

膜構造建築物の鋼製部材の劣化判定マニュアル

第一次案

平成 24 (2012) 年 6 月

一般社団法人日本膜構造協会

メンテナンス研究会

メンテナンス研究会

鋼製部材ワーキンググループ 組織

| | | |
|----|-------|--------------------------------------|
| 主査 | 河端 昌也 | (横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院 准教授) [1, 2] |
| 委員 | 大竹 克浩 | (大成建設株式会社 設計本部) [3] |
| 委員 | 斉藤 嘉仁 | (太陽工業株式会社 研究開発本部) [2] |
| 委員 | 佐藤 等 | (株式会社小川テック 技術本部) [4] |
| 委員 | 榆木 堯 | (一般財団法人ベターリビング つくば建築試験研究センター) [1, 4] |
| 委員 | 山本 秀一 | (株式会社竹中工務店 先進構造エンジニアリング本部) [3] |

* []内数字は、章別の解説執筆担当を示す。

膜構造建築物の鋼製部材の劣化判定マニュアル

第 1 次案

目 次

| | | |
|-----------|-----------------------------|----|
| 第 1 章 | 総則..... | 4 |
| 1.1 | 目的..... | 4 |
| 1.2 | 適用範囲および適用対象..... | 4 |
| 1.3 | 用語..... | 8 |
| 第 2 章 | 劣化診断..... | 9 |
| 2.1 | 劣化診断..... | 9 |
| 2.2 | 劣化診断の区分..... | 9 |
| 2.3 | 劣化診断対象と診断方法..... | 10 |
| 第 3 章 | 補修の要否判定..... | 13 |
| 3.1 | 判定基準..... | 13 |
| 3.2 | 塗膜の表面劣化現象..... | 13 |
| 3.3 | 塗膜層の劣化現象..... | 13 |
| 3.4 | さびの発生状況..... | 14 |
| 3.5 | ケーブルの劣化現象..... | 15 |
| 3.6 | 構造技術者による FCM の判定があった場合..... | 15 |
| 3.7 | 腐食以外の原因による部材断面の変化..... | 17 |
| 3.8 | 残存耐力の検討..... | 17 |
| 第 4 章 | 補修計画・方法..... | 21 |
| 4.1 | 補修計画..... | 21 |
| 4.2 | 補修方法..... | 22 |
| 参考文献..... | | 23 |

第1章 総則

1.1 目的

本マニュアルは、膜構造建築物を構成している鋼製部材に対して、すでに（一社）日本膜構造協会（以下に、「膜協」という）で設定されている、鋼製部材の定期点検および補修・改修に関するマニュアルの内容を追補・補完し、鋼製部材の劣化(さびによる原板厚の減少や欠損など)の診断と、診断結果に基づく判定手段と方法を定め、膜構造建築物のよりの確な維持保全に資することを目的とする。

既に膜協で設定されている、鋼製部材の定期点検ならびに補修・改修に関連するマニュアルには以下のものがある。

「膜構造建築物定期点検マニュアル・同解説」¹⁾

「膜構造建築物の補修・改修マニュアル・同解説」²⁾

「空気膜構造建築物維持保全マニュアル・同解説」³⁾

(以下にこれらを、それぞれ「点検マニュアル」、「補修マニュアル」および「空気膜マニュアル」という。)

これらのマニュアルは、平成2・3（1990・1991）年に設定されているが、その後、平成24（2004）年に大幅な見直し・補完が実施され、定期点検ならびに補修・改修業務のマニュアルとして活用されて現在にいたっている。

膜構造建築物の歴史は、一般に他の構造種別による建築物に比して新しいという認識があるが、維持保全の立場からみると、他の構造による建築物要求されていると同等の性能への対応が求められる時期に達している。

既往のマニュアルでは、鋼製部材に在っては、部材が劣化によって鋼材そのものを補強したり、あるいは、交換するというレベルまでは考慮されていなかった。

<因みに、既往のマニュアルでは、主として鋼製部材の表面修理・保護処理の劣化を回復するレベルまでが考慮されている>

そこで、本マニュアルでは、近年の社会的要求である環境・省資源などのへの対応をも勘案して、既往のマニュアルでは考慮されていない、鋼製部材が劣化し、元板厚が減少したり、部分的な欠損が生じた場合に、これらを補修・改修・交換する際に必要な診断や判断を新たに設定した。

したがって、本マニュアルの内容には、従前のマニュアルでは明記されていなかった、建築技術者の内の、いわゆる構造技術者の業務（診断・構造再計算・判定等）に相当するものが含まれているため、このマニュアルの運用に際しては、特段の留意が必要とされる。

なお、本マニュアルに示されていない内容は、すべて前掲の三種のマニュアルを参照されたい。

1.2 適用範囲および適用対象

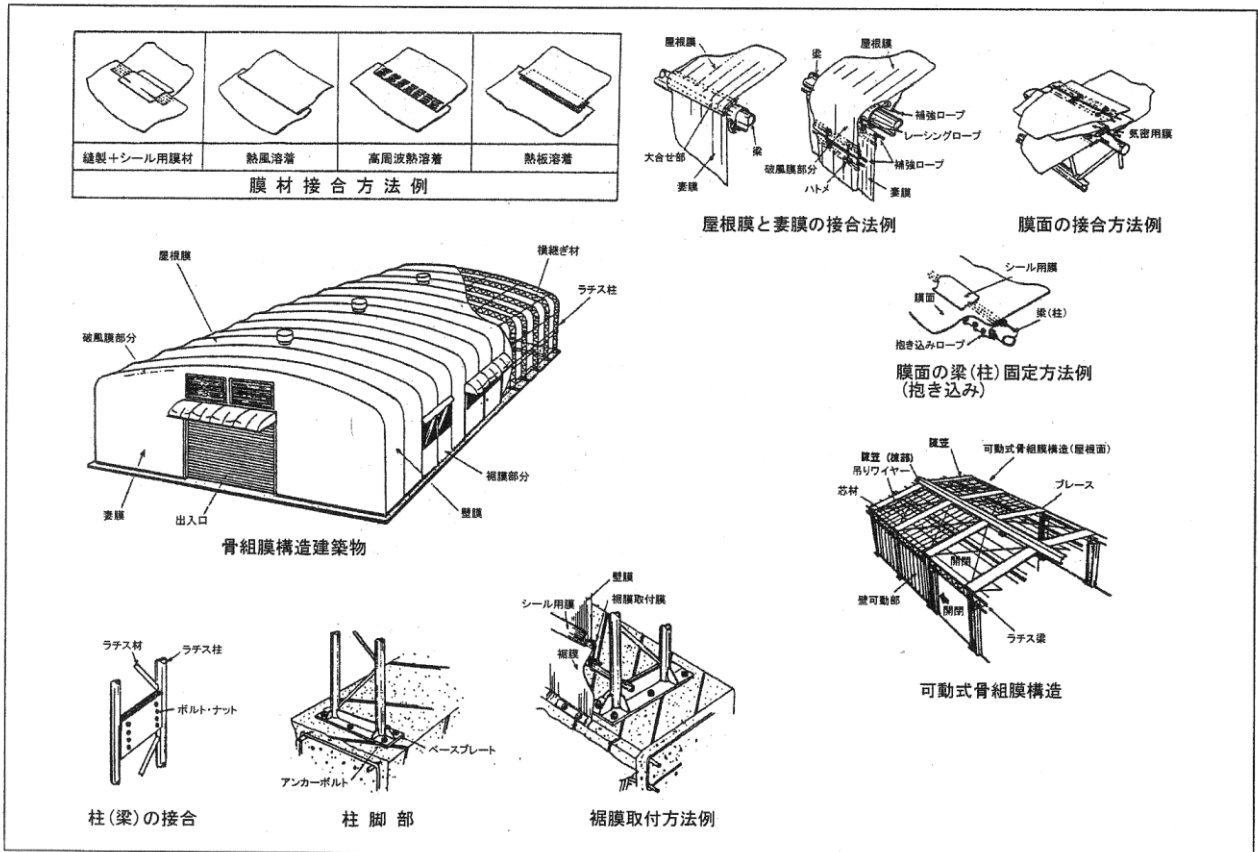
本マニュアルの適用範囲は、膜構造建築物の鋼製部材の保全に関する、「点検マニュアル」、「補修マニュアル」および「空気膜マニュアル」のそれぞれの適用範囲にしたがって、所定の点検・診断・補修行為などを実施する場合に適用する。

本マニュアルの適用対象は、原則として解図 1.2.1～1.2.5 による。

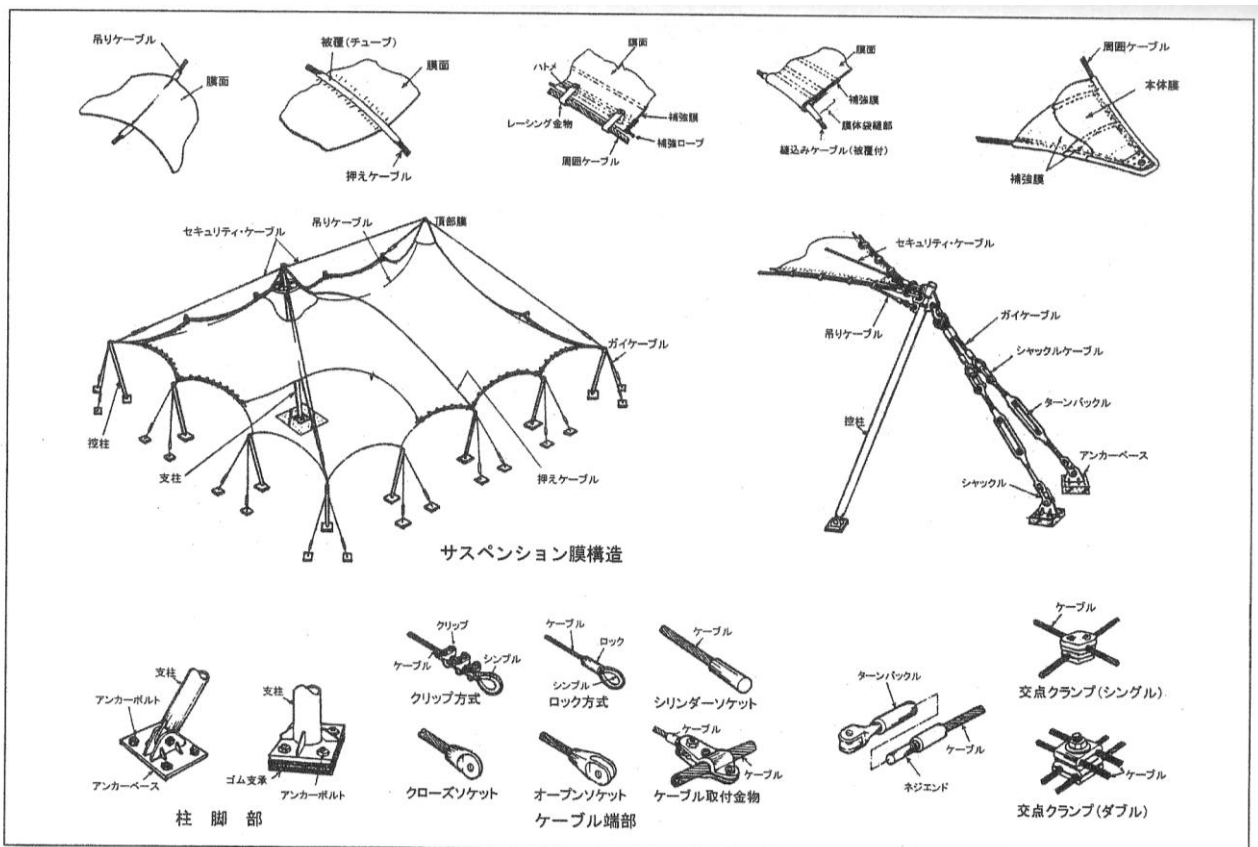
定期点検者が、膜構造建築物の定期点検を実施し、維持管理責任者へ点検結果の報告等をおこなう一連の行為は、「点検マニュアル」、「補修マニュアル」および「空気膜マニュアル」に則って実施されている。

本マニュアルの設定の目的は、これらのマニュアルを補完することにあるため、その適用に際しては、既往の三種のマニュアルと同等のものと位置づける。

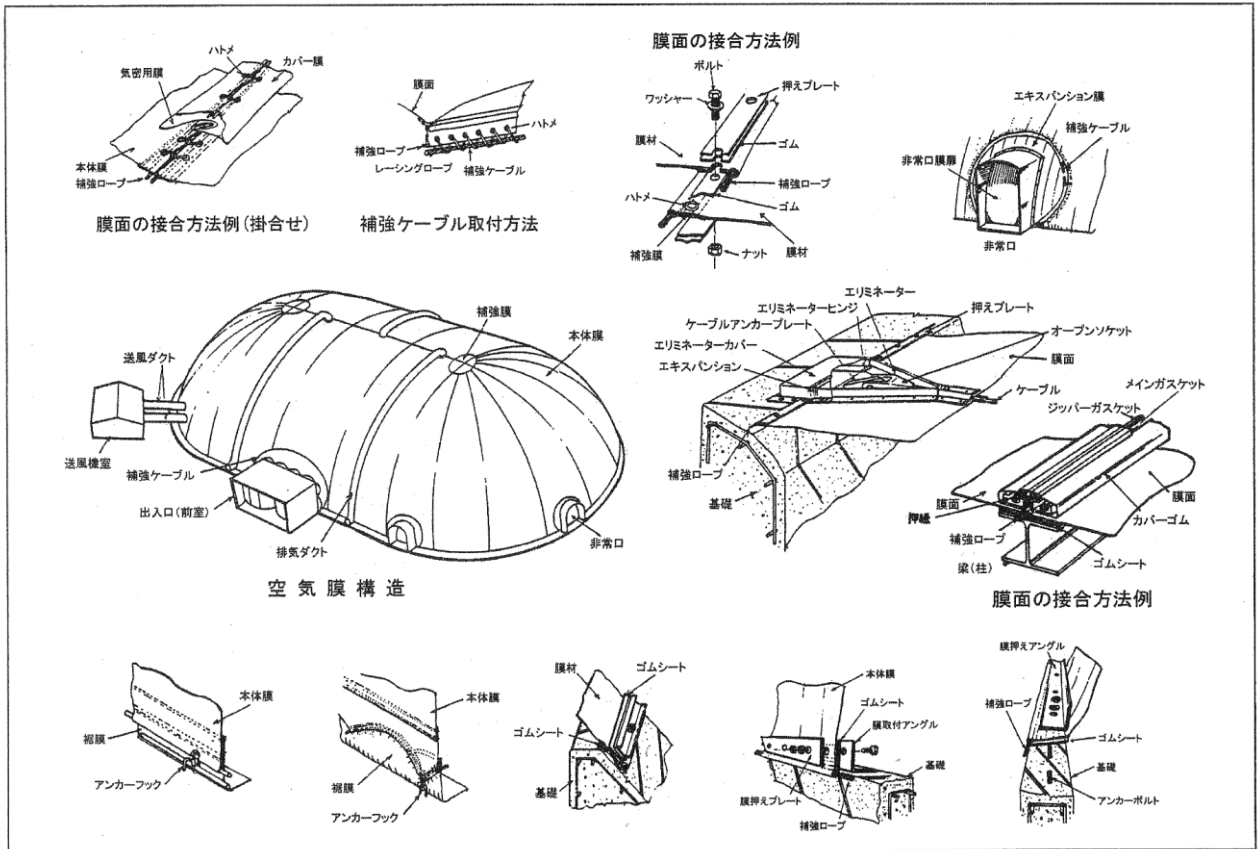
適用対象とする鋼製部材は多種にわたるが、これらは主として解図 1.2.1～1.2.5 による。



解図 1.2.1 骨組膜構造建築物



解図 1.2.2 サスペンション膜構造建築物

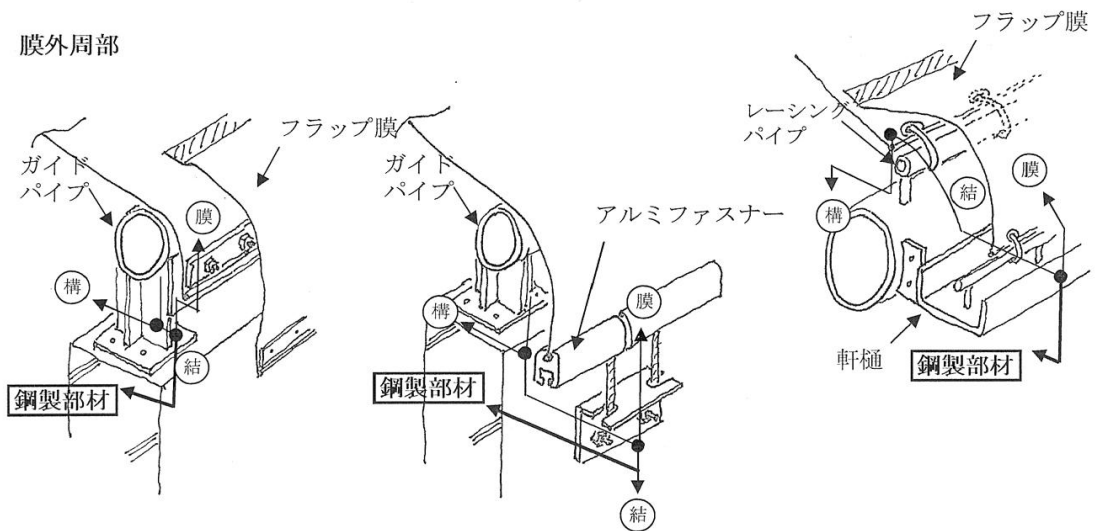
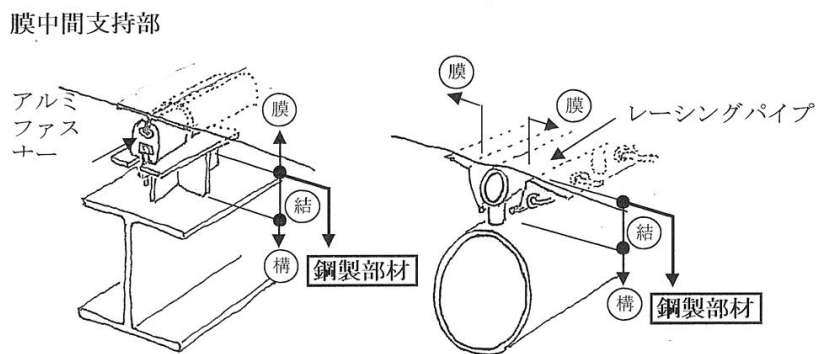
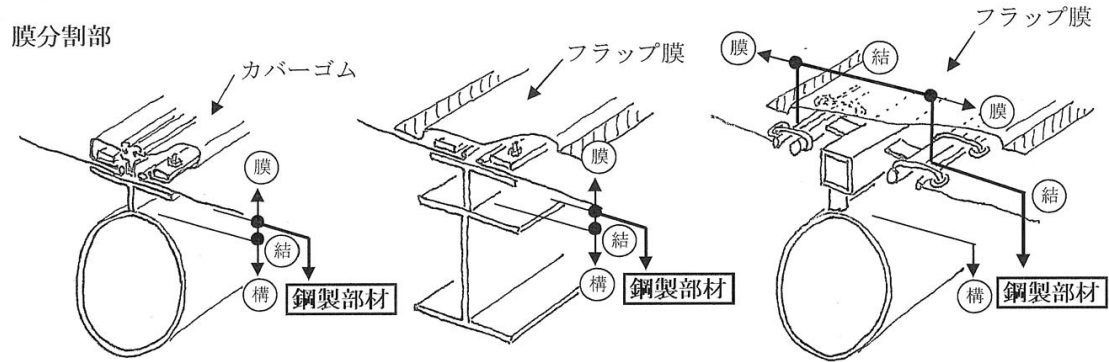


解図 1.2.3 空気膜構造建築物



解図 1.2.4 開閉式膜構造建築物

凡例：
 (膜) 膜定着部
 (結) 膜支持下地鋼材
 (構) 構造架構鋼材



解図 1.2.5 鋼製部材範囲の定義

1.3 用語

関連する用語とその意味を表 1.3.1 に示す。

表 1.3.1 用語の意味

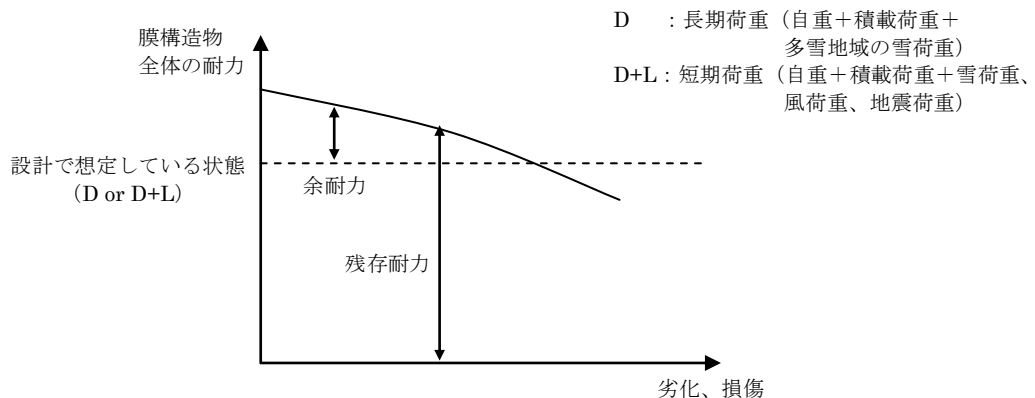
| 用語 | 意味 |
|--------------|--|
| 鋼製部材 | 膜構造建築物を構成する部材のうち、鋼材を主材とする部材。 使用目的により、はり・柱・トラス・ケーブルなどの構造部材とその接合部、それ以外の非構造部材に区分される。詳細は解図 1.2.1-1.2.5 を参照。 |
| 耐用限界 | 社会的または物理的事由により、使用に耐えられなくなること。 |
| 残存耐力 | 本項の解説を参照のこと。 |
| 重要破壊部材 (FCM) | Fracture Critical Member の意。引張応力を受ける部材、もしくは、部材の一部が破断することにより、構造物の崩壊や機能不全を招く部材。 |
| 補修 | 部分的に劣化した部位等の性能・機能を、実用上支障のない状態まで回復させること。 |
| 交換 | 部分的に劣化した部位等の性能・機能を、部材の交換によって当初の性能以上に向上させること。 |
| 構造補修 | 構造部材に対する、構造性能を回復させるための補修。 |
| 塗装補修 | 防食や外観のために鋼製部材の表面に施されている、塗装部分を補修すること。 |

解図 1.3.1 は、劣化や損傷の程度と膜構造物全体の耐力との関係を模式的に示したものである。

縦軸の“設計で想定している状態”とは、長期荷重 D や短期荷重 $D+L$ によって構造物に生じる応答値を、耐力と同じ指標で表したものである。要求性能、あるいは要求される耐力と読み替えてもよい。

設計においては、この要求レベルよりも大きな耐力が得られるように構造決定がなされる（構造物の剛性についても、変形の許容値を満足するよう構造決定がなされる）ことから、劣化や損傷がない場合には耐力は要求レベルを上回る。

一方、自然現象による荷重および外力には不確定要因があり、構造物にも強度や施工精度等のばらつきが存在するため、要求レベルに対して余裕を確保することが一般的である。この要求レベルからの耐力の余裕分をここでは余耐力と云う。柱や梁の腐食による断面減少、斜材やガイケーブルの破断など、重大な損傷が生じると構造物全体の耐力は低下し、場合によっては設計上の要求レベル($D+L$)を下回ることもありうる。ここでは、ある劣化や損傷を受けた場合において、構造物全体が有している耐力の絶対値を残存耐力と呼ぶこととする。



解図 1.3.1 余耐力と残存耐力

第2章 劣化診断

2.1 劣化診断

鋼製部材の劣化診断は、原則として「点検マニュアル」に則っておこなう。

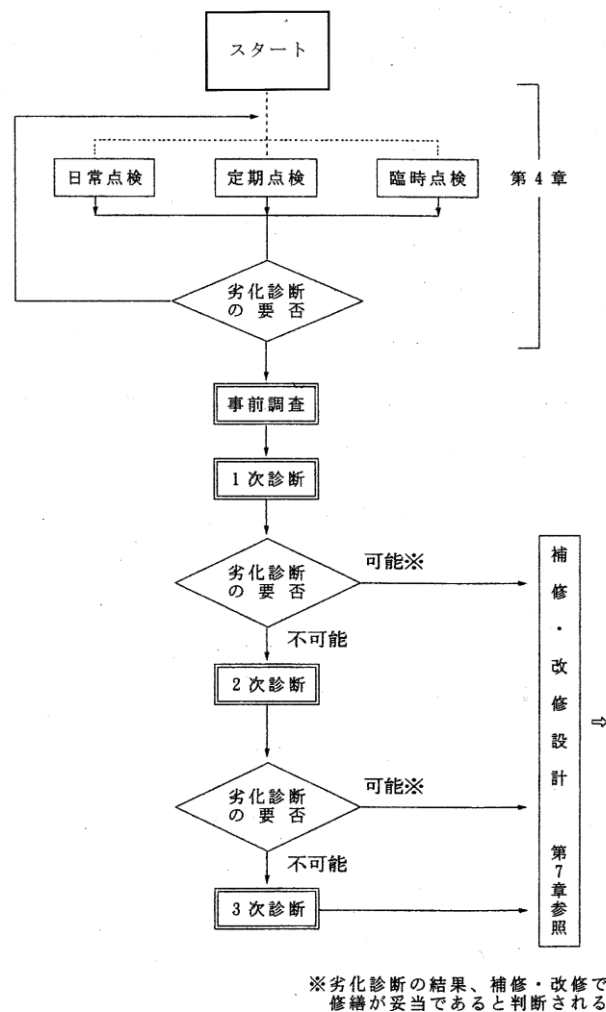
鋼製部材の劣化診断結果の措置の流れの概念図を解図 2.2.1 に、診断項目の概要を解表 2.3.1 に示す。

特に、屋外に露出している部材や部位、沿岸地域や融雪材などの塩害、プール等での塩素系消毒水、高温多湿空間での使用などにおいては、慎重に点検を行うこととする。その際には、高所や裏面などは目が行き届きにくい部位であり、雨漏れ、内部結露、大雨時の浸水などの有無を確認しながら点検を実施する。膜構造に採用される頻度の高い鋼管（丸パイプ、角パイプ、組立て材等）は、外側が健全でも内側で腐食が進行している場合があるので注意する。

ケーブルは目視でも劣化状態を比較的確認しやすい部位もあれば、膜体の袋状部分に被覆付きで組み込まれているケーブルのように確認が容易ではない部位もある。またガイケーブルのように構造物全体の安定性確保に不可欠な部位にケーブルが使用されている場合もあるので注意する

2.2 劣化診断の区分

診断方法は、診断時の手法原則に応じて、1次、2次、3次診断に区分する。



※劣化診断の結果、補修・改修ではなく、日常修繕が妥当であると判断される場合もある。

解図 2.2.1 診断結果の判定と措置の流れの概念図

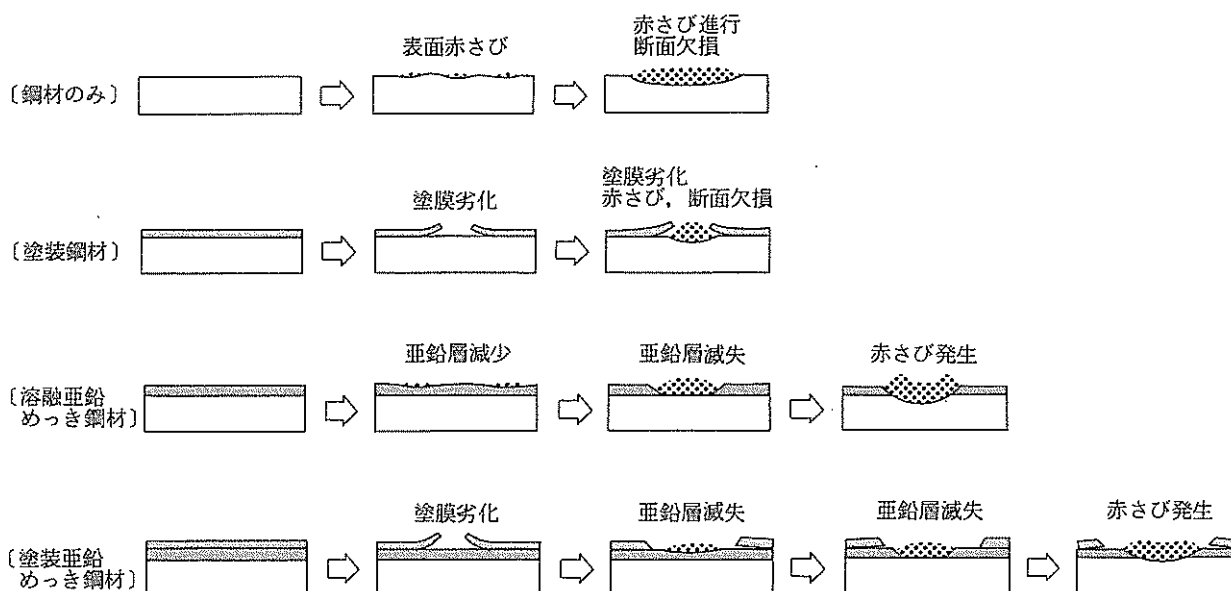
1次診断は、主として目視観察を原則とし、近接できない場合には望遠鏡などを使用する。2次診断は、主として目視、指触または簡易な器具等による診断で、あらかじめデグリーが明示された標準パターンとの写真等との対比などの手法も含まれる。3次診断は、主として専用の測定機器等による診断で、必要に応じた試験や分析を行う。

ここでの診断区分は、診断行為に基づくものであり、定期点検において目視で異常が確認されれば、その程度を判定することで、必要に応じて、より高次の診断によって専門知識を有する診断者が判断すればよい。

2.3 劣化診断対象と診断方法

劣化診断は、鋼製部材の表面処理の分類によって異なり、塗装および亜鉛メッキの防食性能を確認し、さびの種類、程度および進行性の状況によって診断を行う。

まずは、対象建物に使用されている鋼製部材の表面処理を理解する必要がある。解図 2.3.1 に、一般的な各種鋼材の劣化過程を示す。診断の方針として、各種鋼材ごとに塗装および亜鉛メッキの防食性能の健全性を調査し、鋼材を保護する役割が機能しているか確認する。その後、さびの状況を確認することで、構造材としての性能を診断する。



解図 2.3.1 各種鋼材の劣化過程のモデル図

膜構造建築物の維持保全マニュアル II-104 (解図 1.6.1)

なお、点検時には、鋼製部材用の定期点検チェックリストを作成する。開閉式膜構造にあつては、滑車、車輪、駆動用ケーブル等の摩耗についても診断する。(添付資料参照)

解表 2.2.1 鋼製部材の劣化診断項目

| 鋼製部材（ケーブル以外）の劣化診断 | | |
|-------------------|--|--|
| 診断項目 | 内容 | 備考 |
| 変退色、 光沢度低下、白亜化 | 変退色、光沢度低下、白亜化の診断 | 1次診断（点検マニュアルⅡ-110～111） 2次診断（点検マニュアルⅡ-116～117） 3次診断（点検マニュアルⅡ-124～125） |
| ふくれ、 割れ、剥がれ | ふくれ、割れ、剥がれ、付着度の診断 | 1次診断（点検マニュアルⅡ-111～113） 2次診断（点検マニュアルⅡ-117～120） 3次診断（点検マニュアルⅡ-125～127） |
| さび発生 | 補修要否の判定（点検マニュアルⅡ-130～131） ・グレード1→白さびWR3以上なら補修 ・グレード2→白赤さび混在R3以上なら補修 ・グレード3→白赤さび、全面赤さびなら補修 ・グレード4→断面欠損DR1以上かつさびの深さD1以上なら、断面欠損に対する補修・補強の要否を検討する。 | <p>【1次診断】</p> <p>亜鉛めっき-白さび（目視、点検マニュアルⅡ-113～114） WR0（ない） WR1（ほとんどない） WR3（顕著に認められる） WR5（白さびに加えて赤さびも認められる）</p> <p>表面さび（目視、点検マニュアルⅡ-114） R0（表面さびはない） R1（塗膜下にさび色のにじみ発生） R3（点さび・条痕さびの発生） R5（全般的なさびの発生）</p> <p>断面欠損（目視、点検マニュアルⅡ-114） DR0（断面欠損はない） <u>DR1（断面欠損、表面があばた状態に腐食）</u> <u>DR3（孔食が散在）</u> <u>DR5（断面欠損、著しい断面欠損）</u></p> <p>【2次診断】</p> <p>表面無処理鋼材のさび（標準パターン写真と対比、点検マニュアルⅡ-121） R0（発錆なし） R1（ミルスケールがほとんど存在し、赤さびが散在） R2（赤さびの面積がミルスケールの面積より大） R3（全面に赤さびが認められる） R4（全面赤さびで、浮きさびが認められる） R5（全面赤さびで、さびの層がフレーク状に剥がれる）</p> <p>さびの深さ（ダイヤルゲージ等で測定、点検マニュアルⅡ-121） D0（全断面の約0.5%程度以下） <u>D1（全断面の約1%程度）</u> <u>D2（全断面の約3%程度）</u> <u>D3（全断面の約5%程度）</u> <u>D4（全断面の約10%程度）</u> <u>D5（全断面の約20%程度）</u></p> <p>亜鉛めっき鋼材のさび（標準パターン写真と対比、点検マニュアルⅡ-121～122） R0（発生は認められない） R1（光沢がなく、黒変が認められる） R2（薄い白さび層が認められる） R3（厚い白さび層と点状赤さびが認められる） R4（めっき層にかなりの赤さび面の混在が認められる） R5（全面に赤さびが認められる）</p> <p>塗装鋼材のさび（標準パターン写真と対比、点検マニュアルⅡ-122） R0（発錆なし） R1（さびの発生率0.03%以下） R2（さびの発生率0.03～0.3%） R3（さびの発生率0.3～1%） R4（さびの発生率1～3%） R5（さびの発生率3～10%）</p> |

| | | |
|----------------------------------|--|---|
| | | <p>【3次診断】 (点検マニュアルⅡ-127～128)</p> |
| <p>ケーブルの劣化診断</p> | | |
| <p>ケーブル、ケーブル端末金具、取付金具、被覆材の劣化</p> | <p>補修要否の判定(定期点検マニュアルⅡ-046、Ⅱ-069～070)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・グレードⅠ→とくに支障なし ・グレードⅡ→次回の定期点検まで要注意 ・グレードⅢ→補修等の対策を要する ・グレード※ or Ⅳ→早期に補修・取替え等の対策を要する | <p>【ケーブルの点検】亜鉛めっきケーブルの使用を基本とする(定期点検マニュアルⅡ-040～043)</p> <p>ケーブル・ケーブル端末金具・取付金具等のさび デグリー1～5</p> <p>ケーブル・ケーブル端末金具・取付金具等の損傷 デグリー1～5</p> <p>ケーブル・ケーブル端末金具・取付金具等の磨耗 デグリー1～5</p> <p>ケーブル端末金具・取付金具等のゆるみ デグリー1～5</p> <p>ケーブル被覆材のひびわれ デグリー1～5</p> <p>ケーブル被覆材の損傷 デグリー1～5</p> <p>【ケーブルの劣化診断】(定期点検マニュアルⅡ-065～068)</p> <p>ケーブルのさび(抜取りによる引張試験) デグリー1～5</p> <p>ケーブルの損傷(抜取りによる耐力試験) デグリー1～5</p> <p>ケーブルの磨耗(抜取りによる耐力試験) デグリー1～5</p> <p>ケーブル端末金具・取付金具のさび(さびの深さの測定) デグリー3～5</p> <p>ケーブル端末金具・取付金具の損傷(抜取りによる耐力試験) デグリー1～3</p> <p>ケーブル端末金具・取付金具の磨耗(抜取りによる耐力試験) デグリー1～3</p> <p>ケーブル端末金具・取付金具等のゆるみ(器具による測定) デグリー1～5</p> |

第3章 補修の要否判定

3.1 判定基準

鋼製部材の補修の要否の判定は「点検マニュアル」により行う。

第2章の診断における診断結果が、グレード2以上と判断された劣化状況の部位および部材は、補修工事の実施を検討する対象とする。

各グレード別の補修工事の内容を表3.1.に示す。

表 3.1. グレード別の補修工事内容

| グレード | 塗装補修工事 | 構造補修工事 |
|------|--------------|--------------|
| 0 | なし | なし |
| 1 | 診断後3年以内に実施する | なし |
| 2 | 緊急に実施する | なし |
| 3 | 緊急に実施する | 診断後3年以内に実施する |
| 4 | 緊急に実施する | 緊急に実施する |
| 5 | 緊急に実施する | 緊急に実施する |

第2章における診断結果がグレード2以上と判断された劣化状況の部位および部材は、補修工事が必要な状態であると位置づけて、その実施を検討する対象とする。

この場合、塗装工事などの塗膜の補修工事と部材の構造的な補修工事の2つがある。つまり、補修工事には、劣化が塗膜までの場合（断面積の減少率が0.5%未満）と劣化が鋼製部材にまで及んでいる場合（断面積の減少率が0.5%以上）により方法が異なる。断面積の減少率が0.5%未満の劣化を「塗膜の劣化」、断面積の減少率が0.5%以上の劣化を「鋼材の劣化」と判断し、劣化が塗膜までの場合は塗装工事などの塗膜の補修工事を行い、劣化が鋼製部材にまで及んでいる場合は部材の構造的な補修工事および塗膜の補修工事を行うことになる。

当マニュアルの補修の要否判定は、一般の鋼製部材は防食性に重点を置いている。そのため、さびあるいはさびに直結する劣化現象に対するグレードは高く、これと逆に、変退色、汚れなどの外観に関する劣化現象のグレードは低く設定してある。そのため点検者はグレード2であっても美観上重要な部分や劣化の範囲が広い場合などは協議の上、補修の対象と判断することができる。

3.2 塗膜の表面劣化現象

塗膜の表面劣化のみの場合には補修工事は必要としない。ただし、美観上の補修が求められる場合は、別途協議を行う。

ここでいう塗膜の表面劣化とは、塗装表層部に生じている白亜化や、光沢の変化、色調の変化で、いまだ下地である鋼材の防食性能に支障が無い状態を想定している。

ただし、塗装の目的が外観・美観を確保するためである場合は、補修が必要になることから、ここでは別途とした。

3.3 塗膜層の劣化現象

塗膜層の劣化診断の結果、グレード1以上と判定された部位および部材は、補修工事の実施を検討する対象とする。

グレード1 診断後3年以内に塗装補修工事を実施する。

グレード2以上 緊急に塗装補修工事を実施する。

診断の結果がグレード1以上の状態は、当該膜構造建築物の次の定期点検である3年後には、かなり劣化が進行し、構造補修や交換などが必要になることが予想されるので、安全性と経済的な側面を配慮して、3年以内に塗装補修を実施すること、としている。

診断の結果がグレード2と判定されたものは、次の点検時期までこのまま放置しておく、劣化が進行し、確実に下地である鋼材へ悪影響が生じると予測できるため、出来るだけ早くに補修を実施すること、としている。

3.4 さびの発生状況

さびの発生状況の診断の結果、グレード1以上と判定された部位および部材は、補修工事の実施を検討する対象とする。

- | | |
|---------|------------------------------|
| グレード1 | 診断後3年以内に塗装補修工事を実施する。 |
| グレード2 | 緊急に塗装補修工事を実施する。 |
| グレード3 | 緊急に塗装補修工事、診断後3年以内に構造補修を実施する。 |
| グレード4以上 | 緊急に構造補修と塗装補修工事を実施する。 |

さびの発生は、部材断面の減少を伴うことから、部材の構造耐力の低下につながる。

したがって、さびの発生が少ない、断面欠損が微小な状況においては、部材の耐力低下も微小であるため、さびの進行を止めることで、構造安全性を確保することは可能である。一方で耐力低下が予想される欠損の場合は構造的な補修工事を実施する。

ただし、さびの発生状況が比較的軽微なグレード1においても、さびの進行スピードを確認するため、3.3と同様、補修工事までの建物管理者による日常点検を実施させる必要がある。

腐食が進行した鋼材では、特定の箇所に腐食が集中して局所的に板厚が薄くなる場合が多い。腐食により局所的に板厚が薄くなった部分を含む鋼材に引張力が加わると、この箇所で亀裂が発生し、この亀裂が早期に進展して、塑性変形後の伸びが十分に得られないままに（降伏後の耐力上昇が十分に得られないままに）破断に至るため、引張強さが低下する。この現象は同一断面内での板厚の偏りが大きくなるほど顕著になる⁴⁾といわれている。

よって、原則として欠損が認められた場合は、グレード3として構造補修を行うこととしている。

建築物の耐用限界に関して、「建築物の耐久計画に関する考え方（日本建築学会1998年刊）⁵⁾」では、「4.1 耐用年数に達するときの劣化の程度」を「鋼材が腐食によりその断面積が平均10%減少した状態」とし、鋼材は厚さが1%減少すると強度は5~10%低下するとされ、鋼材の両側から5%程度減少すると構造安全性に留意する必要があるとしている。

また「建築物・部材・材料の耐久設計手法・同解説（日本建築学会2003年刊）⁶⁾」では、「付1 鉄骨造建築物の耐用年数推定方法の例」では、その1.2.1項「耐用年数に達した限界状態の設定」において、主要な部材のうち、柱（ベースプレートを含む）、梁、および筋かいが腐食し、断面欠損が各構造部材の10%に至った時点を超えて限界状態としている。

さらに「耐震改修促進法のための既存鉄骨建築物の耐震診断および耐震改修指針・同解説（日本建築防災協会1996年）⁷⁾」では、「錆びによる板厚の減少が元厚の10%以上に達する場合には、建物全体の耐久性が著しく低下しているものと考えられるので、耐震診断自体を中止して別途の対応を検討することになる」としている。

そこで、本マニュアルにおいては、断面積の減少率が10%を超える場合をもって耐用限界と定めている。

一方で、本マニュアルを使用する膜構造の定期点検者は必ずしも構造技術者ではないことを考慮し、構造的な判断なしに構造部材の健全性を判断しかねないことを鑑み、安全率を確保するという意味もあり、断面積の減少率が5%を判断基準とすることとした。

なお、断面積の減少率は材厚とさびの深さから算出する。

3.5 ケーブルの劣化現象

膜構造部分にないケーブル及びケーブル被覆材、ケーブル端末金物の劣化診断は、膜構造部分のケーブル及びケーブル被覆材、ケーブル端末金物と同様の方法で行ない、補修の要否判定も同様の方法で行なう。

膜構造部分にないケーブル及びケーブル被覆材、ケーブル端末金物については、「膜構造建築物定期点検マニュアル・同解説」のケーブル及びケーブル被覆材、ケーブル端末金物の点検の方法もしくは診断及び診断方法と同様の方法により補修の要否判定を行う。

3.6 構造技術者による FCM の判定があった場合

2章における診断結果（ケーブル、定着部材等を除く）のうち、診断項目「さびの発生状況」においてグレード3以上の劣化状況と判断された部位および部材が、構造技術者により FCM ではないと判断された場合には、グレード3はグレード2に、グレード4はグレード3とそれぞれ読み替えて補修工事の実施を検討する対象としてよい。

ケーブル及びケーブル被覆材、ケーブル端末金物等の診断結果において、グレードⅢの劣化状況と判断された部位は、構造技術者により FCM ではないと判断された場合には、グレードⅢはグレードⅡに読み替えて補修工事の実施を検討する対象としてよい。

上述 3.4 さびの発生状況で説明したように、本マニュアルを使用する膜構造の定期点検者は必ずしも構造技術者ではないことを考慮し、断面積の減少率が5%を判断基準とすることとしている。

よって、構造技術者により FCM であるか否かの判断がされた場合には、耐用限界をもって構造補修工事の要否を判断する基準とすることができるようにした。

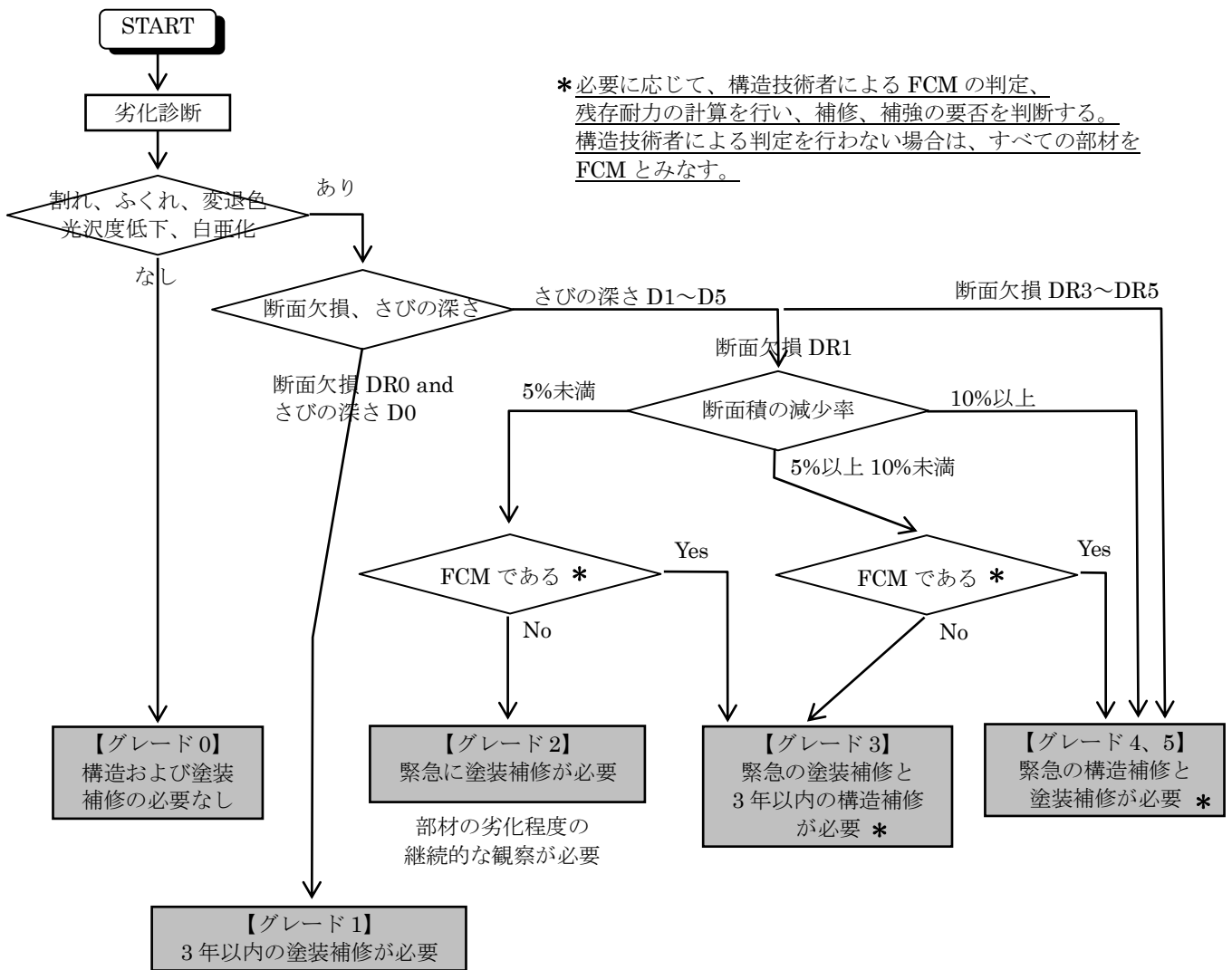
トラス屋根の上下弦材やガイケーブル、アンカーボルトのように、その部材が破断すると構造物が崩壊に至るような重要な部材は典型的な FCM（重要破壊部材）である。

解表 3.6.1. 点検者の能力と判定グレード（ケーブル、定着部材等を除く）

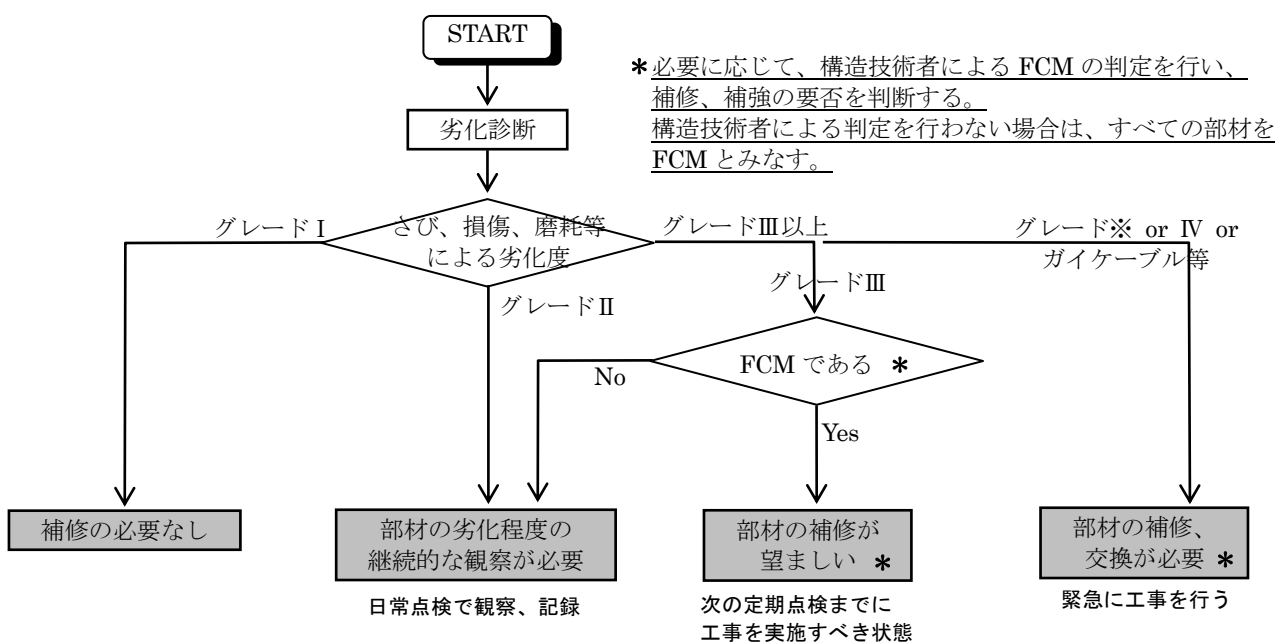
| 点検者の能力 | | 定期点検者 | 構造技術者 | |
|-----------|------------|-------|---------|---------|
| 部材の構造的重要度 | | — | FCM である | FCM でない |
| 断面積の減少率 | 5%未満 | グレード3 | グレード3 | グレード2 |
| | 5%以上 10%未満 | グレード4 | グレード4 | グレード3 |
| | 10%以上 | グレード5 | グレード5 | グレード5 |

解表 3.6.2. 点検者の能力と判定グレード
(ケーブル及びケーブル被覆材、ケーブル端末金物等)

| 点検者の能力 | 定期点検者 | 構造技術者 | |
|-----------|-------|---------|---------|
| 部材の構造的重要度 | — | FCM である | FCM でない |
| グレード | Ⅲ | Ⅲ | Ⅱ |
| | ※ | ※ | ※ |



解図 3.6.1. 鋼製部材（ケーブル、定着部材等を除く）の診断と判定の流れ



解図 3.6.2. ケーブル・ケーブル端末金具・取付金具等の診断と判定の流れ

3.7 腐食以外の原因による部材断面の変化

腐食以外の原因により部材が著しく変形している場合には、交換・補強等の策を推奨する。

ここでは断面欠損の原因として腐食による断面減少のほか、物体の衝突等による断面の変形を想定している。断面形状の変化は、部材の剛性或強度の低下につながるため特に注意が必要である。

腐食以外の原因により部材が著しく変形している場合には、交換・補強等の策を推奨する。必要に応じて構造技術者による FCM の判定、残存耐力の算定等を行う。

3.8 残存耐力の検討

第2章における劣化診断結果にもとづき、柱や梁、ケーブルなどの構造部材に劣化が見られる場合には、必要に応じて残存耐力の検討を行う。残存耐力の評価は、原則として腐食した鉄骨部材の断面をもとにした構造計算による。

劣化診断の結果が、本マニュアルで提案している、その後に必要な対応策<補修や鋼製部材の一部取り換え>が明らかに認められるケースにあっては、残存耐力の計算までを実施する必要はない。しかし、構造的な安全性が、外観や一部の観察からは認知・容認されないケースもままあり、この場合には構造技術者による、専門的な知見を提示して、安全性を確保することになる。

鋼製部材の残存耐力の検討について建築分野での検討例は少ないが、土木分野では 2007 年に米国ミネソタ州で発生した I-35W ミシシッピ川橋梁の崩壊事故⁸⁾以降、研究が盛んに行われている。国内でも国道 23 号木曾川大橋、国道 7 号本条大橋のコンクリート埋込部の腐食による斜材の破断がみられ、詳細な調査や実架構の残存耐力実験⁹⁻¹¹⁾などが行われている。膜構造の鋼製部材と鋼トラス橋は、

- ・屋外や湿度の高い場所など、鋼材の腐食が進みやすい環境で使用される。
- ・不静定次数の低いトラス架構やケーブルが比較的多く用いられる。

などの類似点がある一方で、

- ・鋼橋に比べると、膜構造で使用される鋼材は肉厚が薄く、鋼管などの中空断面部材が多く用いられる。

といった相違点がある。土木分野の手法をそのまま適用することは困難であるが、残存耐力やリダンダンシーの評価手法もいくつか提案されており¹²⁻¹⁴⁾、参考になる部分もあると思われる。

以下に、残存耐力を計算するために必要な基本事項を示す。

1) 腐食した鉄骨部材の板厚

実建物より切り出した腐食部材を用いた引張試験を行い、腐食した鉄骨部材における残存耐力と変形性能についての確認を行った事例では、以下の知見が得られている⁴⁾。この結果により、腐食した鉄骨部材の板厚を計測する事で、断面積の減少を評価し、残存耐力を評価する。

2) 腐食平板の試験結果

- ・全面的に腐食が広がった部材断面に、引張力が作用している場合の最大耐力は、断面平均板厚の最小値から求まる値で、ほぼ推定する事ができる。
- ・腐食部材の引張力と伸びの関係は、簡易的な計算方法によって、推定できる。
- ・腐食による板厚の変動係数が大きくなるに従って、腐食部材の伸びは減少する。

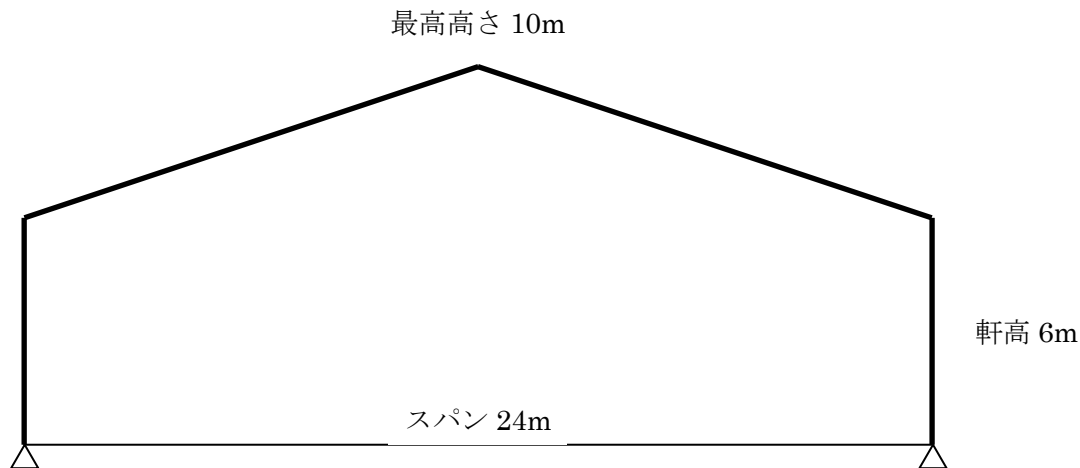
3) 腐食接合部の試験結果

- ・腐食接合部において、予想破断線上の平均板厚を用いて最大耐力を評価すれば、ほぼ推定する事ができる。
- ・抜き取り方針による板厚の計測方法でも、最大耐力は、ほぼ安全側に推定する事ができる。

4) 腐食した鉄骨部材の耐力評価

腐食による影響を把握する為、代表的な骨組膜構造において、線材構造モデルにおける鋼管パイプ材と H 形鋼材の二種類にて検討した事例を以下に示す。設計用応力を算定にあたり設計条件はスパン 24m、直交桁行方向負担幅 4m、軒高 6m、最高高さ 10m の山形ラーメン構造とした。解図 3.8.2 に略軸組図を示す。長期荷重を膜屋根と鉄骨自重とし、短期荷重を基準風速 34m/s の風荷重と想定し、設計用応力を算出する。柱脚条件はピン支持とする。設計用応力は長期荷重と短期荷重を組み合わせた応力を解表

3.8.1 に示す。M1,M2 は曲げモーメント、N は軸力を示す。



解図 3.8.1 略軸組図

解表 3.8.1 設計用応力

| | | | |
|----|----|------|-------|
| | M1 | kN・m | 90.25 |
| 応力 | M2 | kN・m | 46.80 |
| | N | kN | 14.51 |

i) 鋼管パイプ材の検討

基準断面を $\phi 355.6 \times 6.4$ (STK400) とし、鉄骨部材の外側・内側が同等に腐食すると仮定し、断面性能を算出する。解表 3.8.2 に鋼管パイプ材の断面積の減少率に伴う断面性能を示す。D1 は部材外径、D2 は部材内径、t は板厚、e は片側の腐食厚を示す。A は断面積、I は断面二次モーメント、Z は断面係数、i は断面二次半径を示す。断面積の減少率は基準値を 0% とし、5% から 25% まで 5% 毎に腐食後の断面性能を算出し、検討を行う。解表 3.8.3 に鋼管パイプ材の短期許容応力度を示す。許容応力度算定にあたっては、部材長さを 2000mm とし、許容曲げ応力度 f_b 、許容引張応力度 f_t 、許容圧縮応力度 f_c を算出する。解表 3.8.4 に鋼管パイプ材の短期検定値・検定値割増率を示す。曲げ応力度 σ_b ・軸方向応力度 σ_t を算出し腐食後の検定値を算出する。検定値は腐食量が多くなる断面積の減少率に従い、比例して増加する結果となった。

解表 3.8.2 鋼管パイプ材の断面積の減少率に伴う断面性能

| | | 基準値 | | | | | | |
|---------|----|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 断面積の減少率 | | 0% | 5% | 10% | 15% | 20% | 25% | |
| 断面積の比率 | | 100% | 95% | 90% | 85% | 80% | 75% | |
| 断面性能 | D1 | mm | 355.6 | 355.28 | 354.96 | 354.64 | 354.32 | 354.00 |
| | D2 | mm | 342.8 | 343.12 | 343.44 | 343.76 | 344.08 | 344.40 |
| | t | mm | 6.4 | 6.08 | 5.76 | 5.44 | 5.12 | 4.80 |
| | e | mm | 0 | 0.16 | 0.32 | 0.48 | 0.64 | 0.80 |
| | A | mm ² | 7021 | 6670 | 6319 | 5968 | 5617 | 5266 |
| | I | mm ⁴ | 1.071E+08 | 1.017E+08 | 9.634E+07 | 9.099E+07 | 8.563E+07 | 8.028E+07 |
| | Z | mm ³ | 602111 | 572502 | 542842 | 513132 | 483371 | 453558 |
| | i | mm | 123 | 123 | 123 | 123 | 123 | 123 |

解表 3.8.3 鋼管パイプ材の短期許容応力度

| | | | |
|-------------|-----------|-------------------|------|
| 短期 許容応力度 | Lk | mm | 2000 |
| | λ | | 17 |
| | ft | N/mm ² | 235 |
| | fb | N/mm ² | 235 |
| | fc | N/mm ² | 231 |

解表 3.8.4 鋼管パイプ材の短期検定値・検定値割増率
基準値

| 断面積の減少率 | | | 0% | 5% | 10% | 15% | 20% | 25% |
|-----------|---------------------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 短期 検定値 | $\sigma_b=M/Z$ | N/mm ² | 149.89 | 157.64 | 166.25 | 175.88 | 186.71 | 198.98 |
| | $\sigma_t=N/A$ | N/mm ² | 2.07 | 2.17 | 2.30 | 2.43 | 2.58 | 2.75 |
| | σ_b/fb | | 0.64 | 0.67 | 0.71 | 0.75 | 0.79 | 0.85 |
| | σ_t/ft | | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| | $\sigma_t/ft+\sigma_b/fb$ | | 0.65 | 0.68 | 0.72 | 0.76 | 0.81 | 0.86 |
| 検定値割増率 | | | 100% | 105% | 111% | 117% | 125% | 133% |

ii) H 形鋼材の検討

基準断面を H-350x175x7x11(SS400)とし、鉄骨部材の外側・内側が同等に腐食すると仮定し、断面性能を算出する。解表 3.8.5 に H 形鋼材の断面積の減少率に伴う断面性能を示す。H は部材高、B は部材幅、tf はフランジ板厚、tw はウェブ板厚、etf はフランジ腐食厚、etw はウェブ腐食厚を示す。ここで部材幅の腐食厚はウェブと同等と仮定する。A は断面積、Ix は強軸方向断面二次モーメント、Iy は弱軸方向断面二次モーメント、Zx は強軸方向断面係数、Zy は弱軸方向断面係数、iy は弱軸断面二次半径を示す。断面積の減少率は基準値を 0%とし、5%から 25%まで 5%毎に腐食後の断面性能を算出し、検討を行う。解表 3.8.6 に H 形鋼材の短期許容応力度を示す。許容応力度算定にあたっては、部材長さを 2000mm とし、許容曲げ応力度 fb、許容引張応力度 ft、許容圧縮応力度 fc を算出する。解表 3.8.7 に H 形鋼材の短期検定値・検定値割増率を示す。曲げ応力度 σ_b ・軸方向応力度 σ_t を算出し腐食後の検定値を算出する。検定値は腐食量が多くなる断面積の減少率に従い、比例して増加する結果となった。

解表 3.8.5 H 形鋼材の断面積の減少率に伴う断面性能

| 断面積の減少率 | | | 0% | 5% | 10% | 15% | 20% | 25% |
|---------|-----|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 断面積比率 | | | 100% | 95% | 90% | 85% | 80% | 75% |
| 断面性能 | H | mm | 350 | 349.73 | 349.45 | 349.18 | 348.90 | 348.63 |
| | B | mm | 175 | 174.65 | 174.30 | 173.95 | 173.60 | 173.25 |
| | tf | mm | 11 | 10.45 | 9.90 | 9.35 | 8.80 | 8.25 |
| | tw | mm | 7 | 6.65 | 6.30 | 5.95 | 5.60 | 5.25 |
| | etf | mm | 0 | 0.28 | 0.55 | 0.83 | 1.10 | 1.38 |
| | etw | mm | 0 | 0.18 | 0.35 | 0.53 | 0.70 | 0.88 |
| | A | mm ² | 6146.0 | 5836.9 | 5527.9 | 5219.2 | 4910.6 | 4602.3 |
| | Ix | mm ⁴ | 1.312E+08 | 1.248E+08 | 1.183E+08 | 1.118E+08 | 1.053E+08 | 9.884E+07 |
| | Iy | mm ⁴ | 9834896 | 9286410 | 8744146 | 8208063 | 7678120 | 7154275 |
| | Zx | mm ³ | 749913 | 713574 | 677117 | 640542 | 603847 | 567033 |
| | Zy | mm ³ | 112399 | 106343 | 100334 | 94373 | 88458 | 82589 |
| | iy | mm | 40.00 | 39.89 | 39.77 | 39.66 | 39.54 | 39.43 |

解表 3.8.6 H形鋼材の短期許容応力度

| | | | |
|-------------|-----------|-------------------|------|
| 短期 許容応力度 | Lk | mm | 2000 |
| | λ | | 50 |
| | ft | N/mm ² | 235 |
| | fb1 | N/mm ² | 235 |
| | fb2 | N/mm ² | 219 |
| | fb | N/mm ² | 235 |
| | fc | N/mm ² | 135 |
| fb低減率 | | | 100% |
| fc低減率 | | | 100% |

解表 3.8.7 H形鋼材の短期検定値・検定値割増率

| | | 基準値 | | | | | | |
|-----------|-----------------------------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 断面積の減少率 | | 0% | 5% | 10% | 15% | 20% | 25% | |
| 短期 検定値 | $\sigma_b = M/Z_x$ | N/mm ² | 120.34 | 126.47 | 133.28 | 140.89 | 149.46 | 159.16 |
| | $\sigma_t = N/A$ | N/mm ² | 2.36 | 2.49 | 2.62 | 2.78 | 2.95 | 3.15 |
| | σ_b / f_b | | 0.51 | 0.54 | 0.61 | 0.65 | 0.68 | 0.73 |
| | σ_t / f_t | | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| | $\sigma_t / f_t + \sigma_b / f_b$ | | 0.52 | 0.56 | 0.62 | 0.66 | 0.70 | 0.74 |
| 検定値割増率 | | 100% | 106% | 118% | 126% | 134% | 142% | |

この結果より断面積の減少率に従い、部材検定値が割増される。本マニュアルでは断面積の減少率10%を上限とする。

実際の腐食状況は一様で無い為、残存耐力を評価する時は劣化診断結果の評価を適切に行う必要がある。鉄骨部材の腐食が進行し孔があいてしまっている状況の場合は残存耐力を評価するまでも無く、緊急に補修が必要となる。

ここではケーブルの詳細な残存耐力の評価方法に関して省略するが、サスペンション膜構造のガイケーブルは腐食が進行している場合はFCMであると判断し残存耐力を評価するまでも無く、緊急に補修が必要となる。

第4章 補修計画・方法

4.1 補修計画

本マニュアルによって部材の補修、交換が必要と判断されたものは、当該建築物の所有者、管理責任者等及び関係者と協議して、補修計画を作成する。

鋼製部材の補修や交換が必要と判断される状態の把握は、定期点検時期に止まらず、台風で代表される異常気象や震災時にも、緊急点検時にも把握される。

テント倉庫では、倉庫としての使用中に発生する、偶発的な損傷としても出現する。

補修や交換が必要とされる状態が、建築関係者以外の第三者が見ても納得のゆく程度に至っている場合以外は、本マニュアル第3章で設定されている判断基準を咀嚼したうえで、第3者に説明し、補修や交換の必要性について理解・合意を得ることが肝要である。

本マニュアルでは、上記の理解・合意を得るためも含めて、現状の安全性が評価できる残存耐力の計算方法が示されているので、活用されたい。

補修・交換工事計画を作成する際に考慮すべき主な事項を、以下に示す。

今回計画される工事が、既存の当該膜構造建築物の知的所有権・特許等に関連するか否かは、十分に事前に配慮しておく必要がある。

特に、構造部材の変更によって、既存建築物の外観や元設計者が意図するデザインに変更が生じる場合には、特段の配慮が必要となる。

設計者が設計した建築物は、その意匠を含めて他者が勝手に変更・改装することはできず、わが国では建築士法にも明記されている事項である。

通常、構造部材を補修・交換工事をする際には、膜体との取り合いを重視しなければならないが、膜体部分の旧設計者・施工者は、構造部部分のそれと同一ではないこともある。

法令等に規定されていないが、重大問題になりかねない、周辺・近隣の居住者との関連も重視しておく必要がある（規模・形・色彩）。

施工現場から発生する騒音・照明光・臭気に関する規制は年々厳しくなっている。

また、現場から発生する廃材類に対する規制や自主規制も厳しさをまして、これを事前に対処しておかないと工事そのものが開始できないこともある。

関連法規とは別に、税制面の検討も必要になる。

一般の建築物においても同様であるが、構造部材の交換によって、建築面積には変更が無くても、資産価値が変化すると認められる場合には、固定資産税などが変化する。これは不動産管理<Asset Management>の分野であるが、建物所有者・管理者にとっては、維持管理費に直結する問題で、事前に設計・施工者側でチェックし、これを発注者へ提供することが通例である。

当該建物が竣工した後に、周辺や近隣の道路・環境が変化していることはままある。結果として新設時に採用されている施工計画・手順では、張替え工事が実施できない場合がある。

これは、特に、構造部材の搬入・取り付けに伴う重機計画や仮設計画において留意する必要がある。

また、当然のことながら、今回の工事に先立って、当該構造部材以外の、いわば二次部材に相当するものの評価や、再利用可能なものと、新規に交換するものの区分を明確しておく必要がある。

補修、交換方法の計画する際は、補修、交換の対象となる部位にすでに採用、使用されている工法、材料を確認し、採用する工法との整合を図る必要がある。又、構造技術者による判断を仰ぐと共に、最新の技術を採用することが望ましい。

二次部材等の再利用できる部材と交換する部材を選定する場合はコスト等を含め判断する必要がある。

補強等を行う場合、新たな部材の追加あるいは応力集中など、荷重伝達が変化する場合があるため、各部材の荷重分担などを考慮し、安全性を確保する必要がある。

施工時において、一時的に部材の撤去あるいは部材の追加を行う場合には仮受け材の使用などにより撤去部材以外の部材の荷重分担が大きく変化しないように仮設計画を選定する必要がある。

4.2 補修方法

鋼製部材の防食塗装及びケーブルに対する補修方法は、「膜構造建築物の補修・改修マニュアル・同解説」に従って行う。

鋼製部材の防食塗装及びケーブルに対する補修方法は、補修マニュアルに従って行う。

鋼製部材を補修、交換する場合は、当該部分への要求性能（耐力等）を勘案して、これを充足する仕様・工法によること。

ここでの補修・交換は、既に鋼製部材の表面から経年によって腐食等が発生している場合を対象としている。

上記の状況は、多種にわたる鋼製部材の何れかの部分でも発生する可能性があるが、多岐にわたるため、一概にはきめがたく、個々に対応することになる。

以下に、鋼材部分の補修・交換方法を例示する。

鋼材部分の補修・交換方法例¹⁵⁾

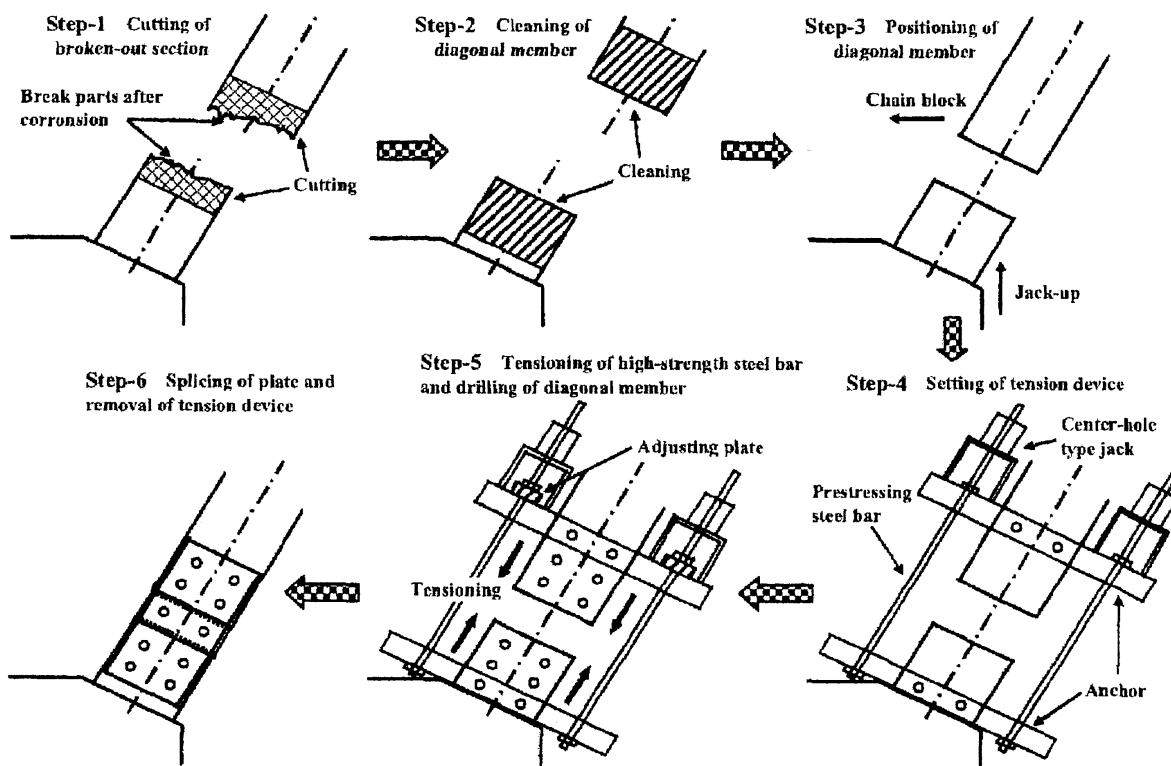


Fig.3 A new retrofit and strengthening method with adjusting axial force of diagonal member.

Step-1, 破断部の整形：破断部とともに腐食の著しい部位を切断除去する。

Step-2, 斜材のケレン：比較的軽微な腐食部及び接合面の素地調整を行う。

Step-3, 斜材位置調整：仮受けベント上のジャッキとチェンブロックを用い、斜材接合端部の位置の調整を行う。

Step-4, 調整装置設置：定着治具とセンターホールジャッキの設置及びPC鋼材の配置を行う。

Step-5, PC鋼材の緊張と斜材の孔明け：予め、調整プレート厚の最適板厚を算出する。また、斜材の所定の位置に穴を穿孔する。さらに、センターホールジャッキによりPC鋼材を緊張し、所定の調整プレートを挿入し、調整作業を完了する。

Step-6, 当て板の施工と調整装置の撤去：高力ボルト当て板補強を行い、施工完了後、調整装置等を撤去する。

参考文献

1. 膜構造建築物定期点検マニュアル・同解説、日本膜構造協会
2. 膜構造建築物の補修・改修マニュアル・同解説—膜体等・鋼製部材編一、日本膜構造協会
3. 空気膜構造建築物維持保全マニュアル・同解説、日本膜構造協会
4. 加藤巨邦、松尾彰、澤田樹一郎、高松隆夫、玉井宏章：腐食した鉄骨部材の残存耐力・塑性変形能力に関する研究、日本建築学会技術報告集 Vol. 18 No.38、pp203-208、2012年2月
5. 建築物の耐久計画に関する考え方、日本建築学会、1998年
6. 建築物・部材・材料の耐久設計手法・同解説、日本建築学会、2003年
7. 耐震改修促進法のための既存鉄骨建築物の耐震診断および耐震改修指針・同解説、日本建築防災協会、1996年
8. American Association of State Highway and Transportation: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications、3rd ed., 2004.
9. 塚田祥久、山沢哲也、野上邦栄、森猛：腐食した実鋼橋部材の曲げ耐力実験
10. 山名和枝、野上邦栄、山沢哲也：孔食に伴うはり部材の残存耐荷性能について、土木学会年次学術講演会、2004年9月
11. 佐々木信智、野上邦栄、山沢哲也：上路式プレートガーター橋端支点部の腐食に伴う残存耐力実験
12. 腐食した鋼構造物の耐久性照査マニュアル、土木学会、2009年
13. 鋼トラス橋のリダンダンシー評価手法の開発と合理的維持管理への適用—鋼トラス橋のリダンダンシー評価ガイドライン（案）一、日本鉄鋼連盟、2010年6月
14. 村越 潤、梁取 直樹、澤田 守：既設鋼橋の致命的損傷を防ぐための状態評価技術
15. トピー工業株式会社 林健二：鋼トラス橋斜材の補修・補強と予防保全に関する 2,3 の検討