

1. はじめに

近年、道路照明柱を固定する際に用いられるアンカーボルトは図-1 のように鋼材とコンクリートの境界部において腐食が激しく進行している事例が確認されている。また、道路照明柱には風荷重や地震荷重などの外力が作用し、これらの外的要因により溶接止端から疲労き裂が発生している事例や照明柱の開口部が座屈変形してしまう事例¹⁾がある。しかし、道路照明柱の溶接継手部に生じる応力とアンカーボルトの疲労耐久性やアンカーボルトが腐食減肉した場合の道路照明柱構造とアンカーボルトの耐久性の関係はわかっておらず、腐食したアンカーボルトに対する診断基準は確立されていない。

そこで本研究では、道路照明柱の風作用による振動特性を実照明柱の現地計測や固有値解析により明らかにし、FEM 解析を用いて腐食したアンカーボルトを有する照明柱の溶接継手部とアンカーボルトに発生する応力の比較と疲労耐久性の比較を行い、地震時を想定した変位を与えた場合の道路照明柱と腐食したアンカーボルトの耐久性能を明らかにする。

2. 風荷重による道路照明柱構造の振動特性と疲労特性

2.1 風による実照明柱の振動特性

照明柱は1本のパイプで支持されており、渦励振が発生しやすい典型的な構造であるため、風作用により照明柱が振動する。そこで、照明柱の振動特性を明らかにするために、応力計測と加速度計測により照明柱の振動モードを明らかにする。

2.1.1 応力と加速度計測の方法

計測対象としたアルミ製照明柱の寸法を図-3 に示す。対象照明柱は離島架橋上に設置されており、高さ10m、基部の管径225mm、照明部の管径88mm、板厚4mmのアルミ製(テーパ管)である。

ひずみゲージの計測位置は、図-3(a)に示すように溶接止端位置から6mmの位置とし、得られたひずみから応力の算出を行った。加速度計には、図-4(b)に示す無線型の3軸加速度センサ(検出範囲±2G、精度10mG)を用いた。計測位置は図-4(c)に示すように、電灯先端近傍、高さ2/3点、高さ1/2点の3箇所とした。なお、ひずみ及び加速度計測のサンプリングレートは256Hzとし、それぞれ計測を行った。

2.1.2 計測結果

ひずみの計測結果より、応力を算出し、高速フーリエ変換によりスペクトル解析をおこなったところ、6.8Hzが卓越周波数であることがわかった。

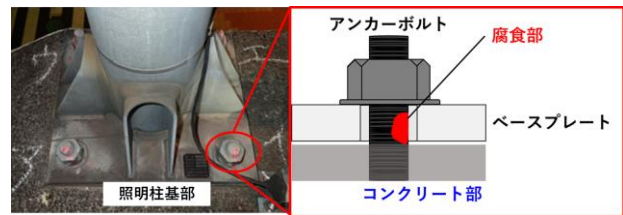


図-1 アンカーボルトの腐食

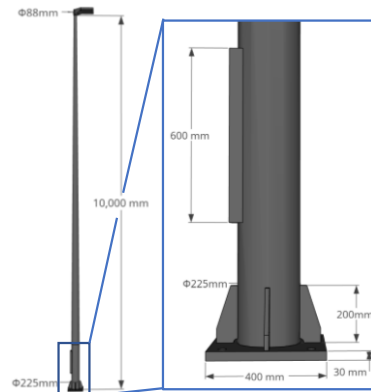
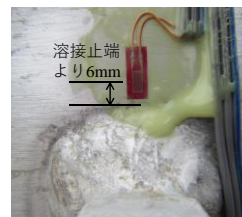


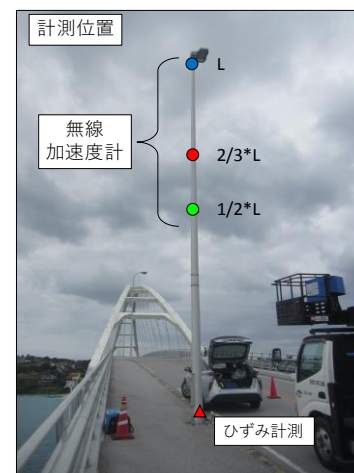
図-2 計測対象照明柱



(a) ひずみ計測



(b) 加速度計



(c) 計測位置

図-3 加速度計測機器と設置位置

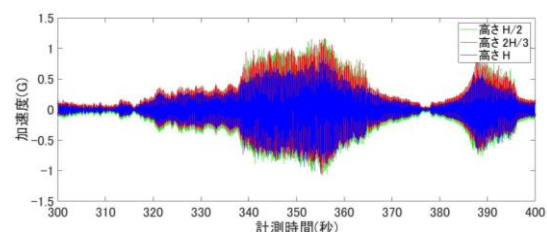


図-4 東西方向の加速度応答記録

東西方向の加速度記録例を図-5に示す。その大きさは高さ2/3点及び1/2点が大きくなる傾向を示し、東西方向で±1G以上の振動が生じていた。

得られた加速度データについて、高速フーリエ変換によりスペクトル解析(図-5)を行ったところ、1.4Hz程度及び6.8Hz程度に卓越周波数が確認され、これが対象の照明柱の固有振動数であると考えれ、ひずみ計測から算出したスペクトル解析の結果と同等であった。

また、加速度データを2階積分し、変位の算出を行った(図-6)。照明柱の高さと変位の関係(図-7)に示す。図より、照明柱の高さH点は高さ2H/3、高さH/2と比べ逆位相で動いており、2次モードと同様な動きをしていたことがわかる。

2.2 弾性FEM解析を用いた道路照明柱と腐食したアンカーボルトの疲労特性

上記で得られた加速度計測結果により照明柱の振動が2次モードで振動していることがわかったため、弾性FEM解析を用いて風作用で振動する道路照明柱と腐食したアンカーボルトの疲労特性を明らかにする。

2.2.1 解析方法

図-8に解析モデルと境界条件の図を示す。リブの溶接止端に生じる応力を確認するためにBeam-Shell混合モデルを用いており、照明柱基部から高さ0~1,350mmまでをShell要素(管径はΦ225mm)、1,350mm~10,000mmをBeam要素(管径はΦ215mm)で作成しており、Beam要素とShell要素はMPC要素により剛体結合している。リブ溶接部の板厚を再現するために既往研究²⁾を参考に入力した。また、Beam-Shell混合モデルでは図-9に示すようなHot Spot応力法を用いて溶接止端部に生じる応力を算出した。

また、腐食を模擬したアンカーボルトに生じる応力を確認するためにBeam-Solid混合モデルを用いて、アンカーボルトとコンクリート部を再現している。また、図-10のようにアンカーボルトの腐食範囲は照明柱のベースプレートと同じ高さ(30mm)とし、4本すべての直径を均一に減肉させた。

鋼材の弾性係数は 2.0×10^5 MPa、ポアソン比は0.3とし、コンクリートの弾性係数は 2.0×10^4 MPa、ポアソン比は0.2とした。また、これらの解析方法が上記のひずみ計測から求められた応力とおおむね同程度であることを確認している。

2.2.2 解析結果

式(1)から算出されるHot Spot応力は58.6MPaであった。さらに、溶接止端から20mmの位置の応力を公称応力とし、32.9MPaであった。

$$\sigma_{hs} = 1.67\sigma_{0.4t} - 0.67\sigma_{1.0t} \quad \text{式(1)}$$

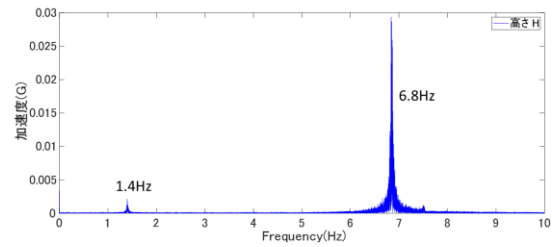


図-5 高さH点東側の加速度記録のスペクトル解析

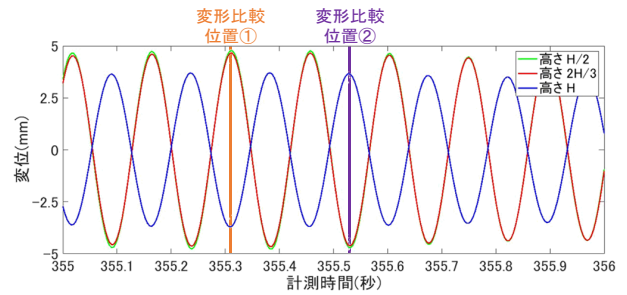


図-6 1秒間の高さ毎の変位

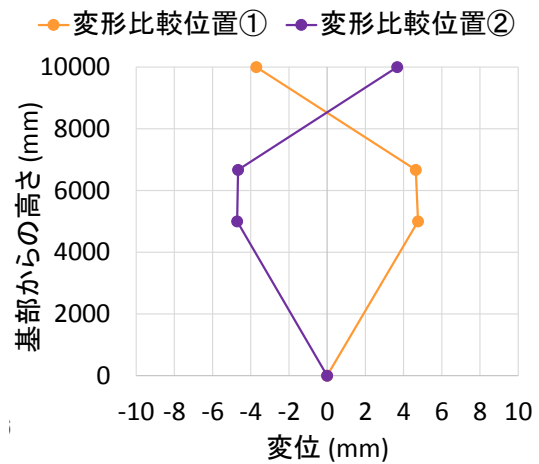


図-7 照明柱の高さ毎の変位

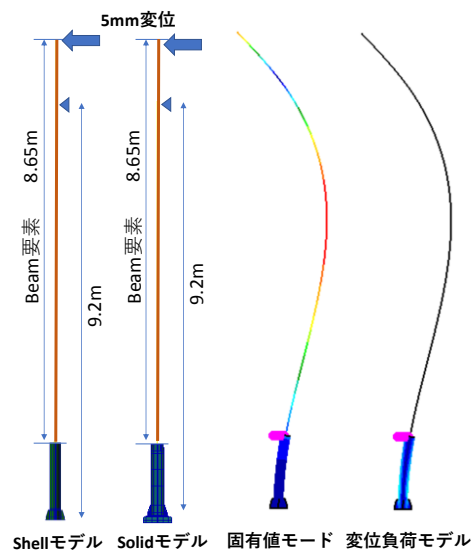


図-8 振動モードに合わせたShell解析モデル

図-11にBeam-Shell混合モデルから算出した公称応力とホットスポット応力、Beam-Solid混合モデルから求まるボルト最大応力の解析結果を示す。リブ端から20mmの位置の応力を公称応力とする。Beam-Solid混合モデルの公称応力は35.4MPa。アンカーボルトに生じる最大の応力は健全モデルで40.3MPa、30%減肉モデルで60.3MPa、50%減肉モデルで80.8MPaでアンカーボルトが減肉していくことにより、アンカーボルトに生じる応力は上昇していくことがわかる。

図-12にそれぞれに対応する等級と解析結果から得られた応力を挿入したグラフを示す。リブの溶接止端のHot Spot 応力が58.6MPaであり、この溶接継手は既往研究²⁾よりE等級とされ、疲労寿命は400万回と推測される。アンカーボルトはSS400材の丸鋼で作成されているため、疲労等級をB等級³⁾と仮定した。その場合の疲労強度は健全モデルで1億1,362万回、30%減肉モデルで3,394万回、50%減肉モデルで1,411万回であり、アンカーボルトの疲労寿命は照明柱の疲労強度に比べると非常に長いことがわかった。

3. 地震荷重による腐食したアンカーボルトを有する道路照明構造の耐久性

弾塑性FEM解析を用いて大規模地震時に照明柱が強制的に変位を受けた場合を想定し、照明柱構造と腐食したアンカーボルトの耐久性を明らかにする。

3.1.1 解析方法

モデルの構成は2章と同様であるが、拘束条件としてコンクリート部を全固定、照明柱の先端に2mの強制変位を与えている。鋼材の降伏応力は235MPa完全弾性体とし、完全弾塑性解析を行った。

3.2.2 解析パラメータ

表-1に解析パラメータを示す。照明柱のパラメータとして開口部がないモデルと開口部がないモデルを設定し、開口部がないモデルにおいてアンカーボルトの直径の減肉量を15%~50%に設定した。開口部があるモデルについてはアンカーボルトの直径の減肉量を25%~50%に設定した。

図-10のようにアンカーボルトの腐食範囲は照明柱のベースプレートと同じ高さ(30mm)とし、4本すべての直径を均一に減肉させた。

3.2.3 解析結果

図-13に開口部がないモデル照明柱の反力と変位の関係のグラフを示す。健全モデルでは変位700mmで最大反力4,610Nを示す結果が得られ、アンカーボルトが減肉していくにつれ、変位と荷重がそれぞれ低下していくことがわかる。得られた最大反力を用いて無次元化したグラフを図-14に示す。Pxは各パラメータの最大耐荷力を示しており、Pはアンカ

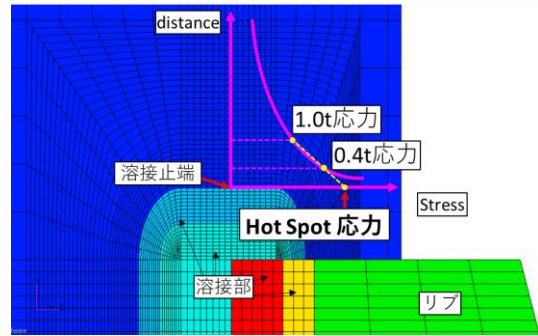


図-9 解析モデルと Hot Spot 応力法

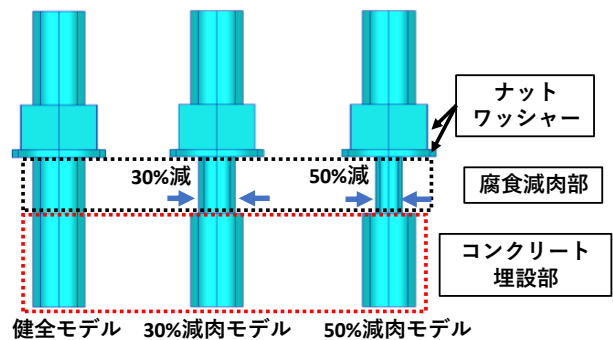


図-10 Solidモデルのアンカーボルト

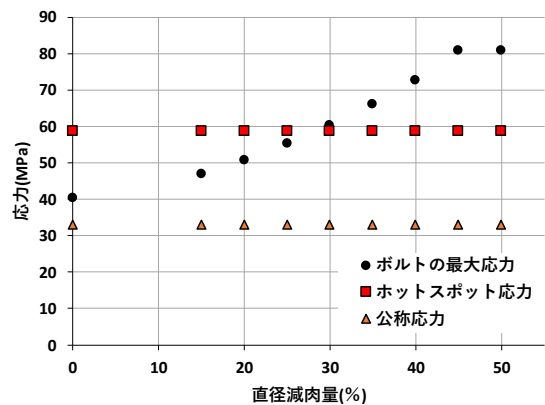


図-11 アンカーボルトと照明柱に生じる応力

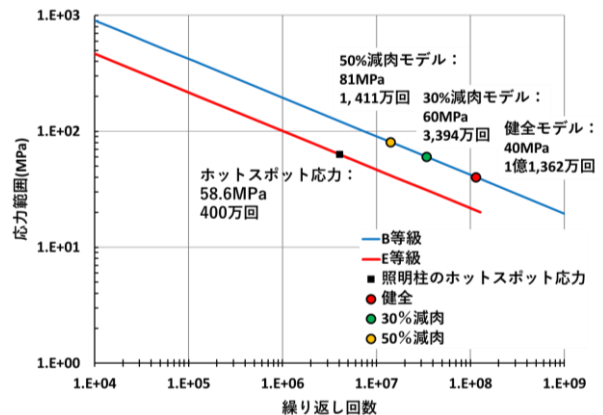


図-12 各疲労等級と疲労寿命

一ボルトが健全状態の最大耐荷力を示している。これにより開口部がないモデルではアンカーボルトの直径の減肉が 30%を超えた位置より直線的に最大耐荷力が下がっていくことが分かる。開口部を設けることにより、アンカーボルトの直径の減肉が 50%を超えた位置よりわずかに最大耐荷力が下がる。

図-15 に 2m 変位時のコンター図を示す。開口部がないモデルではアンカーボルトの直径減肉が 25%未満の場合、リブの直上が座屈するという結果が得られ、アンカーボルトの直径の減肉が 30%を超えるとアンカーボルトの変形が確認される。開口部があるモデルではアンカーボルトの直径の減肉が 50%を超えるとアンカーボルトの変形が確認される。

4. 結論

- 1). 現地計測においてアルミ製照明柱は加速度計測、固有値解析により 2 次モード、6.8Hz で振動していると考えられる。
- 2). アンカーボルトが減肉していくとアンカーボルトに生じる応力は大きくなる。しかし、アンカーボルトの疲労等級を B 等級と仮定すると疲労寿命は健全モデルで 1 億 1,362 万回になり、50%減肉モデルで 1,411 万回になり、アンカーボルトの直径減肉量が 50%を超えてもリブの疲労寿命は 400 万回であると推測されるため、溶接止端から疲労亀裂が発生すると予想される。
- 3). 開口部がない場合、健全モデルではアンカーボルトが破壊に至る前に柱部が座屈する。しかし、アンカーボルトの直径減肉量が 30%を超えるとアンカーボルトが破断に至る。開口部がある場合、健全モデルではアンカーボルトが破壊に至る前に開口部が座屈する。アンカーボルトの直径減肉量が 50%を超えると開口部の座屈より先にアンカーボルトが破断する。

本研究により、風による照明柱の振動により発生する疲労亀裂はアンカーボルトが腐食減肉してもリブの溶接止端から発生すると考えられ、地震等の大きな変位が照明柱に作用する場合、アンカーボルトの直径が 30%以上減肉することで照明構造の安全性を低下させると考えられる。しかし、照明柱に開口部を設けることで構造上の弱点部が開口部に移り、アンカーボルトの腐食の影響が小さくなると推測される。

参考文献

- 1). 玉越隆史、星野誠、市川明弘：道路付属物支柱等の劣化・損傷に関する調査、No. 685、2012
- 2). 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説、pp. 68-72、2012
- 3). 三木千壽：鋼構造、共生出版株式会社、pp. 252-253、2013

表-1 アンカーボルトのパラメータ

	直径減肉量(%)									
	0	15	20	25	30	35	40	45	50	
開口部なし	0	15	20	25	30	35	40	45	50	
開口部あり	0			25	30	35	40	45	50	

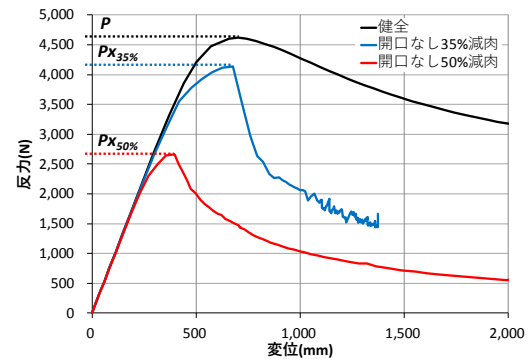


図-13 荷重変位

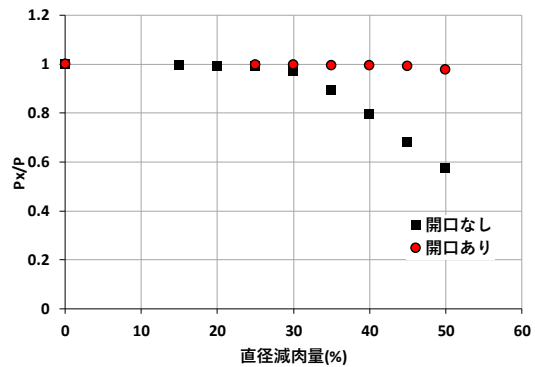


図-14 アンカーボルトの腐食と最大耐力比率

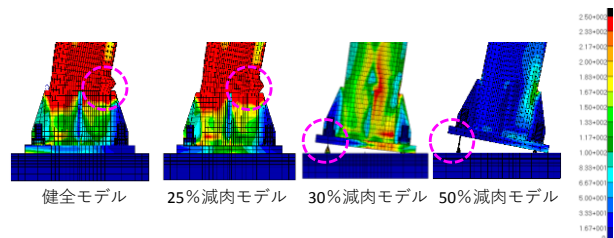


図-15(a) 開口部なしモデルのコンター図

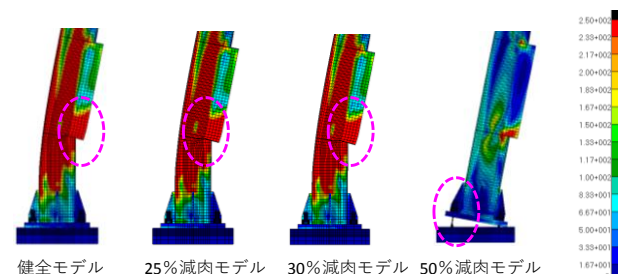


図-15(b) 開口部ありモデルのコンター図