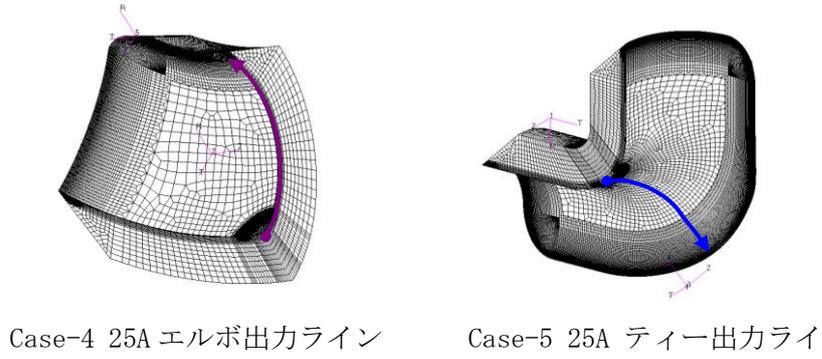
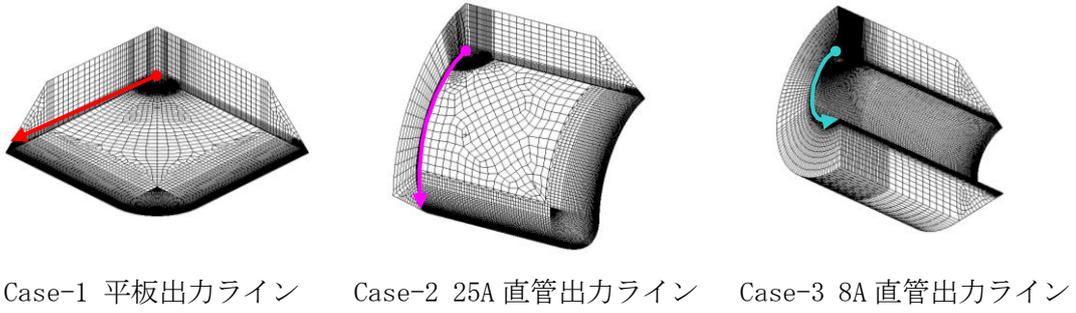


(a) 各ケースの応力分布出力ライン

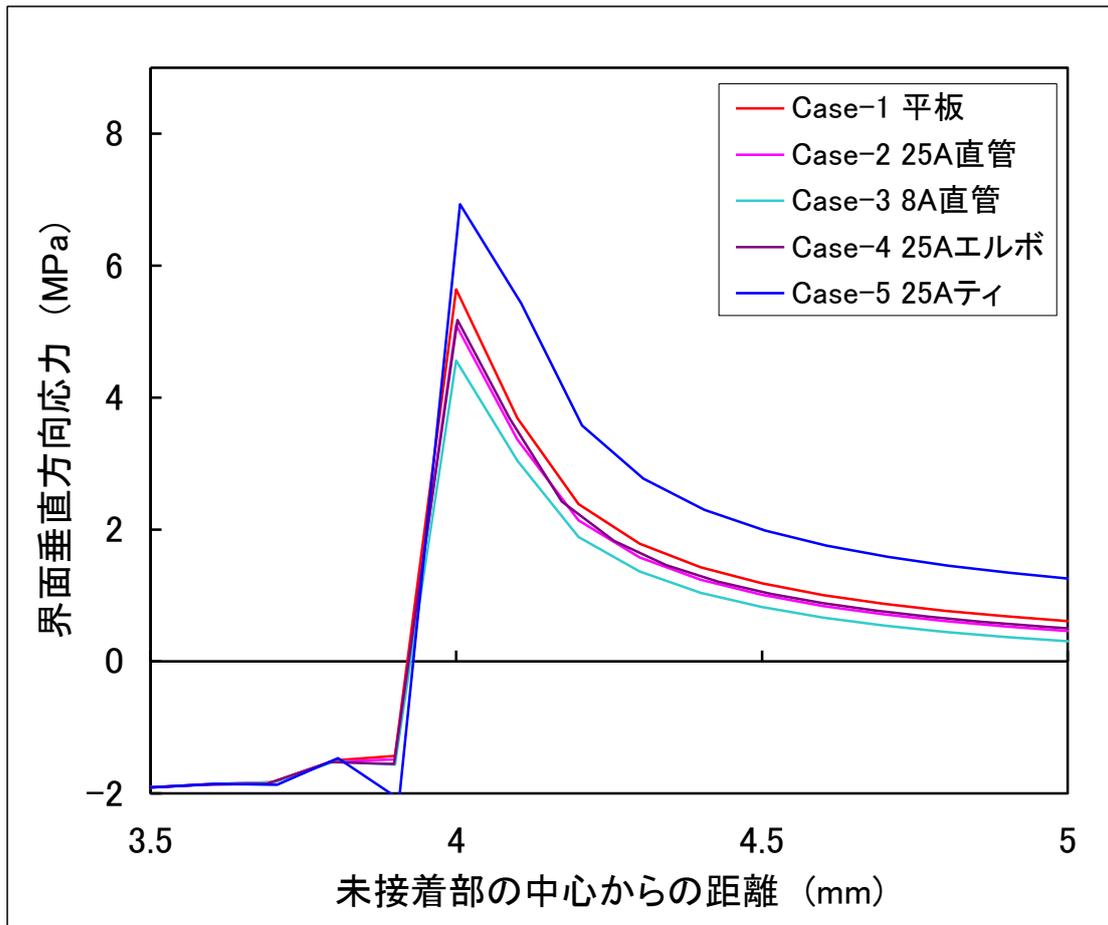


(b) 各ケースの応力分布 (出力ラインは(a)参考)

付図 1-4-1 各ケースにおける界面垂直方向応力の比較(長手方向)

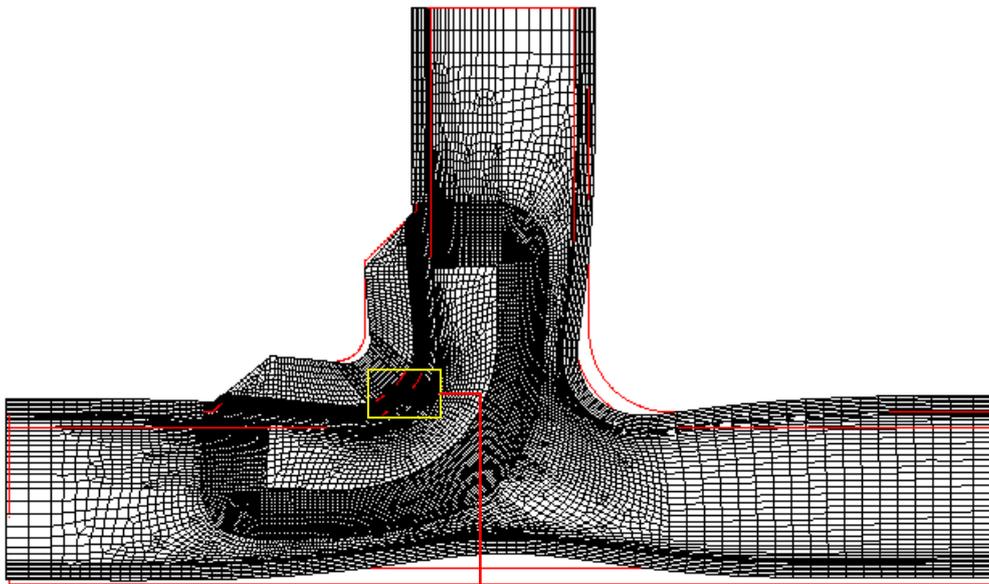


(a) 各ケースの応力分布出力ライン

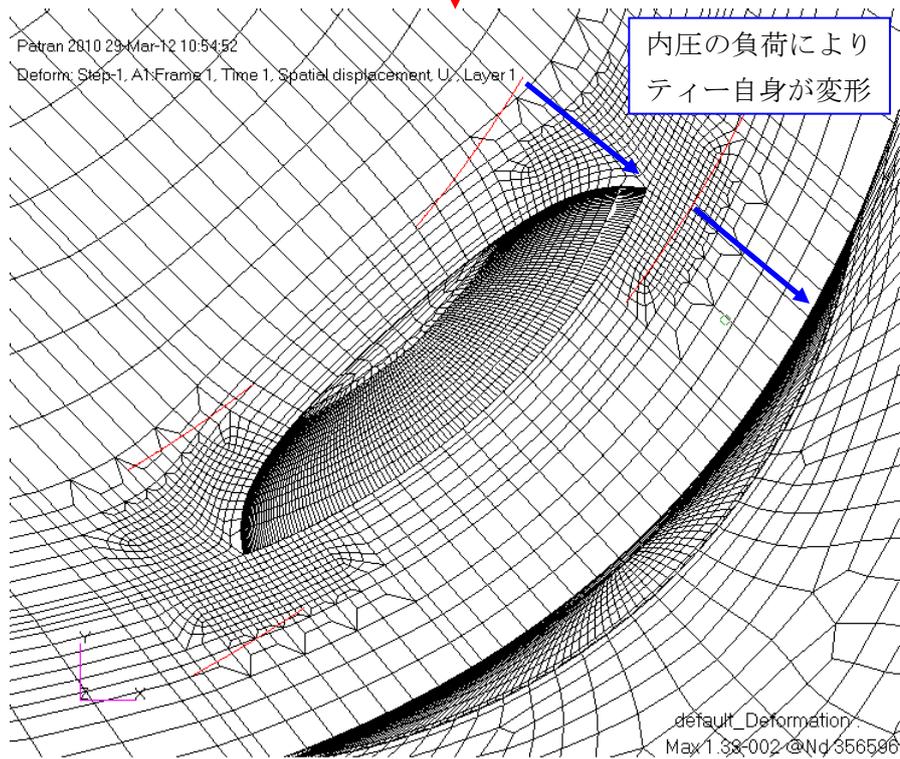


(b) 各ケースの応力分布 (出力ラインは(a)参考)

付図 1-4-2 各ケースにおける界面垂直方向の応力の比較(周方向)



未接着部拡大



付図 1-4-3 25A ティーにおける変形図 (1000 倍)

5. 内圧保持試験

(1) 概要

補修対象の試験体形状として、応力の特性が捉えやすいよう主に形状と応力分布が比較的単純な平板、及び4項の解析の結果、最も高い応力を示したティーの2種を選定して内圧保持試験を実施した。試験結果を付表 1-5-1 に示す。

内圧 1MPa については、平板、ティーの各 5 体とも 6 ヶ月無漏洩を達成し、2012 年 12 月 12 日に試験終了した。試験結果を付表 1-5-1 に示す

内圧 2MPa の平板試験体 5 体とも、試験期間を延長して 12 ヶ月無漏洩を達成し、2013 年 7 月 12 日に試験終了した。試験結果を付表 1-5-1 に示す

付表 1-5-1 内圧保持試験結果

温度	圧力	欠陥径	形状	N 数	現在	保持期間 (day)	保持期間 (month)	結果
50℃	2MPa	φ 8mm	平板	5	2013/7/12	365	12	漏洩なし
	1MPa	φ 8mm	平板	5	2012/12/12	180	6	漏洩なし
		φ 8mm	ティー	5	2012/12/12	180	6	漏洩なし

(2) 試験条件

内圧保持試験条件と試験マトリックスを付表 1-5-2、付表 1-5-3 に示す。試験体形状を補足資料-1 の補足図 1-7 に示す。

付表 1-5-2 内圧保持試験条件の整理表

試験製作条件	漏洩欠陥径	φ 0.3 mm
	欠陥部寸法	一次止水部寸法 (φ 5 mm) +6 ヶ月間の硝酸浸透距離を切上げた寸法 (φ 3 mm) =8 mm。金属箔を設置して模擬
	接着材寸法と形状	53 mm×53 mm×厚さ 10 mm (テーパー部を除く寸法) テーパー付与 (テーパー角 45°) 寸法は固定で実機も同じ
	表面処理条件	#80 で研磨 (実機も同じ)
試験実施条件	内部流体	水 (トレーサー入り)、硝酸浸透は φ 8 mm の金属箔で模擬し、内部流体は圧力負荷の目的だけで使用
	試験温度	50℃ (適用条件最高温度) 施工終了までは室温
	内部流体圧力	1MPa、2MPa (ティーは平板との比較のため 1MPa のみで実施) (施工終了までは大気圧)
	内圧保持期間	6 ヶ月を目途とするが、6 ヶ月後無漏洩の場合は期間延長
	試験体数	N=5 統計処理ではなく適用期間の知見拡充が目的
評価項目	保持内圧 (漏洩した場合は、漏洩発生までの時間) 漏洩位置 (漏洩した場合)	

付表 1-5-3 内圧保持試験マトリックス

補修対象		平板	ティー
内圧 (MPa)	1	○	○
	2	○	—
保持期間 (月)		6 (無漏洩の場合は最長 12 ヶ月まで延長)	

(3) 試験結果

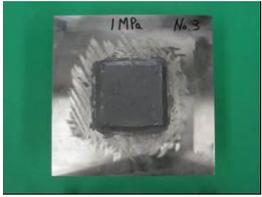
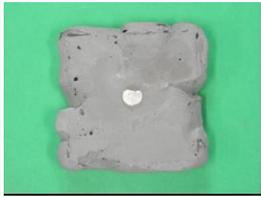
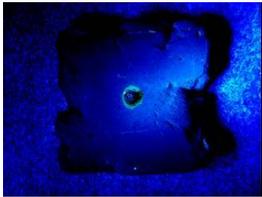
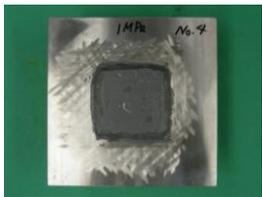
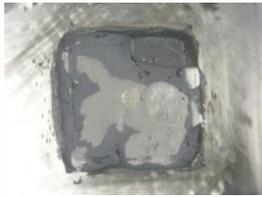
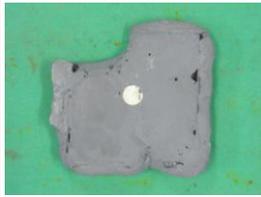
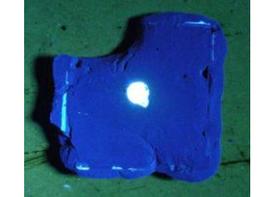
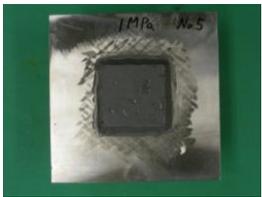
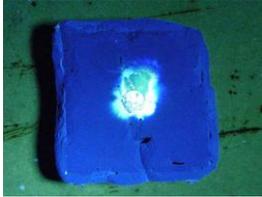
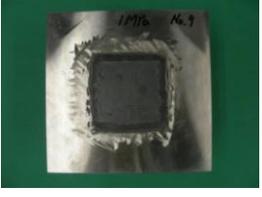
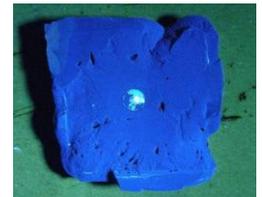
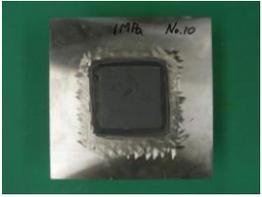
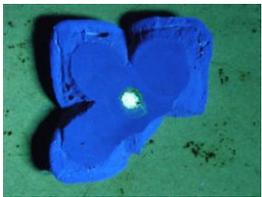
① 内圧 1MPa の保持試験

平板 5 体、ティー 5 体とも 2012 年 12 月 12 日に 6 ヶ月間無漏洩（内圧低下なし、目視で滴下漏洩なし）を達成した。内圧 1MPa の保持試験は内圧 2MPa の保持試験で包絡できるため試験終了した。

各試験体は接着材を強制剥離して、接着界面を目視観察した。結果を付図 1-5-1、付図 1-5-2 に示す。

試験に用いた内部流体にはトレーサとして蛍光剤を添加しているため、接着界面に内部流体が浸透していた場合は、蛍光が認められる。平板試験体 1 体（試験体 No. 3）ではφ8mm 金属箔周辺に発光が認められ、内部流体が金属箔周辺の接着界面に浸透して、その部分が界面剥離していたことが確認できた。

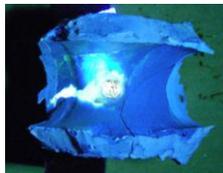
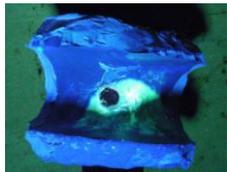
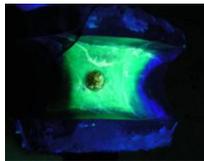
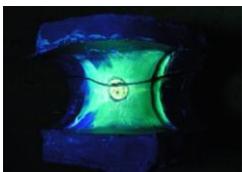
他の 4 体では接着界面の蛍光は認められず、界面剥離は起こってないと判定した。

試験体	No	接着材剥離前	接着材剥離後		
			SUS側界面	接着材側界面	接着材側界面(蛍光)
平板	1				
	2				
	3				
	4				
	5				

付図 1-5-1 内圧 1MPa、6 ヶ月保持試験終了後の接着材強制剥離面観察（試験体形状：平板）

一方、ティーでは5体中1体(試験体 No. 1)では界面剥離は認められなかったが、残り4体については漏洩には至らなかったものの金属箔周辺に界面剥離(蛍光剤による発光)が認められた。特に試験体 No. 4, 5 では界面剥離がかなり進展していることが認められた。

平板よりティーの方が金属箔端部のピーク応力、及び金属箔周囲の平均応力が高いという4章の解析結果と同様の傾向が認められた。

試験体	No	接着材剥離前	接着材剥離後		
			SUS側界面	接着材側界面	接着材側界面(蛍光)
ティー	1				
	2				
	3				
	4				
	5				

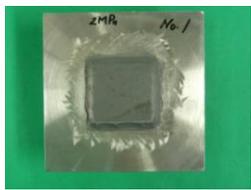
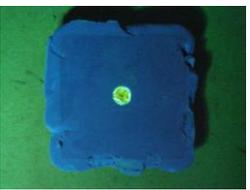
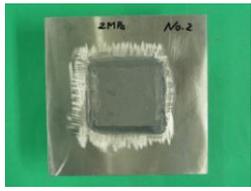
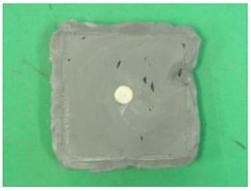
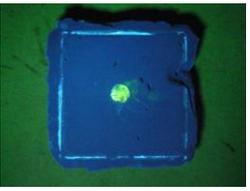
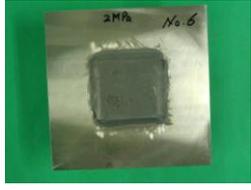
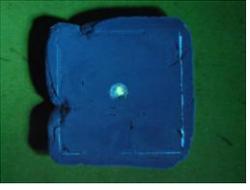
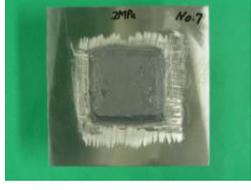
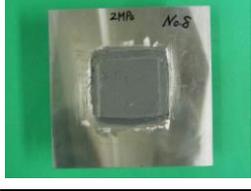
付図 1-5-2 内圧 1MPa、6ヶ月内圧保持試験終了後の接着材強制剥離面観察(試験体形状:ティー)

② 内圧 2MPa の保持試験

平板試験体 5 体とも 2013 年 7 月 12 日に 12 ヶ月 (365 日) 間無漏洩 (内圧低下なし、目視で滴下漏洩なし) を達成し、試験装置は 7 月 16 日に停止させた。

各試験体は接着材を強制剥離して、接着界面を目視観察した。結果を付図 1-5-3 に示す。

全ての試験体について、接着材剥離後の SUS 側表面には接着材塗布領域全体に接着材の薄層が固着しており、接着材は凝集剥離したことが確認された。また、剥離した接着材側表面では、トレーサの蛍光剤による接着界面の発光は観察されなかった。従って、内部流体の界面浸透に起因する接着材の剥離は発生しなかったと判定した。

試験体	No	接着材剥離前	接着材剥離後		
			SUS側界面	接着材側界面	接着材側界面(蛍光)
平板	1				
	2				
	3				
	4				
	5				

付図 1-5-3 内圧 2MPa 保持試験終了後の接着材強制剥離面観察 (試験体形状：平板)

(3) 内圧保持試験結果に基づく接着材補修部の設計寿命について

内圧保持試験で全て無漏洩を維持したことを踏まえ、保守的な観点から無漏洩可能期間の目安は6ヵ月と判断する。

6. 実機条件による検証（実機模擬試験）

6.1 無漏洩期間の確認試験

(1) 概要

4項の解析の結果、最も高い応力を示したティーを試験体として選定し、実機補修を模擬して接着材を施工して、実機適用条件と同条件で内部流体は 10wt%硝酸(1.7mol/L)、温度 50℃、内圧 1MPa を無漏洩で 6 ヶ月維持できるか検証した。

試験の結果、試験体 5 体とも 6 ヶ月間無漏洩を維持した。更に試験終了後、接着材を強制剥離して接着界面を観察したが、硝酸が接着界面に浸透した痕跡は認められなかった。

すなわち、10wt%硝酸(1.7mol/L)、温度 50℃、内圧 1MPa について、内圧保持試験結果から設定した無漏洩可能期間（目安）である 6 ヶ月を経過しても漏洩の兆候がないことを検証した。

(2) 試験条件

実機を模擬した試験条件とするため、接着材による一次止水を実施し、内部流体は接着材を劣化させる作用を有する 10wt%硝酸（1.7mol/L）とした。試験条件詳細を付表 1-6-1 に示す。試験体形状を補足資料-1、補足図 1-8 に示す。

- ・漏洩状態において接着材による一次止水施工
- ・最長 6 ヶ月保持の内部流体は 10wt%硝酸(1.7mol/L)、内圧 1MPa、温度 50℃を使用し、硝酸浸透環境とする

付表 1-6-1 実機条件による無漏洩期間確認試験の条件

	試験条件	試験条件の設定根拠
補修対象	ティー	FEM 解析で最も高い応力分布が認められた補修対象
接着材範囲と厚さ	形状：テーパ付与（テーパ角 45°） 寸法：53mm×53mm×厚さ 10mm （テーパ部を除く寸法）	一律に採用する寸法。これで内圧保持試験も実施。
試験体数	N=5	使用期間の知見を充実することを主な目的とするため、試験体数は N=5 とする
施工姿勢	上向き	塗布作業が最も困難な姿勢
内部流体	硝酸(10wt%≒1.7mol/L、補修適用最高濃度) * 1 次止水を含む施工終了まで内部流体は水	6 ヶ月で接着界面方向へ半径 1.5mm（1.25mm を安全側に丸めた）浸透する 10wt%硝酸（約 1.7mol/L）を選定
内圧	硝酸：1MPa * 1 次止水を含む施工終了まで圧力は滴下状態に保持	実機適用最高圧力
温度	硝酸：50℃ * 1 次止水を含む施工終了まで温度は室温	実機適用最高温度
漏洩欠陥孔	φ 0.3mm	滴下状態の漏洩を考慮し、適用対象とする最大の欠陥寸法
一次止水寸法	φ 5mm	事前検討で決定した一次止水の最適寸法
試験時間	6 ヶ月（漏洩監視を前提とする）	内圧保持試験結果に基づいて設定した無漏洩可能期間

(3) 試験結果

試験体 5 体とも 2013 年 9 月 7 日に 6 ヶ月間(183 日間)無漏洩(内圧低下なし、目視で滴下漏洩なし)を達成し、9 月 9 日に試験装置を停止した。

付表 1-6-2 実機模擬試験(無漏洩期間確認試験)の結果

温度	圧力	欠陥径	形状	N 数	現在	保持期間(day)	保持期間(month)
50℃	1MPa	φ 0.3mm	ティー	5	2013/9/7	183	6.0

各試験体の接着材を強制剥離して、接着界面を目視観察した。結果を付図 1-6-1、に示す。内部流体が硝酸であるため、硝酸により分解される蛍光剤は添加していないが、硝酸と接した接着材は硝酸と反応してニトロ基(-NO₂)を形成し、黄褐色に変色するため(補足資料-3を参照)、変色領域の有無によって、接着界面への硝酸浸透を評価した。

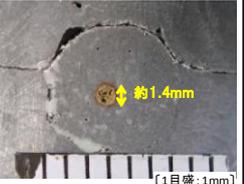
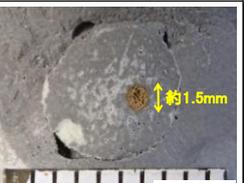
漏洩欠陥孔周辺の強制剥離面では、一次止水用接着材の中心付近に φ 1.5mm 程度の黄褐色の変色が認められたが、それ以外の変色は観察されなかったため接着界面の剥離は起こっていないと考えられる。

なお、5 項に記した内圧保持試験では、試験体がティーの場合は 1MPa×6 ヶ月保持で漏洩した試験体は無かったものの、試験体 5 体中の 4 体で接着界面へ内部流体(水)が浸透していた(付図 1-5-2)。内圧保持試験と実機模擬試験における接着界面への内部流体浸透有無の差については、以下のように考察する。

内圧保持試験においては、「一次止水部寸法 φ 5mm」 + 「6 ヶ月間の半径方向の硝酸浸透距離 1.5mm (1.25mm を安全側に丸めた) × 2」 = φ 8mm の範囲を保守的に接着強さゼロと仮定し、φ 8mm の非接着部を金属箔で模擬した試験体を作製した。

一方、実機模擬試験では、φ 0.3mm の漏洩欠陥から滴下漏洩状態において φ 5mm の一次止水用接着材で止水し、1MPa の内部流体圧を負荷して一次止水できていることを確認した後、補修用接着材(テーパ部を除いた寸法: 53×53×厚さ 10mm)を施工した。

φ 5mm の一次止水用接着材の接着強さはドライ面に施工した場合より小さいと推定されるが、一次止水可能な接着強さを有していることを考慮すると、一次止水用接着材の接着強さをゼロと仮定した内圧保持試験の試験条件は、一次止水を実施する場合よりも厳しい条件と考えられる。そのため、金属箔を設置した内圧保持試験では、接着界面への内部流体(水)の浸透を許す結果となったと推定する。

試験体	No	耐圧試験後(1MPa×6ヶ月)	接着材 強制剥離後		
			SUS側界面	接着材側界面	接着材側界面(拡大)
タイー	1				 約1.4mm [1目盛:1mm]
	2				 約1.5mm 強制剥離時に破壊→
	3				 約1.5mm 強制剥離時に破壊
	4				 約1.5mm [1目盛:1mm]
	5				 約1.8mm [1目盛:1mm]

付図 1-6-1 無漏洩期間確認試験後 接着材強制剥離面観察結果

6.2 耐圧性能確認試験

(1) 概要

実機補修では適用最高圧力以上の圧力を負荷する耐圧試験は困難であるが、本確性試験では実機適用最高圧力 1.96MPa の 1.5 倍を包絡する内圧 3MPa を 10 分間負荷する試験を実施し、試験体 5 体とも無漏洩で試験を終了した。これにより接着材補修部が適用最高圧力 1.96 MPa に対して耐圧性能を有することを検証した。

(2) 試験条件

前項の 6 ヶ月硝酸保持試験体と同時に作製した試験体 5 体について、再処理設備規格溶接規格の耐圧試験に準じて、適用最高圧力 1.96MPa (内部流体は水) の 1.5 倍を包絡する圧力 3MPa を 10 分間負荷した。

試験条件詳細を付表 1-6-3 に示す。試験体形状を補足資料-1、補足図 1-8 に示す。

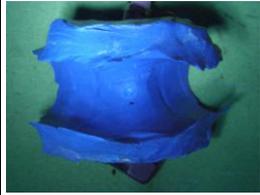
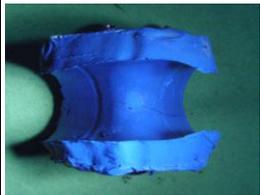
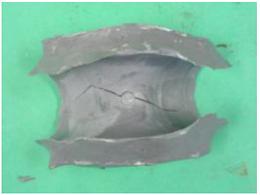
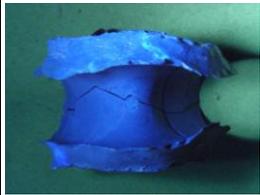
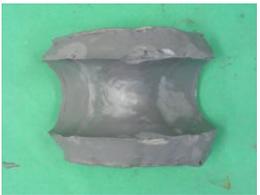
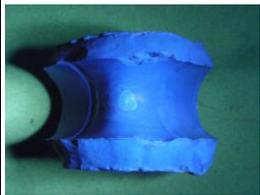
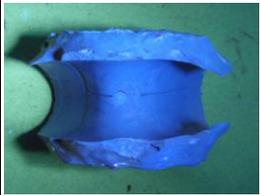
付表 1-6-3 耐圧性能確認試験条件

内部流体	水
試験体形状	ティー
漏洩欠陥孔	φ 0.3mm
一次止水寸法	φ 5mm
接着材範囲と厚さ	形状：テーパ付与 (テーパ角 45°) 寸法：53mm×53mm×厚さ 10mm (テーパ部を除く寸法)
内圧	3MPa
温度	50℃
圧力保持時間	10 分
実施時期	接着材硬化完了後
試験体数	5

(3) 試験結果

試験体 5 体とも漏洩なく、耐圧試験を終了した。試験終了後に強制剥離した接着材の剥離面を付図 1-6-2 に示す。試験体 NO. 2, 3, 5 において、剥離した接着材の一部に亀裂が認められるのは、強固に接着している接着材を強制剥離した際に、割れたためである。

内部流体 (水) にはトレーサとして蛍光剤を添加しているため、接着界面に内部流体が浸透していた場合は、蛍光が認められるが (たとえば付図 1-5-2 参照)、付図 1-6-2 では接着界面に蛍光は全く観察されず (付図 1-6-2 右端欄の写真)、界面剥離は認められなかった。

試験体	No	試験後	接着材強制剥離後		
			SUS側界面	接着材側界面	接着材側界面（蛍光）
ティ-	1				
	2				
	3				
	4				
	5				

付図 1-6-2 耐圧試験後 接着材強制剥離面観察結果

以上

添付資料-2

実機施工要領

目次

1.	はじめに	1
2.	適用範囲に適合していることの確認	3
3.	補修対象の表面処理要領	6
4.	接着材施工要領	7
5.	再施工要領	13
6.	実機施工後の検査方法	14
7.	接着材補修の品質管理	15

1. はじめに

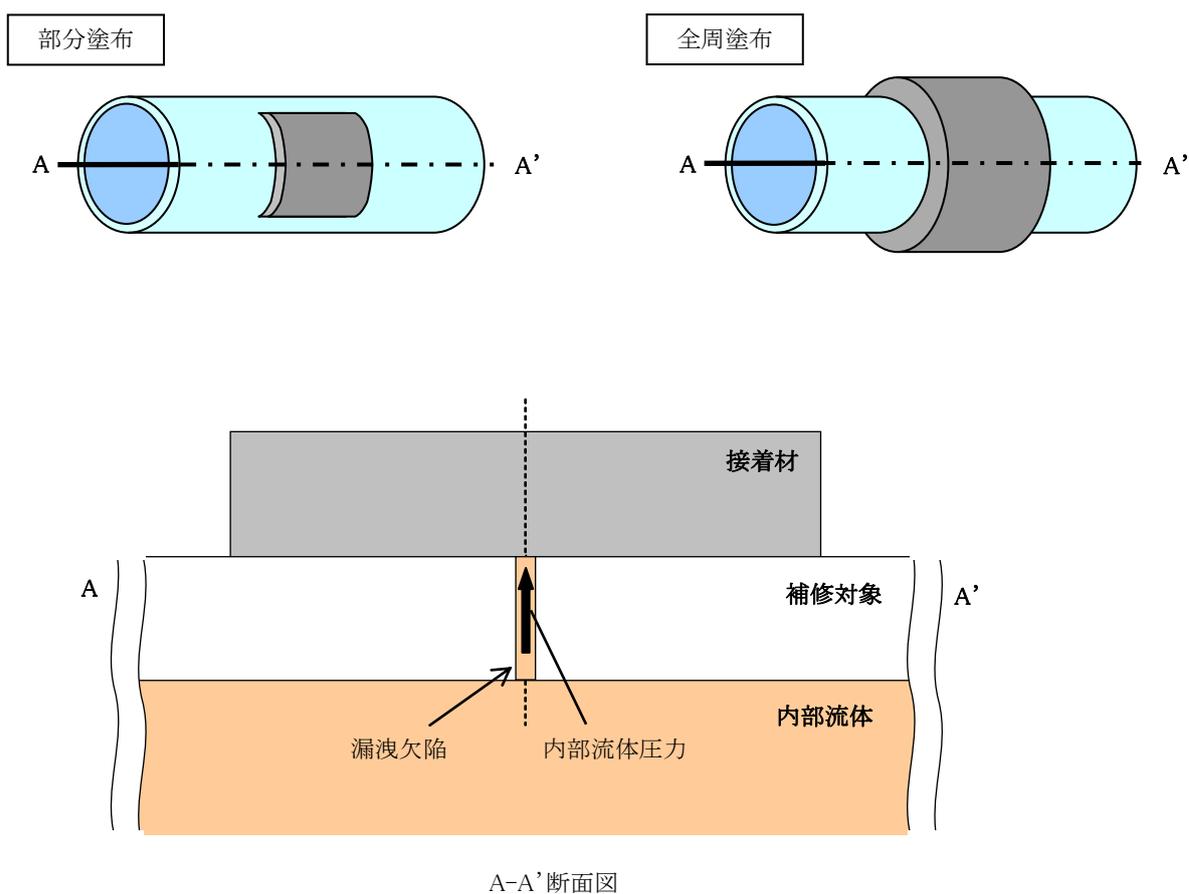
実機において滴下漏洩発見後、「補修適用範囲に適合していることの確認」から「施工後の検査」までの各工程、及び「接着材補修の品質確保」についての要領を以下にまとめる。

本施工要領は、確性試験において決定した接着材構造を、補修対象の形状、漏洩状態、施工姿勢等に関わらず、再現よく確実に実機施工できる手順を明確に記載することを目的とする。

1.1 接着材補修工法の概要

接着材は、チタニウムパテ（金属配合エポキシ樹脂；DEVCON 社製）を用い、漏洩防止機能を維持するように塗布する。接着材の塗布範囲は、配管等の外面に部分塗布もしくは全周塗布とする。接着材補修施工後のイメージを付図 2-1-1 に示す。

なお、補修対象は非放射性流体の系統とする。



付図 2-1-1 接着材補修工法の適用のイメージ

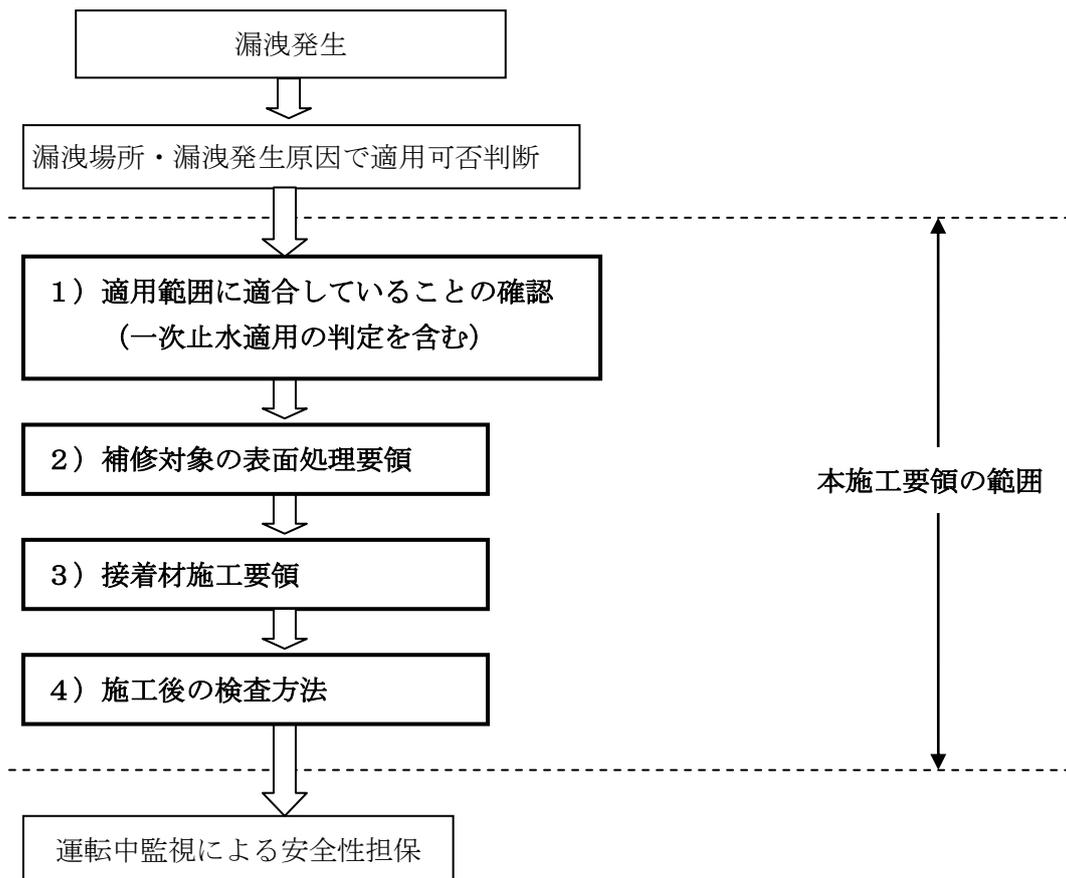
1.2 漏洩場所・漏洩発生原因

漏洩場所 :セル内など通常人が立ち入らない高線量エリアで発生したものは除く。

漏洩発生原因 : 商用再処理施設の試運転において、鍛造品の介在物による母材の貫通及び鋳造品の引け巣をはじめとする母材の貫通漏洩を経験している。また、溶接施工不良によるピンホールなどの欠陥による漏洩の可能性もある。本確性試験における対象の漏洩欠陥は上記のような「非進展性の貫通欠陥」とする。

1.3 本施工要領の範囲

滴下漏洩発見から補修完了に係る一連の工程のうち、本施工要領には下記フロー中の1)～4)について記す。



付図 2-1-2 本施工要領の範囲

2. 適用範囲に適合していることの確認

本補修工法は、恒久補修または取替えまでの間、漏洩を防止するための応急補修工法として扱う。本補修工法は補修対象面がドライの場合に加え、漏洩（滴下漏洩）中で湿潤状態の場合においても適用する。表 1-1 に示す適用範囲は商用再処理施設の運転条件の上限および安全上の観点、並びに試験から定めた。なお、本補修工法の漏洩防止可能期間（目安）は本確性試験にて推測した 6 か月とするが、補修後の設備安全性は漏洩監視にて担保することとする。

付表 2-2-1 接着材補修工法の適用範囲

	適用範囲	選定理由
機器クラス	<現行法令> ・再処理第 3～5 種機器 ・溶接検査対象外機器 <再処理設備規格 設計規格> ・再処理クラス 3～5 機器 ・再処理クラス SIF 機器 ・規格規定対象外機器	応急補修のため、機器クラスの制限は設けない。但し、再処理第 1, 2 種機器（再処理クラス 1, 2 機器）はセル内のみを設置されるため、対象外とする。
適用部位	容器、配管、継手、弁、ポンプ、トラップ、ストレーナ	商用再処理施設における主要機器
適用材質	オーステナイト系ステンレス鋼及び炭素鋼	商用再処理施設における主要材質を対象にする
内部流体* ¹	水 硝酸 (濃度 10% (1.7mol/L) 以下* ²)	安全上の観点から可燃性流体、蒸気は除いた。また、放射線の影響の確認を行わないため、放射性系統は除くこととする。
適用温度* ³	内部流体温度* ⁴ 水：10～50℃ 硝酸：10～50℃	補修適用範囲であるセル外の内部流体温度の適用下限(10℃)以上、接着材のガラス転移温度(55℃)未満
適用圧力	水：1.96MPa 以下 硝酸：0.98MPa 以下	設計圧力（実際に使用される圧力を包絡した圧力）を採用する。
適用接着材	チタニウムパテ* ² (DEVCON 社製；金属配合エポキシ樹脂)	事前検討試験実績による（特に硝酸に対する耐性）
表面状態	ドライな接着面を確保すること	接着材性能を保証するため
適用期間* ⁵	6 か月(目安)	本試験結果に基づく推測値
漏洩程度	滴下状態の漏れまたはにじみ程度の漏洩状態	施工安全上の観点から決定
その他の制限	補修対象は進展性のない欠陥であること	

*1 放射性系統は適用対象外。

*2 内部流体が硝酸である場合の適用濃度は事前検討試験の接着材の耐硝酸性より設定。
適用接着材については、事前検討試験において耐硝酸性の高い接着材を選定した。

*3 施工時の雰囲気温度は 10℃～50℃を確保すること。

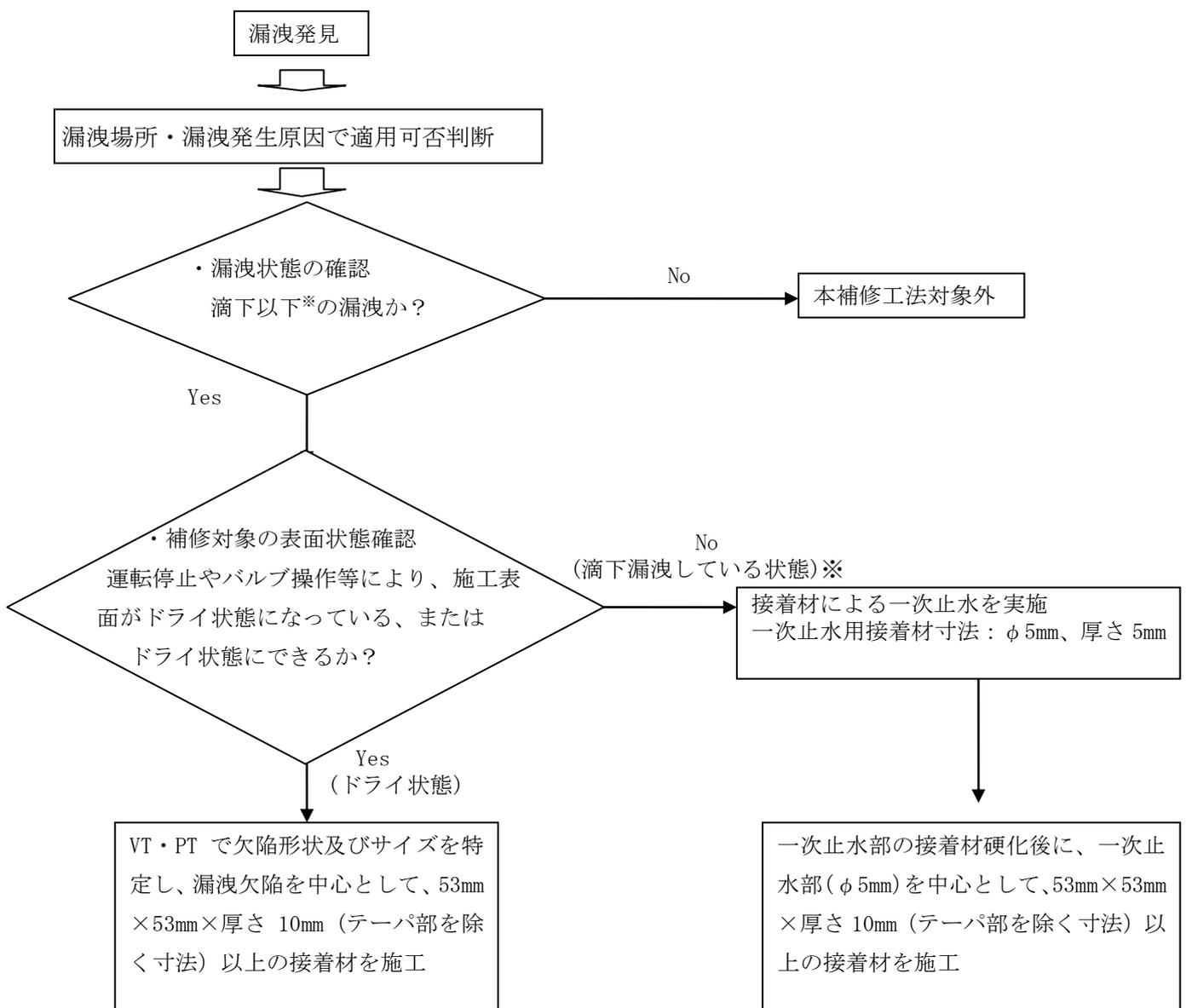
*4 施工時及び使用時の温度を示す。

*5 適用期間は漏洩しないことを保証する期間ではないため、補修箇所は監視対象とする。

2.1 一次止水適用の判定

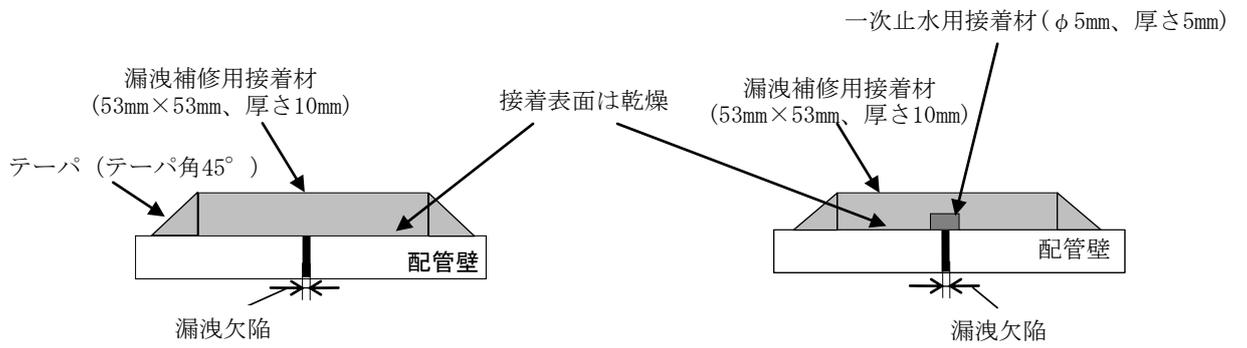
接着材施工面が濡れた状態では接着材の接着力が著しく低下するため、施工面がドライであることを適用範囲としている。従って、漏洩している状態における補修では、施工に先立ち局部的に接着材を塗布する一次止水を実施することで、補修用接着材の施工面の乾燥状態を確保する。

一次止水の判断フローを付図 2-2-1 に、ドライ状態および漏洩状態での接着材補修工法の概要図を付図 2-2-2、付図 2-2-3 に示す。



※滴下状態とは、漏洩欠陥から液体が液滴状となって落下する状態であり、目視によって確認する。

付図 2-2-1 一次止水適用の判断フロー

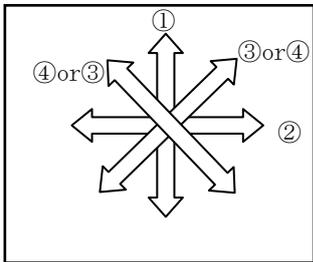
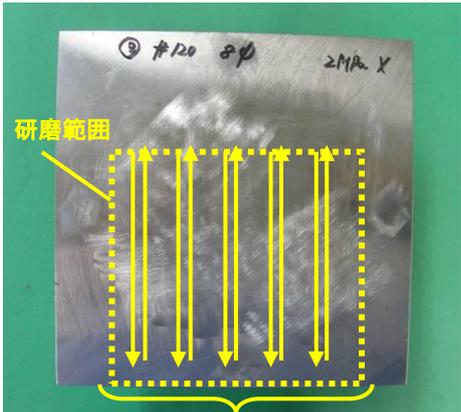
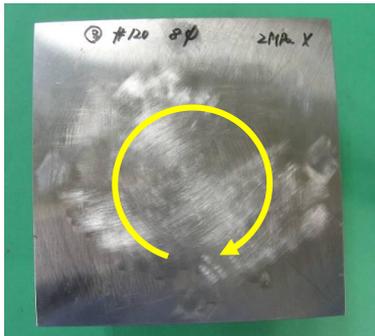


付図2-2-2 ドライ状態における接着材施工概要図

付図2-2-3 漏洩状態における接着材施工概要図

3. 補修対象の表面処理要領

付図 2-3-1 に補修対象が平板（胴を模擬）の場合を例として、表面処理要領を示す。
 なお、鋳鋼品は圧延鋼等の表面と同程度まで研磨する。

工程	手順	写真
表面研磨①	<p>1. 水で表面を洗浄した後、#80 の研磨紙取り付けた回転工具を用いて、縦横斜めに研磨する（研磨紙の選定については補足資料-2 及び補足資料-9 参照）。</p> <p>2. 一方向で5往復、2セット実施（研磨方向は①～④の順、1方向約30秒、1セット約2分）</p> 	 <p>縦方向①5往復の例</p>
表面研磨②	<p>表面研磨①終了後、#80 の研磨紙を用いて、手研磨にて漏洩孔を中心に円周状に2回回転研磨する（約2分）</p>	
脱脂作業	<p>(1) 研磨終了後、アセトンを含ませた紙ウェスにて表面に付着した研磨剤、汚れ等を除去する。</p> <p>(2) 2～3cc のアセトンを補修部表面に滴下し、接着面に均一に広げる</p> <p>(3) アセトンを紙ウェスで拭き取る</p> <p>(4) 再度、新たにアセトンを含ませた紙ウェスにて表面を拭き取る。この時ウェスに汚れ等が付着していないことを確認する。</p> <p>(5) 上記脱脂作業終了後、30分以内に接着材施工を開始する。</p>	

付図 2-3-1 表面処理要領（補修対象を平板とした場合）

表面処理後の施工面に埃、オイルミストなどが付着しないよう注意し、接着材塗布工程に進む。

4. 接着材施工要領

付図2-2-1に示した一次止水適用の判断フローにより、本補修工法を実施する際には、施工表面がドライ状態と漏洩による湿潤状態との二通りが考えられる。

漏洩による湿潤状態においては、前述の通りVT・PTによる漏洩欠陥の大きさが特定できないため、一次止水施工により漏洩が止まる場合は、一次止水用接着材寸法が漏洩欠陥を包絡しているとみなす。この一次止水で施工した接着材を中心として、漏洩補修に必要な接着材塗布範囲に対して補修用接着材を塗布する。

使用する接着材チタニウムパテは主剤：硬化剤＝13：3(重量比)を正確に計量し、清浄なポリエチレン製又はガラス製のパレットの上に取り出す。53×53mm、厚さ10mmの接着材施工には約100g、テーパ部の施工には約40gを量り取る(いずれも主剤＋硬化剤の合計量)。

量り取った接着材は、パテナイフやヘラなどで混ぜ残しが無いよう手早く混練する。均一混練の目安は主剤(グレー)と硬化剤(黒に近いグレー)の混合物の色が均一であることとし、混練時間の目安は3～4分である(気温が低く主剤、硬化剤の粘度が高い場合、あるいは計り取った量が多い場合は、混合時間が長めの方が好ましい)

なお、冬季の施工において気温が低く、均一混合、あるいは接着材の硬化に時間がかかる場合は、施工作业スペースをビニールシートで覆うなどして、作業スペースを適切な温度(10℃以上)に保持する。

具体的な施工方法として、予め接着材に対して離型性の良いシリコンゴムシート等で一次止水用型枠を設置し、型枠に沿って欠陥孔の周囲から接着材を塗布していく。その際、漏出した内部流体が接着材に混入しないよう、小型のポンプ等につないだチューブを用いて流体を吸出しながら接着材を塗布していく。チューブを差し込んだ部分以外への接着材施工が終わった後、チューブを外すとほぼ同時に、予め半硬化させた接着材を漏洩部に設置し、結束バンド等で締め付け、接着材を硬化させる。この一次止水部が硬化した後、内部流体の漏洩が止まっていることを確認し、次に漏洩補修に必要な寸法の接着材を追加塗布する。

ドライの状態においては一次止水を実施する必要がないため、VT、PTにて特定した欠陥部を中心として必要な寸法分の漏洩補修用接着材を塗布する。

いずれの場合も、接着材の寸法は53mm×53mm×厚さ10mm(テーパ部を除く寸法)以上とする。

ただし、接着材塗布長さが補修対象の周長を越える場合は全周を覆う構造を採用する。(付図2-4-1参照)

なお、施工に際しては、接着材品質に関する以下の項目を確認して使用する。

- ・使用期限を過ぎてないか
- ・メーカー発行の出荷前検査記録

また、作業開始前に作業手順を（声に出して）確認する、あるいは各工程ごとにチェック項目を記載したチェックシートで作業や確認項目の抜けが無いことをチェックすることも施工の品質確保には有効である。

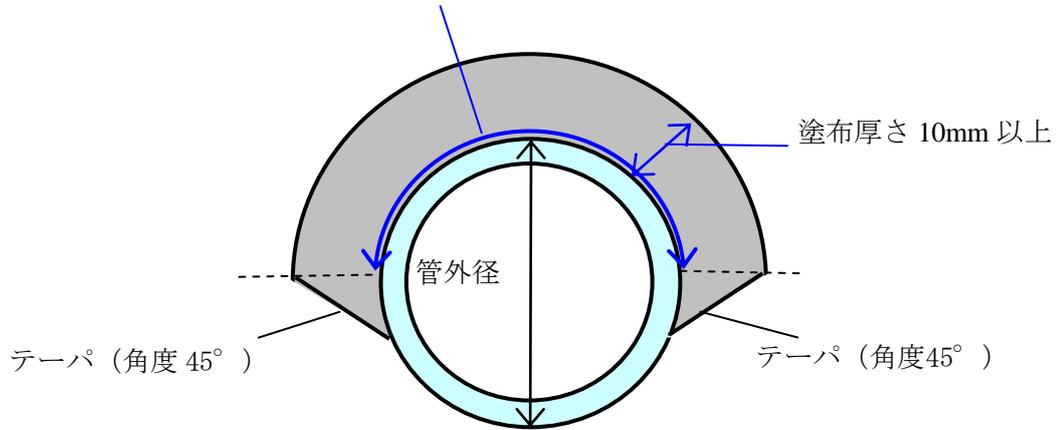
さらに、漏洩箇所に塗布した接着材の残材（主剤/硬化剤を混合し硬化した状態）をアーカイブとして6か月間保管する。

補修部位が冷たく、施工中に大気中の水分が施工面に結露する場合は、ドライヤーの熱風で温める等して、結露を防止する。

例として、直管への接着材施工要領について、ドライ状態の施工を付図 2-4-2、及び漏洩状態の施工を付図 2-4-3 に示す。

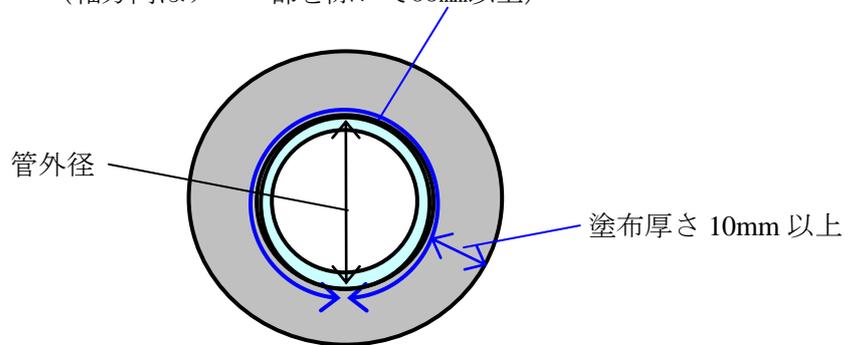
塗布範囲

円周方向塗布長さ（テーパ部を除く）53mm以上（軸方向もテーパ部を除いて53mm以上）



全周塗布

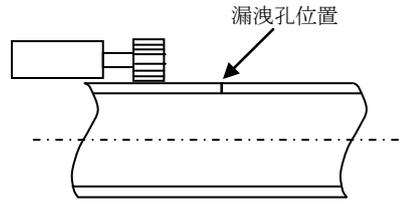
(円周方向塗布長さ) \geq (補修対象の周長) の場合、全周を覆う
(軸方向はテーパ部を除いて53mm以上)



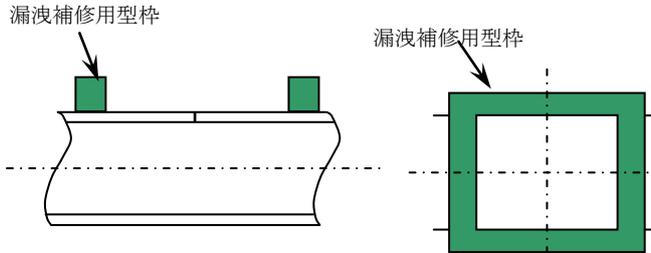
付図 2-4-1 補修範囲と接着材補修構造の関係 (配管断面図)

作業手順

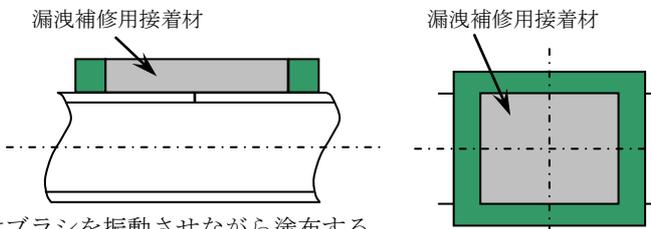
① 接着材塗布範囲に対し、3項に記した表面処理を実施。図は回転工具による研磨状況の例を示す。



② 53mm × 53mm × 厚さ10mm の塗布寸法を有する漏洩補修用型枠を設置する。

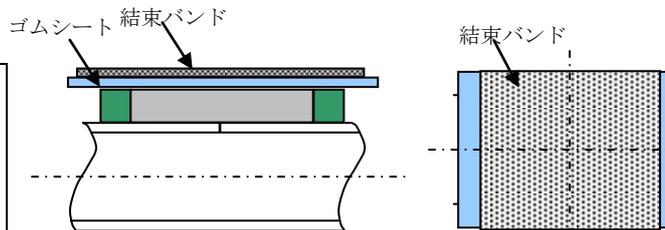


③ 接着材の樹脂成分と充填材が均一になるよう十分混練した後、漏洩補修用型枠に沿って、接着材を母材に密着させながら均一に塗布する*。

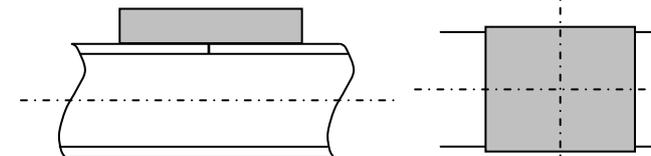


*ヘラで擦り付ける、或いはブラシを振動させながら塗布するなどの方法を用いてもよい

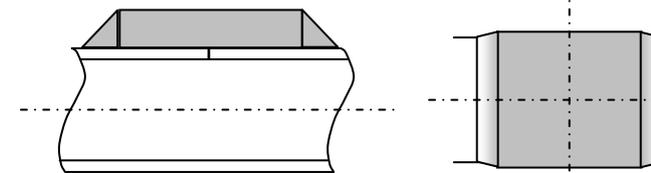
④ ゴムシートを接着材に押し当て、結束バンドを用いて、ゴムシートごと接着材を押さえつけ硬化させる。



⑤ 補修用接着材硬化後、ゴムシート及び補修用型枠を取り外す。



⑥ 硬化済の接着材端部を油などで汚さないよう注意しながら、約45°のテーパを追加施工し、硬化させる。テーパの形状はパテナイフやヘラで整える。



確認事項

① 塗布表面状態がドライであることを確認後、作業開始する。

② 漏洩孔位置が型枠の中心になっているか確認。補修用型枠は塗布面積、厚さを満足していることを確認、記録しておく。

③ 塗布表面に接着材をこすり付けるように塗布し、特に接着界面に気泡を噛みこまないよう注意する

④ バンド結束後、バンドが緩んでないか確認

⑤ 接着材塗布寸法、接着材外観、漏洩有無を目視検査し記録。接着材塗布端部に汚れやゴミ付着が無いことを確認する。

⑥ テーパ施工後、テーパ形状が適切であることを目視確認

付図 2-4-2 接着材施工方法（ドライ状態）

作業手順

①接着材塗布範囲に対し、3項に記した表面処理を実施。一次止水用型枠の範囲まで研磨しておく。
図は回転工具による研磨状況の例を示す。

②ポンプを接続したチューブを孔の先端に設置し、内部流体を吸い出す。また、一次止水用型枠（一次止水部φ5mm、厚さ5mm）を設置する。

③一次止水用型枠に沿ってチューブ周辺まで一次止水のための接着材を設置し、硬化させる。

④チューブを抜いて、直ちに半硬化させた接着材シートを漏洩孔にゴム等を用いて押し当てる。
接着材の半硬化は主剤と硬化剤を混練した後、常温で20～30分程度が目安。

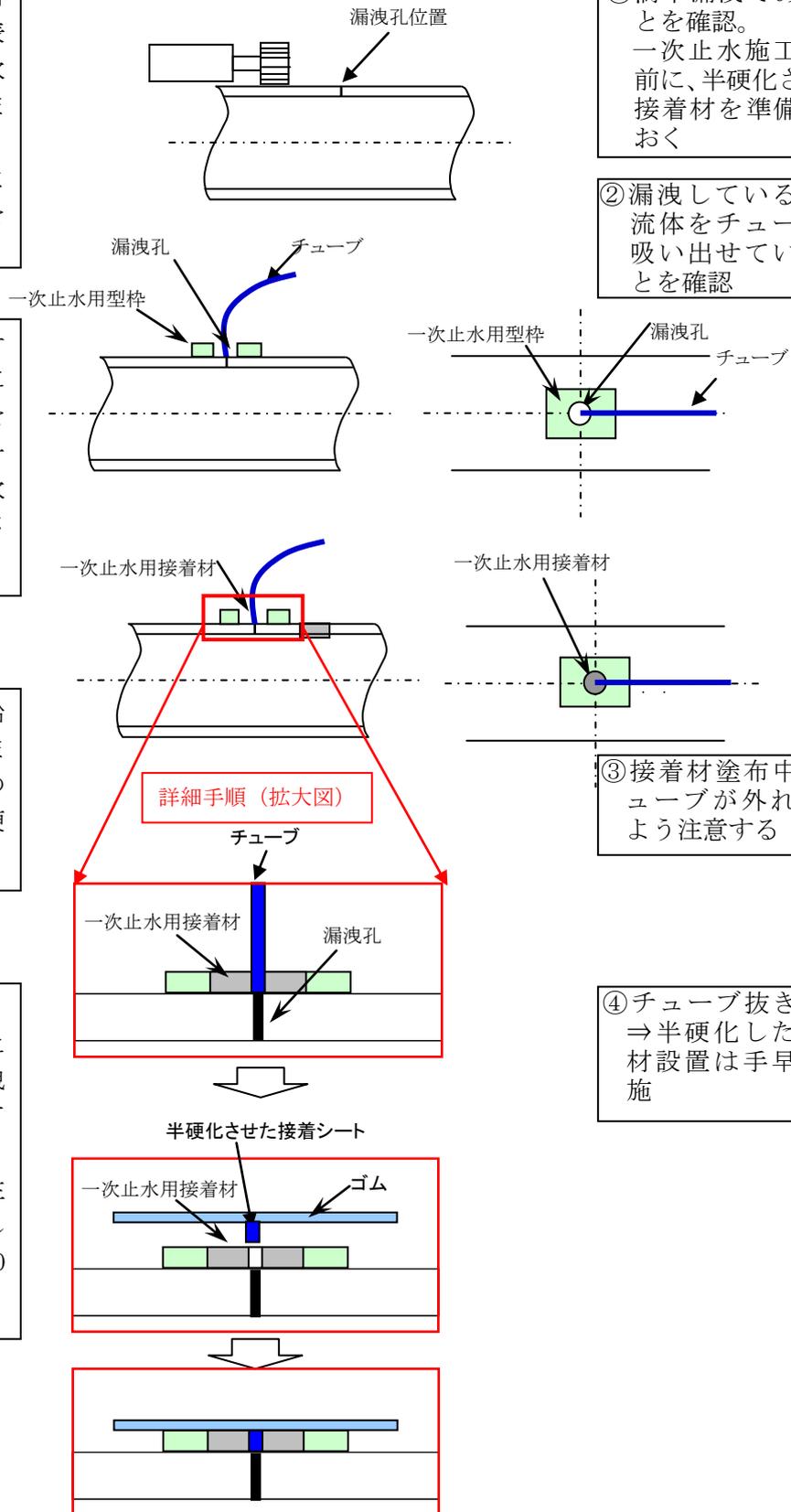
確認事項

①滴下漏洩であることを確認。
一次止水施工開始前に、半硬化させる接着材を準備しておく

②漏洩している内部流体をチューブで吸い出していることを確認

③接着材塗布中にチューブが外れないよう注意する

④チューブ抜き取り
⇒半硬化した接着材設置は手早く実施

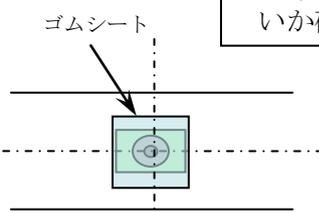
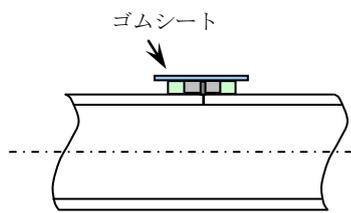


付図 2-4-3 接着材施工方法（漏洩している状態）

作業手順

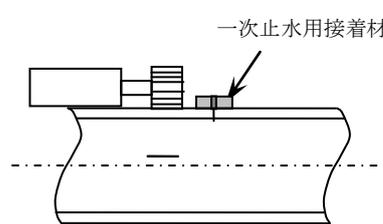
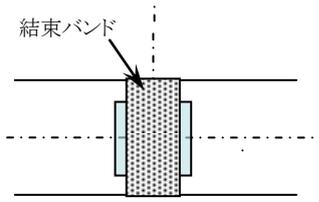
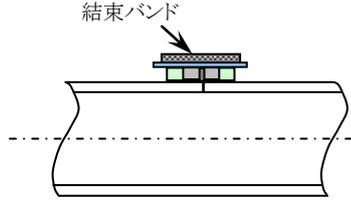
確認事項

⑤ 結束バンドを用いて、ゴムごと接着材を押さえつけ硬化させる。



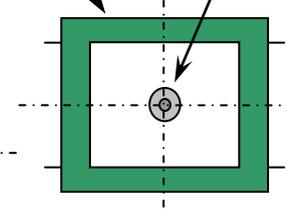
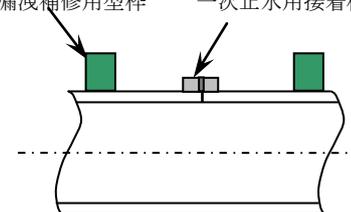
⑤ バンド結束後、バンドが緩んでないか確認

⑥ 一次止水のための接着材が硬化した後、一次止水用型枠等を取外す。その後、#80の研磨紙を回転工具に取り付け、母材の接着材塗布範囲に対し研磨を行う。研磨は回転工具が接着材に触れないよう、一次止水用型枠を設置した位置まで行う。



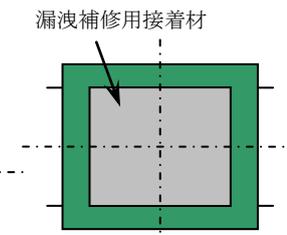
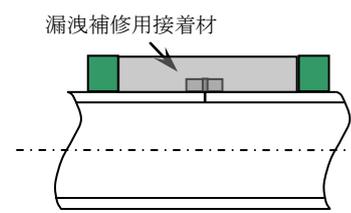
⑥ 型枠除去後、漏洩が止まったことを確認し、次工程へ進む。漏洩が止まらない場合は、後述の再施工要領に従って一次止水用接着材を剥離し、前章の表面処理に戻って再施工

⑦ 53mm × 53mm × 厚さ10mmの塗布寸法を有する漏洩補修用型枠を設置する。



⑦ 一次止水用接着材が型枠の中心になっているか確認。補修用型枠は塗布面積、厚さを満足していることを確認、記録する。

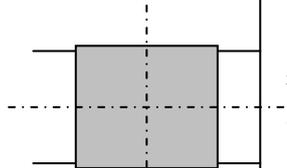
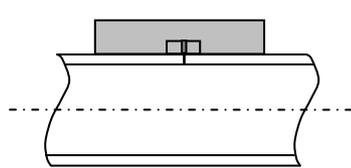
⑧ 接着材の樹脂成分と充填材が均一になるよう十分混練した後、漏洩補修用型枠に沿って、接着材を母材に密着させながら均一に塗布する*。



⑧ 塗布表面に接着材をこすり付けるように塗布し、特に接着界面に気泡を噛みこまないよう注意

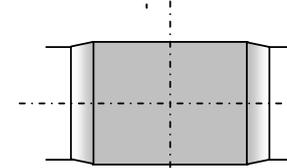
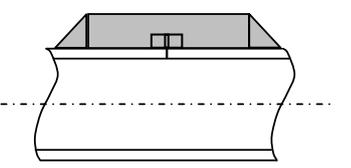
*ヘラで擦り付ける、或いはブラシを振動させながら塗布するなどの方法を用いてもよい

⑨ 漏洩補修用接着材硬化後、補修用型枠を取り外す。



⑨ 接着材塗布寸法、接着材外観、漏洩有無を目視検査し記録する。接着材塗布端部に汚れやゴミ付着が無いことを確認する。

⑩ 硬化済の接着材端部を油などで汚さないよう注意しながら、約45°のテープを追加施工し、硬化させる。テープの形状はパテナイフやヘラで整える。



⑩ テーパ施工後、テープ形状が適切であることを目視確認する。

付図 2-4-3 接着材施工方法 (漏洩している状態)

5. 再施工要領

接着材補修部位から内部流体の滴下漏洩が確認された場合は、接着材を再施工し、漏洩防止機能を維持する。

まず、施工してある接着材を剥離する。剥離の際は被補修部位を傷つけないよう注意して、接着材/被補修部位の界面にせん断力を負荷するように補修用接着材の側面を木槌でたたくななどの方法で接着材を剥離させる。内部流体が漏洩した剥離部分に、くさび状の治具を打ち込む方法を併用してもよい。

上記の方法で大部分の接着材を剥離させた後、被補修部表面に残存している少量の接着材を粗落としするため、#80の研磨紙を取り付けた面粗し用の工具などを用いて、目視で接着材が確認できなくなるまで研磨する。

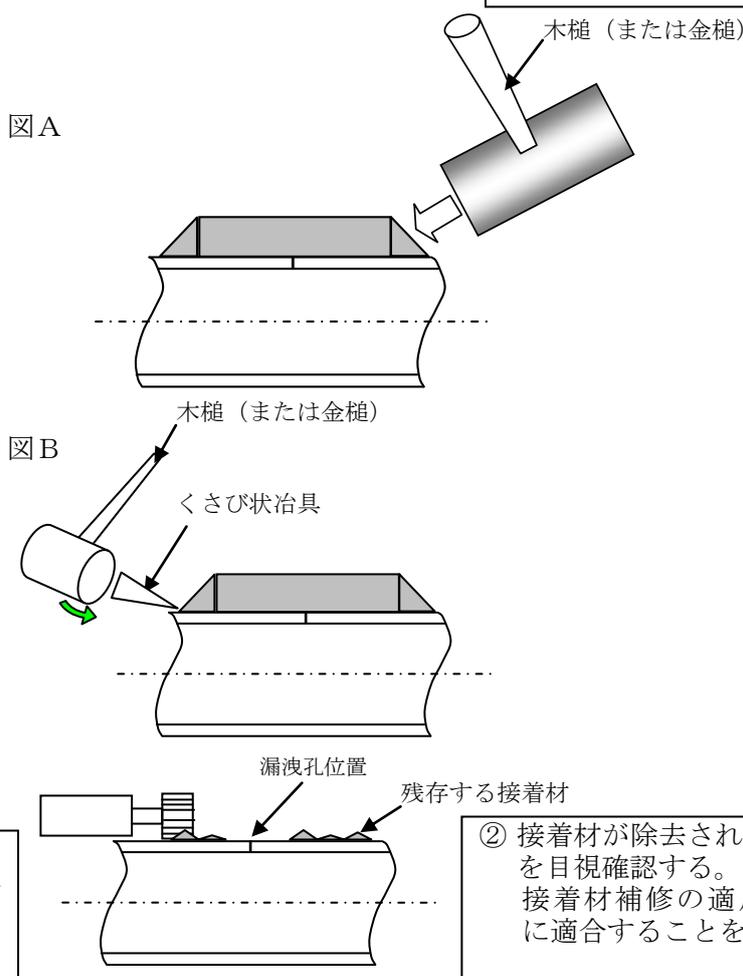
接着材除去後、2項の「適用範囲に適合していることの確認」を再度実施し、接着材補修適用条件に適合することを確認する。その後、3項「補修対象の表面処理要領」及び4項「接着材施工要領」に従って、再施工を行う。

作業手順

① 施工してある接着材を剥離する。図Aは木槌（または金槌）でたたいて剥離する例を示す。図Bは接着材/被補修部位の漏洩部分にくさび状の治具を打ち込んで剥離する例を示す。

確認事項

① 接着材剥離時に被補修部位を傷つけてないか、剥離面を目視確認。



② 残存する接着材を研磨し除去する。図は回転工具による研磨状況の例を示す。

② 接着材が除去されたことを目視確認する。接着材補修の適用条件に適合することを確認。

付図 2-5-1 再施工時の接着材除去手順

6. 実機施工後の検査方法

接着材の施工により漏洩を防止できることの確認のため、以下に示す実施工後の検査を実施する。

- ・接着材施工後の目視確認：接着材の塗布範囲と厚さ（テーパ部を除いて 53mm×53mm、厚さ 10mm）、外観（異常の無いこと）
- ・施工時点で流体を内包する場合（1次止水を行った場合）は、施工終了直後に漏洩が無いことを目視で確認
- ・施工後の試運転時に漏洩がないことを目視で確認

7. 接着材補修の品質管理

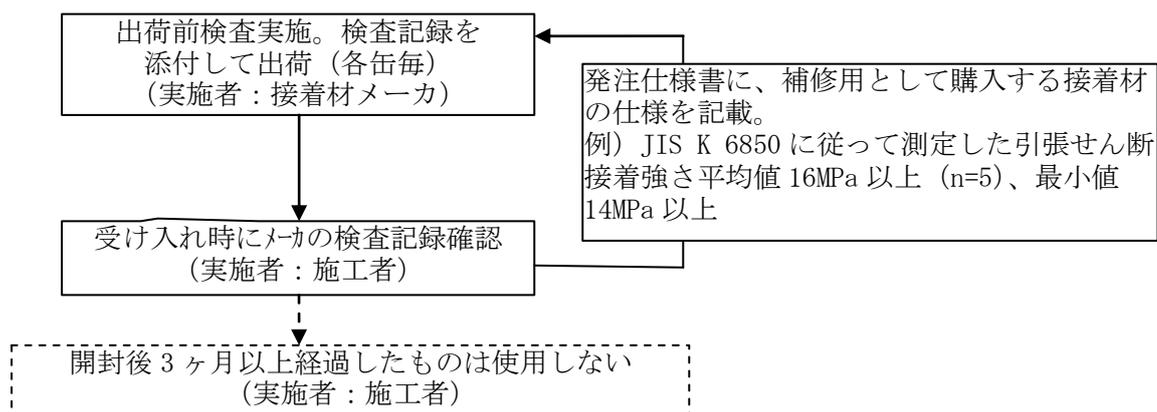
接着材補修の品質を確保するために、品質が確認された接着材を用い、技量管理された作業員により、前記施工要領に従って補修を行う。

7.1 接着材の品質管理

接着材メーカーによる出荷前検査（ロットNo. 毎に引張せん断接着強さ測定）及び施工者による受け入れ検査（メーカー検査記録の確認）を行う。

開缶した接着材は冷暗所（冷蔵庫の中など）に保管する。冷蔵庫から取り出して接着材を使用する場合は、大気中の水分が接着材表面に凝縮することを避けるため、冷蔵庫から取り出して室内に置いておき、接着材の缶が室温と同等温度になったことを確認し、缶表面に水分が結露している場合は水分を拭き取った後、フタを開ける。

なお、開封後3ヶ月以上経過した接着材は使用しない。



なお、メーカーが公表しているチタニウムパテの仕様を補足資料—10に示す。

7.2 接着材補修作業者の技量管理

接着材補修の実施は、作業に関する技量の認定を受けた作業者に限定することで作業の品質を確保する。

【技量認定方法】

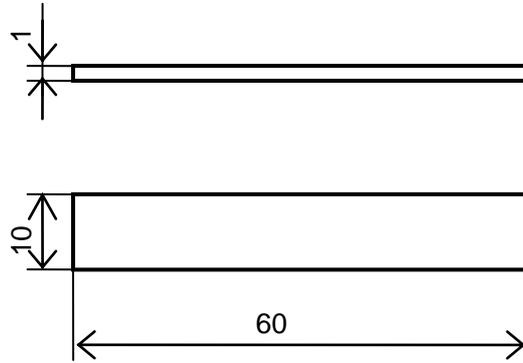
- ・ JIS K 6850 に準じて引張せん断接着強さ試験片（材質 SUS304）を 3 体作製する。
表面処理方法、接着材混合方法などは確性試験にて定めた施工要領に従う。
- ・ 試験片作製し室温で 24 時間保管後、JIS K 6850 に準じて引張せん断接着強さを測定する。
- ・ 以下を満足すれば、接着材補修の作業者として認定する。
 - ① 引張せん断接着強さの平均が 16MPa 以上、且つ最小値が 14MPa 以上
 - ② 剥離面を目視観察して完全な界面剥離部分が全体の 20%未満
- ・ なお、作業者認定に使用する接着材は、事前に 7.1 項に従って品質が適切であることを確認した接着材を使用する。

以上

補足資料—1

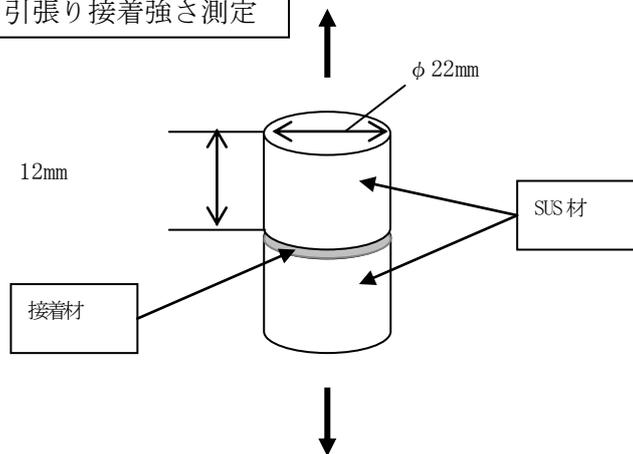
試験体形状

試験片 1-1 : ガラス転移点測定



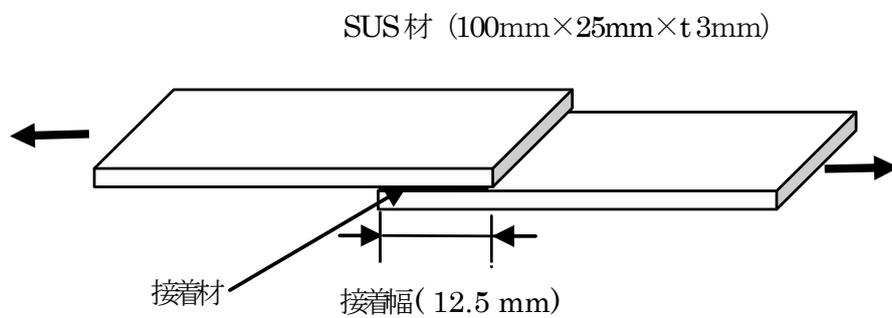
補足図 1-1 ガラス転移点測定試験片

試験片 2-1-1~30 : 引張り接着強さ測定



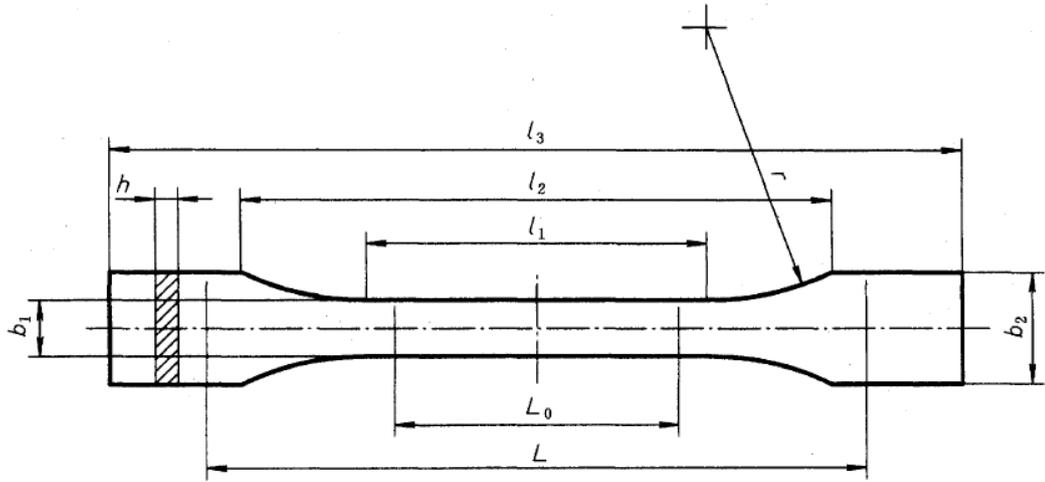
補足図 1-2 丸棒形引張り接着強さ試験片

試験片 2-2-1~30 : 引張せん断接着強さ測定



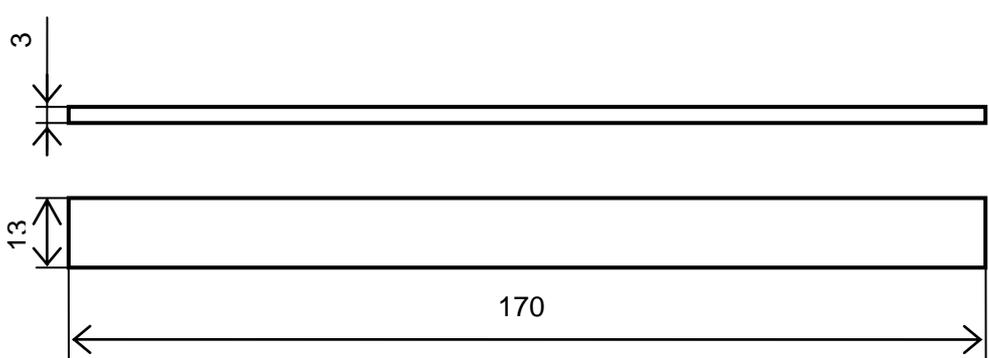
補足図 1-3 引張せん断接着強さ試験片の形状及び寸法

試験片 2-3-1~30 : 引張強さ



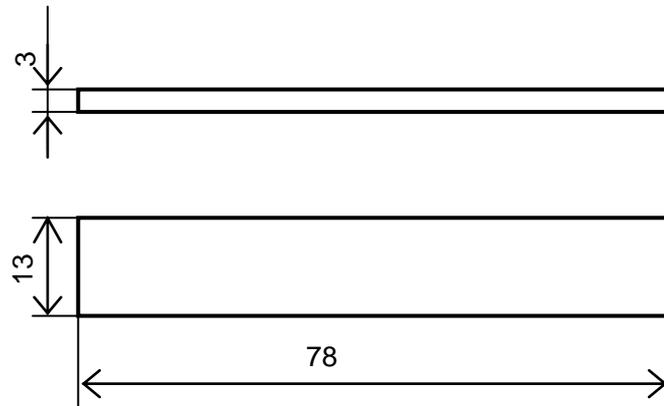
試験片の形	単位 mm	
	1A	1B
l_3 : 全長		≥ 150 ¹⁾
l_1 : 幅の狭い平行部分の長さ	80 ± 2	60.0 ± 0.5
r : 半径	$20 \sim 25$	≥ 60 ²⁾
l_2 : 幅の広い平行部分間の間隔	$104 \sim 113$ ³⁾	$106 \sim 120$ ³⁾
b_2 : 端部の幅		20.0 ± 0.2
b_1 : 狭い部分の幅		10.0 ± 0.2
h : 標準厚さ ⁴⁾		4.0 ± 0.2
L_0 : 標準間距離		50.0 ± 0.5
L : つかみ具間の初めの間隔	115 ± 1	$l_2 + 5$ $l_2 + 0$

補足図 1-4-1 引張強さ試験片
(本試験では機械加工作成の標準試験片である 1B 型を採用)

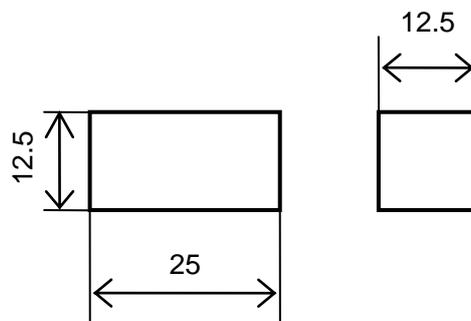


補足図 1-4-2 引張弾性率および引張ポアソン比試験片

試験片 2-4-1~30 : 圧縮特性測定

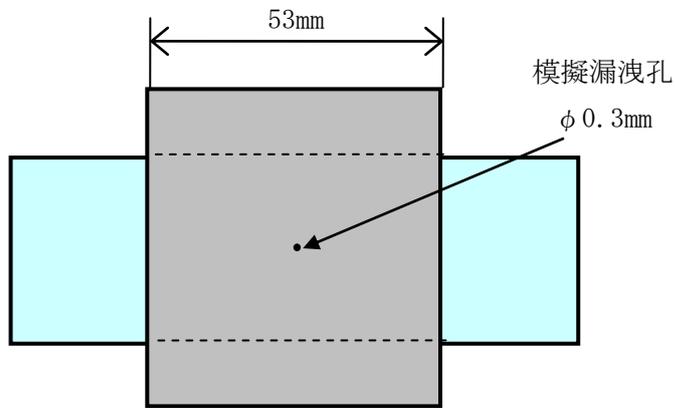


補足図 1-4-3 圧縮強度試験片

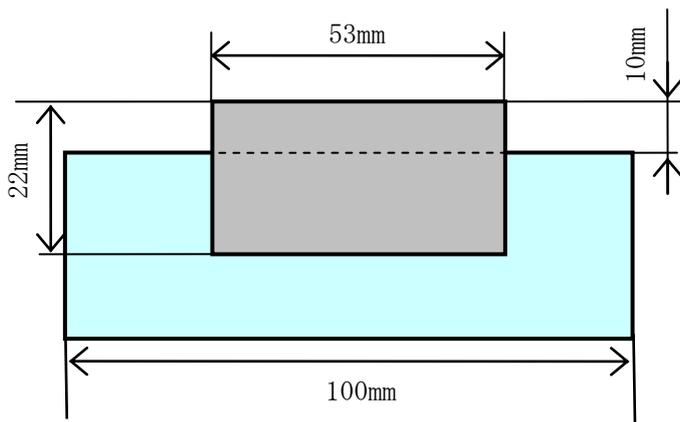


補足図 1-4-4 圧縮弾性率及び引張ポアソン比試験片

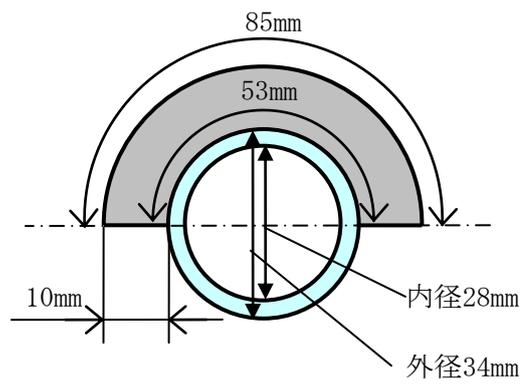
試験体 3-1-1~9：硝酸浸透試験



(平面図)



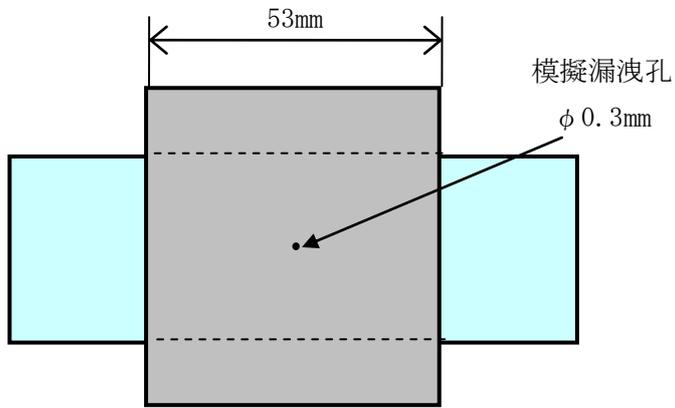
(正面図)



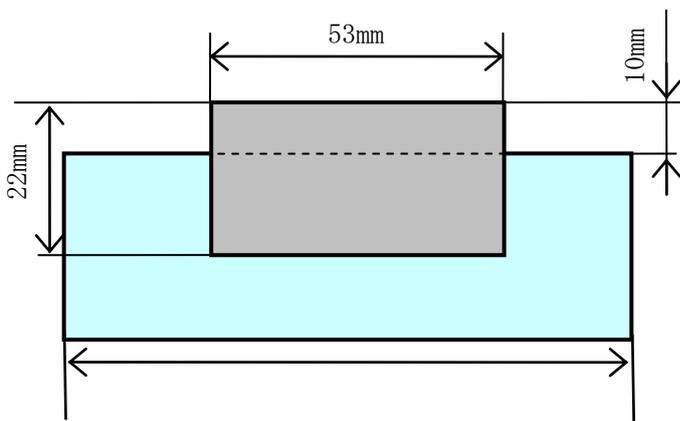
(側面図)

補足図 1-5 硝酸浸透試験体

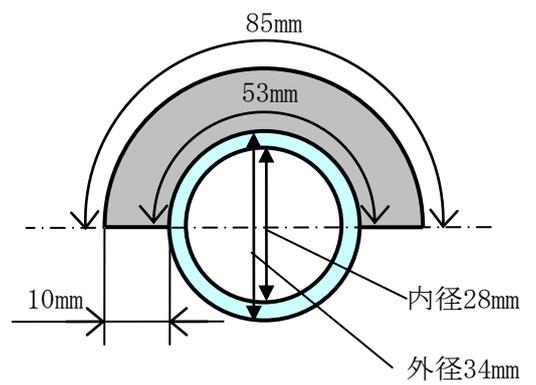
試験体 3-2-1~3 : 水浸透試験



(平面図)



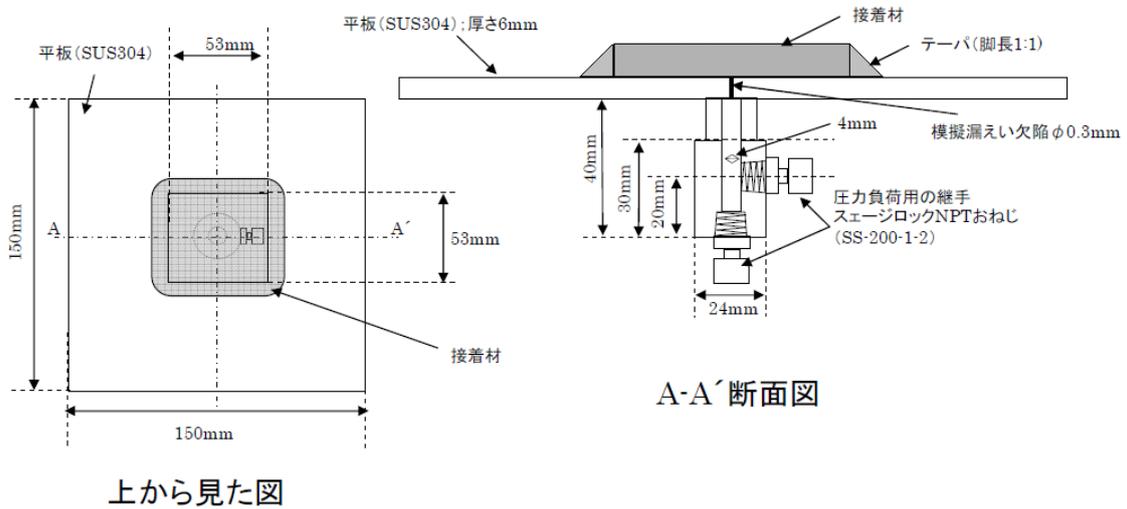
(正面図)



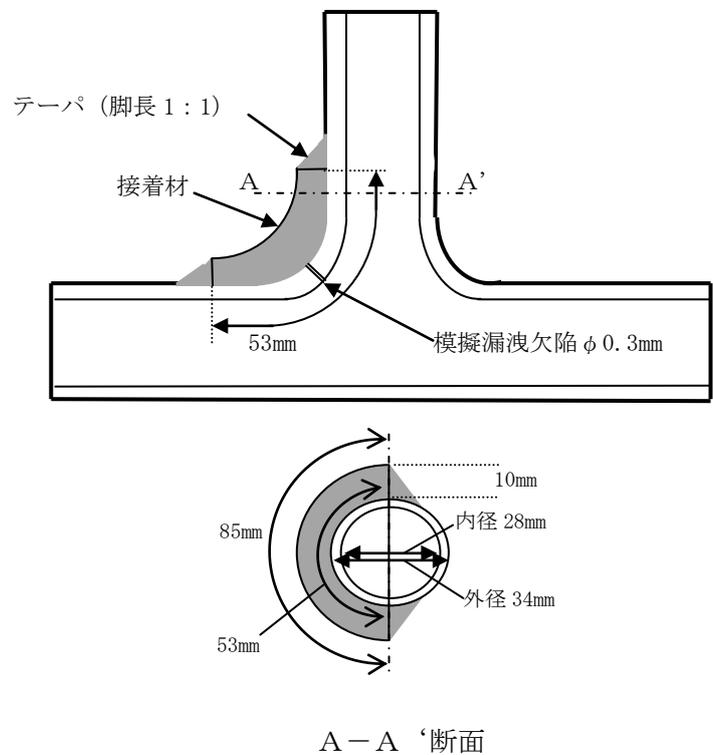
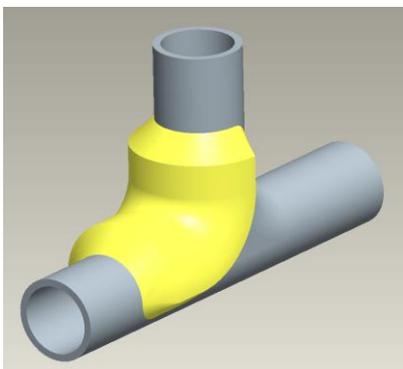
(側面図)

補足図 1-6 水浸透試験体

試験体 4-2-1~10 : 内圧保持試験 (平板)

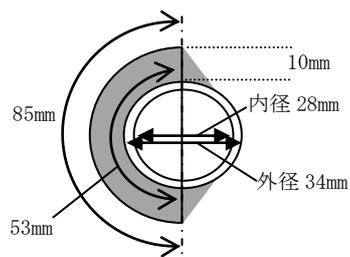
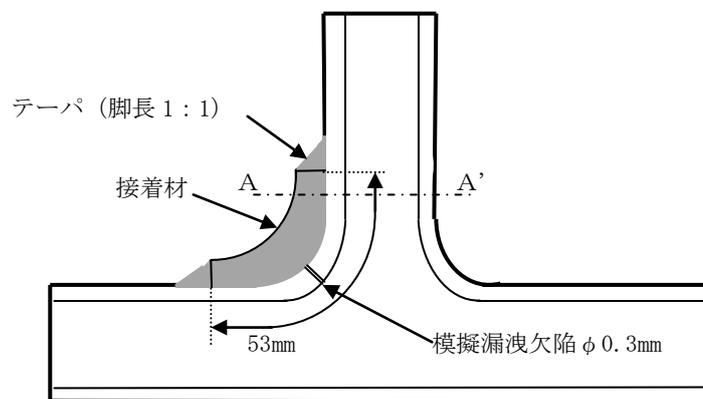
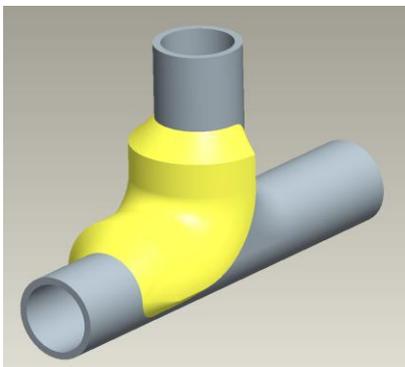


試験体 4-2-11~15 : 内圧保持試験 (ティー)



補足図 1-7 内圧保持試験体

試験体 5-1-1~5 及び 5-2-1~5 ; 実機模擬試験 (ティー)



A-A '断面

補足図 1-8 実機模擬試験体

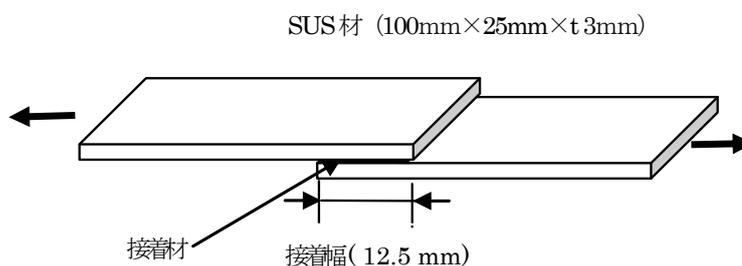
表面粗さと接着強さの関係
研磨紙の選定

1. はじめに

接着材強さには被接着体の表面粗さが影響すると考えられるため、粗さの異なる研磨紙を用いて接着面の面粗しを実施し、接着強さを測定することで接着材補修前の表面処理（面粗し）に使用する研磨紙選定を行った。

2. 実施内容

- 1) 研磨紙の粗さ：#80、#120、#400 の 3 水準
- 2) 接着強さ測定：JIS K 6850 に準じて引張せん断接着強さを測定した。試験片形状を補足図 2-1 に示す。試験体雰囲気温度 50℃で 5 体を測定した。

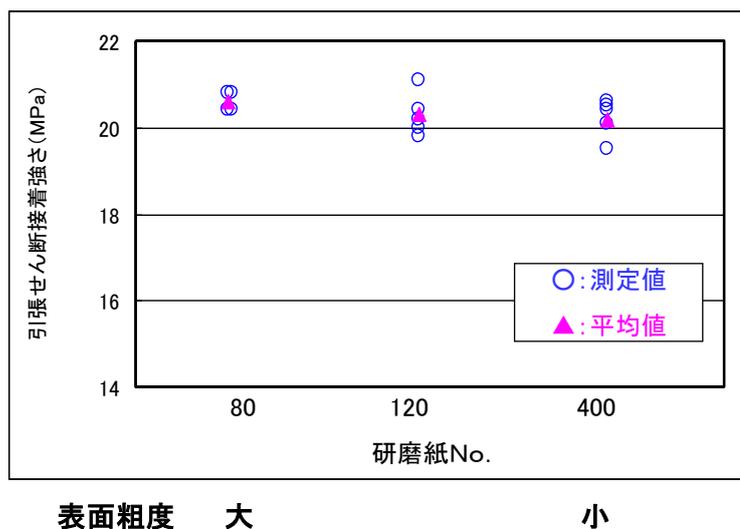


補足図 2-1 試験片形状

3. 接着強さ測定結果

表面粗さと接着強さの関係を補足図 2-2 に示す。#80 で研磨した接着強さの平均値がやや大きいものの、#120、#400 もほぼ同レベルであり、試験した範囲に関しては接着強さに対する表面粗さの影響は小さい。

実機施工では、例えば鋳物など、さまざまな表面を研磨する必要があることを考慮し、面粗しの効率が高い#80 での研磨を標準とする。



表面粗度 大 小

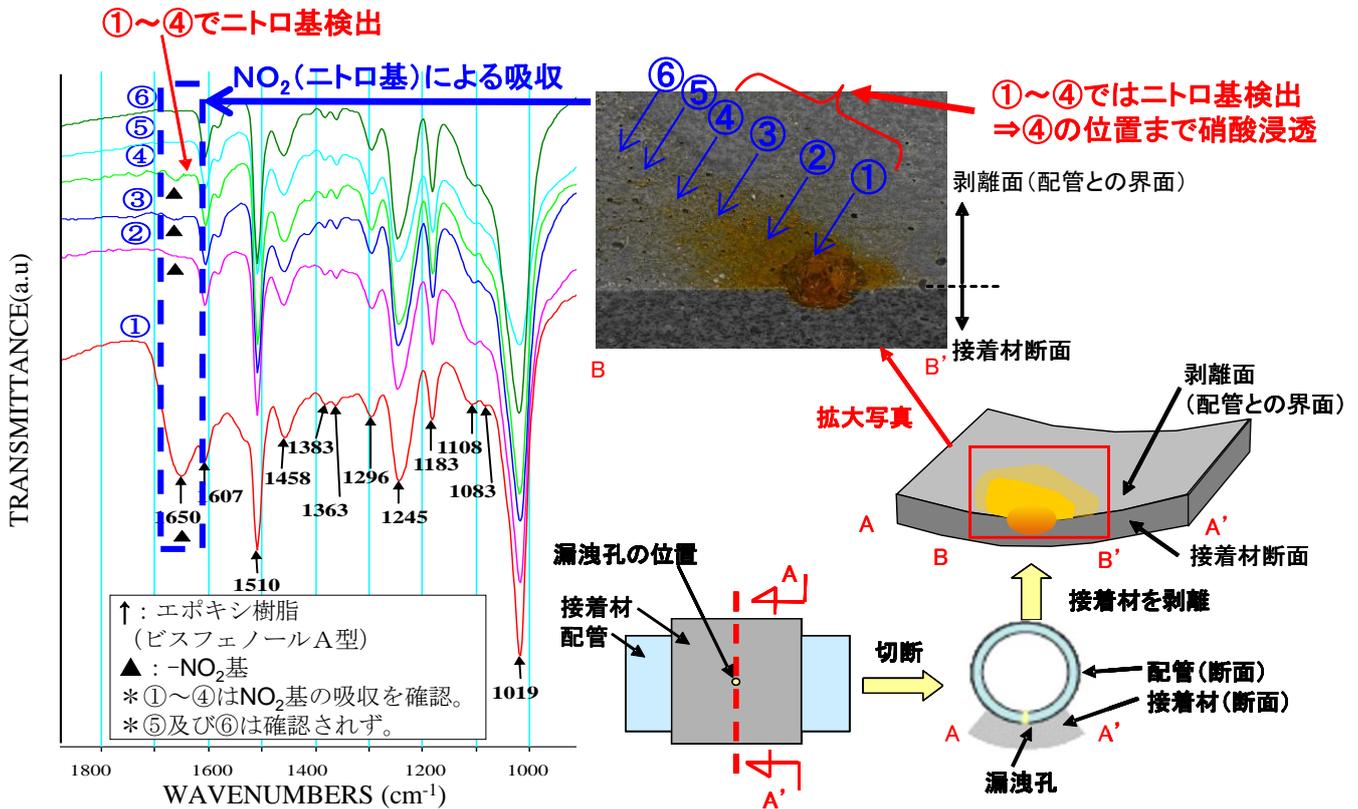
補足図 2-2 表面粗さと接着強さの関係

以上

界面方向への硝酸浸透距離の判定方法

界面方向への硝酸浸透距離の判定方法

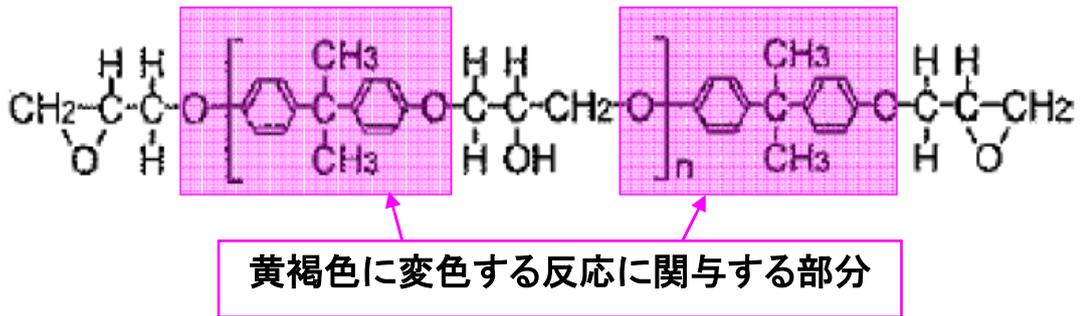
予備試験として硝酸浸透により黄変した接着材剥離面を赤外分光分析法で分析した。黄色～褐色の変色部では硝酸と接着材の主成分であるエポキシ樹脂の反応により生じたニトロ基 (NO_2)を確認した。変色部を硝酸浸透範囲と判定することとした。



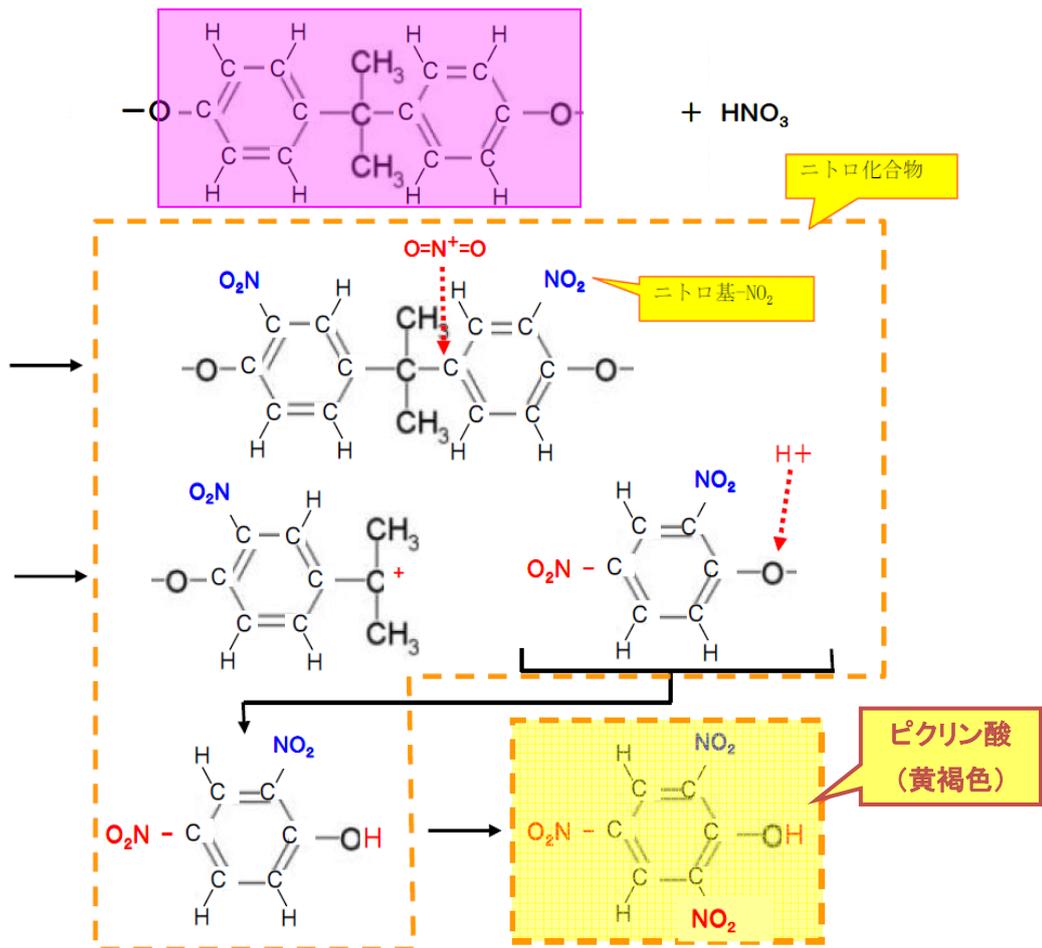
補足図 3-1 変色部の赤外分光分析結果

エポキシ樹脂の分子構造を補足図 3-2、エポキシ樹脂の発色に関与する部分と硝酸との反応機構を補足図 3-3 に示す。

エポキシ樹脂が硝酸と反応すると、ニトロ化合物 (ニトロ基を含有する化合物) の一種であるピクリン酸 (黄色～褐色) を生成する。また、ピクリン酸生成過程でもニトロ化合物 (黄色～褐色) を中間体として生成するため、硝酸との反応開始直後からチタニウムパテは変色開始すると考えられる。



補足図 3-2 ビスフェノール A 型エポキシ樹脂の分子構造

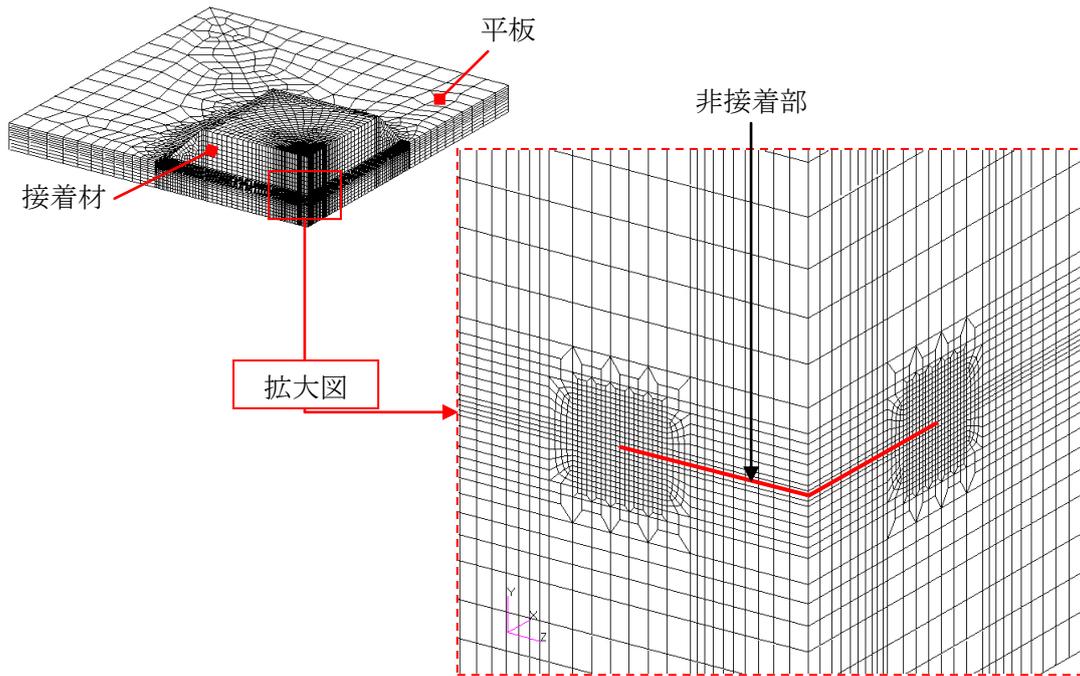


補足図 3-3 エポキシ樹脂の変色に関与する部分と硝酸の反応機構*

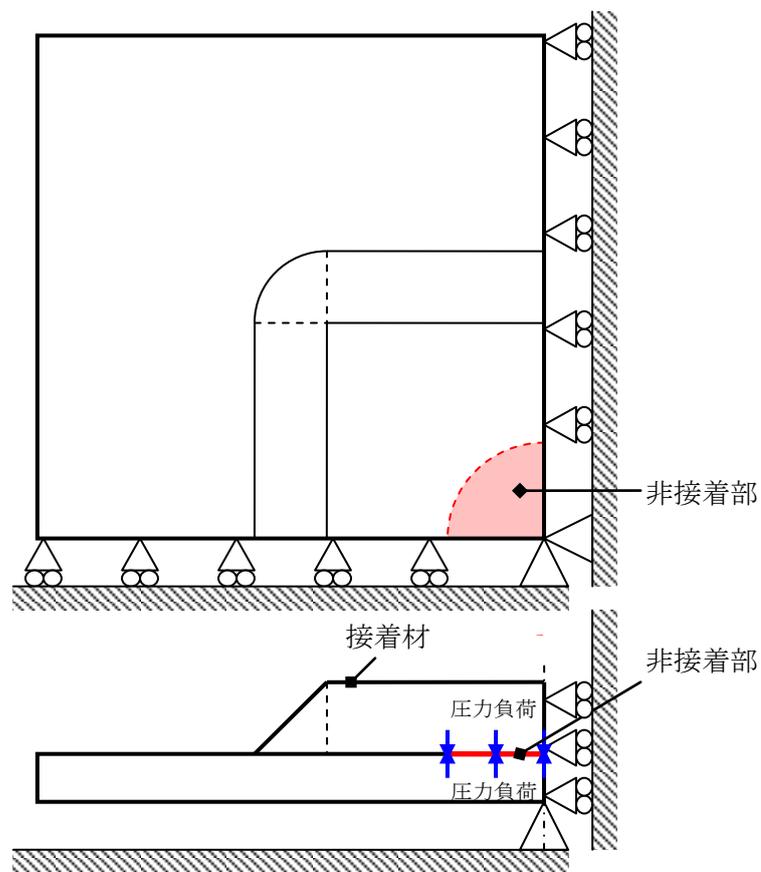
(*参考文献 ; J. Soc. Mat. Sci. , Japan, Vol. 49, No. 5, pp488-493, 2000)

補足資料—4

欠陥部先端近傍の応力分布解析
解析モデル、境界条件及び荷重条件

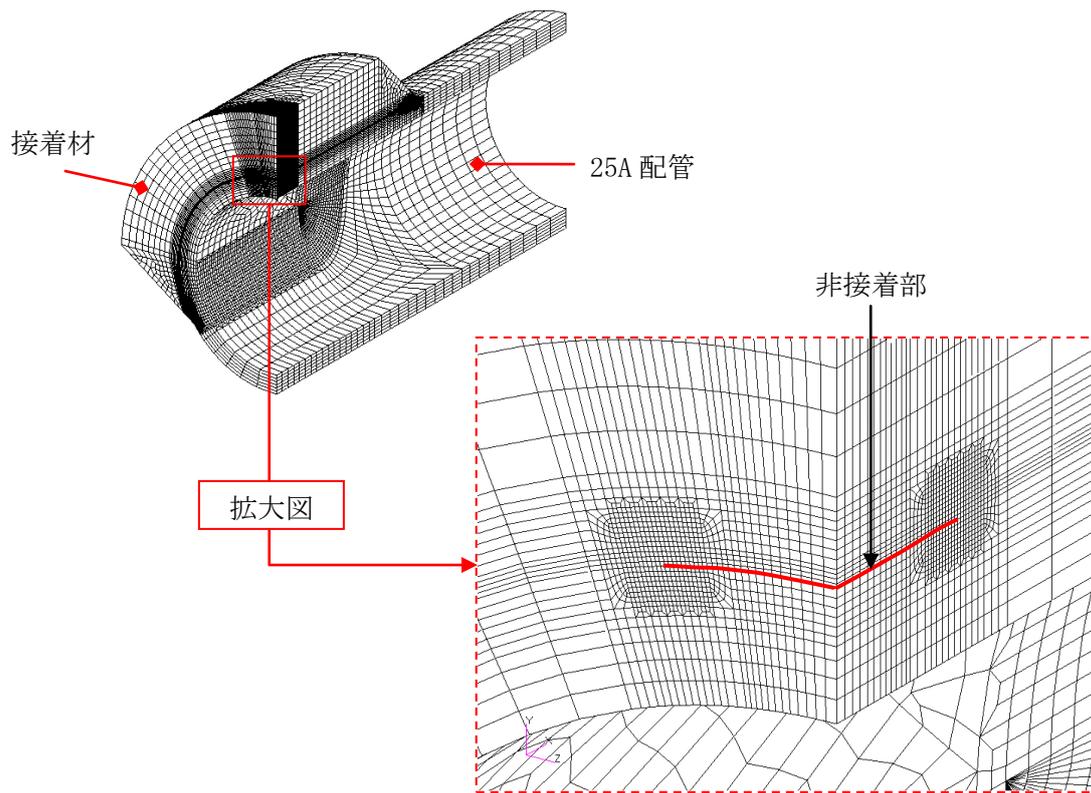


(a) 解析モデル

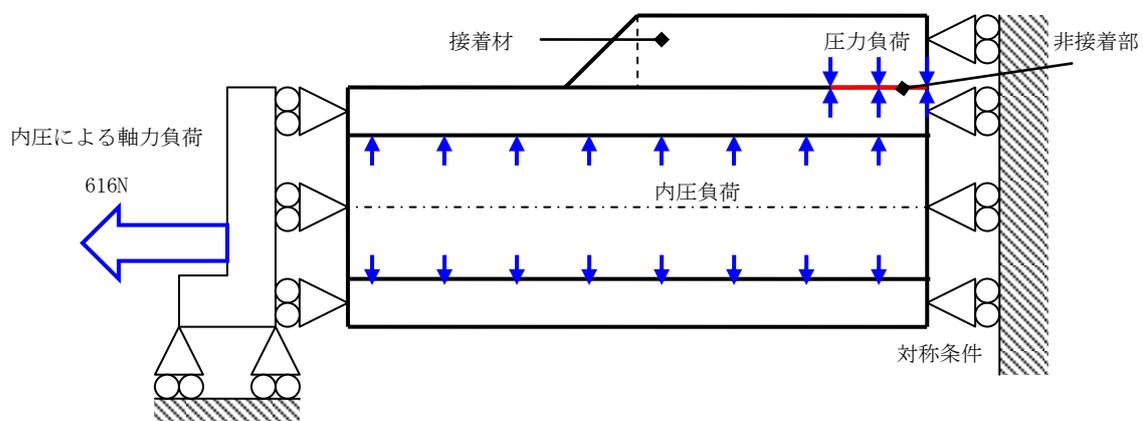


(b) 境界条件及び荷重条件

補足図 4-1 Case-1(平板モデル)の解析モデル・境界条件及び荷重条件

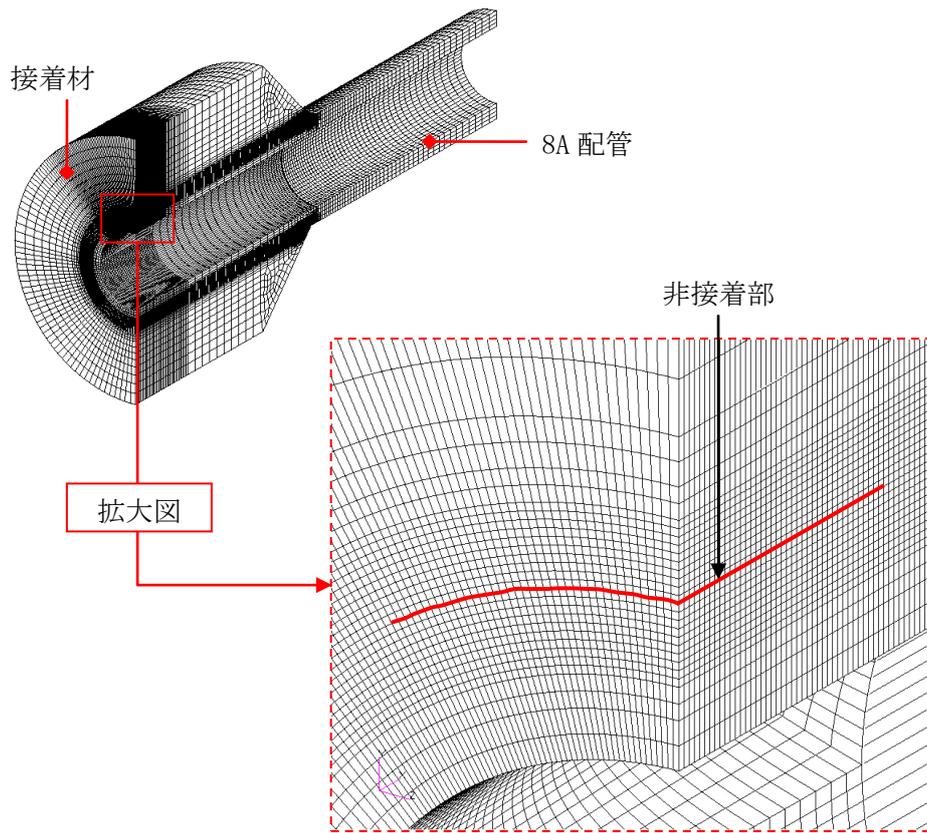


(a) 解析モデル

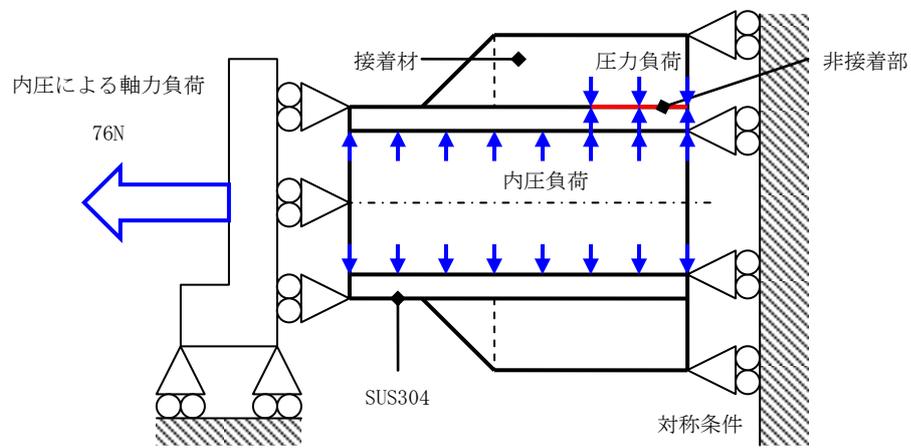


(b) 境界条件及び荷重条件

補足図 4-2 Case-2(25A 直管モデル)の解析モデル・境界条件及び荷重条件

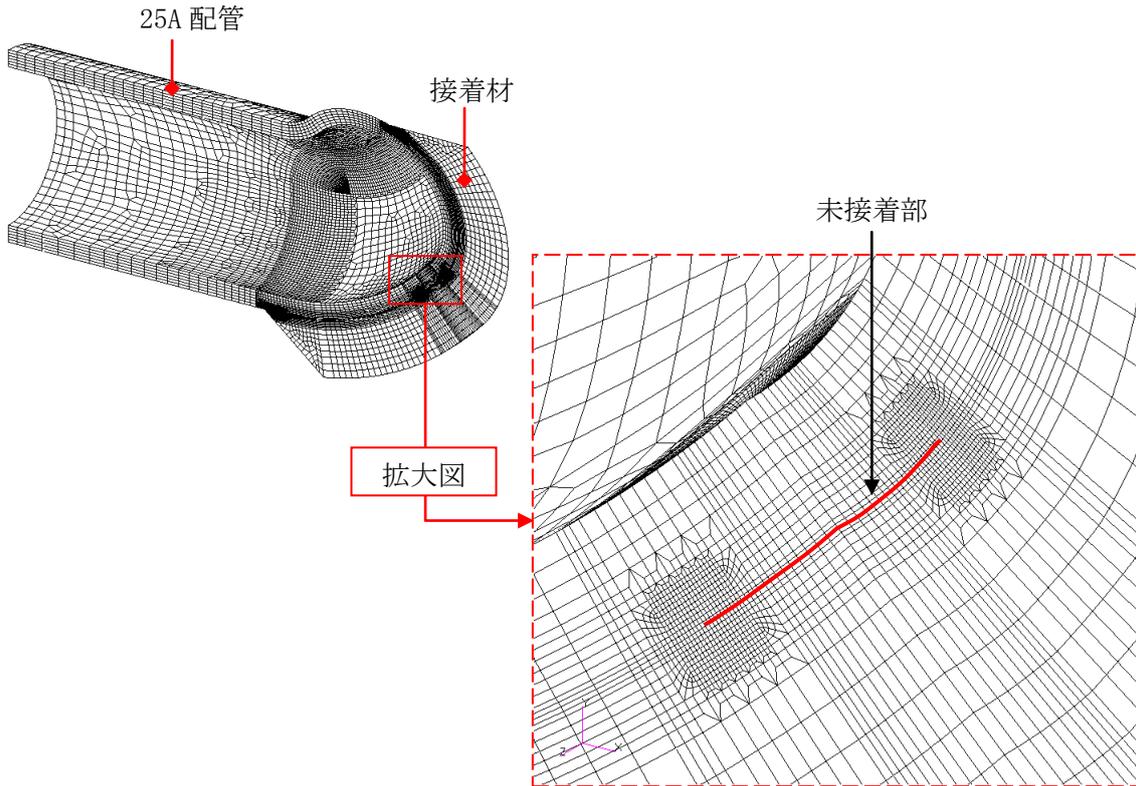


(a) 解析モデル

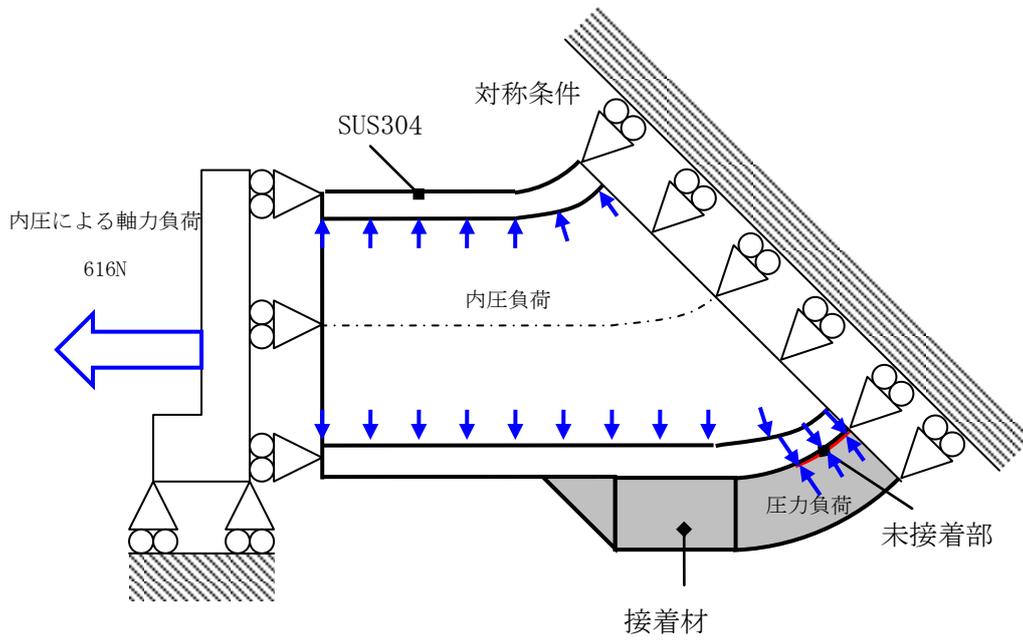


(b) 境界条件及び荷重条件

補足図 4-3 Case-3(8A 直管モデル)の解析モデル・境界条件及び荷重条件

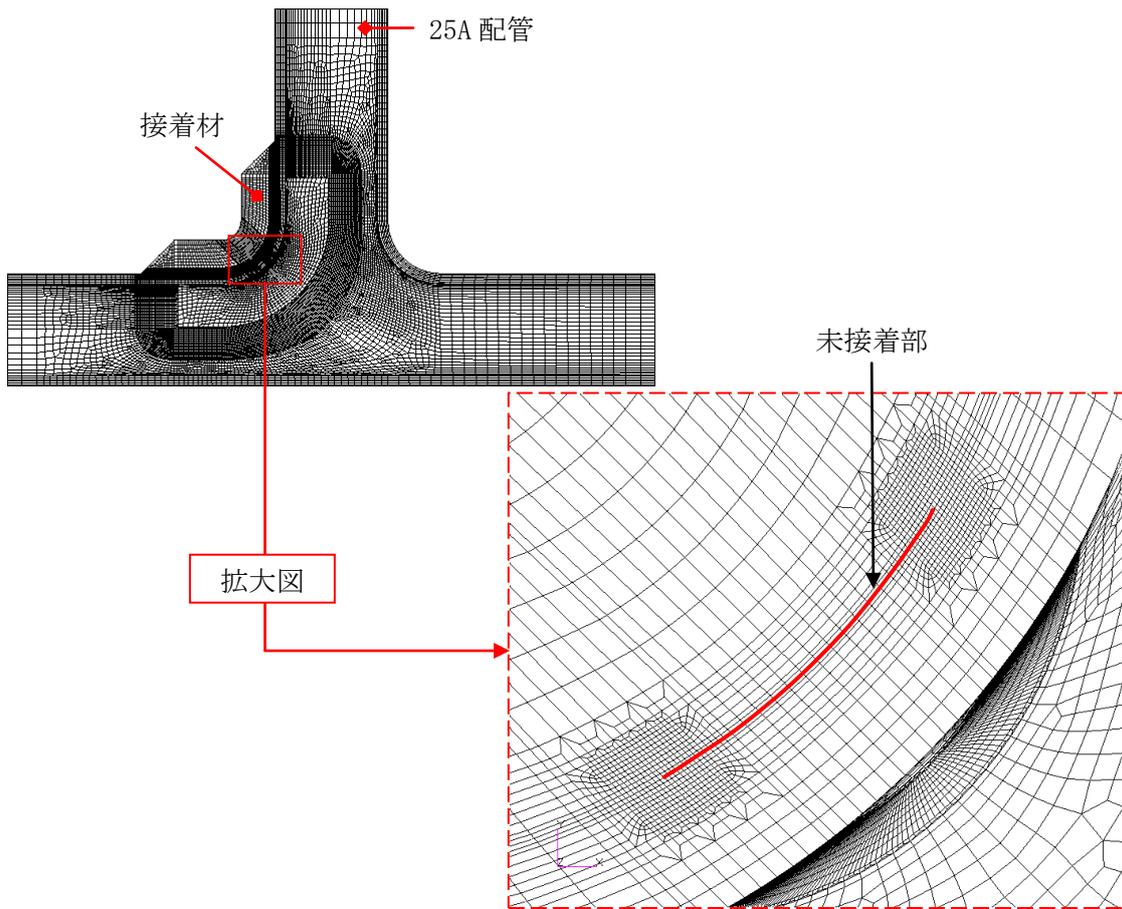


(a) 解析モデル

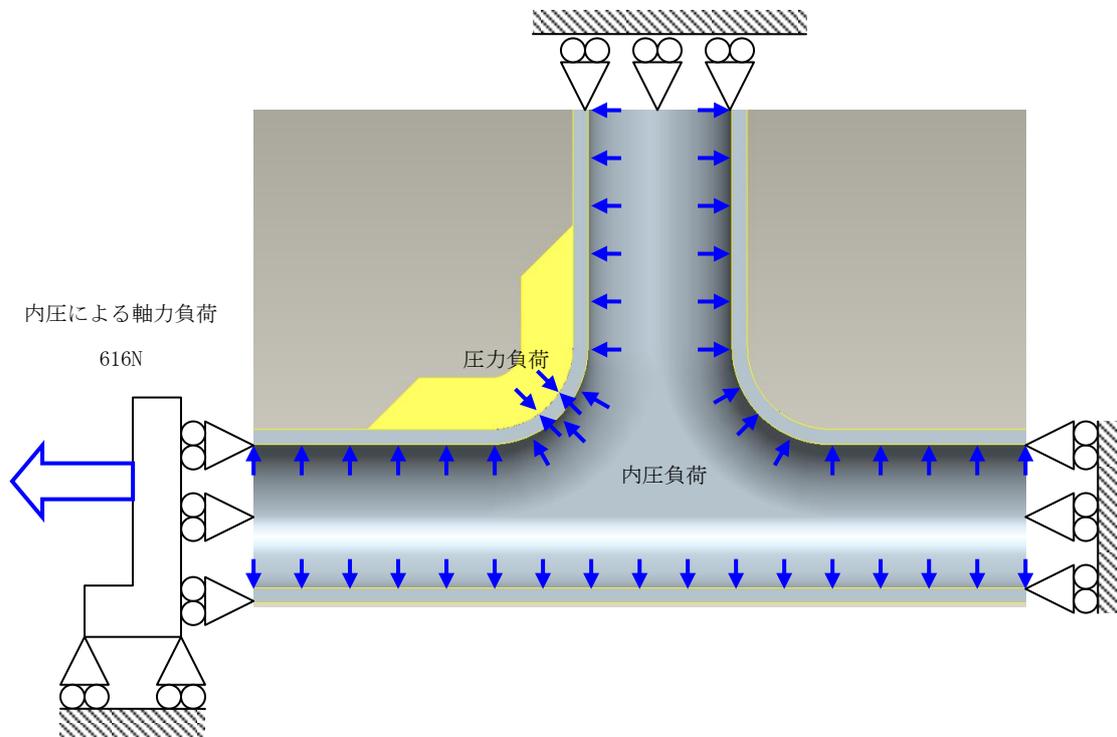


(b) 境界条件及び荷重条件

補足図 4-4 Case-4 (25A エルボ) の解析モデル・境界条件及び荷重条件



(a) 解析モデル



(b) 境界条件及び荷重条件

補足図 4-5 Case-5(25A ティー) の解析モデル・境界条件及び荷重条件

テーパ形状解析
接着材端部に生じる熱応力の低減効果

1. 概要

接着材と被補修材料とは線膨張係数が異なる。そのため、温度変動が生じると接着材端部に熱伸び差に起因する熱応力が発生する。補足表 5-1 に、本補修工法において使用する接着材と、被補修材料であるオーステナイト系ステンレス鋼の代表である SUS304 との物性値を示す。なお、被補修材料には炭素鋼もあるが、炭素鋼のヤング率はオーステナイト系ステンレス鋼とほぼ同等であり、炭素鋼の線膨張係数はオーステナイト系ステンレス鋼の約 2/3 と小さいため、オーステナイト系ステンレス鋼で代表している。この熱応力の低減策として、接着材端部にテーパ部を設けることが考えられるため、その効果を確認する目的でテーパなしとテーパあり(脚長 1:1)の 2 ケースに対し解析を実施し、その効果を評価した。

2. 解析条件

- 1) 解析タイプ 2次元弾性解析 1/2 モデル 一般化平面ひずみ
- 2) 欠陥部寸法 $\phi 8\text{mm}$ (解析ではスリットにより模擬)
- 3) 接着材寸法 $53\text{mm} \times 53\text{mm} \times t10\text{mm}$
- 4) 対象形状 テーパの有無の効果を平易に評価するため、解析対象は平板とした
- 5) 解析ケース Case-1 テーパなし
Case-2 テーパあり(脚長 1:1)
- 6) 解析モデル Case-1 テーパなし：補足図 5-1 参照
Case-2 テーパあり(脚長 1:1)：補足図 5-1 参照
- 7) 荷重条件 $10^{\circ}\text{C} \rightarrow 40^{\circ}\text{C}$ の昇温
- 8) 材料 接着材及び SUS304
- 9) 解析の仮定条件
 - ・接着材は弾性体として扱う
 - ・劣化や収縮による経時的な物性値の変動は考慮しない
 - ・初期応力(塗布時に生じる残留応力)は 0MPa とする

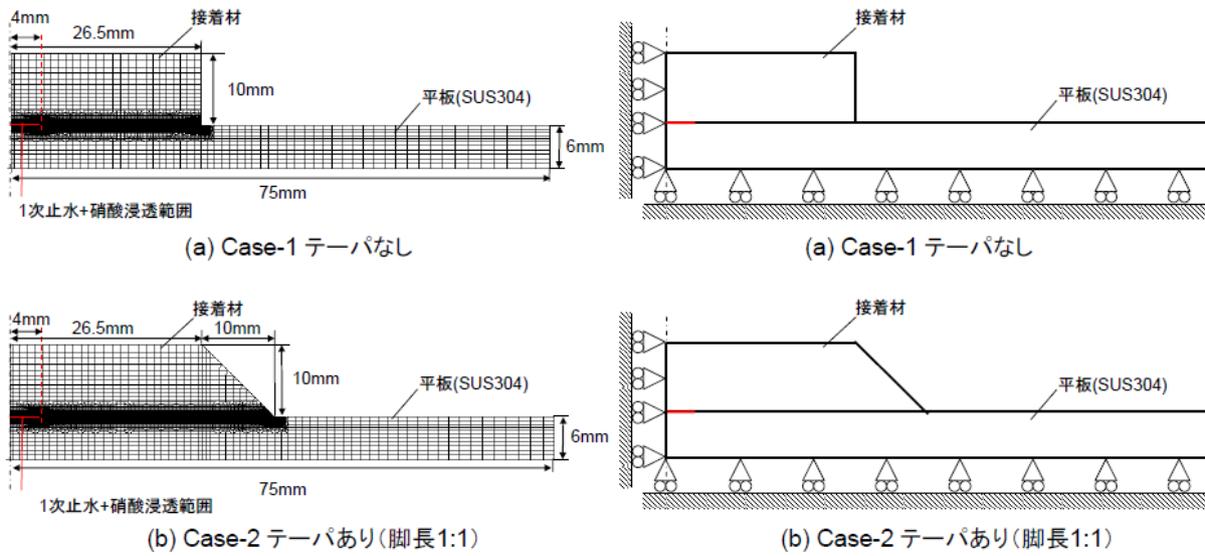
3. テーパ効果の評価結果

熱応力による接着材の剥離は、接着材界面における水平方向応力によると考えられる。そのため、Case-1 及び Case-2 におけるこの方向の応力分布を比較した。比較結果を補足図 5-2 に示す。

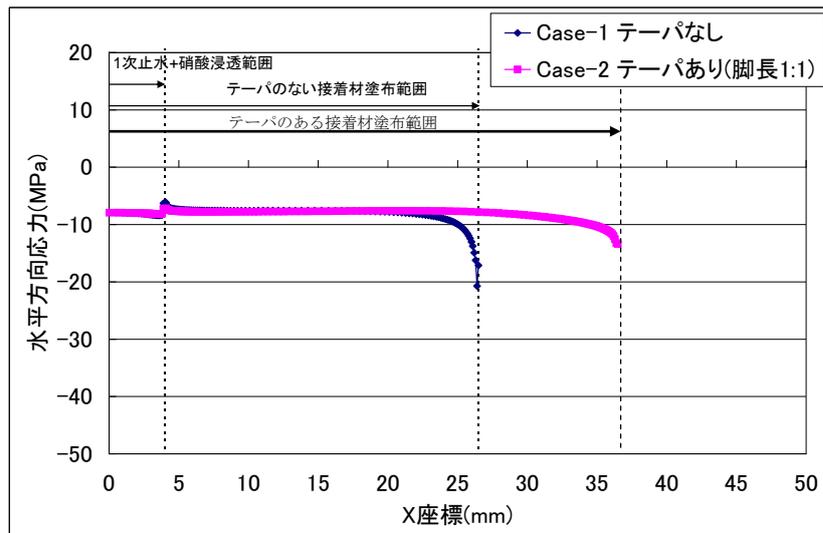
このように、テーパ部を設けると接着材端部に生じる熱応力を約 1/2 に低減できることから、本補修工法においても接着材端部にテーパ部を設けることとする。

補足表 5-1 接着材及び被補修材料の物性値

物性値	材料	RT	50°C
線膨張係数 ($\times 10^{-6}\text{mm}/\text{mm}/^{\circ}\text{C}$)	接着材	-	40.0
	SUS304	-	15.6
ヤング率 (MPa)	接着材	8710	7030
	SUS304	195000	193000



補足図 5-1 解析モデル概要と解析条件



補足図 5-2 接着材界面における接線方向応力 (水平方向応力)

以上

水、2MPa の内圧保持試験用平板試験体の
模擬欠陥径選定理由

1. 目的

内圧保持試験の試験体形状を単純形状である平板と設定した一方で、母材形状の解析結果より、ティーが最も発生応力が高い形状であることを確認している。

そこで、ティー形状において水の最高使用圧力 2MPa を負荷した際に、一次止水用接着材直径 $\phi 5\text{mm}$ (=非接着部と見なす) を模擬した金属箔 ($\phi 5\text{mm}$) の端部に発生する応力と同等の応力を平板試験体で発生させるため、平板試験体の金属箔径を広げることとした。

本検討では、FEM 解析による発生応力の比較検討を行い、平板試験体の金属箔径を決定した。

なお、内部流体が水の場合は、接着材/被補修体界面及び接着材内部へ浸透しないことを試験で確認しているため、模擬欠陥径は一次止水用接着材の寸法だけを考慮した寸法としている。

2. 解析条件

解析ケースを補足表 6-1 に示す。評価方法及びその他の解析条件は添付資料-1 の「4. 欠陥部先端近傍の応力分布解析」と同様とした。

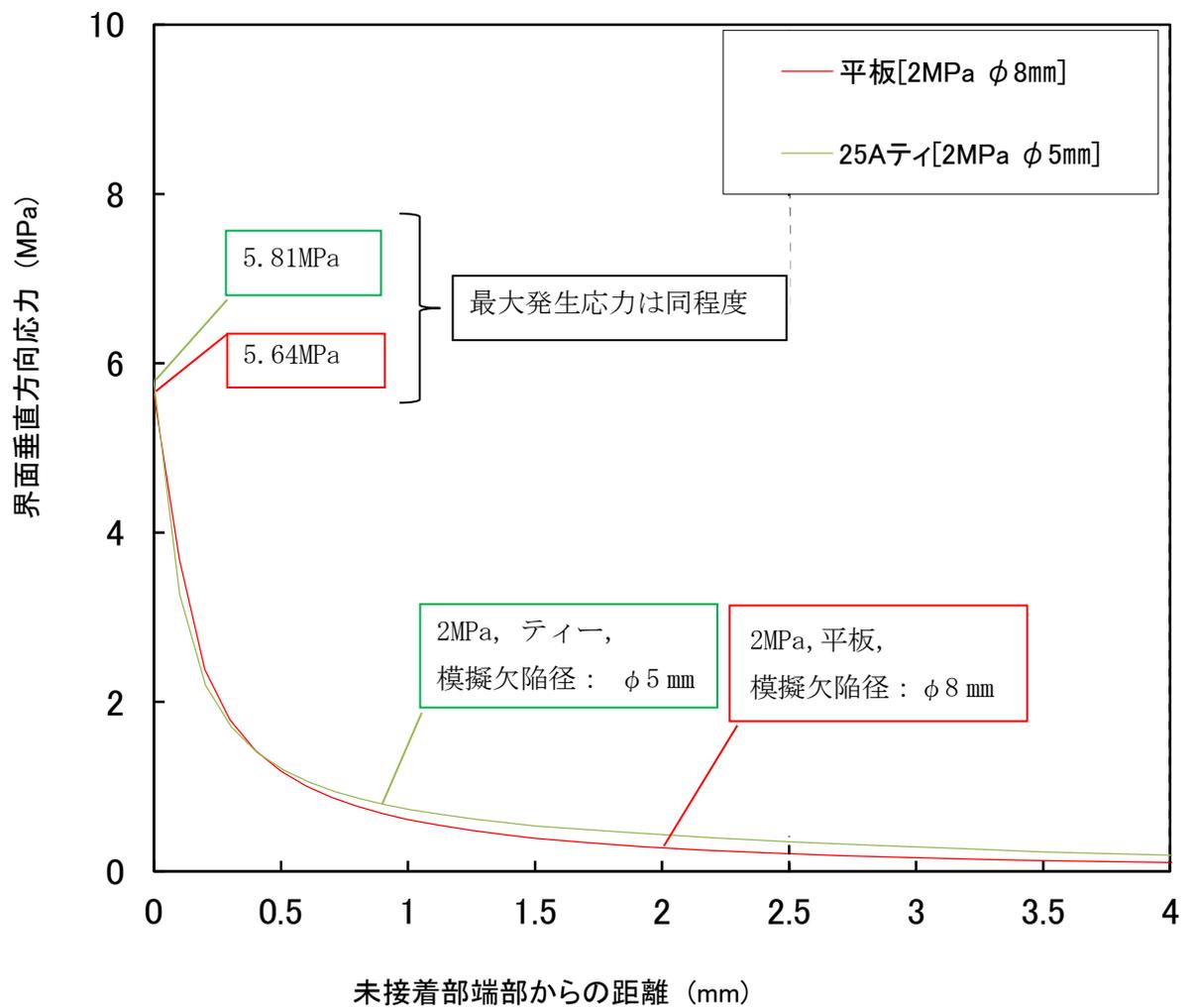
補足表 6-1 解析ケース

補修対象	接着材の塗布形状	荷重条件	模擬欠陥径
平板	部分塗布	内圧 2MPa (内圧による軸力なし)	$\phi 8\text{mm}$
ティー			$\phi 5\text{mm}$

3. 解析結果

発生応力の比較結果を補足図 6-1 に示す。欠陥端部の発生応力は平板、ティーともほぼ同様の値となっている。なお、解析条件におけるティーのモデルは保守的に配管と同様の板厚を用いているが、実機のティーでは更に板厚が厚くなることから、本解析条件の発生応力よりも低くなると推定される。

本結果より、水への適用を想定した内圧 2MPa の試験では、平板試験体の金属箔径を $\phi 8\text{mm}$ とすることで、ティー試験体における金属箔径 $\phi 5\text{mm}$ と同等の発生応力となることを確認した。



補足図 6-1 FEM 解析結果【25A ティー, 模擬欠陥径 : φ 5 mm】、【平板、模擬欠陥径 : φ 8 mm】

一次止水用接着材の寸法確認試験

1. 目的

寸法の異なる一次止水用接着材を施工し、漏洩確認試験により一次止水に要する接着材の最適寸法を確認した。

2. 試験内容

25A 直管（材質 SUS304）に $\phi 0.3\text{mm}$ の漏洩欠陥を開け、接着材（チタニウムパテ）により寸法の異なる一次止水を実施した後、温度 50°C で内部流体（水）を圧力 2MPa で 2 時間*1 漏洩しないで保持できるか否か確認した。

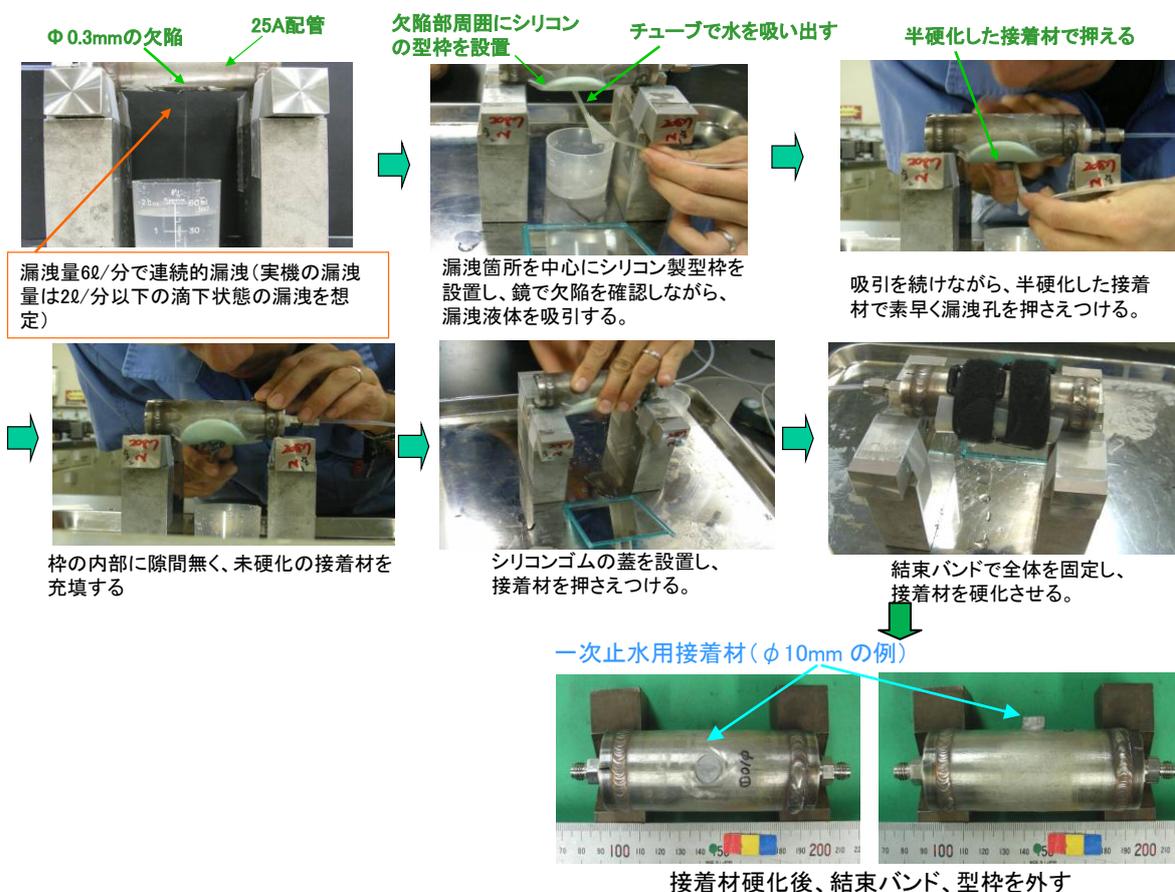
*1) 漏洩防止用接着材（テーパ除いて $53\text{mm} \times 53\text{mm} \times$ 厚さ 10mm ）の「施工+硬化」に要する時間

一次止水寸法は、 $\phi 5\text{mm}$ 、 $\phi 10\text{mm}$ 、 $\phi 15\text{mm}$ の 3 水準で、厚さは 5mm で一定とした。2 時間の漏洩防止が可能な中で、寸法が小さいものを適正寸法*2 とする。

*2) 濡れた母材表面に施工する一次止水部の接着強さはドライ面より小さいため、補修寸法（テーパ除いて $53\text{mm} \times 53\text{mm} \times$ 厚さ 10mm ）の中で接着強さが小さい部分が最少になる寸法を選定する。

2-1. 一次止水用接着材の施工

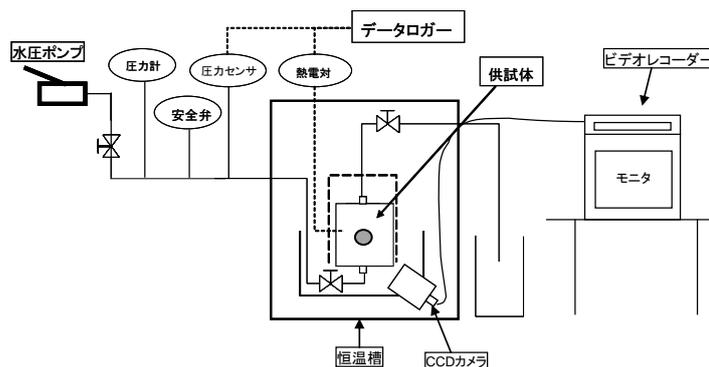
補足図 7-1 に一次止水施工手順を示す。作業姿勢の観点から、作業しにくい配管下面からの滴下漏洩を一時止水した。



補足図 7-1 一次止水用接着材の施工手順

2-2. 2時間保持試験

補足図 7-2 の装置を用いて、接着材で前記 3 水準の寸法の一次止水を実施した各試験体 3 体について、50℃、2MPa の内部流体（水）を 2 時間無漏洩で保持できるか確認の試験を実施した。



補足図 7-2 漏洩確認試験装置

3. 結果

試験結果のまとめを補足表 7-1 に示す。補足表中では、2MPa の内圧を負荷した直後に漏洩したか否かの確認を「一次止水試験結果」として表記し、内圧負荷直後に漏洩しなかった場合は、更に無漏洩を 2 時間保持可能か否かの確認を「漏洩試験結果」として表記している。いずれも漏洩しなかった場合は○と表記している。

試験した 3 水準のすべての一次止水寸法で、2 時間無漏洩維持できることを確認した。従って、2 時間無漏洩が可能な最も小さい寸法φ5mm を適正寸法とした。

補足表 7-1 一次止水施工後の漏洩確認試験結果

試験体 No.	一次止水寸法径 (mm) (厚さはいずれも 5 mm)	試験結果	
		一次止水試験結果	漏洩試験結果 (50℃、2MPa、2Hr)
15-1	15	○ (漏洩無く止水)	○ (耐圧中漏洩無し)
15-2	15	○ (漏洩無く止水)	○ (耐圧中漏洩無し)
15-3	15	○ (漏洩無く止水)	○ (耐圧中漏洩無し)
10-1	10	○ (漏洩無く止水)	○ (耐圧中漏洩無し)
10-2	10	○ (漏洩無く止水)	○ (耐圧中漏洩無し)
10-3	10	○ (漏洩無く止水)	○ (耐圧中漏洩無し)
5-1	5	○ (漏洩無く止水)	○ (耐圧中漏洩無し)
5-2	5	○ (漏洩無く止水)	○ (耐圧中漏洩無し)
5-3	5	○ (漏洩無く止水)	○ (耐圧中漏洩無し)

以上

無漏洩可能期間設定に関する試算

1. 概要

内圧保持試験においてケース3（12ヶ月間、全試験体で無漏洩を維持した場合）の結果を得た場合、無漏洩可能期間の目安は6ヶ月と判断する。

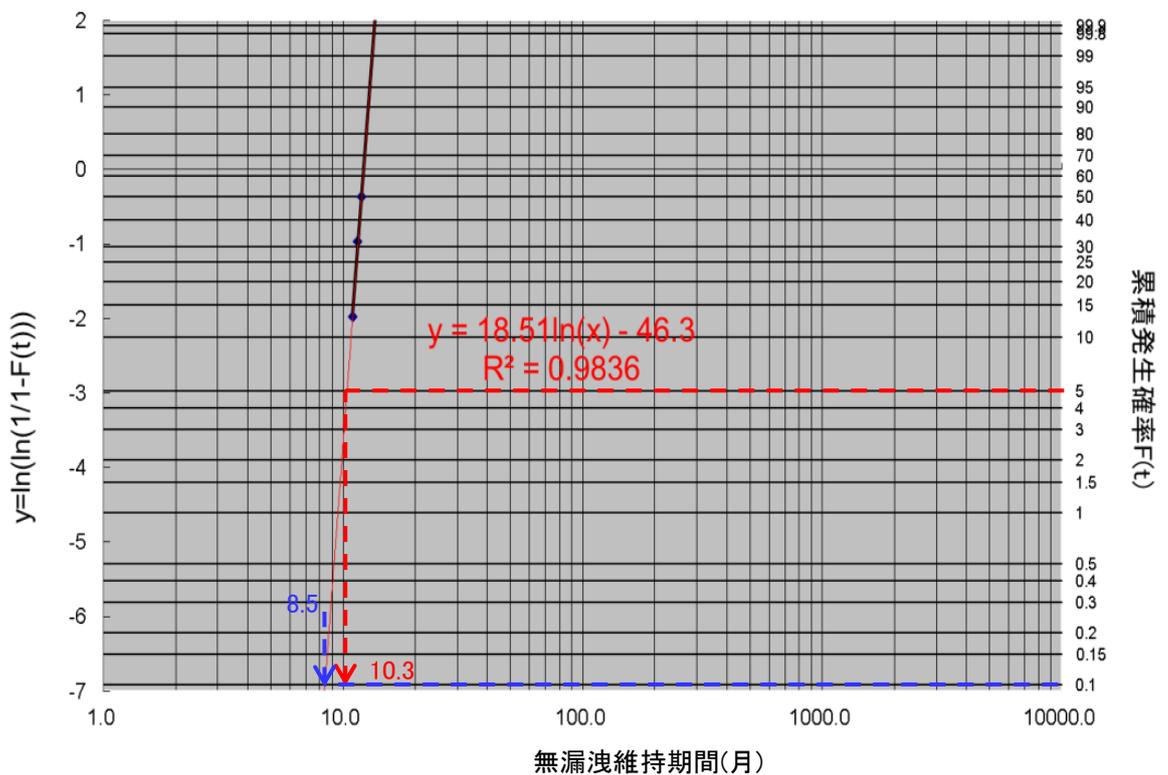
本検討では参考として、これまで検討してきた無漏洩可能期間の設定に関する試算結果をまとめたものである。

2. ワイブル解析を用いた試算

2.1 3体漏洩を仮定したワイブル解析結果

ワイブル解析には試験期間内(12ヶ月内)に漏洩した試験体が最低3体必要となるため、1体目が11ヶ月、2体目が11.5ヶ月、3体目が12ヶ月で漏洩したと仮定し、無漏洩期間を推定した。ワイブル解析結果を補足図8-1に示す。

補足図8-1に示す通り、漏洩発生確率5%における無漏洩期間は10.3ヶ月 \approx 10ヶ月となる。また、漏洩発生確率0.1%における無漏洩期間は8ヶ月余りとなる。

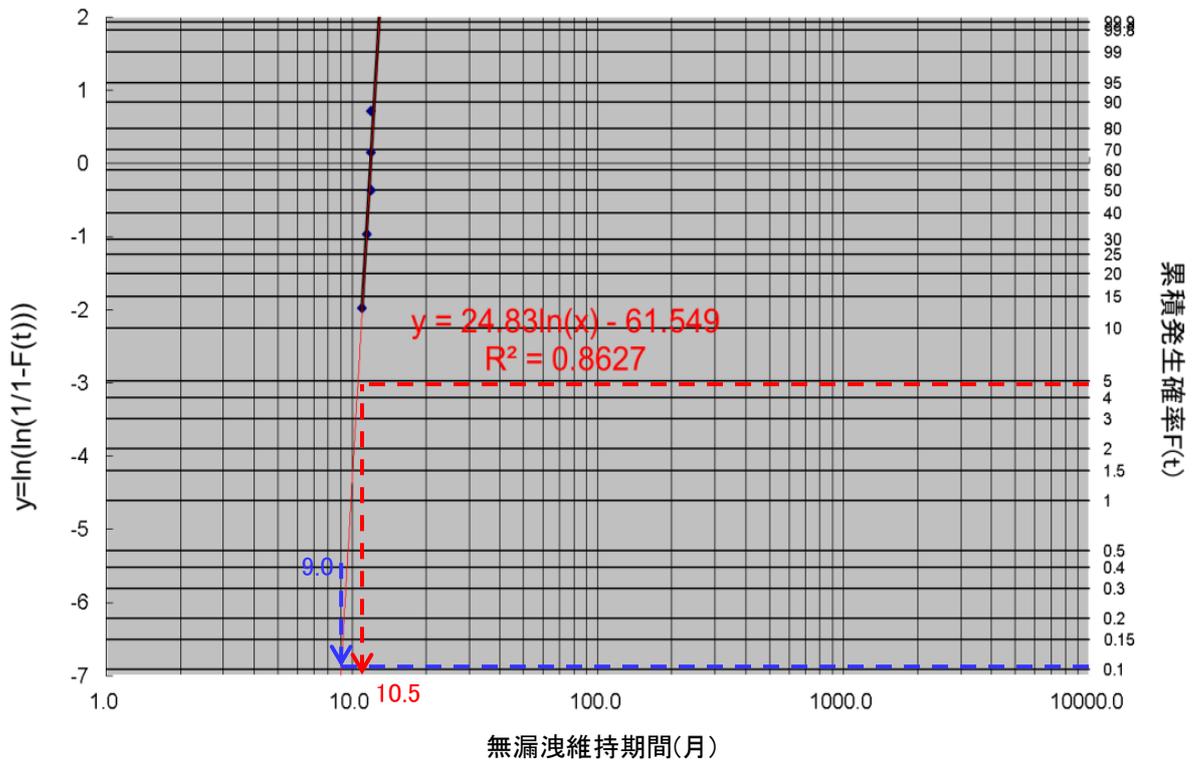


補足図 8-1 5体中3体漏洩した場合のワイブルプロット

2.2 5体漏洩を仮定したワイブル解析結果

試験体1体目が11.0ヶ月、2体目が11.5ヶ月、3体目が12.0ヶ月、4体目が12.0ヶ月、5体目が12.0ヶ月で漏洩したと仮定し、無漏洩期間を推定した。ワイブル解析結果を補足図8-2に示す。

直線の傾きは補足図8-1より大きくなり、「漏洩発生確率5%における無漏洩期間」は10.5ヶ月、「漏洩発生確率0.1%における無漏洩期間」は約9ヶ月となった。補足図8-1と比較すると若干であるが非保守的な評価結果であった。



補足図 8-2 5体中5体漏洩した場合のワイブルプロット

2.3 結論

全試験体にて12ヶ月間無漏洩を維持した場合、試験結果に基づいたワイブル解析を使用できないことから、数体の試験体の漏洩仮定条件におけるワイブル解析を実施した。仮定条件により、無漏洩期間は大きく変わることが予想されるが、漏洩発生時期のバラつきが0.5ヶ月毎であれば、漏洩発生確率5%の場合は10ヶ月程度が概ね妥当な無漏洩可能期間となることを確認した。

3. 「接着・粘着製品の分析、評価事例集」に基づく応力安全率の試算

「接着材・粘着製品の分析、評価事例集」に基づき、6ヵ月後の接着強度に対する応力面の裕度を算出するため、本検討を行った。検討内容を以降に示す。

3.1 安全率算出式

「接着・粘着製品の分析、評価事例集(江端涼平企画編集、技術情報協会、2012)」の内、「3.2 耐用年数経過後の安全率の基本的手法」に記載される安全率 S_y の算出式は以下の通り。

$$S_y = F_y / P_{\max}$$

F_y : 実効接着強度

P_{\max} : 最大発生応力

$$F_y = F_{\mu RO} \cdot \eta_{T0} \cdot D_y \cdot \eta_y$$

$F_{\mu RO}$: 初期の室温における静的な平均接着強度

η_{T0} : 温度係数

D_y : 耐用年数経過後の接着強度のばらつき係数

η_y : 耐用年数経過後の劣化係数

$$\eta_y = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \dots \times \eta_n$$

η_i : 個別の環境・応力因子における劣化係数

3.2 安全率の算出

(1)式を基に、これまで実施した試験結果に対する接着材工法の安全率を算出した。算出条件を補足表 8-1 に示す。また、算出結果を補足表 8-2 に示す。但し、本結果はクリープ変形の影響を考慮しない破壊を前提とした場合の評価となる。

<算出条件>

補足表 8-1 安全率算出条件

	条件	備考
P_{\max}	5.81MPa	FEM 解析結果 (2MPa, ティー, $\phi 8$ mmの最大発生応力)
$F_{\mu RO}$	21.78MPa	・ 6ヵ月経過後の平均引張接着強さ(実測値)使用 ・ 最高使用温度(50℃)における接着強度
η_{T0}	1	・ $F_{\mu RO}$ を最高使用温度にて測定しているため、省略
D_y	0.56	・ 95%信頼度におけるバラつき係数
η_y	1	・ $F_{\mu RO}$ を6ヵ月経過後に測定しているため、省略。

※ D_y は以下の計算にて算出。

補足表 8-2 安全率算出結果

接着強さ (MPa)	平均値 (MPa)	標準偏差	CV _y	95%信頼度 における D _y	99%信頼度 における D _y
26	21.78	5.89	0.27	0.56	0.37
17.1					
27					
12.5					
26.3					

CV : 標準偏差 σ / 平均値 F_{μ}

D_y (信頼度 95%) : $1 - 1.6456 \cdot CV_y$

(信頼度 99%) : $1 - 2.3264 \cdot CV_y$

<信頼度 95%場合の安全率算出結果>

$$F_y = F_{\mu R0} \cdot \eta_{T0} \cdot D_y \cdot \eta_y = 21.78 \cdot 1 \cdot 0.56 \cdot 1 \doteq 12.20 \text{MPa}$$

$$S_y = F_y / P_{\max} = 12.20 / 5.81 \doteq 2.10$$

3.3 結論

傍証として試験結果及び解析結果を用いて、設計期間6ヶ月後の応力面での信頼度95%の安全率を試算すると2.1であり、接着強度面でも余裕があることを確認できた。

4. ASME疲労試験の安全率を用いた安全率の試算

以下のように12ヵ月の無漏洩維持期間に対し安全率を付加し、適用期間を試算する。その際、安全率は「ASME Boiler and Pressure Vessel Code」にて規定される疲労試験の寿命割合係数による安全率を用いることとする。

寿命割合係数は、複数の因子の掛け合わせにより求められる。(下式参照)

本試験は、試験条件が同様である5体の試験体を用いていることから、この中の統計的評価係数(K_{ss})に着目し、他の係数を1とすることにより寿命割合係数(K_n)を求める。

$$K_{ss}=1.470-0.044 \times \text{number of replicate tests (N)}$$

$$K_s=K_{s1} \times K_{sf} \times K_{sc} \times K_{st} \times K_{ss}$$

$$K_n=K_s^{4.3}$$

(ASME Boiler and Pressure Vessel Code より抜粋)

上記式より試験体数 $N=5$, $K_{s1}=K_{sf}=K_{sc}=K_{st}=1$ の条件で K_n を求めると

$$K_{ss}=1.470-0.044 \times 5=1.25$$

$$K_s=K_{ss}=1.25$$

$$K_n=K_s^{4.3}=2.61 \approx 2.6$$

K_n =寿命割合係数
 K_s =試験応力の割合係数
 K_{s1} =寸法効果係数
 K_{sf} =表面粗さ効果係数
 K_{sc} =種々の温度における設計疲労線
図の差に関する補正係数
 K_{st} =試験温度補正係数
 K_{ss} =統計的評価係数

従って、ASME 疲労試験の安全率を適用した場合の適用期間は以下となる。

$$\text{適用期間}=\text{無漏洩可能期間}/\text{安全率}^{*1}=\text{無漏洩可能期間}(12 \text{ ヲ月})/2.6$$

$$\approx \underline{4.6 \text{ ヲ月}}$$

補足資料—9

鋳物の研磨処理について

1. 目的

補修対象ごとの接着強さを安定化させるためには、補修対象の表面状態（粗さ）を一定にする必要がある。

そこで鋳物のように表面に大きな凹凸がある補修対象については、引抜き加工品や鍛造品の表面と同程度まで研磨することで、同等の接着強さとなることを確認する。

2. 実施内容

1) 試験対象

試験片は鋳肌及び炭素鋼機械加工面の2ケースとし、JIS K 6849 に準じた引張接着強さ測定用試験片を作製する。なお、試験体数は各3体とする。

2) 研磨

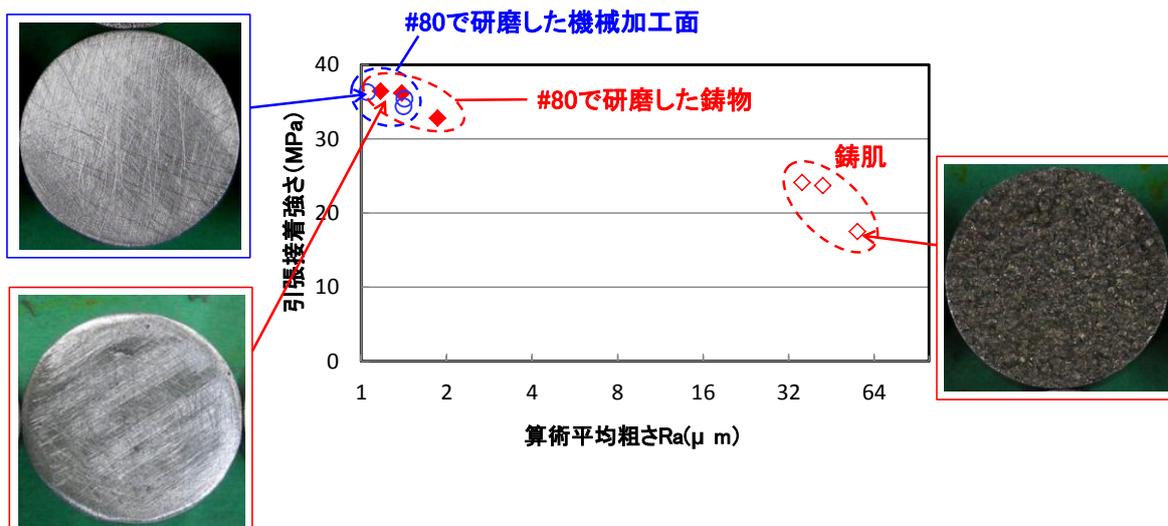
鋳肌表面および機械加工面を#80 研磨紙にて研磨。表面粗さが同等となったことを表面粗度測定で確認する。

3) 引張接着強さ測定

#80 で研磨した鋳物表面と機械加工面、及び鋳物表面（研磨なし）の各試験片について、JIS K 6849 に準じて引張接着強さを測定する。試験片環境温度は50℃とする。

3. 試験結果

研磨後の表面粗さ Ra と引張接着強さの測定結果を補足図 9-1 に示す。研磨無しの鋳物表面は粗さが大きく接着強さが小さいが、#80 で研磨した鋳物の表面粗さは#80 で研磨した機械加工面と同等であり、接着強さについても機械加工面と同等であることを確認した。



補足図 9-1 鋳物表面の研磨状態と接着強さの関係

以上

補修用接着材チタニウムパテの
メーカー公表仕様

接着材メーカー（デブコン社）が公表しているチタニウムパテの仕様を以下に示す。

補足表 10-1 チタニウムパテの仕様（メーカー公表値）

項目		主剤	硬化剤	備考 ASTM No.
混合比	質量比*	13	3	
色調		灰色		
粘度	Cps. 25°C	パテ状（混合後）		
可使時間	分/25°C/500g	20		
硬化時間	時間/25°C	4		
比重		2.4		D729
硬さ	ショアーD	87		D2240
圧縮強さ	MPa	118～137		D695
引張強さ	MPa	25～29		D638
曲げ強さ	MPa	49～59		D790
熱線膨張係数	cm/cm/°C	40×10 ⁻⁶		D696
引張せん断接着強さ	MPa	14～16		D1002 Fe-Fe

以上