

(9) 加速度センサを用いた道路照明柱に対する風振動による疲労損傷度評価に関する検討

巻幡 憲俊¹・高橋 宗昭²・狩野 正人³・家入 正隆⁴・津川 拓也⁵

¹正会員 JIP テクノサイエンス (株) (〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町一丁目2番5号)

E-mail:noritoshi_makihata@cm.jip-ts.co.jp

²非会員 JIP テクノサイエンス (株) (〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町一丁目2番5号)

E-mail:muneaki_takahashi@cm.jip-ts.co.jp

³正会員 JIP テクノサイエンス (株) (〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町一丁目2番5号)

E-mail:masato_kanou@cm.jip-ts.co.jp

⁴非会員 JIP テクノサイエンス (株) (〒532-0011 大阪府淀川区西中島2丁目12番11号)

E-mail:masataka_ieiri@cm.jip-ts.co.jp

⁵非会員 (株) NTT データ 公共システム事業本部 (〒135-8671 東京都江東区豊洲3-3-9)

E-mail:tsugawat@nttdata.co.jp

本研究は、腐食した道路照明柱の風振動による疲労損傷度に着目し、実際に腐食した道路照明柱による疲労試験を行い、疲労強度等級の明確化を行う。腐食進行により道路照明柱の疲労強度が著しく低下し、強風地域以外でも疲労損傷による倒壊リスクが高まることを検証する。疲労損傷度を算出するために必要なセンシングデータを効率的に収集・解析するセンサ機器およびプログラムの開発を行う。

Key Words: acceleration sensor, light pole, corrosion, fatigue damage

1. はじめに

近年、笹子トンネルの天板崩落事故を契機に社会インフラの老朽化が注目されている中、道路附属物である道路照明柱の倒壊事故が度々報告されている。道路照明柱を倒壊に至らしめる外力は一般的に強風（静的風作用）と見られることが多く、通常、道路照明柱は強風のみを考慮して設計される¹⁾。また、腐食が進行している道路照明柱に対しては、点検要領²⁾により、設計風速に対して許容応力度を超過しない板厚（限界板厚という。）により損傷判定基準が明確化されている。

一方、風作用には静的風作用以外に動的風作用もあり、沿岸部等の強風地域の橋梁上に設置された道路照明柱については動的風作用が考慮されることがある^{3,4)}ものの、その他の地域については、特に考慮されることはない。実際、強風地域以外では健全な道路照明柱が疲労破壊することは起こりえないものの、腐食が進行した場合、疲労強度が著しく低下することが想定されることから、強風地域以外での倒壊事故の原因が全て強風（静的風作用）であるとは断言できない。

そこで、本研究では腐食した道路照明柱の風振動による疲労損傷度に着目し、健全および腐食した道路照明柱の疲労試験を行い、疲労強度等級を明確化する。道路照明柱の腐食進行に伴い疲労強度が著しく低下し、強風地域以外でも疲労破壊による倒壊リスクが高まることを検証する。疲労損傷度の推定には、道路照明柱の振動データと板厚の情報が必要となることから、効率的に振動データを収集するセンサ機器の検討・開発、収集したデータから算出した疲労損傷度を基に道路照明柱の倒壊リスクを判定するプログラムを開発する。

2. 道路照明柱の風振動による疲労損傷度算出

(1) 動的風作用

風作用により一般の構造物に作用する現象を図-1に示す。動的風作用のうち道路照明柱に発生する現象は、ガスト応答と渦励振である。

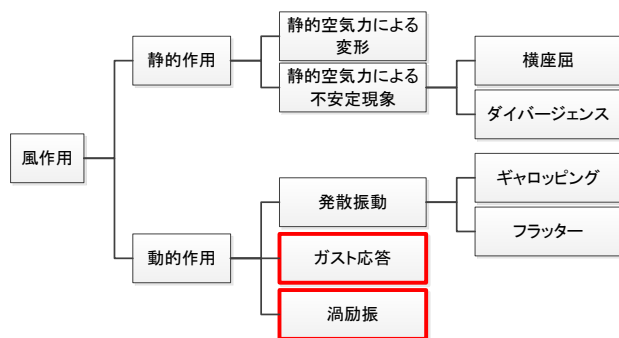


図-1 風作用と構造物に発生する現象³⁾

本研究で使用する腐食した道路照明柱については、千葉県千葉市内で実際に供用されていた道路照明柱を採用していることから、動的風作用についても千葉市の風速情報を採用する。千葉市の基本風速は文献⁹⁾によると34m/s程度であり、強風地域には該当しない。対象となる道路照明柱では渦励振による疲労破壊が発生しづらいという結果が得られたことから、今回はガスト応答による疲労損傷度の算出を行う。

(2) 疲労損傷度算出のフローチャート

風振動による疲労損傷度算出方法については、図-2のフローチャートに基づき検討を行う。

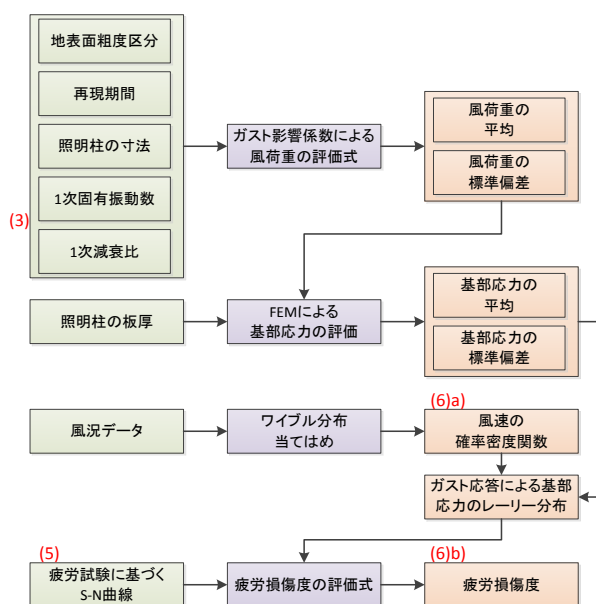


図-2 疲労損傷度算出のフローチャート

(3) 固有振動数・減衰比推定のための加振高さの検討

風振動による疲労損傷度の算出には、道路照明柱の1次固有振動数・減衰比が必要となる。道路照明柱の1次固有振動数・減衰比は、振動計測により得られた加速度データを用いて算出されるが、1次固有振動数・減衰比の算出精度は加振高さに依存し、加振高さが頭頂部に近いほど精度が高くなる。そこで、様々な位置での加振が

可能な試験ヤードを設けて振動試験を実施し、1次固有振動数・減衰比が高精度に算出可能な加振高さを明確化する。

振動試験の計測機器として、センサ精度の異なる、スマートフォン、MEMSセンサ、高精度MEMSセンサの3機種を用意し、図-3に示す加振位置で振動試験を実施した。

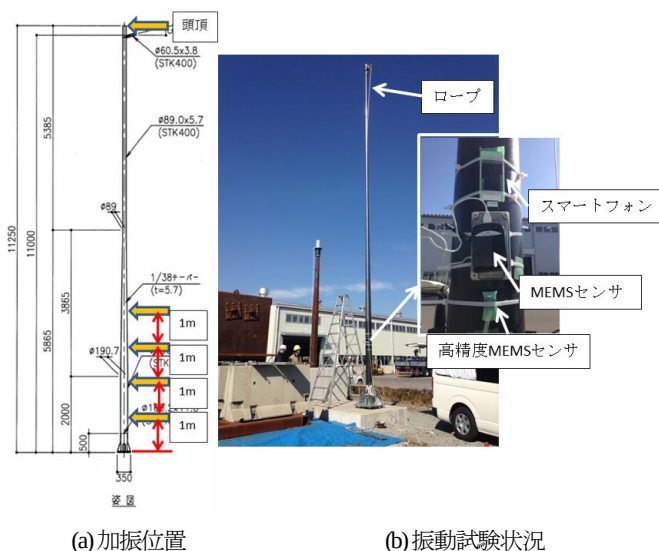


図-3 振動試験

道路照明柱に対する1次固有振動数・減衰比の算出は文献⁹⁾の方法を用いて実施する。算出結果を表-2に示す。1次固有振動数推定の加振高さについては、地面から2m以上の位置での加振が必要と確認された。また、1次減衰比推定の加振高さについては、地面から4m以上の位置での加振が必要であることが確認された。

表-2 1次固有振動数・減衰比

		推定値		誤差率 [%]	
		f	h	f	h
頭頂	スマートフォン	1.191	0.001	0.001	9.137
	MEMS	1.191	0.001	0.002	16.449
	高精度MEMS	1.191	0.001		
4m	スマートフォン	1.190	0.008	0.084	625.930
	MEMS	1.190	0.002	0.035	76.321
	高精度MEMS	1.191	0.001	0.005	27.214
3m	スマートフォン	1.186	0.032	0.433	2924.737
	MEMS	1.192	0.009	0.141	755.990
	高精度MEMS	1.194	0.018	0.278	1620.211
2m	スマートフォン	1.191	0.028	0.005	2525.209
	MEMS	1.190	0.005	0.057	346.195
	高精度MEMS	1.192	0.004	0.124	263.788
1m	スマートフォン	1.176	0.112	1.271	10417.571
	MEMS	1.210	0.086	1.621	8018.781
	高精度MEMS	1.189	0.142	0.176	13295.672

(4) 対象道路照明柱の選定

文献⁷⁾によると、供用されている道路照明柱の支柱形式は「逆L型」が58%、損傷種類は「腐食」が86%、腐食部位は「柱脚部」がそれぞれ最も多いという結果で

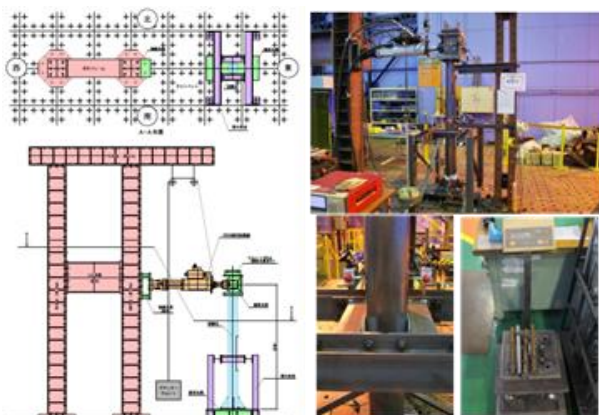
ある。そこで、千葉市内の道路照明柱から、支柱形式が逆 L 型、損傷種類が柱脚部腐食、という条件に合致する道路照明柱を選定（図-4 参照）し、供試体として入手している。健全供試体については、鋼管メーカーから調達している。



図-4 対象道路照明柱

(5) 疲労試験による疲労強度の測定

腐食供試体および健全供試体の疲労強度を測定するため、疲労試験を実施する。疲労試験装置を図-5 のとおり作成し、供試体を固定治具に固定する。供試体の上部には、道路照明柱の上部切断部分に相当するウェイト 100kgf を載荷し、ベースプレート下面から 2m の高さにおいて正負交番載荷を行う。



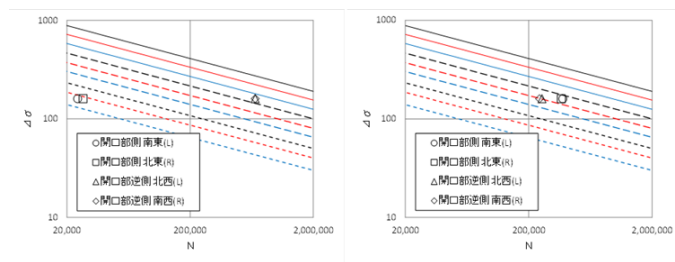
(a) 疲労試験装置 (b) 疲労試験状況

図-5 疲労試験

疲労試験により道路照明柱の疲労強度を測定するためには、応力範囲の着目位置を定める必要がある。文献⁹⁾によると、応力範囲の着目位置は疲労き裂の発生位置と思われるリブ溶接止端部付近で、応力集中の影響を受けない位置としている。事前の FEM 解析により、リブ溶接止端部付近の応力分布を求めたところ、腐食供試体、健全供試体ともに溶接止端から高さ 25mm 位置から応力集中の影響が少なくなっていることから、高さ 25mm を着目位置とする。なお、着目位置での応力範囲は 160

MPa (± 80 MPa) とする。

疲労試験による疲労き裂進展状況から疲労等級を推定するにあたり、文献⁹⁾を参考に片側き裂長さが鋼管径の 1/4 に達した時点を破壊と定義する。供試体の鋼管径は 165 mm であることから、片側き裂長さが 41 mm に達した時点で供試体が破壊したものとする。この定義による疲労強度および JSSC の疲労設計曲線⁹⁾は図-6 のとおりである。



(a) 腐食

(b) 健全

図-6 疲労強度

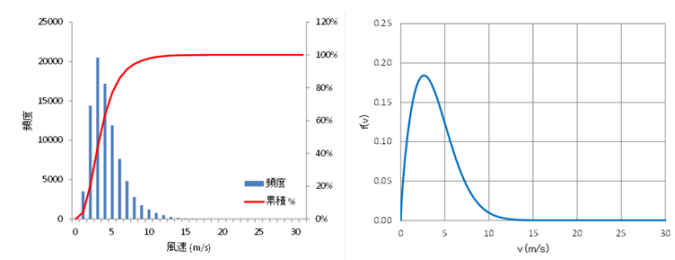
疲労試験結果から、腐食供試体は H 等級、健全供試体は E 等級と見なす。

(6) 腐食照明柱の疲労損傷度の算出

実証フィールドより選定した対象道路照明柱に対して、風振動による疲労損傷度を算出する。

a) 風速の確率密度関数の算出

風速の確率密度関数は、風速頻度分布のワイブル分布当てはめにより求められる。千葉市の風速頻度分布を、気象庁の風況データ¹⁰⁾を用いて算出する¹¹⁾。採用したデータは 2006 年～2015 年の 10 年分とする。当てはめたワイブル分布を図-7 に示す。



(a) 風速頻度分布

(b) ワイブル分布

図-7 風速の確率密度関数

b) 疲労損傷度の算出

これまでに得られた結果を用いて、図-2 のフローチャートに基づき、対象道路照明柱の疲労損傷度を文献¹²⁾の方法にしたがって算出する。再現期間を 50 年としたときの疲労損傷度を表-3 に示す。

表-3 再現期間 50 年での疲労損傷度

	道路軸方向		道路軸直角方向	
	腐食	健全	腐食	健全
疲労損傷度	2.128	0.010	0.864	0.011

表-3 から、健全道路照明柱が極めて 0 に近似した値であるのに対し、腐食道路照明柱は道路軸方向が 1 に近似し、道路軸直角方向が 2 を超えるという推定結果を得た。このことから、今回採用した腐食道路照明柱が供用後 50 年を経過したと仮定した場合、疲労損傷度（推定値）が 1 を大きく超えていることから、疲労破壊が起り得る、ということが実証された。

3. センサ機器・プログラムの開発

(1) センサ機器の開発

現場で効率的に振動データを計測するセンサ機器として、加速度センサを内蔵した防水対応のタブレット端末を採用し、計測アプリケーションを開発した。しかし、表-2 の振動試験結果から、タブレット端末のセンサ性能では減衰比の推定に必要な精度を得られないことが判明したため、今後、高精度 MEMS センサを用いた計測機器を開発予定である。

(2) 疲労損傷度推定プログラムの開発

図-2 のフローチャートを基に、収集した振動データ等の情報を基に疲労損傷度を自動推定するプログラムを開発した（図-8 参照）。

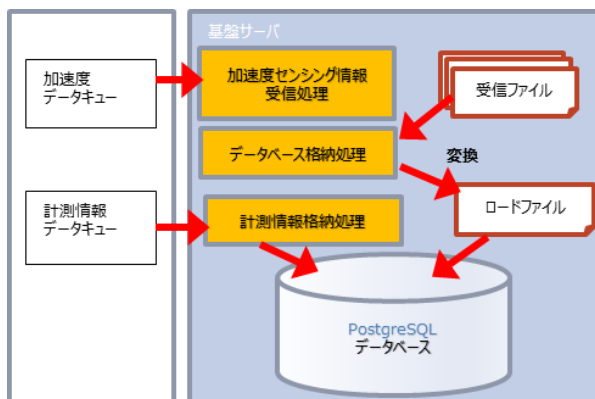


図-8 疲労損傷度推定プログラム

4. まとめ

本研究では、道路照明柱に対して従来考慮されることがなかった動的風作用による疲労損傷により、強風地域以外でも腐食進行により疲労破壊が起り得ることを実

証した。また、収集したデータから疲労損傷度を自動推定するプログラム開発を行い、ビッグデータを効率的に処理する仕組みを構築した。

今後の課題として、道路照明柱の板厚測定には超音波厚さ計を用いているが、1 本当たりの計測に時間を要することから、実際の点検・維持管理での運用を考慮した場合、実用的ではないことから、振動特性（減衰比等）から腐食状況を推測できないか、今後、ビッグデータを収集し、振動特性（減衰比等）と腐食状況の相関性について検証する予定である。

謝辞：本稿は、（国立研究開発法人）情報通信研究機構（NICT）の高度通信・放送研究開発委託研究（採択番号 178B02、課題名：道路付帯構造物のセンシングおよび診断方法の研究）において採択され実施いたしました。

千葉市役所からは、管理する道路照明柱の点検結果の閲覧、振動・板厚計測のためのセンサの設置、疲労試験体として腐食照明柱の撤去工事等をさせて頂きました。この場を借りて謝意を表します。

参考文献

- （社）日本照明器具工業会：JIL 照明用ポール強度計算基準 JIL1003, 2009.
- 国土交通省：附属物（標識、照明施設等）点検要領, 2014.
- （社）日本道路協会：道路橋耐風設計便覧（平成 19 年改訂版），2007.
- 松島哲郎，北田公三，沼田秀昭：白鳥大橋照明柱の長寿命化に資する耐風対策，第 53 回北海道開発技術研究発表会，2010.
- 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説(2015)，2015.
- 岡林隆敏，中忠資，奥松俊博，郝婕馨：多次元 AR モデルを用いた常時微動による橋梁振動特性推定法と推定精度の検討，土木学会論文集 A，Vol.64 No.2，pp.474-487，2008.
- 玉越隆史，星野誠，市川明弘：道路附属物支柱等の劣化・損傷に関する調査，国総研資料第 685 号，2012.
- 山田聡，酒井吉永，山田健太郎：撤去した標識柱基部の疲労強度とその補修方法に関する一考察，構造工学論文集，Vol.49A，pp.725-734，2003.
- 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，2012.
- 気象庁：気象庁ホームページ，<<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>>，（入手 2016.3.7）.
- 白石成人，松本勝，白土博通，安田清純：日本の風向別風速発生頻度分布特性，日本風工学会誌，pp.13-38，1984.
- 松本勝，白石成人，築山有二，三澤彰，村上琢哉：橋梁構造物の空力振動に対する安全性と疲労損傷に関する基礎的研究，京都大学防災研究所年報，第 32 号 B-1，1989.