

道路付属物の強度設計に関する基礎的検討

A Study on Strength Design of Adjunct Facilities of Highway

北海道開発局 開発土木研究所 正員 三田村 浩 (Hiroshi Mitamura)
 北海道開発コンサルタント (株) ○正員 小林 竜太 (Ryuta Kobayashi)
 北海道開発コンサルタント (株) 正員 菅原 登志也 (Toshiya Sugawara)
 室蘭工業大学 正員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

近年、道路付属物である鋼管を主構造とした照明柱や標識柱の損傷異常が多数報告されている。これは長期間にわたって繰り返し作用する風や通行車両によって振動が励起され、疲労破壊を起こしたためと推察されている。調査結果によれば、損傷が発生した照明柱の亀裂発生箇所は、安定器取付用開口部に補強材として設置されるフェイスプレートの隅角部や支柱基部の補強リブ先端であり、これらはいずれも応力集中度が高い部位である。また、この種の内空円形断面を有する鋼構造物は溶接によりそれ自身の形状を確保しているが、溶接時に発生する熱応力と製作時における塑性曲げ加工（プレス成形加工）による内部残留応力が初期状態で内在しているため、これが更なる金属疲労を助長したとの見解もある。

しかしながら、一般的な設計においては風荷重のみを考慮した静的弾性設計法で行われており、これらの現象を踏まえた照査は全く行われていないのが現状である。また、残留応力が内在する状態下における疲労強度の理論的評価手法も未だ確立されていない。従って、こうした状況において疲労強度を定量的に把握するためには、実規模試験体を用いた疲労試験を実施することが必要不可欠であり、これらを反映した合理的な設計手法の確立が望まれている。

このような観点から、本論文では、疲労試験を実施するに先立ち、対象とする試験体の基礎的な構造特性を把握することを目的として、道路橋に設置される標準的構造を有する照明柱を対象に 1) 支柱基部や開口部周りの構造、2) 補強リブプレート形状、3) 支柱母材板厚が応力集中度に及ぼす影響を数値解析的に検証することとした。なお、本数値解析においては、支柱基部近傍の応力集中領域と、発生応力度の低減効果を確認することが目的であり、本研究ではそれらを静的弾性解析によって検証することとした。本数値解析には、汎用の構造解析プログラムである ABAQUS¹⁾ を用いている。

2. 試験体の概要

本研究で対象とした標準型の照明柱は、図-1に示すような高さ 11.890m の鋼製照明用丸形テーパーポールである。試験体の材質を表-1に示すが、照明具取付用アームのみに STK400（一般構造用炭素鋼管：JIS G 3444）を用い、その他は全て SS400（一般構造用圧延鋼材：JIS G 3101）を用いて製作している。支柱母材は板厚 6mm、直径が基部において $\phi 255$ であり、上方に向かいテーパー率 1% で縮小している。支柱上端には長さ 2400mm、 $\phi 101.6$ の照明具取付用アームが設置されており、支柱基部より 600mm の位置には 500×130mm の開口部を有している。また、支柱基部には板厚 12mm、高さ 180mm の補強リブプレートが円周方向に計 8 箇所設置されており、これらはいずれも溶接接合により支柱及びベースプレート（板厚 25mm）に固定されている。さらに、開口部周りには補強用フェイスプレート（580×175mm）を取付けており、これも補強リブプレートと同様、支柱に溶接接合によって固定されている。

表-1 試験体の材質

部材名	形状及び板厚	材質
支柱	PL-6	SS400
補強リブプレート	PL-12	SS400
ベースプレート	PL-25	SS400
フェイスプレート	PL-6	SS400
照明具取付用アーム	P. $\phi 101.6 \times 4.2$	STK400

3. 数値解析条件および仮定

3.1 数値解析ケース

表-2に数値解析ケースの一覧を示す。本研究においては図-1に示した標準型の照明柱をケース1として、その他に応力集中の低減効果を期待した計3タイプの構

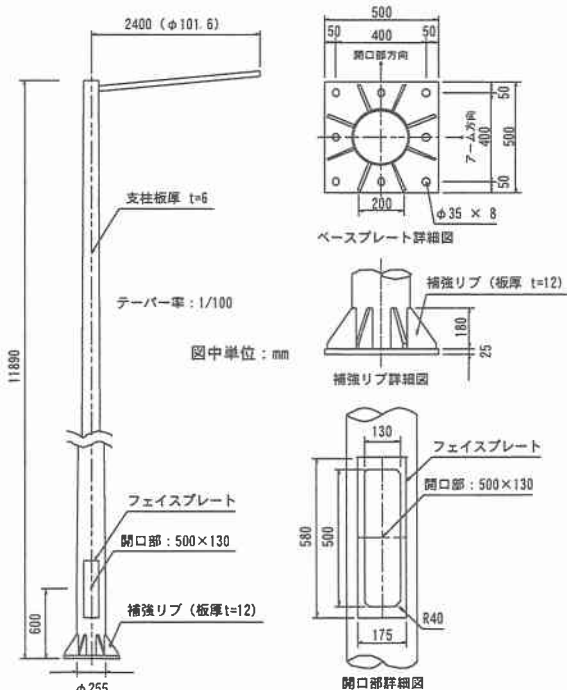
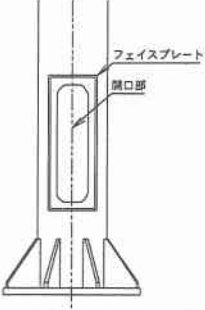
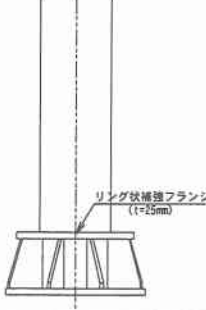
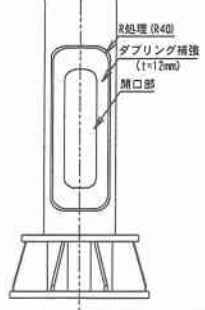
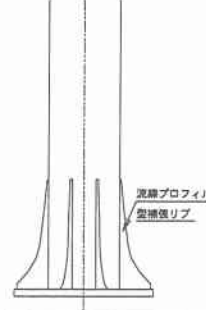
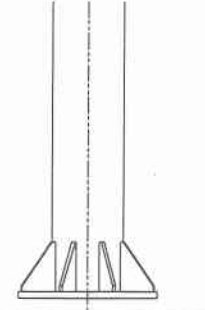


図-1 標準型照明柱の形状寸法

表－2 数値解析ケース一覧

ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5
標準型照明柱の場合	リブ上にリング状フランジを設置した場合	開口部をダブリング補強した場合	流線プロファイル型補強リブを設置した場合	ケース1において開口部を撤去した場合
				

造モデルを作成した。すなわち、ケース2は、支柱基部の補強リブ上に板厚 25mm のリング状の補強フランジを設置した場合である。これは、補強リブ先端における応力集中の緩和を意図したものであり、リブ先端とリブーリブ中間部の固定剛性差を無くし、発生応力の分散を期待するものである。ケース3は、開口部周辺を板厚 12mm の鋼板によりダブリング補強を行い、また補強箇所のコーナー部に R 処理 (R=40) を施した場合である。これは、開口部周りの剛性を増加させることにより発生応力の低減を計るものであり、さらに隅角部に曲率を設けることにより、コーナー部の応力集中を緩和しようとするものである。ケース4は、支柱基部の補強リブプレート形状を滑らかな曲線を有する流線プロファイル形状とした場合である。これは、標準型の照明柱ではリブ高が 180mm と低く、さらに上方に向かって直線的に形状が変化しているため、これを流線形状に変更し、かつリブ高を高くすることにより応力の流れをスムーズにして応力集中を緩和するという考えに基づいたものである。なお、ケース5は、ケース1における開口部を撤去した場合であり、ケース2におけるリング状補強フランジ及びケース4の流線プロファイル型補強リブの影響度合いを検証することを目的として設定した。

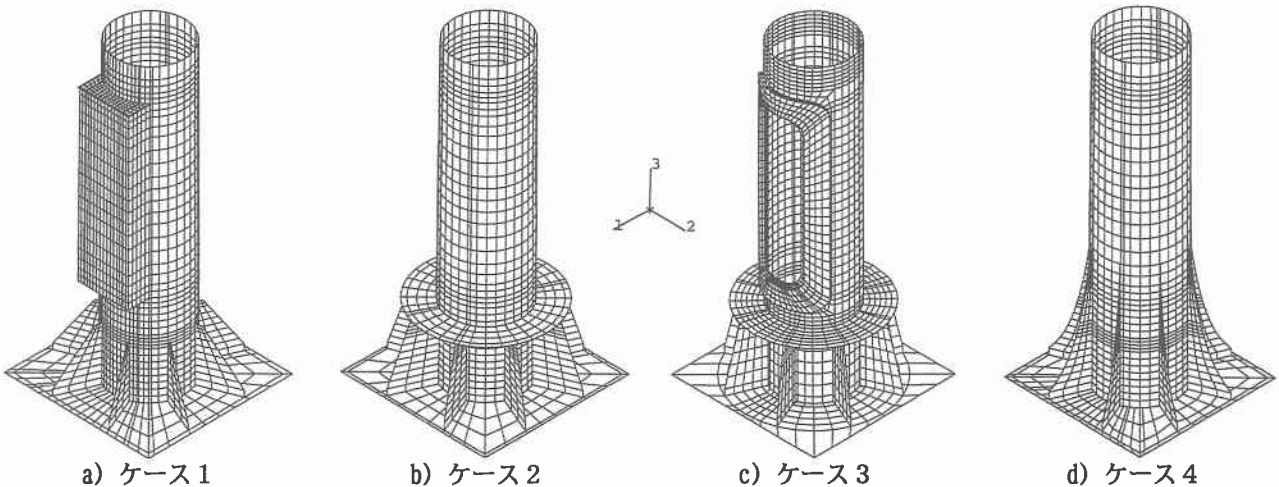
3. 2 数値解析モデル

図－2にケース1からケース4における支柱基部近傍の要素分割図を示す。(ケース5に関しては、ケース1

において開口部のみを撤去したモデルであるため、ここでは省略することとする。) 適用した有限要素タイプは、照明具取付用アームを除き全て4節点シェル要素を用い、照明具取付用アームは簡略化して梁要素を用いてモデル化を行った。なお、ケース3における開口部のダブリング補強要素に関しては、3次元固体要素を用いてモデル化を行っている。表－3には各ケースの解析モデルにおける総節点数、総要素数を示している。境界条件は支柱基部のベースプレートを完全固定とした。また、ケース3におけるダブリング補強部は周溶接効果を再現するため、補強用鋼板の最外周及び最内周部の節点のみを拘束し、その以外の領域に関しては支柱と鋼板の要素間に接触面を定義することでモデル化することとした。なお、数値解析上の材料物性値は、いずれの部材に関しても静的な公称材料定数(弾性係数 $E=2.1 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$)を用いることとした。

表－3 各ケースの総節点数及び総要素数

解析ケース	総節点数	総要素数
ケース1	4,009	4,003
ケース2	2,987	2,951
ケース3	5,272	4,899
ケース4	3,110	3,099
ケース5	2,822	2,811



図－2 各ケースにおける支柱基部近傍の要素分割図

3. 3 入力風荷重強度の設定

本数値解析において考慮した風荷重強度は、耐風設計基準²⁾及びJIL基準^{3), 4)}を参考にして基準風速を $v=50\text{m/sec}$ と仮定し、これに補正係数を乗じて設計基準風速を設定した。なお、荷重強度は仮定した設計基準風速から速度圧 q を算出して、さらに断面形状別に定義される風力係数を乗じて設定することとした。すなわち、

$$P = q C = \frac{1}{2} \rho V^2 C = \frac{V^2}{16} C$$

P : 風荷重 (kgf/m^2)

q : 速度圧 (kgf/m^2)

ρ : 空気密度 ($0.125 \text{ kgf s}^2/\text{m}^4$)

V : 設計基準風速 ($V=v\alpha : \text{m/sec}$)

C : 風力係数 (円形断面: $C=0.7$)

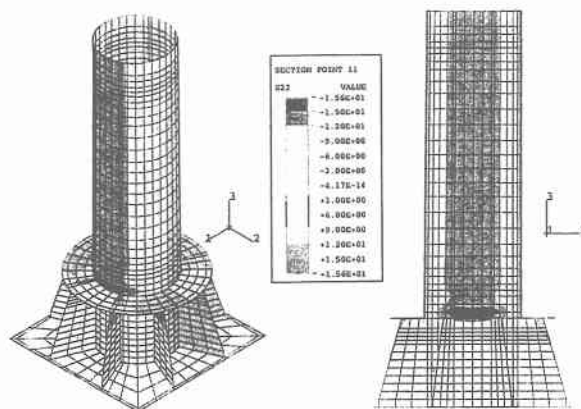
α : 補正係数 ($\alpha=1.428$)

$$P = \frac{(1.428 \times 50)^2}{16} \times 0.7 = 223 \text{ kgf/m}^2$$

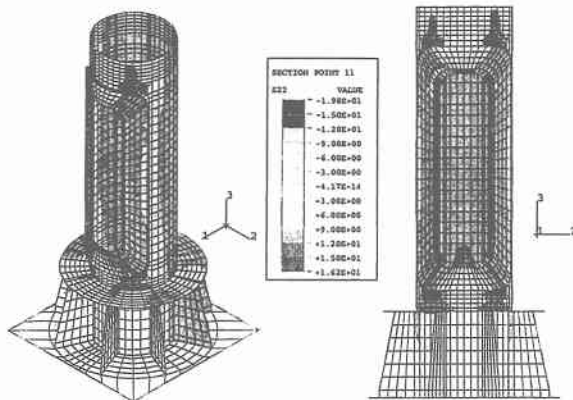
なお、上記の風荷重は、解析対象が曲面形状を有していることから、その曲面上に適切に作用させることが困難であるため、支柱内部に低剛性の荷重載荷用プレート要素をモデル化し、その要素上に等分布荷重を作用させることとした。ここでは、荷重載荷方向を開口面に対して垂直(要素分割図における1軸方向)で、かつ開口側が引張りとなる方向のみに限定した。

4. 数値解析結果

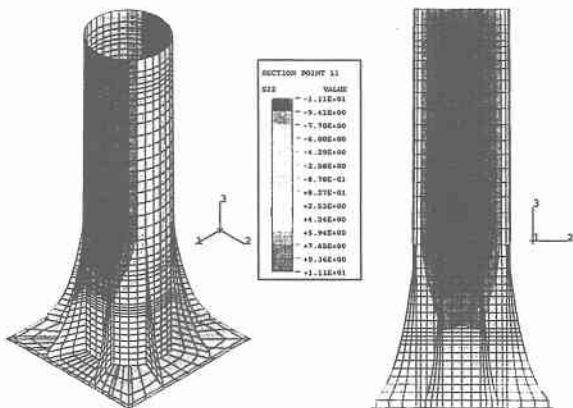
図-3に、各ケースの高さ方向応力成分に着目した等色分布図を示す。図中の単位は kgf/mm^2 であり、赤色が引張領域、青色が圧縮領域を表している。なお、本論文では予備解析により高さ方向応力成分が円周方向応力よりも支配的であることを確認していることより、以後の比較検討を高さ方向応力のみに着目して行うこととする。ケース1の標準型照明柱に着目すると、フェイスプレートの隅角部周辺に 2400 kgf/cm^2 程度の引張応力が集中して発生しており、また、支柱基部の補強リブ先端においても約 1800 kgf/cm^2 の引張応力が局所的に発生していることがわかる。従って、調査結果におけるフェイスプレートのコーナー部あるいは補強リブ先端に亀裂が発生しているという事実は、本数値解析結果からも類推される。



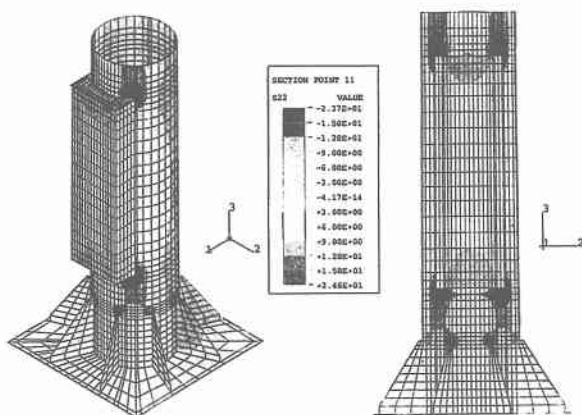
ケース 2



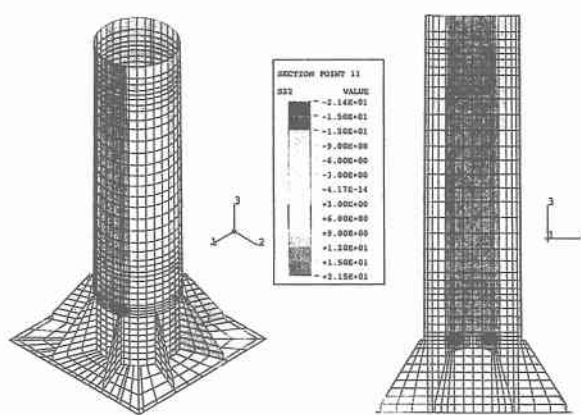
ケース 3



ケース 4



ケース 1



ケース 5

図-3 各ケースにおける高さ方向応力分布図 (単位: kgf/mm^2)

補強リブ上にリング状フランジを設置したケース2に着目すると、フランジ上で 1500kgf/cm^2 程度の引張応力が発生しているが、リブ先端における応力集中が緩和され、その発生領域も広く分散されていることがわかる。これは、リブが設置されている箇所とその中間部で曲げ剛性に極端な差があるために応力集中を引き起こすが、円周方向に連続したフランジプレートを設置することによって剛性差を小さくすることができ、応力が分散されるためと考えられる。なお、ケース5におけるリブ直上発生応力度との定量的な比較を行うと、約 30% 程度の応力低減が認められる。ケース3において、まずリブ直上の発生応力分布に着目すると、ケース1と比較してフランジプレートを設置しているにも関わらず、それほど有効な応力分散効果が発揮されていない。一方、開口部周辺に着目すると、隅角部において 1600kgf/cm^2 程度の応力が発生しており、ダブリング補強及び隅角部の R 処理効果によりケース1に対して約 40% の応力低減が認められる。一般的に応力集中問題においては R 処理の半径や数値解析上の要素分割の程度に影響を受けるものと考えられるが、本数値解析結果からは隅角部の R 処理による定性的な応力集中低減効果は確認できたものと判断される。最後に、補強リブを流線プロファイル形状にしたケース4に着目すると、これまで見られた局所的な応力集中は見られず、連続的で様な応力分布性状を示していることがわかる。これは、リブ形状を滑らかな曲線形状に変更することによって急激な剛性変化を防ぎ、応力の流れをスムーズにすることが可能であることを意味している。この結果、発生応力が最大で 1100kgf/cm^2 程度とケース5と比較して約 50% の低減効果が認められた。

5. 支柱母材板厚の影響

これまでの、いずれのケースにおいても支柱母材の板厚を一定として検討を行ってきた。しかしながら、現状の試験体においては支柱板厚が $t=6\text{mm}$ と比較的薄いことから、支柱母材の板厚を増加させることも発生応力の低減を計る有効な手段として考えられる。従って、ここでは支柱母材の板厚を $t=10\text{mm}$ と厚くした場合における応力低減効果を数値解析的に検証することとした。なお、本検討に用いた数値解析モデルは、開口部周りにおける応力低減効果を把握するため、ケース1及びケース3のモデルを適用することとした。

図-4にそれぞれケース1及びケース3における板厚 $t=10\text{mm}$ とした場合の高さ方向応力分布図を示す。図より、ケース1に着目すると、開口部周りに発生していた 2400kgf/cm^2 程度の引張応力が約 1700kgf/cm^2 に低減されており、その領域も縮小されていることがわかる。また、ケース3においても、現状の板厚で開口部周りに発生していた 1600kgf/cm^2 程度の引張応力が 1100kgf/cm^2 に低減しており、いずれのケースにおいても現状の板厚 ($t=6\text{mm}$) の場合に対して約 30% の応力低減効果があることが確認された。

6. まとめ

本論文では、照明柱の基礎的な構造特性を把握することを目的として、標準的構造を有する照明柱を対象に、支柱基部近傍の構造、補強リブプレートの形状及び支柱

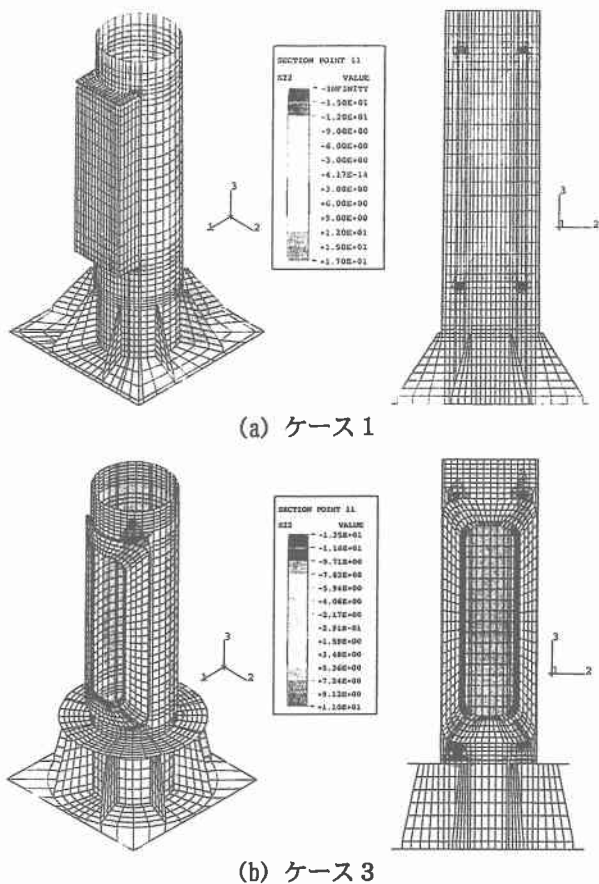


図-4 支柱板厚を増加させた場合の高さ方向応力分布 (板厚 $t=10\text{mm}$, 単位: kgf/mm^2)

母材の板厚が応力集中度に及ぼす影響を数値解析的に検証した。本研究によって得られた結果を要約すると、

- 1) 標準型照明柱は、フェイスプレートの隅角部周辺に 2400kgf/cm^2 程度、支柱基部の補強リブ先端で 1800kgf/cm^2 程度の局所的な応力が発生する。
- 2) 補強リブプレートにリング状フランジを設置した場合には、リブ先端における応力集中度が緩和され、またその領域も広く分散される。フランジを設置しない場合に対し約 30% の応力低減効果が得られる。
- 3) 開口部をダブリング補強する場合には、隅角部 R 処理効果も含めて約 40% の応力低減効果が得られる。
- 4) 補強リブプレートを流線プロファイル形状とした場合には、局所的な応力集中は発生せず、連続的で様な応力分布となる。標準型リブ形状の場合と比較して発生応力は約 50% に低減される。
- 5) 支柱母材板厚を $t=10\text{mm}$ に増加した場合には、作用応力が 30% 程度低減され、発生領域も縮小される。

参考文献

- 1) ABAQUS/Standard User's Manual, Ver. 5. 6, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., (1987)
- 2) 耐風設計基準・同解説 (1976), 本州四国連絡橋公団, 昭和 51 年 3 月
- 3) 照明用テーバーポール (鋼製), JIL1001-1966, 日本照明器具工業会
- 4) 照明用ポールの強度計算基準, JIL1003-1987, 日本照明器具工業会