

I-345 長大橋梁の3次元ガスト応答解析

本州四国連絡橋公団 正員 秋山晴樹
日立造船(株) 正員 山村信道
日立造船(株) 正員 田中 洋

§ 1. 解析概要

構造物の長大化、高層化に伴って、風の乱れによる構造物の不規則振動は、耐風設計の上で重要となる。¹⁾ 本報告では、自励空気力を考慮した長大橋梁の3次元ガスト応答の定式化の骨子を計算例と共に紹介する。

自励空気力を非定常空気力係数 (P^*, H^*, A^*) によって導入し、3次元 (立体) 振動モードを対象とした不規則振動論による汎用解を導いた。外力は、主流方向 $v(t)$ と鉛直方向 $w(t)$ を考慮した。²⁾ 本解式は、振動モード間の連成応答を完全2次結合 (CQC) 法を適用し、重根および重根に近い固有振動数が存在する場合にも正解が得られる。

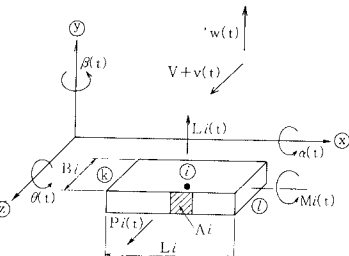


図-1 座標系及び記号

§ 2. 解析方法

自励空気力の n 次項を次式で表わす (ρ : 空気密度、 $\bar{V}_i$: 平均風速、 C_{Di} : 抗力係数)。³⁾

$$\left. \begin{aligned} P_{in}(t) &= (\rho \cdot \bar{V}_i^2 / 2) \cdot A_i \cdot K_{in} \cdot [P_{1i}^* \cdot (\dot{z}_i / \bar{V}_i) + P_{2i}^* \cdot (B_i \cdot \dot{\alpha}_i / \bar{V}_i) + P_{3i}^* \cdot K_{in} \cdot \alpha_i] \cdot L_i & (\text{抗力}) \\ L_{in}(t) &= (\rho \cdot \bar{V}_i^2 / 2) \cdot B_i \cdot K_{in} \cdot [H_{1i}^* \cdot (\dot{y}_i / \bar{V}_i) + H_{2i}^* \cdot (B_i \cdot \dot{\alpha}_i / \bar{V}_i) + H_{3i}^* \cdot K_{in} \cdot \alpha_i] \cdot L_i & (\text{揚力}) \\ M_{in}(t) &= (\rho \cdot \bar{V}_i^2 / 2) \cdot B_i^2 \cdot K_{in} \cdot [A_{1i}^* \cdot (\dot{y}_i / \bar{V}_i) + A_{2i}^* \cdot (B_i \cdot \dot{\alpha}_i / \bar{V}_i) + A_{3i}^* \cdot K_{in} \cdot \alpha_i] \cdot L_i & (\text{モーメント}) \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

$$P_{1i}^* = -2C_{Di} / K_{in}, \quad P_{2i}^* = (dC_{Di} / d\alpha) / K_{in} = C_{Di}' / K_{in}, \quad P_{3i}^* = C_{Di}' / K_{in}^2, \quad K_{in} = B_i \cdot \omega_n / \bar{V}_i$$

ガスト (パフエティング) 空気力の n 次項を次式で表わす。

$$\ddot{X}_n(t) + 2h_n \cdot \dot{X}_n(t) + \omega_n^2 \cdot X_n(t) = \{\phi_{in}\}^T \cdot \{F_{in}^B(t)\} / M_n^* \dots (2)$$

$$M_n^* = \{\phi_{in}\}^T \cdot [M] \cdot \{\phi_{in}\} \dots (3)$$

$$\{\phi_{in}\}^T \cdot \{F_{in}^B(t)\} / M_n^* = \{P_{in}\}^T \cdot \{v_i(t)\} + \{Q_{in}\}^T \cdot \{w_i(t)\} \dots (4)$$

$$\left. \begin{aligned} P_{in} &= (\rho \cdot \bar{V}_i / M_n^*) \cdot [\phi_{in}^z \cdot C_{Di} \cdot A_i \cdot G_{Di}(\tilde{f}_n) + \phi_{in}^y \cdot C_{Li} \cdot B_i \\ &\quad \cdot G_{Bi}(\tilde{f}_n) + \phi_{in}^x \cdot C_{Mi} \cdot B_i^2 \cdot G_{Bi}(\tilde{f}_n)] \cdot L_i \\ Q_{in} &= (\rho \cdot \bar{V}_i / 2M_n^*) \cdot [\phi_{in}^z \cdot C'_{Di} \cdot A_i \cdot G_{Di}(\tilde{f}_n) + \phi_{in}^y \cdot C'_{Li} \cdot B_i \\ &\quad \cdot G_{Bi}(\tilde{f}_n) + \phi_{in}^x \cdot C_{Di} \cdot A_i \cdot G_{Di}(\tilde{f}_n) + \phi_{in}^x \cdot C'_{Mi} \cdot B_i^2 \\ &\quad \cdot G_{Bi}(\tilde{f}_n)] \cdot L_i \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

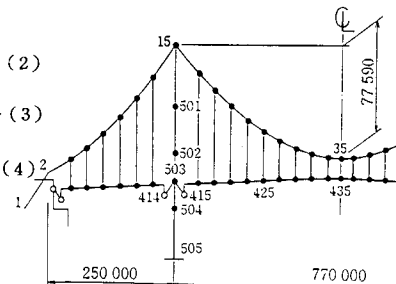


図-2 解析モデル

ここに、

$v_i(t)$: 主流方向の変動風速

$w_i(t)$: 鉛直方向の変動風速

$G_{Di}(\tilde{f}_n), G_{Bi}(\tilde{f}_n)$: 部材高 D_i , 部材幅 B_i

に関する 空力アドミタンス

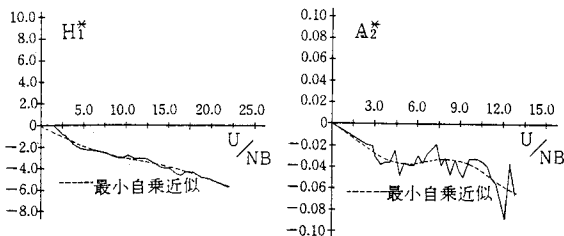
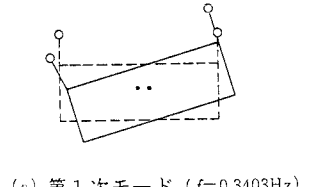


図-3 非定常空気力係数

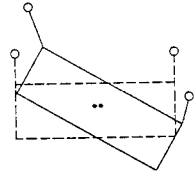
等価振動数 ω_n 、減衰率 h_n は次式で表わせる。

$$\left. \begin{aligned} \bar{\omega}_n &= \omega_n \cdot \left[1 + (\rho/2M_n^*) \cdot \sum_i B_i^2 \cdot \phi_{in}^2 \cdot \{ P_{3i}^*(\bar{K}_{in}) \cdot A_i \cdot \phi_{in}^2 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + H_{3i}^*(\bar{K}_{in}) \cdot B_i \cdot \phi_{in}^2 + A_{3i}^*(\bar{K}_{in}) \cdot B_i^2 \cdot \phi_{in}^2 \} \cdot L_i \right]^{-1/2} \quad (6) \\ \bar{K}_{in} &= B_i \cdot \bar{\omega}_n / \bar{V}_i \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} h_n &= (\omega_n / \bar{\omega}_n) \cdot h_n^m - (\rho/4M_n^*) \cdot \sum_i B_i \cdot \left[A_i \cdot \phi_{in}^2 \cdot \{ P_{1i}^*(\bar{K}_{in}) \cdot \phi_{in}^2 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + P_{2i}^*(\bar{K}_{in}) \cdot B_i \cdot \phi_{in}^2 \} + B_i \cdot \phi_{in}^2 \cdot \{ H_{1i}^*(\bar{K}_{in}) \cdot \phi_{in}^2 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + H_{2i}^*(\bar{K}_{in}) \cdot B_i \cdot \phi_{in}^2 \} + B_i^2 \cdot \phi_{in}^2 \cdot \{ A_{1i}^*(\bar{K}_{in}) \cdot \phi_{in}^2 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + A_{2i}^*(\bar{K}_{in}) \cdot B_i \cdot \phi_{in}^2 \} \right] \cdot L_i \quad (7) \end{aligned} \right\}$$



(a) 第1次モード (f=0.3403Hz)



(b) 第2次モード (f=0.3840Hz)

・印は、回転中心

図-4 ねじり振動モード

応答スペクトル密度のk次モーメントは次式より得られる。

$$\left. \begin{aligned} (\rho_{mn}^{(k)} : \text{モード相関係数, } \psi_n : \text{等価振動モード}) \\ \lambda^{(k)} &= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \rho_{mn}^{(k)} \cdot \psi_m \cdot \psi_n \cdot (X_{mn} + Y_{mn}) \\ X_{mn} &= \{ P_{im} \}^T \cdot [(\lambda_{ij,mm}^{v(k)} \cdot \lambda_{ij,nn}^{v(k)})^{1/2}] \cdot \{ P_{jn} \} \\ Y_{mn} &= \{ Q_{im} \}^T \cdot [(\lambda_{ij,mm}^{w(k)} \cdot \lambda_{ij,nn}^{w(k)})^{1/2}] \cdot \{ Q_{jn} \} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{ij,mm}^{v(0)} &= S_{ij}^v(\tilde{f}_m) / [64\pi^3 \cdot h_m \cdot \tilde{f}_m^3] & \lambda_{ij,mm}^{w(0)} &= S_{ij}^w(\tilde{f}_m) / [64\pi^3 \cdot h_m \cdot \tilde{f}_m^3] \\ \lambda_{ij,mm}^{v(1)} &\simeq (1 - 2h_m/\pi) \cdot \lambda_{ij,mm}^{v(0)} \cdot \tilde{f}_m & \lambda_{ij,mm}^{w(1)} &\simeq (1 - 2h_m/\pi) \cdot \lambda_{ij,mm}^{w(0)} \cdot \tilde{f}_m \\ \lambda_{ij,mm}^{v(2)} &= \lambda_{ij,mm}^{v(0)} \cdot \tilde{f}_m^2 & \lambda_{ij,mm}^{w(2)} &= \lambda_{ij,mm}^{w(0)} \cdot \tilde{f}_m^2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} S_{ij}^v(\tilde{f}_n) &= J_{ij}^2(\tilde{f}_n) \cdot [S_i^v(f_n) \cdot S_j^v(\tilde{f}_n)]^{1/2} \\ S_{ij}^w(\tilde{f}_n) &= J_{ij}^2(\tilde{f}_n) \cdot [S_i^w(f_n) \cdot S_j^w(\tilde{f}_n)]^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ここに、 $J_{ij}^2(\tilde{f}_n)$: (i, j) 部材間の空間修正関数⁴⁾ $S_i^v(\tilde{f}_n), S_i^w(\tilde{f}_n)$: 変動風速のパワー・スペクトル密度

§3 数値計算例及びまとめ

図-2の吊橋の非定常空気力係数(H_1^*, A_2^*)を図-3に示す。図-4の低次ねじり振動の減衰率を図-5で比較した。式(1)の自励空気力を用いた場合(CASE-1)と準定常理論(P^*, H_1^* のみ適用: CASE-2)によるガスト応答値を表-1で比較した。これより、準定常理論によっても実用設計に十分な解析結果が本モデルに対しては得られることを確認した。

表-1 補剛トラス(格点425)の部材力(平均風速: $\bar{V}$, ガスト成分: v, w)

断面力	荷重区分	CASE-1 (非定常理論)	CASE-2 (準定常理論)
曲げモーメント (橋軸直角)	$\bar{V}$	51 608	51 608
v, w		33 535	33 536
合計		85 143	85 144
曲げモーメント (鉛直面内)	$\bar{V}$	128	128
v, w		4 241	4 380
合計		4 369	4 508
せん断力 (橋軸直角)	$\bar{V}$	393	393
v, w		224	224
合計		617	617
せん断力 (鉛直面内)	$\bar{V}$	2	2
v, w		59	63
合計		61	65
単純ねじり モーメント	$\bar{V}$	451	451
v, w		513	553
合計		964	1 004

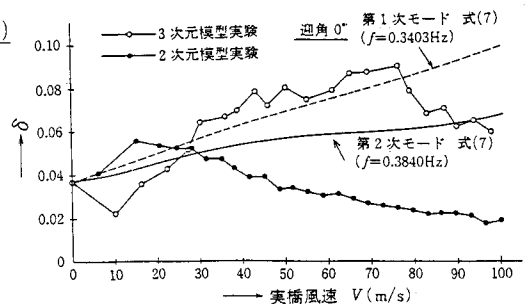


図-5 対数減衰率の比較

参考文献

- 1) 本州四国連絡橋耐風設計基準(1976)・同解説
- 2) A.D. Kiureghian: Structural Response to Stationary Excitation, Proc. ASCE, EM6 (1980,3)
- 3) R.H. Scanlan: The Action of Flexible Bridges under Wind, Part II Buffeting theory, Journal of Sound and Vibration, 60-2(1978)
- 4) 山村、田中: 長大構造物のガスト応答解析、日立造船技報 Vol.47 (1987.6)