

効率的な疲労寿命評価のための有限要素法による影響線解析の提案

東北大学大学院工学研究科 学生会員 三井 涼平 正会員 斉木 功
エム・エムブリッジ（株） 正会員 ○横山 薫, 鈴木 俊光, 橋本 幹司

1. はじめに

橋梁の疲労問題では、移動荷重により生じる着目点の応答を適切に把握するために影響線が一般的によく用いられる。斉木ら¹⁾は相反定理に基づきモデルの修正が不要な影響線の解析手法を提案しているが、連続体ソリッド要素に限定して述べている。本論文では、平面シェル要素で離散化された有限要素モデルに対する影響線の解析手法を提案する。

2. 平面シェル要素における影響線の解析

平面シェル要素で離散化された有限要素モデルを考える。平面シェル要素では、曲げの影響を考慮するために板表面における応力やひずみを求める必要がある。

まず、図-1に示すような有限要素モデルで、節点 a の板表面における x 方向変位 $u_{a,surface}^1$ の影響線を求める方法について考える。系1には任意位置にある節点 ξ に y 方向単位荷重 $P_\xi^1 = 1$ が作用しており、系2には節点 a に x 方向荷重 P_a^2 と y 軸まわり曲げモーメント M_a^2 が作用している。節点 ξ の y 方向の変位を v_ξ とし、節点 a の x 方向変位を u_a 、 y 軸まわり回転角を θ_a とする。板厚を t とすると、板表面における変位 $u_{a,surface}$ は

$$u_{a,surface} = u_a - \frac{t}{2}\theta_a \quad (1)$$

となる。このことと、相反定理

$$u_a^1 P_a^2 + \theta_a^1 M_a^2 = v_\xi^2 P_\xi^1 \quad (2)$$

より、節点 a に以下の荷重

$$P_a^2 = 1, \quad M_a^2 = -\frac{t}{2} \quad (3)$$

を与えたときの各節点の y 方向変位が着目点の板表面における変位 $u_{a,surface}$ の影響線となることが示される。

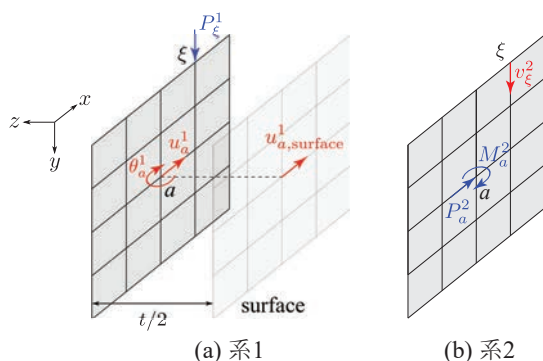


図-1 節点の板表面における変位の影響線の解析

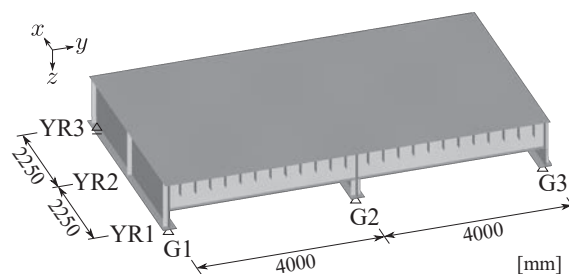


図-2 解析モデル全体図

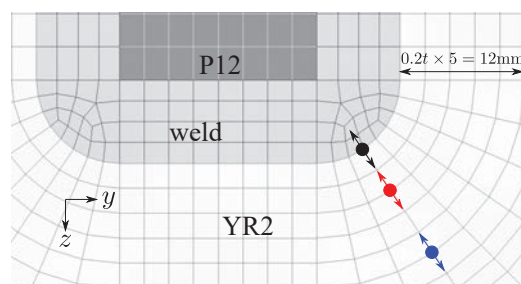


図-3 P12とYR2との交差部近傍の着目点

節点の板表面におけるひずみ・応力においては斉木ら¹⁾と同様の考え方で影響線を求めることができる。

3. 提案手法の妥当性の検証

文献²⁾における鋼床版の改良モデルを用いて、本手法の妥当性検証を行う。図-2に示すように、対象構造は3本の主桁および3本の横リブからなる部分モデルとした。横リブの板厚は12 mmである。材料は均質でYoung率 $E = 2 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、Poisson比 $\nu = 0.3$ の等方線形弾性体とし、すべての部材を4節点平面シェル要素でモデル化した。

着目点は主桁G2の主桁G1側に隣接する縦リブP12と横リブYR2との交差部近傍に位置する点とした。図-3に着目点を赤丸で示した。この着目点において、横リブYR1側板表面の溶接止端直角方向応力の影響線を求めるために、平面応力状態の構成関係を考慮して荷重を載荷した。この解析によって得られた結果から、床版上面の鉛直(z)方向変位、すなわち着目点の溶接止端直角方向応力の影響線コンターを図-4に示す。この結果の妥当性を確認するために、図-4に示すA, B, Cの3点を参照点として選び、通常の単位荷重載荷の解析を行い、着目点応力との比較を行う。

各参照点に単位荷重を載荷したときの着目点応力と、本手法による参照点における影響線の値を表-1にまと

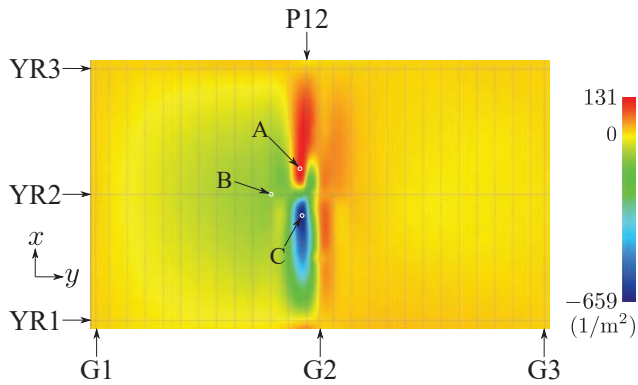


図-4 床版上面での着目点の応力影響線

める．なお，単位荷重を載荷したときの節点における応力は齊木ら¹⁾と同様に節点変位から求めた．表にある通り，本手法は単位荷重を載荷する通常の解法による解と比較し， $10^{-1}\%$ 程度の精度で一致している．

4. 疲労寿命評価への適用

本手法を疲労寿命評価に適用することでその効率化を試みる．本論文では横山ら²⁾と同様に，縦横リブ交差部の溶接部における横リブ側止端部を対象とするため，日本鋼構造協会の疲労設計指針³⁾に従い，次式によって構造ホットスポット応力 σ_h を算出した．

$$\sigma_h = 1.67\sigma_{0.4t} - 0.67\sigma_{1.0t} \tag{4}$$

ここに， $\sigma_{0.4t}$ ， $\sigma_{1.0t}$ はそれぞれ溶接止端から $0.4t$ ， $1.0t$ の位置における鋼板表面の溶接止端直角方向応力， t は板厚である．構造ホットスポット応力 σ_h は鋼板表面における応力の線形結合で表されるため，それらの影響線を求めるための荷重を組み合わせることで，一度の解析で σ_h の影響線を求めることができる．

解析モデルは図-2と同様の部分モデルとし，主桁G2の主桁G1側に隣接する縦リブP12と横リブYR2との交差部における横リブYR1側板表面の横リブ側止端部を評価対象とする．図-3に着目する溶接止端を黒丸，その溶接止端から $0.4t$ ， $1.0t$ 離れた位置をそれぞれ赤丸，青丸で示した．平面応力状態の構成関係を考慮して荷重を作用させ，影響線を求めたところ，定性的には図-4とほぼ同様となった．

荷重モデルは，道路橋示方書のT荷重を参考に図-5に示すようなダブルタイヤを模した等分布荷重とした．荷重の位置は着目部を原点として，橋軸(x)方向に

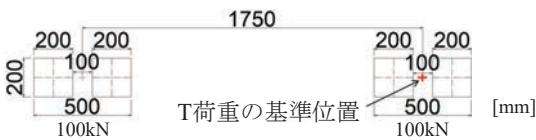


図-5 荷重モデル

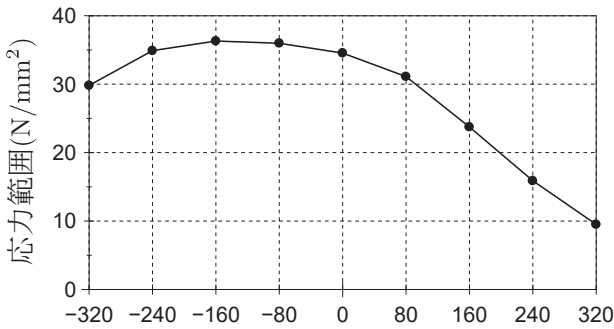


図-6 着目点の応力範囲

± 2200 mmの区間を50 mm間隔，橋軸直角水平(y)方向に ± 320 mmの区間を80 mm間隔の全801ケースとした．なお，等分布荷重により発生する着目部の応力は，影響線と等分布荷重の積を載荷範囲で積分することで求められる．この荷重モデルにより発生するホットスポット応力範囲とT荷重の基準位置の関係を図-6に示す．

横山ら²⁾と同様の条件で設計寿命100年の累積疲労損傷比Dを算出した．荷重モデル走行位置の期待値を着目部直上とした場合，累積疲労損傷比Dは0.197となった．通常の荷重載荷による解析は全801ケース必要であったが，本手法を用いれば，一つの着目点に対して一度の解析を実行するだけで影響線を求めることが可能で，疲労寿命評価を効率的に行うことができる．

5. おわりに

本論文では，齊木ら¹⁾の有限要素モデルの修正が不要な影響線の解析手法を平面シェル要素へ適用した．平面シェル要素で離散化した有限要素モデルに対して，通常の単位荷重による有限要素解析結果と本手法による影響線を比較し，妥当性を確認した．また，鋼床版の疲労問題に対して，本手法を用いることで効率的に疲労寿命を評価することができることを示した．

参考文献

1) 齊木 功, 三井 涼平, 横山 薫, 鈴木 俊光, 橋本 幹司: 相反定理に基づく有限要素モデルの修正が不要な影響線の解析, 土木学会論文集 A1, Vol. 78, No. 3, pp. 480-489, 2022.
2) 横山 薫, 鈴木 俊光, 橋本 幹司, 三木 千壽: 主桁に隣接する縦リブに着目した鋼床版縦横リブ交差部の疲労寿命に関する一検討, 土木学会第71回年次学術講演会概要集, 1-56, 2020.
3) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, 2012.

表-1 着目点の応力

参照点	A	B	C
本手法 ($/\text{m}^2$)	131.177	-104.516	-659.335
単位荷重 ($/\text{m}^2$)	131.165	-104.311	-659.228
相対差%	9.3×10^{-3}	2.0×10^{-1}	1.6×10^{-2}