

# テーパースタイル鋼管の特長と耐疲労技術について

## Advantages of Nippon Steel's Tapered Steel Tube and Its Fatigue-resistant Technology

近藤 哲己<sup>\*(1)</sup> 杉本 雅一<sup>\*(2)</sup>  
 Tetsumi KONDOH Masakazu SUGIMOTO

### 抄 録

新日本製鐵は温間スピニング加工によるテーパースタイル鋼管の製造技術を開発し、1997年9月同加工法によるテーパースタイル鋼管の製造を開始した。温間スピニング加工法は、様々なテーパースタイル形状の鋼管が製造できる等のメリットがあり、新日本製鐵ではそれを生かしたユニークな商品を開発すると共に、照明柱等の柱状構造物に対する総合的な耐疲労技術を開発してきた。特に、新たに開発した柱状構造物基部の耐疲労構造では画期的な耐疲労性能の改善効果が得られた。本報告では、ユーザーから高い評価を得ている新日本製鐵のテーパースタイル鋼管の特長と柱状構造物に対する耐疲労技術について紹介した。

### Abstract

Since September 1997, Nippon Steel has been producing the tapered steel tubes by its newly invented hot-spinning manufacturing method. Taking advantage of this manufacturing method's capability to create versatile form of tapered configuration, Nippon Steel has developed several unique tubular products and further gave birth to comprehensive fatigue-resistant technology for column structures such as luminaire poles. Best of all, the innovative column base structure has demonstrated landmark performance of fatigue life. This article reports several advantages of Nippon Steel's tapered steel tube products and its fatigue-resistant technology for the column structures.

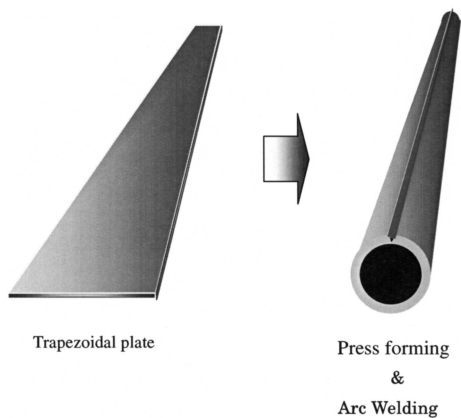
### 1. 緒 言

新日本製鐵は温間スピニング加工によるテーパースタイル鋼管の製造技術を開発し、1997年9月同加工法によるテーパースタイル鋼管の製造を開始した。温間スピニング加工法は、様々なテーパースタイル形状の鋼管が製造できる等の特長があり、新日本製鐵ではそれを生かしたユニークな商品を開発すると共に、照明柱等の柱状構造物に対する耐疲労技術を開発してきた。本報告では、ユーザーから高い評価を得ている新日本製鐵のテーパースタイル鋼管の特長と照明柱を中心に柱状構造物に対する耐疲労技術について紹介する。

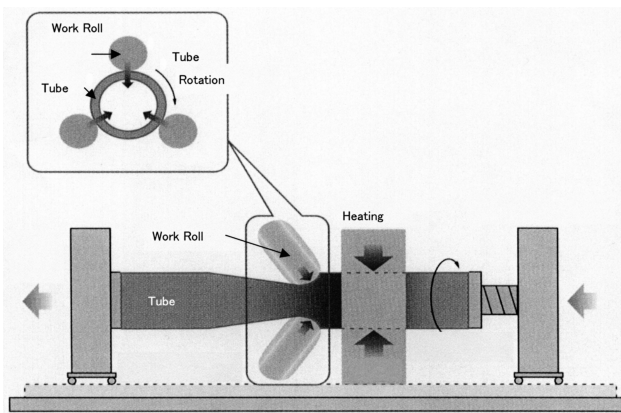
開発してきた。本報告では、ユーザーから高い評価を得ている新日本製鐵のテーパースタイル鋼管の特長と照明柱を中心に柱状構造物に対する耐疲労技術について紹介する。

### 2. 新日本製鐵テーパースタイル鋼管の製造方法

一般にテーパースタイル鋼管は、図1(a)に示すように台形に切断された鋼板をプレス等により円錐状に成形し、衝き合せ部を外側から溶接



(a) 一般的なテーパースタイル鋼管の製造方法  
 Traditional manufacturing process



(b) 温間スピニング加工  
 Hot spinning fabrication

図1 テーパースタイル鋼管の製造方法  
 Manufacturing process of tapered steel tubes

<sup>\*(1)</sup> 鋼管事業部 鋼管営業部 鋼管プロジェクトグループリーダー  
 東京都千代田区大手町2-6-3 〒100-8071 TEL:(03)3275-7899

<sup>\*(2)</sup> 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター

して製造されている。新日本製鐵は、図 1(b)に示すように、加熱した鋼管を、回転する成形ロールで縮径加工することによりテーパ鋼管を製造する技術(温間スピニング加工技術)を開発し、1997年9月よりこの加工法によるテーパ鋼管の製造を開始した。尚、新日本製鐵のテーパ鋼管製造設備においては、加工される鋼管は長手方向に進みながら加熱炉、成形加工ロール(NC制御を実施)を通過し、様々な形状のテーパ鋼管が加工される。

### 3. 温間スピニング加工を活かした商品

温間スピニング加工を採用することにより、上述したテーパ形状の自由度が高いことのみではなく、以下に述べる差厚管や底部二重管のようなユニークなテーパ鋼管の製造が可能である。ここでは、これらのテーパ鋼管の商品としての機能を景観性と強度の改善(軽量化、腐食対応を含む)の観点から紹介する。

#### 3.1 景観性の改善

従来、一般的な道路の照明柱は単一テーパの鋼管が用いられ単調な景観となっていた。近年、照明柱や標識柱を地域固有の形状で統一することによって、歴史や文化等地域固有の特色を演出することが行われている。本加工法によれば、写真 1 に示すように曲線を含む様々なテーパ形状の鋼管を経済的に製造することができることから、上記の地域固有の景観性を持った照明柱への対応が容易である。写真 2 は柱身の胴部にふくらみをつけたエンタシス形状の照明柱の例で、景観性の改善に寄与している。

#### 3.2 強度の改善

新日本製鐵の温間スピニング加工設備では、同一のテーパ鋼管の中で肉厚を徐々に変化させた鋼管(差厚管)や、鋼管底部の内側に短管が鋼管本体により強く締結された二重管(底部二重管)の製造が可能である。これらの鋼管は負荷応力や腐食の点で最も不利な照明柱の基部改善に極めて有効であり、図 2(a)にその効果をまとめた。また、図 2(b)に示すとおり、照明柱の開口部の強度対策としてテーパ形状の自由度と差厚管が効果的である。



写真 2 エンタシス形状の照明柱  
Entasis tapered lamp post

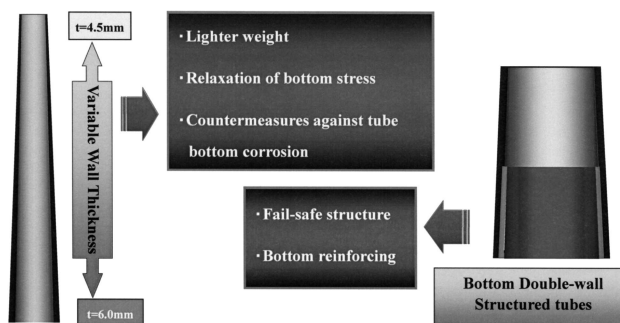


図 2(a) 差厚鋼管と底部二重管による強度改善対策  
Strength improvement by the variable wall thickness and bottom double-wall structured tubes

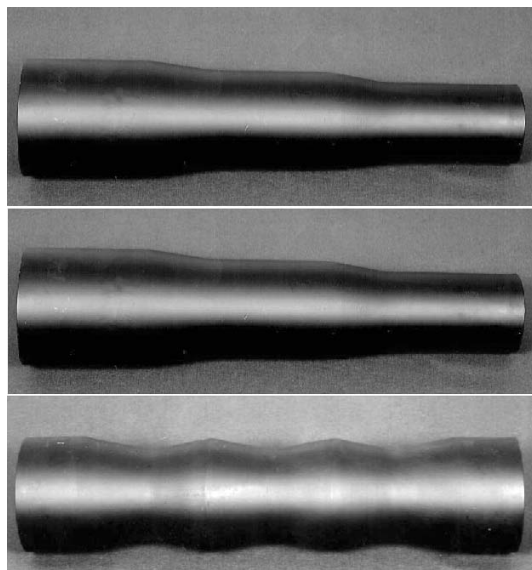


写真 1 テーパ形状のサンプル  
Samples of the taper configurations

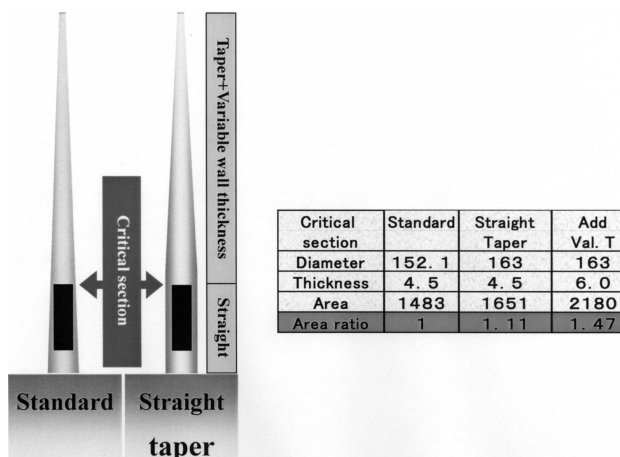


図 2(b) テーパ形状の自由度と差厚管による開口部の強度向上対策  
Measures for openings applying the freedom of taper and variable wall thickness tube

### 4. 照明柱等柱状構造物の疲労技術について

材料に一度加えただけでは壊れない力でも、繰返すと材料に亀裂が発生し破壊に至る現象が疲労破壊であり、機械や構造物の破壊事故原因の多くは疲労破壊が関係していると言われている。我国や米

国を始めとする先進諸国では建設後長年に亘り繰返し荷重を受けたことによる構造物の疲労問題がクローズアップされ、照明柱や標識柱等の道路付帯設備においても、風や道路振動に起因する高頻度の繰返し荷重により疲労亀裂の発生に至った事例も見られる。新日本製鐵は、スピニング加工で製造するテーパ鋼管の特長を活かした疲労対策に加え、疲労亀裂の発生事例の多い柱基部についても画期的な耐疲労強度を有する構造を開発した。以下にそれらの耐疲労技術を紹介する。

#### 4.1 照明柱の疲労亀裂発生箇所と疲労対策

照明柱の疲労亀裂は図3に示すように、照明柱の基部、開口部のコーナー、灯具支持アームの基部で発生している。疲労亀裂は、図3の写真に照明柱基部に繰返し荷重を加えて発生させた例を示すように、溶接部の境界から発生し周方向に伝播することが多い。

一方、照明柱の疲労対策は疲労亀裂の発生する箇所の耐疲労強度を向上させることは勿論、共振現象の防止や事故防止の観点からはフェールセーフ対策の実施が有効である。

#### 4.2 照明柱基部の耐疲労強度向上対策

照明柱を橋梁・高架上に立てる場合、鋼管を溶接したベースプレート راボルトにより基礎に固定する方法が多く用いられている。この構造では、照明柱が受ける風力や道路振動による慣性力等に起因するモーメントにベースプレートが耐えられないことや、溶接部に大きな応力がかかることから一般には台形のリブを溶接して補強している(図4)。

ところが、台形リブ頂部の溶接部近傍に前項で紹介した疲労亀裂が発生した事例があり対策が急がれていた。新日本製鐵は、照明柱の製造及び性能保証の容易さの点から特殊な材質、溶接法や溶接後

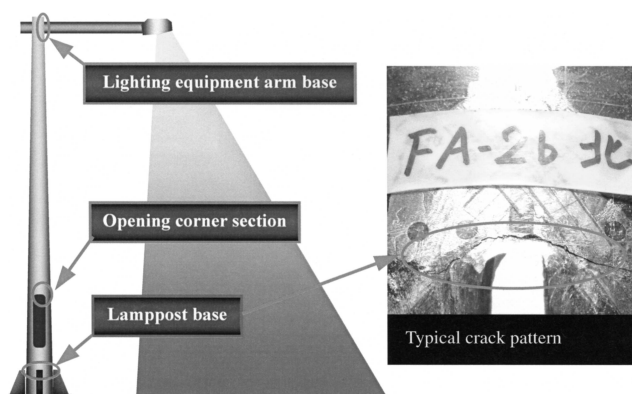


図3 照明柱における疲労亀裂発生危険箇所  
Critical zones exposed to the danger of fatigue cracking

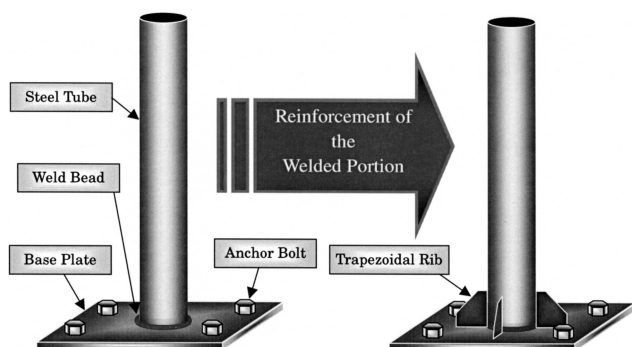


図4 ベースプレート式基部の台形リブによる補強  
Reinforcement of the tube-base plate structure by the trapezoidal ribs

の処理を用いない方法に絞って対策検討を進めた結果、従来に比較して画期的な耐疲労強度を有する基部構造(U字リブ構造)の開発に成功した。このU字リブ構造は写真3に示すように従来の台形のリブに代えてU字形に曲げたリブを鋼管に溶接した構造である。

この構造の耐疲労強度を評価するために実施した疲労試験結果と(社)日本鋼構造協会編『鋼構造物の疲労設計指針・同解説<sup>1)</sup>』で規定されている各疲労強度等級の疲労設計曲線を合わせて図5に示す。図5では縦軸は応力振幅、横軸は応力の繰返し回数を示し、図上の点または曲線はある応力を繰返し負荷した時の疲労亀裂が発生するまでの繰返し回数を示している。この結果から、従来のリブ構造では疲労強度等級はG等級、U字リブ構造では概ねB等級であることを示しており、例えば160MPaの応力振幅であれば従来リブ(G等級)では6万回で疲労亀裂が発生するが、U字リブ(B等級)を採用することにより繰返し回数が180万回まで延長することを示している。

上述のようにU字リブは画期的な耐疲労性能を有していることが実験的に検証されたが、再現性の観点からは理論的に耐疲労性能向上の要因を検証する必要があるため以下の調査検証を実施した。

#### (1) リブ頂部の応力集中について

台形リブとU字リブを取付けた鋼管に荷重をかけた時のリブ先端近傍の応力分布を測定した結果を図6に示す。従来リブに比較してリブ先端での応力集中が著しく緩和されており、この結果は有限要素法により解析的にも確認した。



写真3 U字リブ構造  
U shaped rib structure

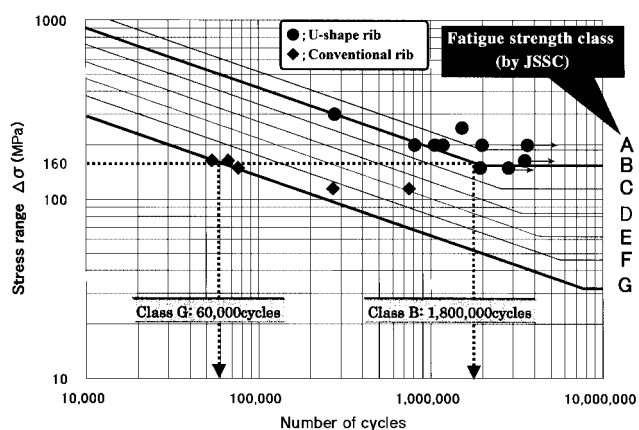


図5 柱基部構造の疲労試験結果(JSSC:(社)日本鋼構造協会)  
The fatigue test result of the pole base structures (JSSC: Japanese Society of Steel Construction)

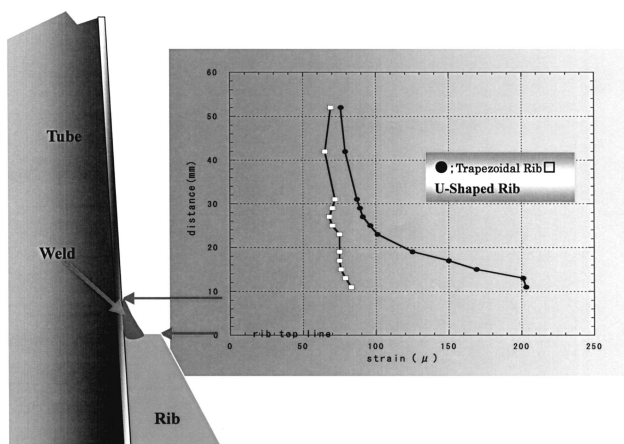


図6 応力集中係数比較  
Comparison of stress concentration factor

(2) リブ頂部近傍の残留応力について

(社)日本鋼構造協会編『鋼構造物の疲労設計指針・同解説<sup>1)</sup>』に示された継手強度等級分類から抜粋した表1に示す通りB等級の継手は非溶接継手であり、応力集中緩和のみでは、U字リブのような溶接継手でB等級の継手強度等級を得ることは困難と考えられるため、疲労強度に大きな影響を与える残留応力を計測した。

残留応力は、リブを溶接した試験体の溶接部近傍に歪ゲージを貼りつけた後、水冷式切断機にてゲージ毎の小片に分割し分割前後の

表1 継手と疲労強度分類(社)日本鋼構造協会編『鋼構造物の疲労設計指針・同解説』より抜粋)

The fatigue strength class of joints ("Steel-structure Fatigue Design Guideline and Its Commentary" by the Japanese Society of Steel Construction)

Class	B	F	G
Joint	Non-weld joint Seamless tubes	Butt weld joint (One-side welding)	Gusset weld joint

歪の変化により計測した。図7に示すように従来リブでは溶接部上方近傍に大きな引張応力が残留し、一方U字リブではリブの溶接部近傍が圧縮残留応力で囲まれた状態であることがわかる。一般に溶接部の周辺は引張応力が残留することが知られており、U字リブの溶接部周辺の圧縮残留応力は従来の知見と異なった結果となっている。

この原因を調査するため、溶接後の変形を有限要素法により解析した。その結果を図8に示す。リブの溶接によりリブが鋼管表面を押し込むように鋼管が変形し、その結果U字リブでは、リブ溶接部近傍の鋼管表面は鋼管の外側が圧縮されるように局部的に曲がっていることがわかった。このようにU字リブ構造は、リブ先端部形状による応力集中の緩和とリブ溶接に伴う鋼管の変形による溶接部周辺の圧縮残留応力の相互作用により画期的な耐疲労強度が得られていることが解明された。

U字リブ構造の一例を図9に示す。使用している材質は一般的なSTK400及SS400の鋼材であり、リブの溶接も従来と同様の隅肉溶接で、リブの取付け精度についてもリブ溶接時の肌隙を2mm程度にとって疲労試験を実施したが、耐疲労強度に殆ど影響は見られない等製作も容易である。また、一般に耐疲労対策として実施される溶接端部のグラインダー等による平滑化は、圧縮残留応力の効果を残す観点から極端なビード形状不良の場合を除き不要となる。

尚、本構造は平成14年度に土木学会より技術開発賞を受賞した。

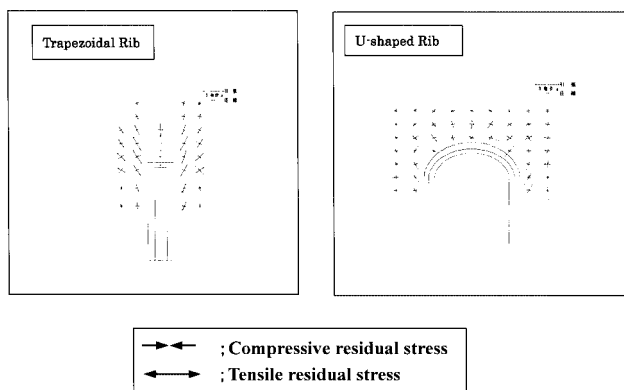
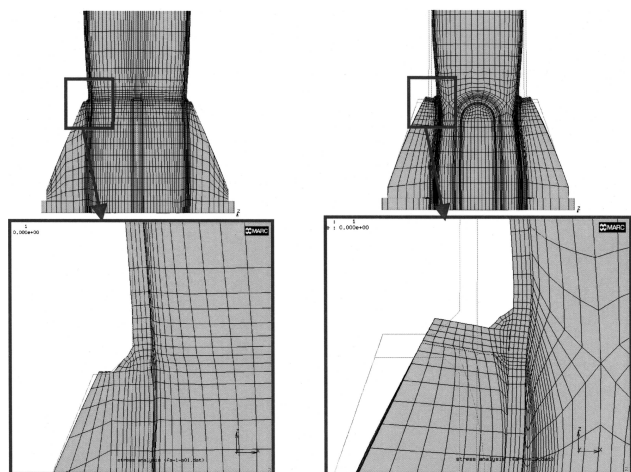
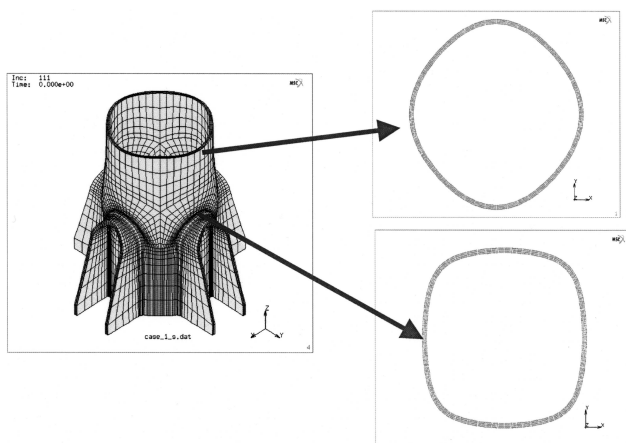


図7 残留応力比較  
Comparison of weld residual stresses



(a) リブの溶接による鋼管の変形(縦断面)



(b) U字リブ溶接による鋼管変形(横断面)

Deformation of the steel tube caused by rib welding (vertical section) Deformation of the steel tube caused by U-shaped rib welding (cross section)

図8 リブの溶接による鋼管の変形  
Deformation of the steel tube caused by rib welding

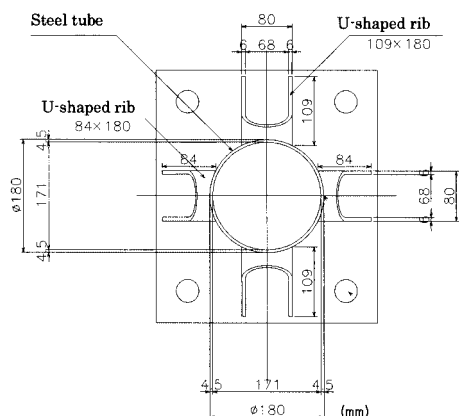
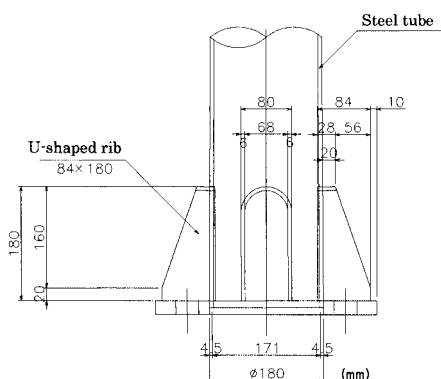


図9 U字リブ構造の例  
Detail example of the U-shaped rib structure

#### 4.3 開口部の疲労対策

照明柱では安定器等を照明柱内に設置するため開口部を設けている場合が多い。開口部では開口による断面欠損に加え、開口部コーナーや蓋取付け枠の溶接部コーナーへの応力集中により疲労亀裂が発生する場合がある。断面の欠損対策としては、既に述べた通り開口部が有る部分の外径拡大、厚肉化が有効である。コーナー部の応力集中に対してはコーナー曲率半径を極力大きくすることが有効である。

#### 4.4 共振現象の防止対策

交通振動や風による外力の振動数と照明柱の固有振動数が一致すると共振現象が発生する。共振現象が発生すると照明柱は激しく振動するため、照明柱には非常に大きな応力が高い頻度で加わり短期間で破壊に至る場合がある。従って、共振現象が起こる可能性がある場合には照明柱の固有振動数を交通振動等の振動数とずらす等の対策により共振現象を防止することが必要である。

照明柱の固有振動数は主に、柱の高さ、アームの長さ、柱の断面剛性、質量で決定される。一般に柱の高さや取付け器具の質量は路面の照度等の条件で決まり、かつ柱先端と基部の外径も道路や器具により決まるため、照明柱の固有振動数は肉厚の高さ方向の分布と先端と基部を除いた外径の分布のみで設計する必要がある。従来のプレス成形によるテーパ鋼管の製造方法では、基部と頂部の外径が決まると、単一テーパのため外径の分布の自由度はなく固有振動数の設計には限界がある。一方、新日本製鐵のテーパ鋼管では外径分布及び肉厚分布の自由度が高いため、例えば図10に示すような形状の変更により固有振動数を変えることが可能であり、固有振動数設計の幅が大きく、道路振動等の振動数から照明柱の固有振動数をずらせる範囲が大きい。

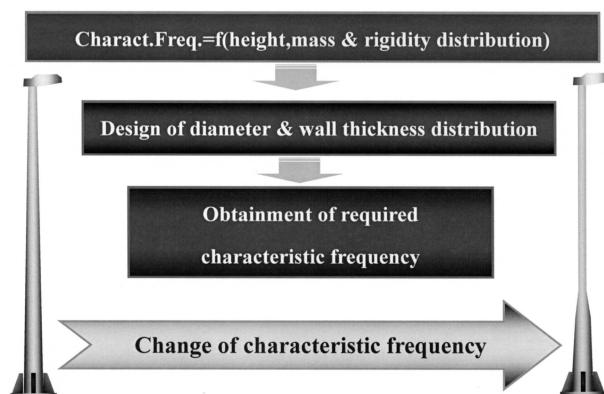


図10 固有振動数の設計  
Design of characteristic frequency

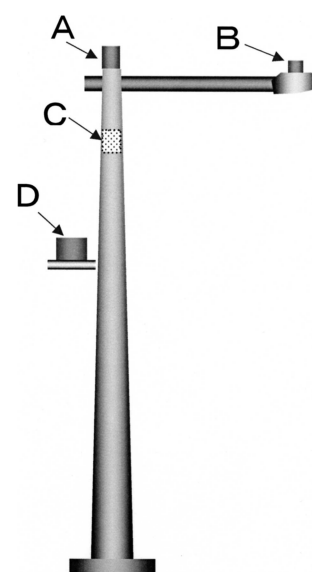


図11 制振装置の設置例  
Examples of the installation of vibration control devices

一方、照明柱の形状変更による固有振動数をずらす対策ができない場合、振動源の振動数が特定できない場合や高次の振動モードへの対応が必要な場合には、制振装置を取付けることにより効果的に共振現象を防止できる。新日本製鐵では図11に示すように振動を防止する対象の振動モードや景観性等から設置する位置を決められるコンパクトな制振装置の技術を保有している。

制振装置の効果を確認するため、制振装置を取付けた照明柱と取付けていない両照明柱に、固有振動数に当る振動数の正弦波(加速度20gal)を照明柱の基盤から入力し、共振現象が発現した後に入力を停止した時の照明柱頂部加速度の経時変化を調べた。結果を図12に示す。制振装置の無い照明柱では共振現象により入力加速度の約60倍以上の加速度が発生しており、入力停止後の減衰も極めて緩慢である。一方、制振装置を設置した照明柱では共振による極端な加速度は認められず減衰も速やかであり、本制振装置が共振防止に極めて有効であることがわかる。

#### 4.5 フェールセーフ対策

道路上の柱状構造物では倒壊した時に大きな被害が予想されるため、万一柱に亀裂が発生した場合でもすぐには倒壊に至らず、倒壊するまでに亀裂の入った構造物を代替えることにより安全を確保することが望まれる。

先に紹介した底部二重管を用いると、外側の柱状構造物本体に亀

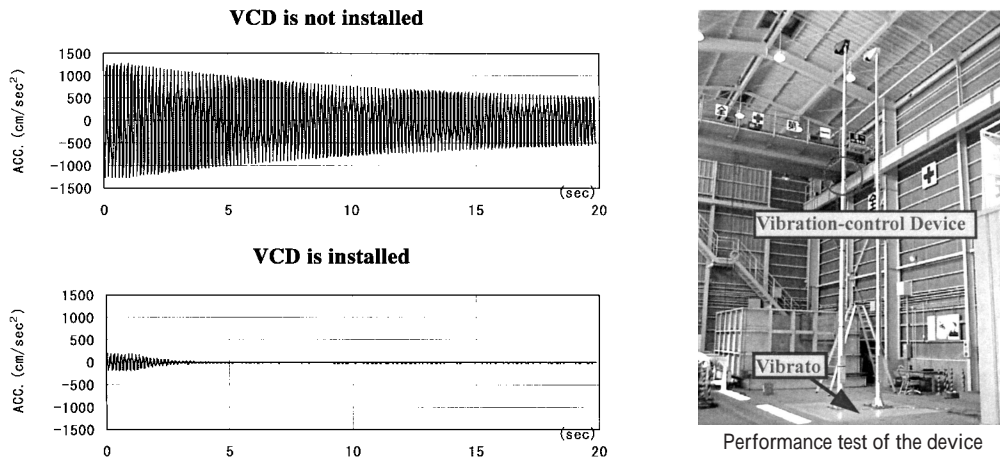


図12 制振装置の効果  
The effect of the vibration-control device

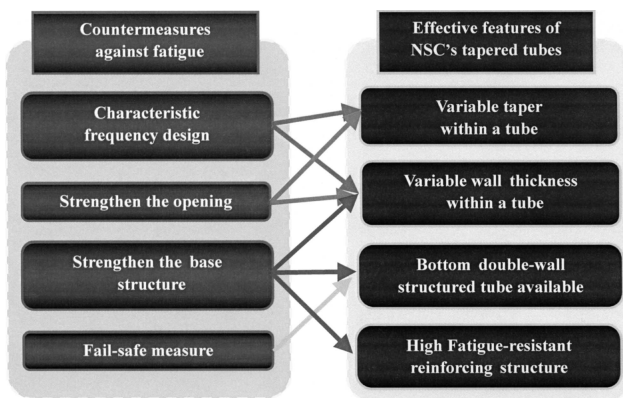


図13 疲労対策と新日本製鐵テーパー鋼管の特長  
Effective features for fatigue resistance

裂が入った場合でも短期的には内側の鋼管で支えることにより倒壊を防止することができ、安全の確保に寄与できる。但し、この対策は柱状構造物の基部の確実な点検でフォローする必要がある。

#### 4.6 疲労対策技術のまとめ

以上のように、柱状構造物の疲労対策に新日本製鐵のテーパー鋼管に関する技術は極めて有効に使うことができる。図13に疲労対策と新日本製鐵のテーパー鋼管に関する技術の関係をまとめた。

## 5. 結 言

新日本製鐵のテーパー鋼管は、スピニング加工法を適用し、耐疲労技術を開発することにより、照明柱を始めとする柱状構造物の技術的改善に役立つものと考えている。

#### 参考文献

- 1) (社)日本鋼構協会編:鋼構造物の疲労設計指針・同解説 初版 東京 技報堂出版,1993 p.5