

# D滑走路 鋼構造部材の疲労設計と溶接管理 ～ 設計要求品質の確保に向けて～

J V工事管理 Gr 関口太郎

ジャケット製作工区 吉田誠太郎、接続部護岸・栈橋工区 橋本光行、連絡誘導路工区 岩崎泰  
新日鉄エンジニアリング 阪上精希・高田賢一・能勢哲郎  
キーワード：ジャケット、疲労設計、溶接施工性、非破壊検査

## 1. まえがき

D滑走路建設工事の大きな特徴の一つは、栈橋部のジャケット構造をはじめ、基盤施設等の重要構造物に鋼構造部材を多用している点である。図-1にD滑走路において鋼構造部材を利用している主要箇所を示す。特に、滑走路や誘導路に適用される部位は、航空機の繰り返し载荷の影響が大きく、設計供用期間100年を満足する疲労安全性を確保するために、十分な検討が必要となる。疲労安全性の検討にあたっては、設計で要求する品質が製作段階で確実に確保される必要があり、設計による疲労損傷度の照査、構造検閲と、製作による製作要領、品質管理に関する検討を並行して実施した。本文ではこれらの検討内容の概要を報告する。

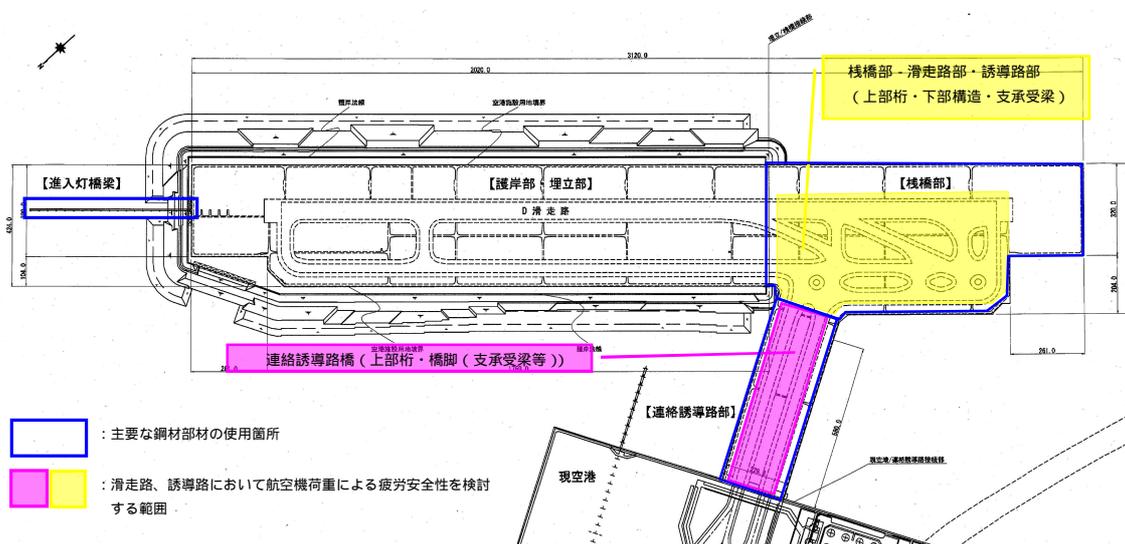


図-1 D滑走路における主要な鋼部材利用箇所

## 2. 疲労安全性の検討方針

疲労安全性の検討は、設計部門と製作部門が各々の検討状況を共有し、必要に応じて実物大モデルによる検証等を行いながら実施した。主な検討項目と検討の流れを図-2に示す。

設計部門においては、要求水準書に示される設計条件を踏まえ、対象となる全ての溶接継手に対して「鋼道路橋の疲労設計指針」及び「ジャケット工法技術マニュアル」に準じて疲労安全性の検討を行うとともに、製作段階における継手の要求品質を明確化した。

製作部門においては、実寸大モデルによる検証等を実施し、設計要求品質を確保するための製作性、溶接施工性、品質管理方法を具体的に検討した。

特に、D滑走路栈橋部レグ頭部及び連絡誘導路橋梁部支承受梁部は、構造が比較的複雑で、かつ常時航空機の繰り返し载荷を受ける重要部位であるため、詳細な設計及び製作検討を行った。

また、これらの検討成果を実施設計図面及び施工計画書、品質計画書に盛り込み、各製作工場・ヤードにおいて所定の品質を確保するための必要なルールとして規定した。

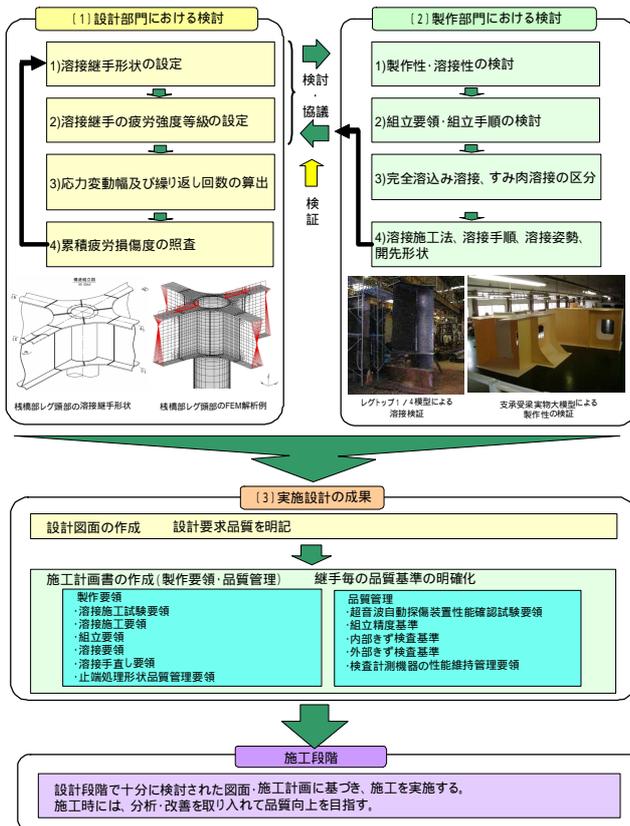


図 2 鋼構造物に対する疲労安全性の検討の流れ

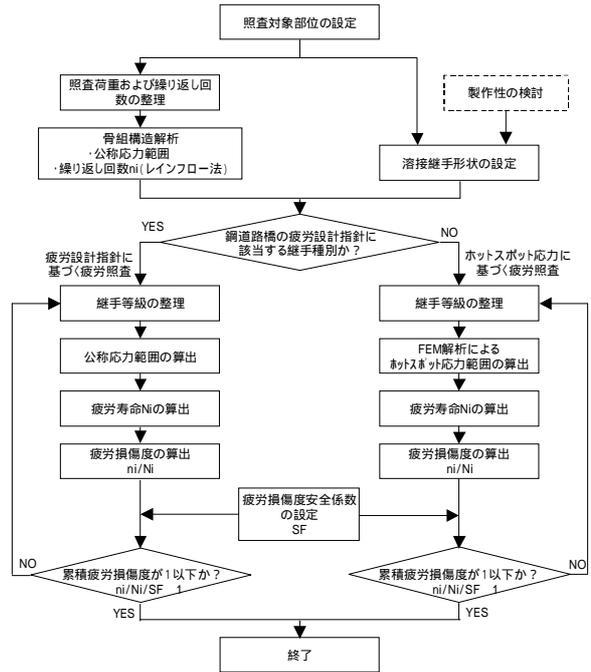


図 3 設計部門における疲労検討フロー

### 3. 設計部門における検討

#### 3-1 検討方針

設計部門における疲労検討は図 3 に示すフローにしたがって実施した。上部桁は原則として、「鋼道路橋の疲労設計指針」((社)日本道路協会)に基づく疲労照査手法にしたがったが、公称応力による評価が困難なレグ頭部については、ホットスポット応力を FEM 解析により算出し、疲労耐久性を評価した。FEM 解析のモデル化およびホットスポット応力の算出方法は、要求水準書にしたがい、「Designer's Guide」(International Institute of Welding)の手法に準じた。また、下部ジャケットの鋼管格点部については、「ジャケット工法技術マニュアル」((財)沿岸技術研究センター)にしたがって航空機荷重および波浪荷重によるホットスポット応力を算出し、疲労照査を実施した。

疲労損傷度安全係数は、要求水準書により、着目部位が構造上クリティカルであるか否か、維持管理が可能であるか否かにより異なる数値が設定されている。ジャケット構造は多数の構造部材により構成された高次の不静定構造物であり、一部の部材に疲労亀裂が生じて荷重伝達機能が低下しても、構造安定性が確保できることが解析的に確認できたため、構造上クリティカルではないと判断した。また、大気中の上部桁、海中部の鋼管トラス構造ともに、近接目視による維持管理が可能であると判断し、疲労損傷度安全係数は、それぞれ 1.0、3.0 と設定した。以下では D 滑走路棧橋上部桁の検討内容を詳述する。

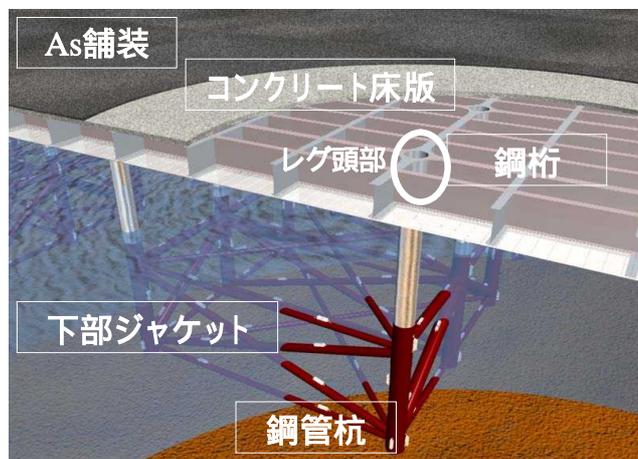


図 4 D 滑走路棧橋



## (2) 溶接継手等級の設定

溶接継手等級は、公称応力により疲労強度を照査する継手は「鋼道路橋の疲労設計指針」に規定があり、これにしたがった。ホットスポット応力により疲労強度を照査する継手は、要求水準書にしたがい、溶接仕上げがない場合はE等級、仕上げありの場合はD等級とした。溶接仕上げにより継手等級は1ランク上がるが、製作能率が低下し、品質管理が煩雑となるため、仕上げを要する範囲を最小化した。

継手等級の設定に際しては、その前提として、仕上げの程度や許容できる内部きず、外部きずが「鋼道路橋の疲労設計指針」に規定されている。実施設計図面に適用基準及び継手の種類、等級を記載することにより、これらの設計要求品質を明確にした。

## (3) 応力変動幅及び繰返し回数の算出

継手位置における応力変動幅は、骨組解析モデルに航空機を移動載荷させて得られる着目部位での断面力を基に算出した。繰返し回数はレインフロー法により算定した。

ホットスポット応力を算出するために用いたレグ頭部のFEM解析モデルを図7に示す。骨組解析モデルの発生断面力をFEM解析モデルの境界条件として作用させるズームング手法(図6)を用いている。

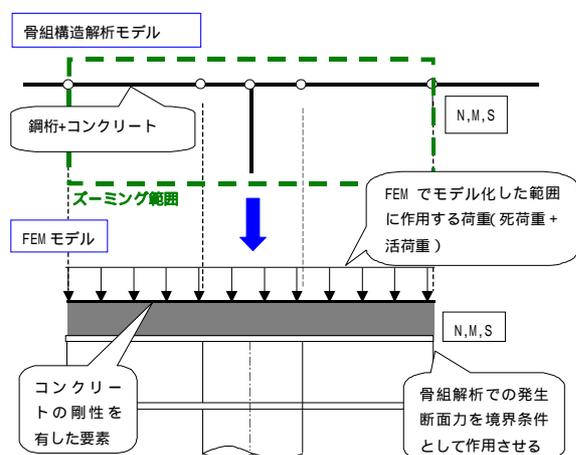


図6 ズームング手法

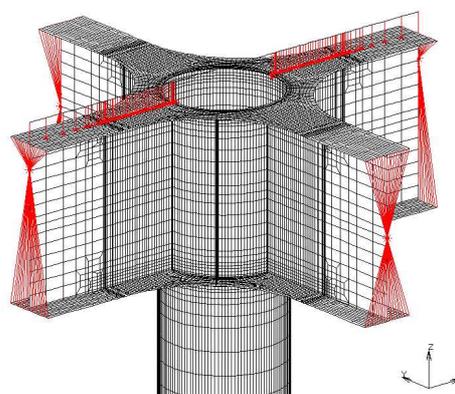


図7 レグ頭部のFEM解析モデル

## (4) 累積疲労損傷度の照査

着目継手の強度等級と、上述の方法により算出した応力変動幅及び繰返し回数より、疲労損傷度を算出した。荷重種別毎の疲労損傷度の重ね合わせはマイナー則にしたがった。これらの手法により算出した設計供用期間100年の累積損傷度を表1に示す。

表1 滑走路部の疲労損傷度の計算結果

照査方法	継手No.	継手位置	等級	累積疲労損傷度						
				A380	B747	B777	B767	B737	DHC	合計
疲労設計指針による照査		上側リング-上側リング	D	継手No. の照査がOKであれば照査を満たす。						
		上側リング-上フランジ	D	0.10	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24
		上フランジ-上フランジ	D	0.11	0.11	0.11	0.00	0.00	0.00	0.33
		上フランジ-上フランジ	D	0.32	0.33	0.28	0.01	0.00	0.00	0.94
		下側リング-下側リング	D	継手No. の照査がOKであれば照査を満たす。						
		下側リング-下フランジ	D	0.10	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24
		下フランジ-下フランジ	D	0.36	0.36	0.17	0.02	0.00	0.00	0.90
ホットスポット解析による照査		上側リング-レグ	D	0.19	0.25	0.18	0.00	0.00	0.00	0.62
		ウェブ-レグ	E	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11
疲労設計指針による照査		下側リング-レグ	E	0.08	0.09	0.06	0.00	0.00	0.00	0.25
		ウェブ-ウェブ	D	継手No. 、 、 の照査がOKであれば照査を満たす。						
		ウェブ-ウェブ	D	継手No. 、 、 の照査がOKであれば照査を満たす。						

## 4. 製作部門の検討

### 4-1 製作性・溶接性の検討

#### (1) 製作性の検討

設計図面で指示された部材形状に対して、作業空間や適切な作業姿勢の確保の検証を目的とし、実寸大試験体や模型を用いた検証を行った。作業空間が比較的狭隘である支承受梁部においては、スチロール材で製作した実寸大模型により、設計図面の部材配置において、適切な作業空間が確保でき、溶接トーチ挿入度、グラインダー挿入度に問題はなく、特別な管理が必要な箇所がないことを確認した。



図 8 実寸大模型による支承受梁部の製作性検証

#### (2) 溶接施工性の検討

設計要求品質を満足する適正な溶接条件の設定や、使用予定の溶接機の適正確認を目的とし、代表部位において実寸大またはスケール模型を用いた検証を行った。

レグ頭部においては、完全溶込溶接線が3線交差する箇所の溶接条件の確定ならびに製作要領の可否検討を目的とし、1/4 円 (90°) 実寸大模型より、開先形状、溶接条件、溶接姿勢 (先行・後行順序)、トーチ角度、3線交差部連続溶接性を検証した。確定した施工法により、内/外部きず、コーナー部溶け込み、溶接外観を含め良好な接合結果が得られること、部材回転により、3線交差部の連続溶接が可能であることを確認した。



図 9 実寸大模型によるレグ頭部の溶接施工性検証

#### 4-2 組立要領・溶接手順の検討

レグ頭部及び支承受梁は構造上重要な部位であり、完全溶込溶接の3線交差部を有しているため、当該箇所を重点管理部と位置づけ、具体的な組立・反転・溶接手順を検討した。組立及び非破壊検査について特に留意すべき事項は以下の通りである。

- 組立：
- ・組立溶接は3線交差部の先行溶接側には行わない。
  - ・組立精度は「道路橋示方書 鋼橋編」((社)日本道路協会)に基づき管理するが、ルートギャップはこの管理値を超えると予測されるため、溶接施工試験により確認する。
- 非破壊検査：
- ・完全溶込溶接箇所は全線超音波探傷試験(UT)により、内部欠陥のないことを確認する。
  - ・3線交差部(交差部から連続する300mm区間の溶接線)は、磁粉探傷試験(MT)により、表面近傍のきずの有無を確認する。

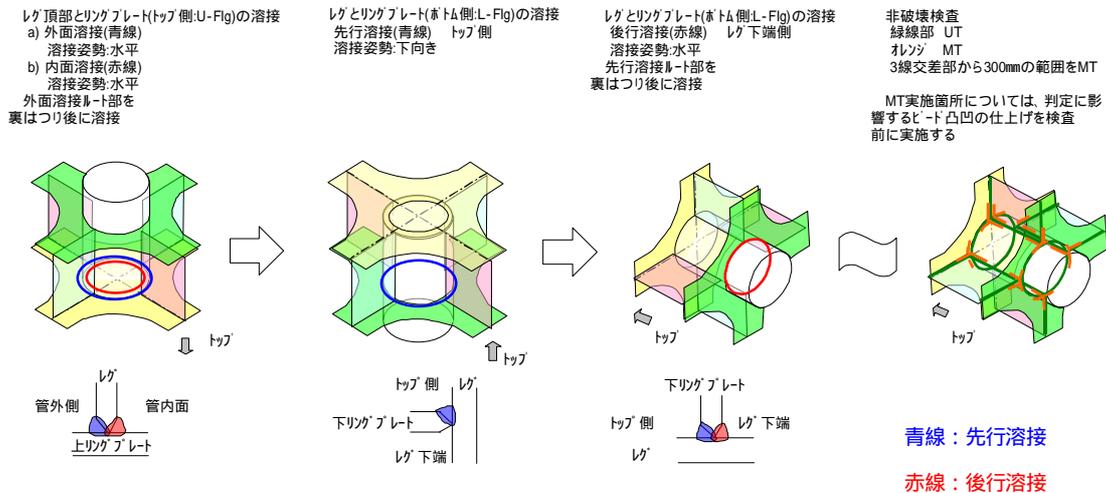


図 10 栈橋レグ頭部の組立・溶接手順の例

#### 4-3 溶接施工法の検討

部材製作では部材の反転が可能であるため溶接姿勢の自由度が高く、また部材の組立に対する制約が小さいが、ブロック製作や大組立になると溶接姿勢が限定され、組立に対する制約が大きい。このため、溶接継手毎に組立精度、溶接方法、溶接手順、溶接姿勢、開先形状、スカーラップ等を検討し、適用基準との整合性を検証した。ルートギャップや入熱量が基準を満たさない場合や施工実績のない施工方法を採用する場合は、4-4(1)に示す溶接施工試験により、継手品質が確保できることを事前に確認することとした。

重点管理部位であるレグ頭部や支承受梁部の3線交差部については、ウェブ(立板)の板厚内に溶接欠陥が生じやすいため、類似の鋼製橋脚隅角部で実績のある手順で溶接することを施工計画書に明記した。

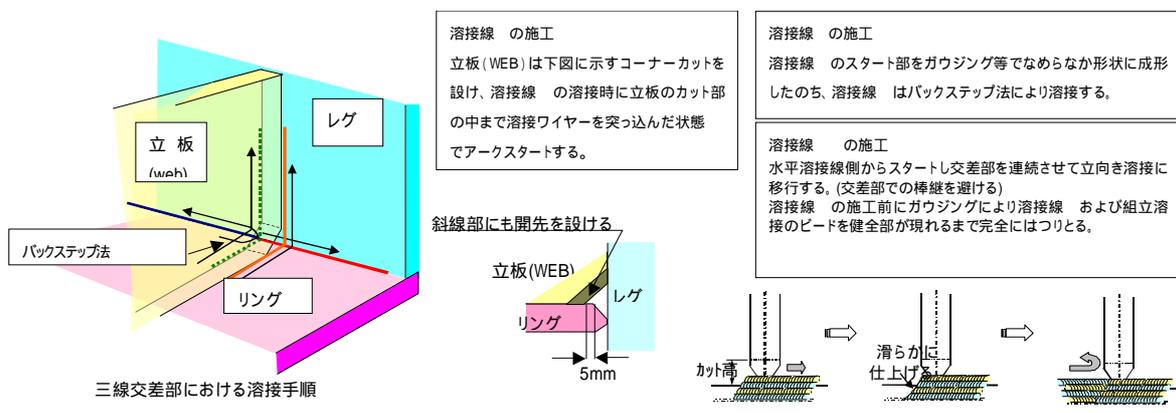


図 11 3線交差部における溶接手順

## 4.4 施工法の事前確認試験

### (1) 溶接施工法試験

溶接施工試験は、製作基準に適合しない溶接法を採用する継手に対して、事前に要求品質を満足できるかを確認するための試験であり、表 2 に示す「土木工事共通仕様書」及び「道路橋示方書 鋼橋編」に規定されている項目について製作工場毎に実施する。さらに、表 2 に加えて、以下の場合についても実施することとしている。

表 2 の「施工実績がない場合」については、開先条件が過去の実績と異なる場合、過去に使用実績のない自動溶接機を用いる場合、材片の組合せ精度を「道路橋示方書」から変更する場合も対象とする。

3 線交差部、鋼管格点部についても、施工方法の妥当性を確認する目的で実施する。

表 2 溶接施工試験の実施条件及び主な実施箇所

	溶接施工試験の実施条件	主な実施箇所
a)	SM570、SMA570W、SM520及びSMA490Wにおいて、1パスの入熱量が7,000J/mmを超える場合	・BHフランジ-ウェブ溶接
b)	SM490、SM490Yにおいて、1パスの入熱量が10,000J/mmを超える場合	・BHフランジ-ウェブ溶接
c)	被覆アーク溶接法(手溶接のみ)、ガスシールドアーク溶接法(CO2ガスあるいはArとCO2の混合ガス)、サブマージアーク溶接法以外の溶接を行う場合	該当なし
d)	鋼橋製作の実績がない場合	該当なし
e)	使用実績のないところから材料供給を受ける場合	該当なし
f)	採用する溶接方法の施工実績がない場合	・桁交差部ウェブ-ウェブ溶接 ・上下部ジャケット一体化レグ-レグ溶接
g)	その他(道路橋示方書の試験実施項目には該当しないが、施工方法の妥当性を確認するために実施する項目)	・レグ頭部リング-レグ溶接 ・下部ジャケット鋼管格点溶接(TKY溶接)

### (2) AUT 性能確認試験

超音波自動探傷試験(AUT)は、溶接部の内部きずに対する試験方法として、「道路橋示方書 鋼橋編」に規定されている非破壊検査法である。本工事に適用する装置の性能を確認することを目的として実施した。

AUT 機種の様子は JIS Z 3070 -1998「鋼溶接部の超音波自動探傷方法」に規定があり、「道路橋示方書 鋼橋編」に「検査対象とする板厚、溶接条件等も考慮して、探傷条件に対して信頼性の確かめられた超音波自動探傷装置によるものとする」との記述があり、本工事で使用予定の AUT 機種に対して、実施設計に基づいた試験体形状及び板厚で人為的にきずを内包した試験体を製作し、実工事の探傷方法を考慮した探傷姿勢及び探傷面で探傷を行った。従来の放射線透過試験(RT)及び手動 UT(MUT)による実きず検出率との比較も行いながら、本工事に要求される品質確保が可能と評価した機種に対して、適

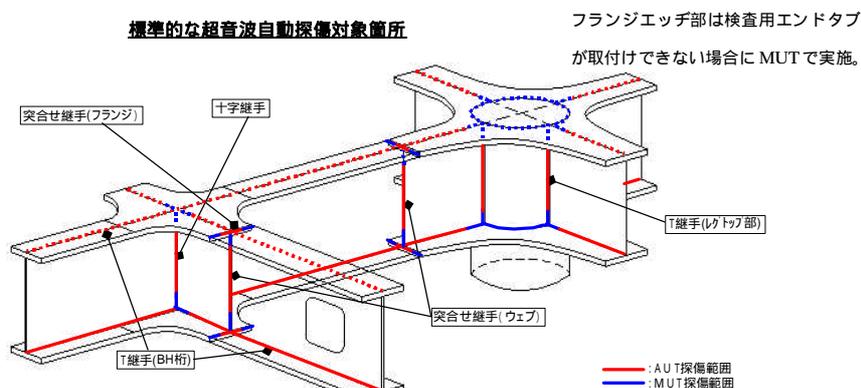


図 12 AUT の標準使用部位

用可能な継手形状・板厚範囲を明確にした。試験にあたっては、試験の厳密性を担保するため、試験体の製作に対して一切の関係者もきず位置を特定出来ない情報管理を実施し、性能確認試験時においては、第三者機関監視のもと、情報の漏洩を防止する処置を取った。図-12にAUTの標準仕様部位を示す。

### (3) 溶接止端処理方法・品質管理要領

溶接止端仕上げの基本は、疲労亀裂の始点となりやすい溶接止端部の表面形状を許容できる範囲内に滑らかに処理し、かつ微小なアンダーカットを完全に除去することであり、「鋼道路橋の疲労設計指針」に種々の方法が規定されている。本工事ではこのうち、グラインダー法及び作業能率が優れている超音波打撃処理法(UIT=Ultrasonic Impact Treatment)を採用する。

止端処理方法の採用にあたっては、以下の手順で施工性を検証し、品質管理基準を策定した。

要求される仕上がり形状と施工方法を明確化する。表-3に要求される止端形状を示す。

実物大試験体により、特に狭隘部での施工性を検証する。図-13にグラインダー法及びUIT法での試験状況を示す。

仕上げ形状を確認するための具体的な品質管理基準を明確にする。図-14に3Rゲージによる止端形状の確認方法を示す。

なお、溶接法によっては、溶接のまま滑らかな止端形状を得られるため、スケール模型により適用溶接法、溶接条件、溶接姿勢を確認した。

表-3 溶接止端部に要求される形状外観

止端部の継手形状区分	施工方法	形状・外観管理要領
なめらかな止端を有する継ぎ手	As-weld、またはガスシールドアーク溶接、TIG溶接等によりなめらかな止端形状とする	・アンダーカットがないこと ・止端部が3R以上のなめらかな形状であること
止端仕上げした継手	グラインダー仕上げ、または超音波打撃(UIT)仕上げにより止端部の形状をなめらかにする	・アンダーカットがないこと ・止端部が3R以上のなめらかな形状であること ・仕上げ残しがないこと ・仕上げ深さが0.5mm以下であること
非仕上げの継手	止端部の処理なし	・道示 17.4.5 による



グラインダー法



UIT法

図-13 止端処理状況

### 3Rゲージの適用例

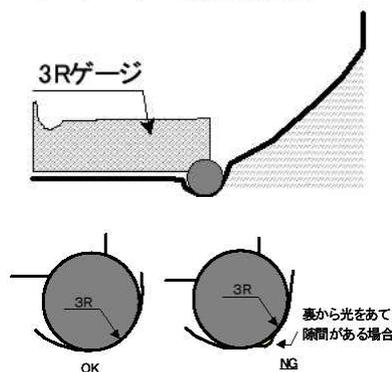


図-14 止端処理部の検査要領

## 5. あとがき

本文では、羽田空港D滑走路における鋼構造物の疲労安全性の確保について、設計の考え方と製作での事前検討の概要について述べた。施工段階においては、設計図面、施工計画書、品質計画書に基づき、製作工場・ヤードにおける自主検査を確実に実施して記録を残し、また、記録に基づいて分析を行い、施工要領を随時修正・改善していくことが重要である。また、品質・出来型記録は維持管理業務にも活用していくため、トレーサビリティの考え方も反映して製作管理を実施する予定である。