

鋼構造物の維持管理における 評価・回復・予測の要素技術

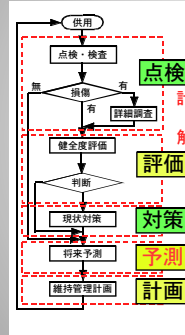
藤井 堅

広島大学 大学院 工学研究院
社会環境空間部門

1

維持管理における講演内容の位置づけ

維持管理の流れ



・維持管理の最近の動向

点検・計測技術:

評価技術:

・腐食した構造物の残存強度評価
有限要素法の活用, 簡易強度評価法

予測技術:

・腐食による耐力低下の予測
腐食表面の再現,
防食工を考慮した鋼管杭の強度低下予測

対策法(性能回復技術)

・鋼板接着による腐食部の強度回復
腐食表面の作成,
接着剤による鋼板当て板補修法の実験
・維持管理における問題点

2

維持管理に関する最近の動向

土木学会

鋼構造委員会

- ・鋼橋の寿命評価小委員会(1993-1996年)(三木千寿)
- ・鋼構造新技術小委員会(1993-1996年)(伊藤学)
- ・鋼構造物の維持管理研究小委員会(1998-2002年)(三木千寿)
- ・鋼構造物の点検・モニタリングに関する新技術調査小委員会(2004-2006年)(館石和雄)
- ・鋼構造の残存耐力性能評価と耐久性向上方策研究小委員会(2004-2006年)(野上邦栄)
- ・腐食した鋼構造物の長寿命化のための性能回復技術検討小委員会, 2010-2013 (藤井堅)
- ・構造物の長寿命化技術に関する検討小委員会, 2013-(高木千太郎)
- ・構造物のリダンダンシーに関する検討小委員会, 2013-(奥井義昭)

構造工学委員会

- ・構造物診断研究小委員会(1997-1999年)(大津政康)
- ・土木構造物のライフサイクルマネジメント研究小委員会(2010-)(鈴木基行)

国土交通省(中国地整)

- ・中国地方橋梁保全委員会 橋梁補修・補強の手引き検討WG

広島県内の市町村(社団法人広島県土木協会)

- ・A/M 長寿命化修繕計画

3

維持管理における残存耐力評価の在り方

維持管理とは

構造物の保有性能 $\geq$ 要求性能(安全性・使用性)
を供用期間にわたって保持する行為

・構造物に要求される性能: 構造全体が対象

・初期設計: 部材設計

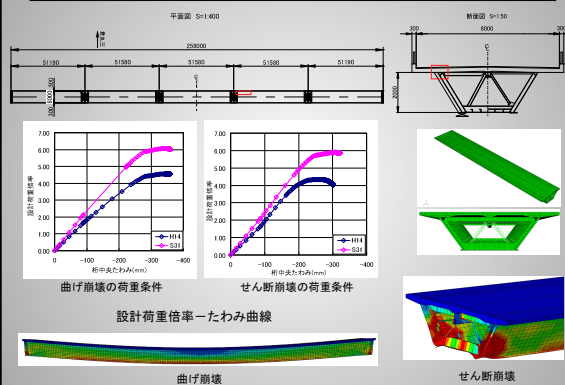
部材強度と全体強度は異なる!



構造物の強度評価: 安全性評価には最も重要かつ必要
しかし現状は

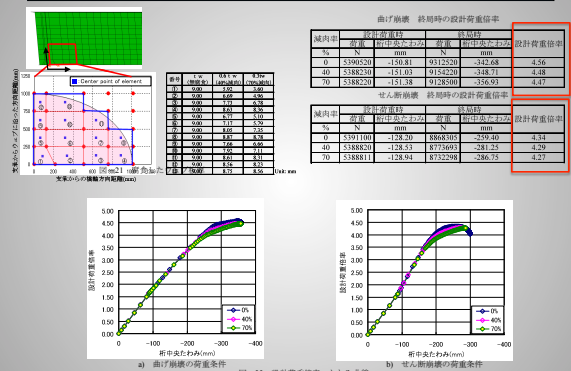
部材強度の評価も難しい

橋梁全体強度の解析例



5

支承部の腐食が残存強度に及ぼす影響



6

残存耐力評価の流れ

1. 腐食状況調査 板厚計測/表面凹凸計測
 - ・現状では、現場での精密な計測は困難
 - ・必要な計測項目
2. 残存耐力解析
 - ・計測結果の使用方法 (平均板厚or最小板厚?)
 - ・荷重状態 (作用応力) と統計指標 (支配因子)
 - 引張: 最小断面積 (断面平均板厚の最小値)
 - 圧縮: 断面剛性 (平均板厚, 偏心)
 - 疲労: 応力集中 (腐食表面凹凸形状数)
 - ◆有限要素法解析 (最も有力な方法)
 - ・非線形解析に関する高度な知識・技術が必要
 - 使用要素, 要素分割数・・・
 - 入力データの作成 (計測データからどのように作るか?)
 - ◆簡易強度評価式
 - ・無腐食の耐力評価式を適用する → 評価指標
 - ・評価指標の与え方 (代表板厚等)

7

有限要素法による残存耐力評価

残存強度解析における有限要素法への期待

- ・高度な複合非線形解析が可能
- ・複雑な形状に対応できる
- ・構造物の全体解析が可能 (部分構造解析も可能)
- ・部材の解析も可能 (この場合, 多くは安全側の評価となる)

利用上の注意事項

- ・作用外力に適する要素の選定 (shell要素, solid要素・・・)
- ・崩壊形式を表現できる有限要素の選定
- ・適する要素分割
 - 崩壊形式を再現できる要素数, 要素の大きさ
 - 圧縮の場合: shell要素 (要素幅1cm以下), 平均板厚
- ・適する境界条件の設定
 - 特に非線形解析で, 極めて重要

腐食した円形鋼管の残存圧縮耐力

19年間海洋環境に暴露した円形スパイラル鋼管
 暴露場所: 新日本製鐵光製鉄所構内
 材質: STK50とSTK41
 寸法: $d: 406.4\text{mm} \times t: 9\text{mm} \times$ 全長約10m

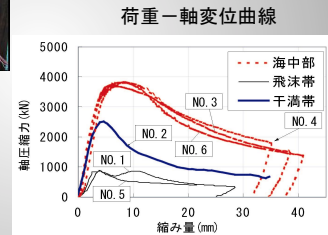
計測結果

鋼種	試験体	平均板厚の経年変化				断面平均板厚の経年変化				断面最大板厚の経年変化			
		平均板厚 (mm)	平均板厚 (mm)	平均板厚 (mm)	平均板厚 (mm)	断面平均板厚 (mm)	断面平均板厚 (mm)	断面平均板厚 (mm)	断面平均板厚 (mm)	断面最大板厚 (mm)	断面最大板厚 (mm)	断面最大板厚 (mm)	断面最大板厚 (mm)
STK50	飛沫帯	NO.1	5.48	3.60	2.41	2.50	6871	4259	135	5.28	5.75	1.84	4.72
	干渉帯	NO.2	7.35	1.70	1.39	3.99	910	7180	36	6.76	2.21	1.03	3.45
	海中部	NO.3	7.75	1.29	1.02	3.21	9538	9026	1159	7.63	1.37	0.50	7.35
	海中部	NO.4	7.99	1.06	0.84	2.88	9782	9569	48	7.76	1.24	0.53	7.25
STK41	飛沫帯	NO.5	5.11	3.91	0.69	3.59	6207	4017	455	4.78	4.25	1.68	3.12
	海中部	NO.6	7.89	1.15	0.83	3.25	9578	9097	797	7.73	1.25	0.43	7.40

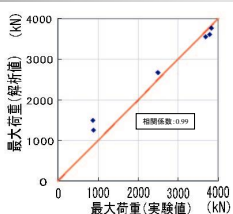
腐食した円形鋼管の残存圧縮耐力実験



圧縮荷重試験状況



FEM解析結果との比較例(2)



解析値と実験値の比較

実験結果・解析結果比較

試験体	最大荷重 (kN)		公称寸法で無次元化		最大荷重時の変位 (mm)	
	実験値	解析結果	実験値	解析結果	実験値	解析結果
NO.1 (飛沫帯)	868	1493	0.20	0.34	3.18	2.45
NO.2 (干渉帯)	2489	2670	0.56	0.60	4.62	2.66
NO.3 (海中部)	3680	3551	0.83	0.80	6.44	3.90
NO.4 (海中部)	3929	3756	0.86	0.85	8.53	4.73
NO.5 (飛沫帯)	682	1251	0.23	0.29	3.04	2.46
NO.6 (海中部)	3780	3802	0.98	0.84	8.29	3.20
腐食前モデル (STK50)	—	4363	—	0.96	—	4.20
腐食前モデル (STK41)	—	4218	—	0.98	—	4.20

FEM解析のまとめ

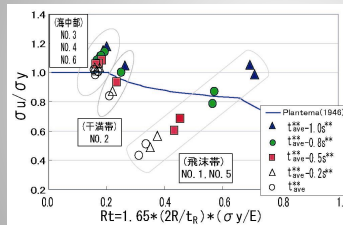
圧縮が作用する板で構成された部材

- ・アイソパラメトリックシェル要素が便利
- ・要素幅: 10mm 程度
- ・初期不整の影響を容易に考慮できる
- 中央面の座標に計測結果を使用

ただし,

- ・かなり密な凹凸表面のデータが必要
- ・実際の計測結果を使用するには工夫が必要

簡易強度評価式による鋼管杭の 圧縮耐力評価



1. 評価板厚 t_{eff}
例: 平均板厚 t_{av} と標準偏差 S を用いて
 $t_{eff} = t_{av} - \kappa S$
 κ : 係数
2. 腐食していない部材の強度評価式
例: Plantema の強度評価式に t_{eff} を代入

評価板厚が適切であれば精度よく容易に評価可能

13

残存耐力性能の経時予測

1. 残存耐力性能を直接予測する方法
2. 平均板厚などの残存耐力性能を支配する指標を予測し、簡易耐力性能評価法や有限要素解析などにより耐力性能の将来予測する方法
3. 腐食形態の変化を予測し、それを考慮した有限要素解析や、腐食形態の予測結果から得られる評価指標を用いて耐力性能評価式により耐力性能の将来予測する方法

- ・防食機能の低下を考慮する必要がある
- ・腐食形態や速度は環境条件によって異なる
- ・一定の説明力が必要である

鋼表面の腐食進展モデル

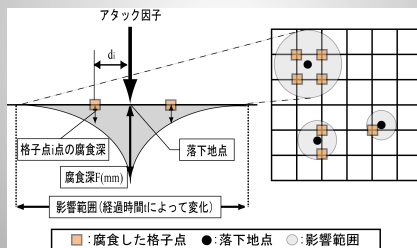
$$V_i = F \exp(-\beta d_i)$$

V_i : 格子点 i での腐食深

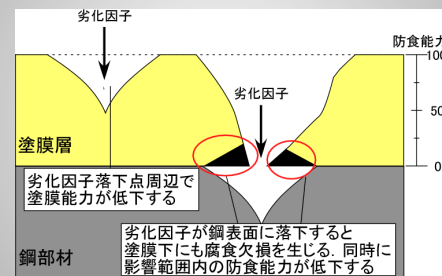
F : アタック因子落下点での腐食深さ

d_i : 格子点 i とアタック因子の落下点との距離

β : 距離減衰定数

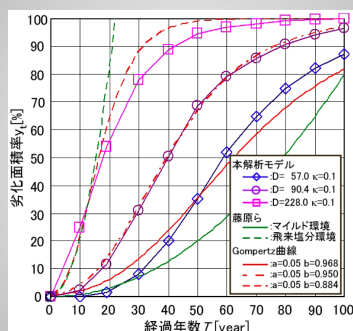


防食工の劣化・損傷を考慮した 腐食進展

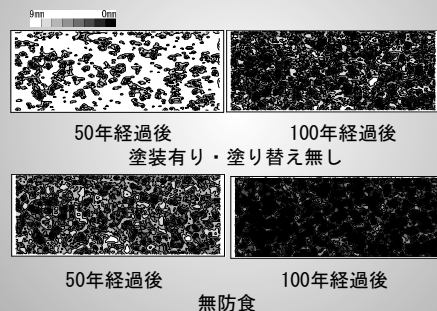


塗膜劣化イメージ

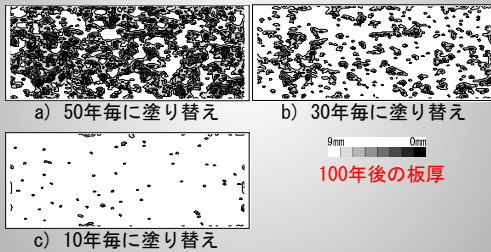
塗膜劣化面積率の経年変化



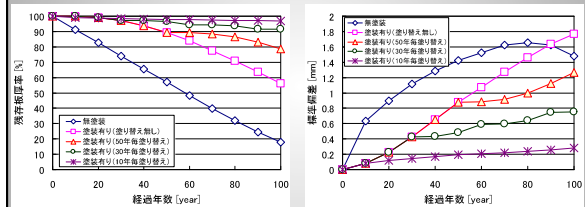
残存板厚の経年変化



塗装塗り替え期間と防食効果



評価指標の経年変化

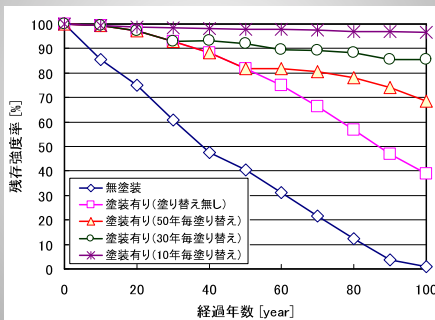


平均板厚の経年変化

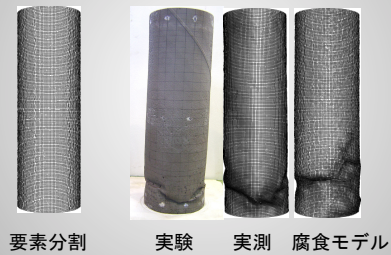
板厚標準偏差の経年変化

簡易強度評価法による将来予測

塗装の防食効果を考慮した強度低下予測



有限要素法による圧縮強度評価



耐荷性能評価のまとめと課題

- 一定の説明力を持って予測が可能
- 簡易評価式は、ある領域が**一様な腐食**の場合に有効
- FEMは**局所腐食**があっても予測解析が可能

手法のアプローチは多種多様。
今後より精度のよい予測法が期待される

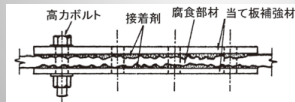
腐食した板厚の補強法

- HTボルトー当て板補強
荷重伝達機構が不明確(摩擦伝達の場合)
削孔が必要:(施工が煩雑)
支圧伝達の場合:施工が複雑
- HTボルト接着剤併用当て板補強
接着効果は2次的?
- 炭素繊維シート補強
塑性にともなう延性が期待できない
止端の剥離による破壊:結構脆性的

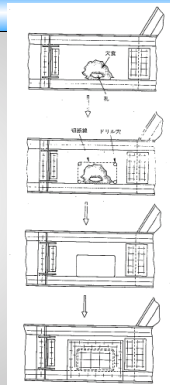


HTボルト-当て板補強例

- ・錆落とし
- ・孔あけ
- ・欠食部ガス切断
- ・HTボルトによる添接板取付
- ・塗装



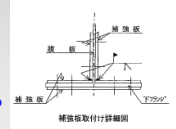
接着剤併用



当て板補修の疑問(私的考え)

・補修の目的は？

- ◇剛性？ 耐荷力？
- ◇設計荷重or部材の全強を保証
同厚の板に置き換えるなら全強を確保できる
- ◇補修すべき荷重あるいは応力状態
前ページのウェブ欠食(孔あき状態)の添接補修では・・・
・ウェブはせん断を受け持つ → せん断応力の伝達を保証
・欠食部のガス切断は必要か？(孔があいていないときには？)
- ・補修効果の確認は？
◇補修前後の変位やひずみ計測から補修効果を確認 → 剛性は可能！
耐荷力、変形能などの要求性能に対する補修設計が必要では？



当て鋼板接着補修の特徴とねらい

【接着剤の使用】

- ・腐食凹凸表面の応力をなじませる。(応力集中の緩和)
- ・凹凸表面からも力の伝達を期待
- ・欠食部にも荷重負担を期待(不足強度を当て板で負担) → 薄鋼板で満足される
- ・削孔を省略できる(施工が楽)(ボルトは位置決め程度の数)

【鋼板の採用】

- ・塑性、延性が期待できる
- ・薄板の使用により、施工が容易(CFRPよりは劣る)

【その他の特徴】

- ・ボルトで当て板を接合する方法に比べ、施工が容易
- ・溶接接合のような火を使わない
- ・CFRP補修と異なって、接着剤劣化が無い

接着剤を用いた当て鋼板接着の問題点

接着材料特性

材料特性試験法と設計法

施工

- ・接着面の素地調整
母材表面の錆除去の信頼性
現場での除錆は難しい → 今後の課題

強度、強度発現

- ・硬化時間、強度発現と供用
- ・温度、湿度(環境)の影響
- ・剥離
・剥離の問題(止端からの剥離、応力集中)
・繰り返し荷重による剥離の進展(疲労による剥離の進展)

耐久性

接着剤の劣化

- ・温度、湿度(環境)の影響
夏: 相当高温になる(60℃以上?)
冬: 低温(脆性的?)
紫外線、水、塩分……

性能回復設計の問題点

問題点

- 1) 補修効果をどのように確認・評価するか？
- 2) 補修設計はどう考えるか？
・部材の全強あるいは設計荷重？
(全強を確保するためには腐食部全面を鋼板接着の必要)

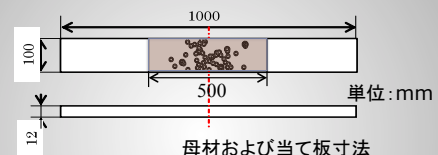
性能回復効果の定量的把握が不可欠

研究の特徴

- ・模擬腐食表面を人工的に作成
- ・同じ表面を持つ供試体を多数作成
→ 性能回復効果を定量的に把握
→ 性能回復設計の確立

29

供試体の作成



【母材】

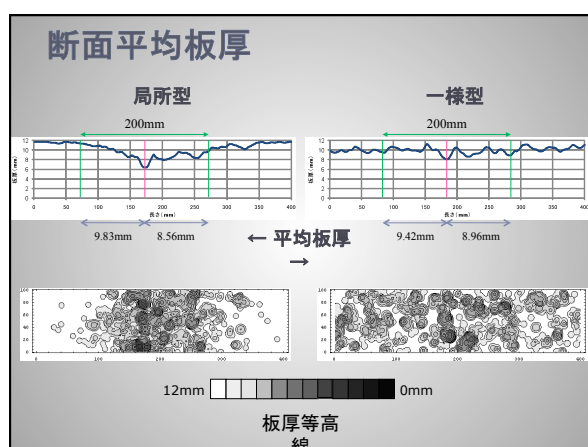
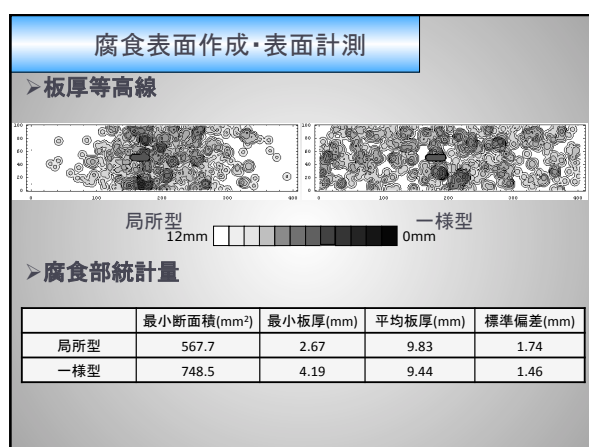
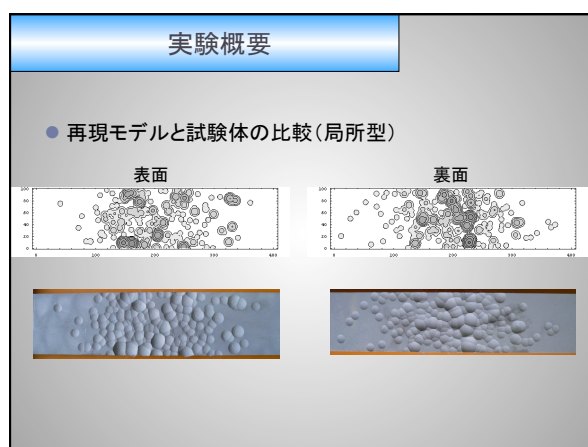
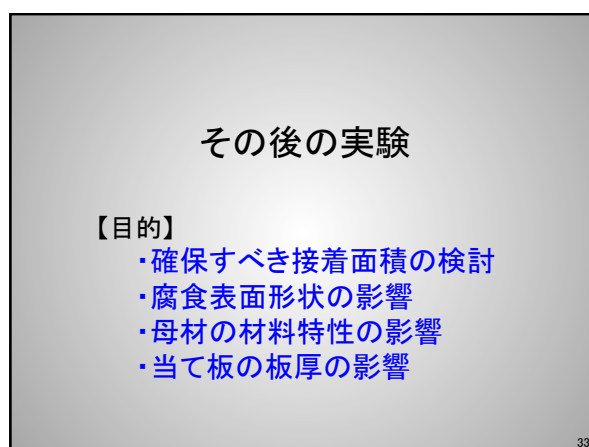
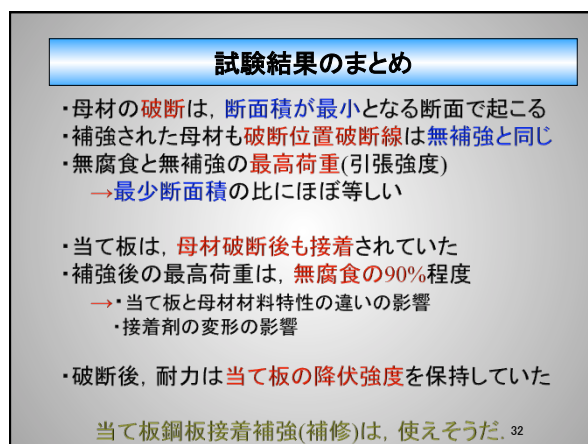
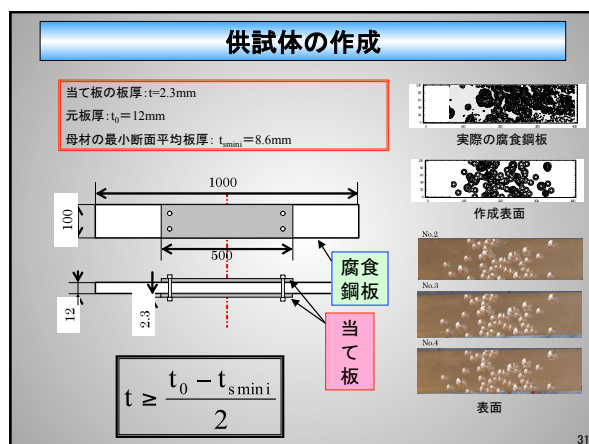
磨き平板: SGD: JIS G3123 SS400

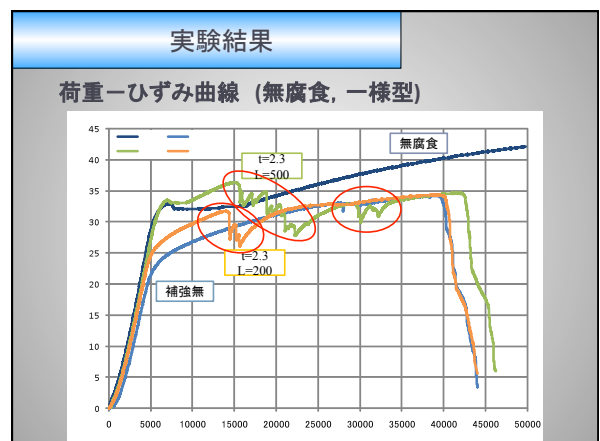
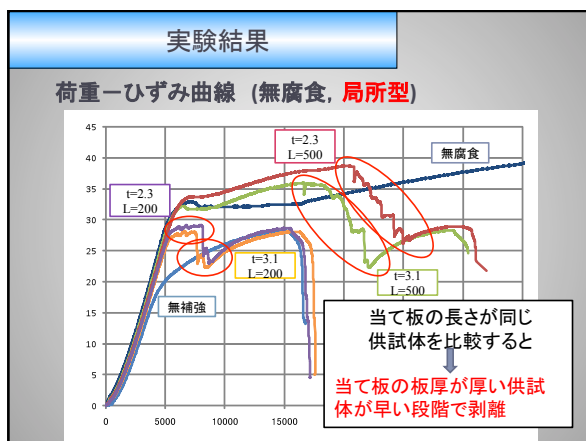
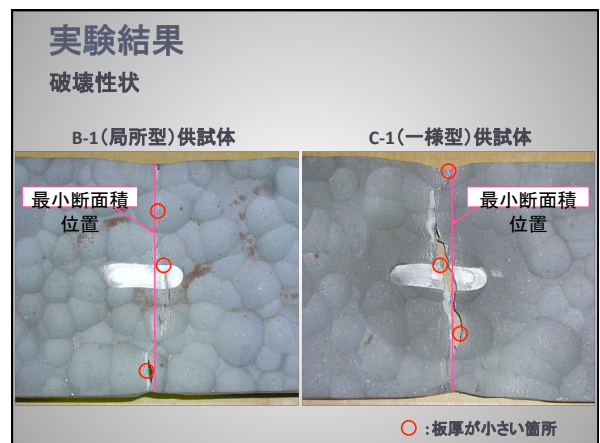
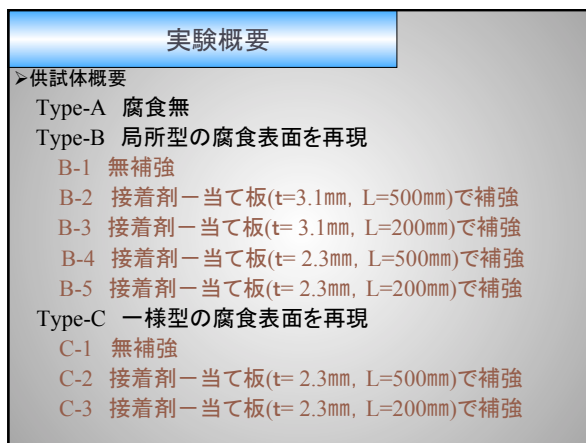
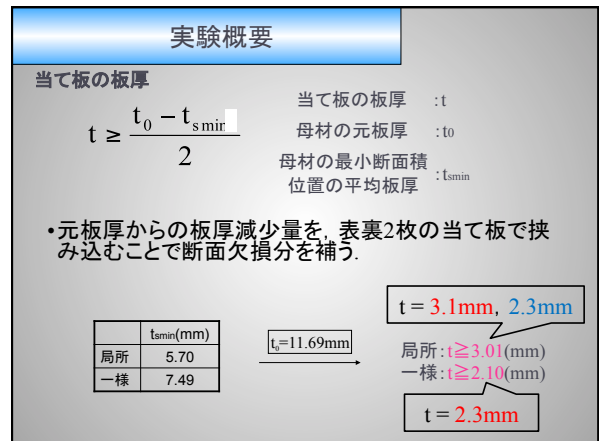
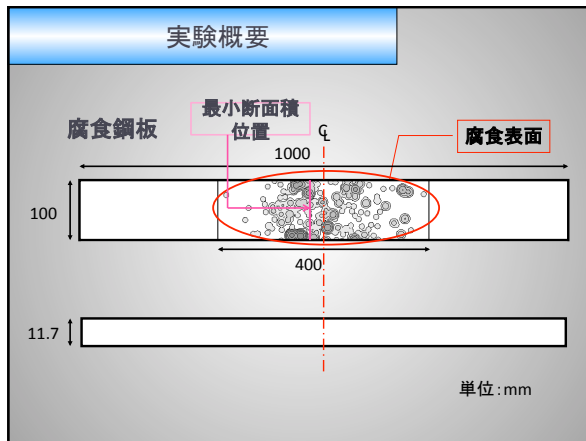
降伏応力: 615 Mpa
引張強度: 640 Mpa
破断伸び: 18%

【当て板】

降伏応力: 260 Mpa
引張強度: 403 Mpa
破断伸び: 37%

30

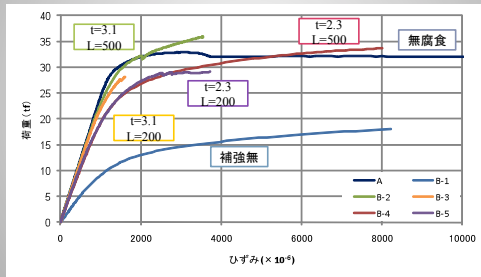




実験結果

荷重－母材のひずみ曲線(最小断面積位置)

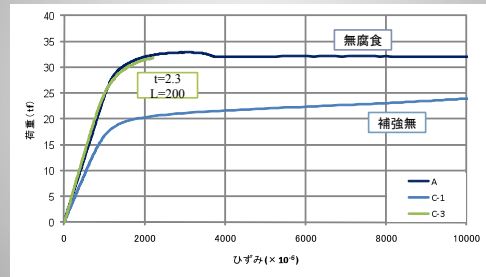
局所型



実験結果

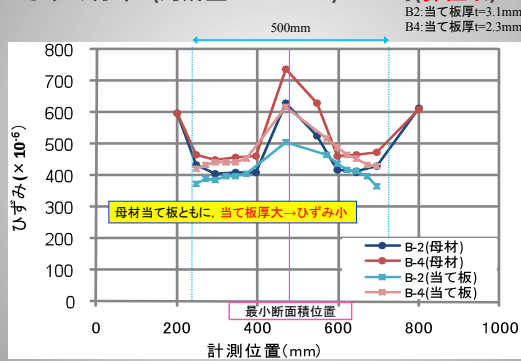
荷重－母材のひずみ曲線(最小断面積位置)

一様型



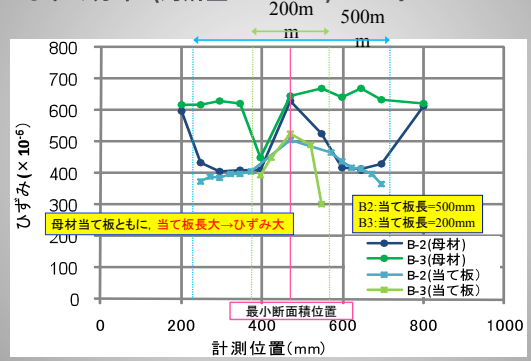
実験結果

ひずみ分布 (局所型: L=500mm) 15tf時(弾性域)



実験結果

ひずみ分布 (局所型: t=3.1mm) 15tf時



今回の実験のまとめ

～弾性域～

- 腐食部を十分に覆える当て板で補強した供試体
 - ➡ 当て板の板厚に応じた強度を発揮
- 最小断面積位置と当て板の端部を除いて
 - ➡ 母材と当て板はほぼ一体となって挙動

～塑性域～

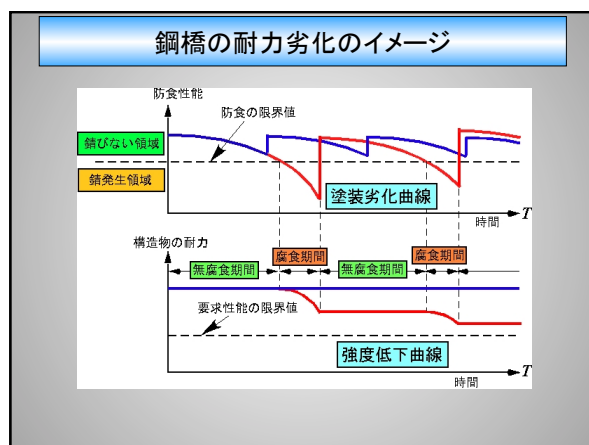
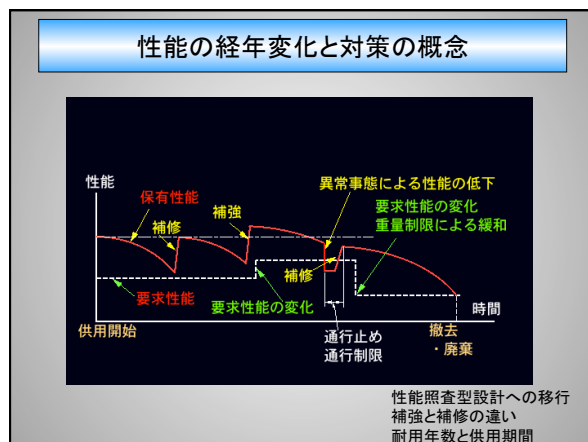
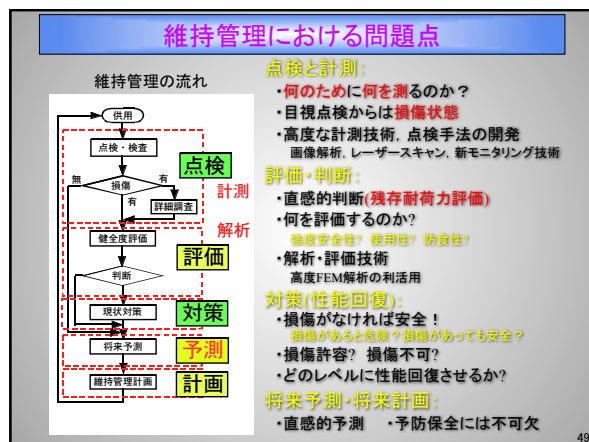
- 応力集中と塑性変形により剥離
- 厚い当て板の場合、薄い場合より早期に剥離する。
 - ➡ 当て板縁端の応力集中が原因!!
- 剥離進展にともない耐力が低下し、最小断面位置まで剥離進展すると、無補強供試体と同じ耐力

47

今後の課題

- ・疲労
- ・衝撃
- ・硬化中に荷重が作用する場合の挙動
- ・耐久性
- ・母材との接着表面の素地調整の影響

48



腐食を許す維持管理と許さない維持管理

現在の維持管理の姿勢: 腐食を許さない維持管理

腐食を許さない維持管理の問題点

性能照査設計法の問題

耐用年数、LCCの意味は?

永久構造物をめざすのか?

鋼構造物の実態

- 多数の腐食橋梁が現存
- 既存腐食橋梁の対策は、「場当たり保全」しかできないことになる。

なぜなら腐食損傷は考えていない

将来計画「予防保全」は腐食を許さざるを得ない

- ### そのためには
- 現時点の**性能評価**の精緻化
 - 将来の性能変化の**高精度な予測**
 - **補修・補強効果**の確認精度, 将来予測の精緻化
- が不可欠
- そのための**点検・計測データの蓄積**
 - 将来に向けた**データベースの構築**
- が不可欠

