

第 I 部門 側面に開口部を設けた矩形柱のギャロッピング不安定性に関する研究

京都大学工学部 学生員 ○高田 篤史 京都大学大学院工学研究科 正会員 八木 知己
 京都大学大学院工学研究科 学生員 山本 宗一郎 京都大学大学院工学研究科 学生員 宮元 鴻
 京都大学大学院工学研究科 正会員 野口 恭平

1. 背景

橋梁の施工の容易化・軽量化が図られる中、橋桁側面に開口部を有するバタフライウェブ橋が提案された。また、既往の研究¹⁾から、側面のスパン方向に開口部と閉口部が交互に現れるような構造（三次元的な開口部）を有した矩形柱において、側面開口率が空力特性に影響を与えることが分かっている。しかし、そのメカニズムについては十分に明らかにされているとは言えない。この一因として、断面の三次元的変化が複雑な流れ場を起こすことが考えられる。本研究では、空力特性を単純化させるため、断面の三次元的変化を排除し、スパン方向に一樣な構造となる開口部（二次元的な開口部）を設けた矩形柱(図1)を対象に、開口部面積率がギャロッピング不安定性に及ぼす影響とそのメカニズムの解明を目的とし、風洞実験を行った。

2. 実験概要

側面に開口部を有し、任意の大きさのプレートを設置することで開口部の大きさを変化させることができる模型を使用した。また、側面開口部のギャロッピング不安定性への影響を検証するため、開口部を完全に閉口した際に断面辺長比が $B/D=2$ (幅員 $B=140\text{mm}$, 高さ $D=70\text{mm}$) となる矩形柱を選択した。開口部形状を決定する変数として、開口部面積率 Opening area Ratio(OR)を $OR = d/D_0$ で定義した(D_0 : 上下板間距離[m], d : 開口部高さ[m])。この OR が空力特性に与える影響を検証するために、非定常空気力測定実験(加振倍振幅 10mm, 加振振動数 2.6Hz)、静的空気力測定実験及び静的圧力測定実験を各 OR (0, 0.25, 0.5, 0.75, 0.875, 1) に対して行った。

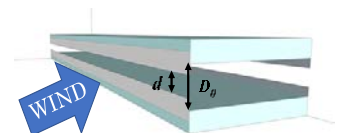


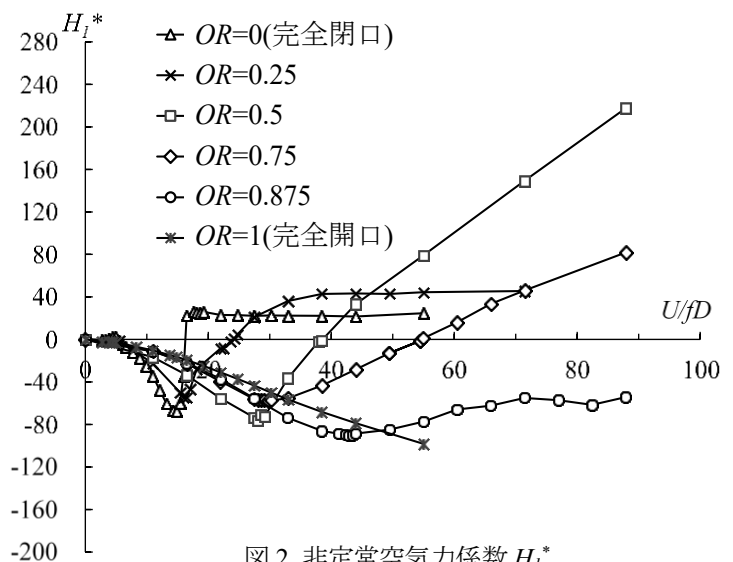
図1 矩形柱模型

3. 実験結果及び考察

非定常空気力測定実験から算出された各 OR の非定常空気力係数 H_l^* を図2に示す。 H_l^* は以下の式のうち、鉛直たわみ方向の空力減衰を表す指標で、負から正に転じる風速でギャロッピングが発現し、正の値の大きさは励振力の強さを示す。

$$Lift = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left\{ k H_1^* \frac{\dot{\eta}}{U} + k^2 H_4^* \frac{\eta}{B/2} \right\} \quad (1)$$

$Lift$: 単位スパン長あたりの非定常揚力[N/m] (下向き正), η : 鉛直たわみ方向の変位[m] (下向き正), $(\cdot)$: 時間微分, ρ : 空気密度[kg/m³], U : 風速[m/s], k : 換算振動数 ($=b\omega/U$), ω : 加振角振動数[rad/s]。この結果から、OR が大きいほど、ギャロッピング発現風速

図2 非定常空気力係数 H_l^*

速が大きくなることが判明した。また、ギャロッピング発現風速より高無次元風速域での H_l^* の正の値に着目すると、OR が大きくなるほど、OR=0~0.5 では大きくなり、OR=0.5~1 では小さくなることが判明した。

まず、ギャロッピング発現風速と OR の関係について着目する。既往の研究¹⁾から三次元的な開口部を有する矩形柱は、側面の開口率が大きいほど、カルマン渦周波数が小さくなり、物体の振動数とカルマン渦放出周波数が同期する風

速が高風速に移動することが原因で、ギャロッピング発現風速が高風速側に移動すると考えられている。一方、今回使用した二次元的な開口部を有する矩形柱では、図3から、 $OR \leq 0.5$ では同様に、カルマン渦の影響で、 OR が大きいほど、ギャロッピング発現風速が大きくなる

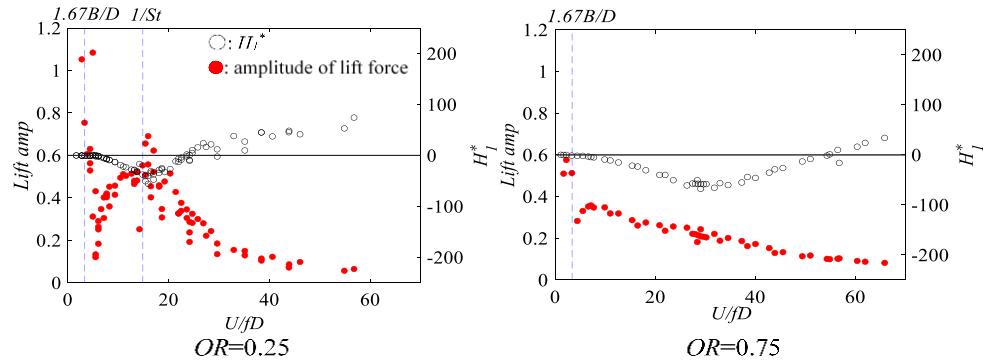


図3 非定常空気力係数 H_l^* と無次元揚力の振幅

なると考えられる。しかし、 $OR \geq 0.5$ では、カルマン渦放出が確認できず、カルマン渦の放出が抑制されていることから、カルマン渦に対応するような無次元揚力振幅のピークは見られない結果となった。ここで、既往研究結果²⁾から、断面辺長比 $B/D=2$ の矩形柱の後流側にカルマン渦を抑制する目的でスプリッタープレートを設置した際の無次元揚力振幅の結果から、自己励起型渦が放出される領域が広がることでギャロッピングの発現を抑制していた可能性が考えられている。また、無次元揚力振幅のピークが消える点において、今回の実験と上記の既往研究は似た変化を示すといえる。このことから、 $OR \geq 0.5$ では、カルマン渦ではなく、自己励起型渦がギャロッピングの発現に干渉し、発現風速が大きくなる可能性があると考えられる。

続いて、ギャロッピングの励振力と OR の関係について着目する。一般に、静的な空力特性から非定常状態の空力特性を考察できることが知られている(準定常理論)。そこで、静的圧力測定実験を行い、図4に示す圧力点での圧力から、時間平均無次元圧力を示す圧力係数 C_p を算出した。また、桁外部に比べ、桁内部の圧力が模型の振動に対する影響が小さいことを確認しており、以下では桁外部の圧力から検討を行う。 $OR=0.25, 0.5, 0.875$ での迎角 0° での圧力分布(図5)より、 OR が大きいほど桁後縁で圧力回復が生じていることから、剥離せん断層が桁後縁に近づいていると考えられる。次に迎角 1° での圧力分布から、 $OR \leq 0.5$ では、 OR が大きいほど桁外部の上下面の圧力差は大きくなる。これは OR が大きいほど、迎角 0° で桁外部の剥離流れが模型表面により近づくため、迎角 1° に変化した際、下面では剥離流れが桁に近づくことによる圧力低下、上面では逆に遠ざかることで圧力回復がより大きくなるためと考えられる。その結果、 $OR \leq 0.5$ では、 OR が大きいほど、 $dC_l/d\alpha$ が大きくなり、ギャロッピングの励振力は大きくなる。

一方 $OR \geq 0.5$ でも、 OR が大きいほど、剥離流れが模型表面に近づくが、下面後縁付近では次第に剥離流れの再付着が促進されることで、桁後縁の上下面圧力差が小さくなり、ギャロッピングの励振力に寄与しなくなる。この結果、 $OR \geq 0.5$ では、 OR が大きいほど、 $dC_l/d\alpha$ が小さくなり、ギャロッピングの励振力は小さくなることが分かった。

4. 結論

- (1) $OR \geq 0.5$ では、カルマン渦の放出が顕著ではなく、自己励起型渦の放出領域がより高風速域まで広がっていると推測される。このことより、自己励起型渦がギャロッピングの発現に対して干渉する可能性が考えられる。
- (2) 開口部面積率 OR が大きいほど、剥離せん断層が桁後縁に近づくため、 $OR \leq 0.5$ ではギャロッピングの励振力が大きくなったと考えられる。また、 $OR \geq 0.5$ では、下面後縁において剥離せん断層の再付着が促進されることで圧力回復がより顕著となり、励振力が弱くなることが明らかとなった。

参考文献 (1) Wang et al., Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 206, 2020 (2) 八木ら, 構造工学論文集 vol.59, 552-561, 2013.

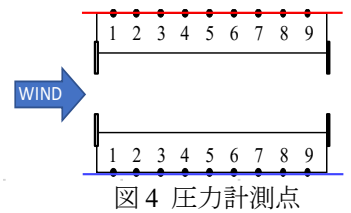
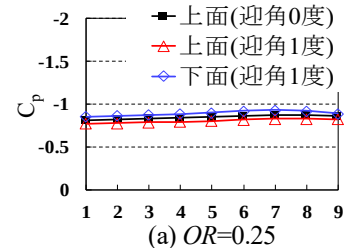
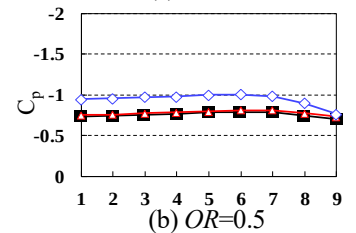


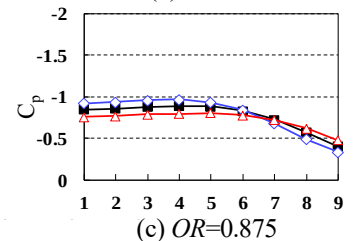
図4 圧力計測点



(a) $OR=0.25$



(b) $OR=0.5$



(c) $OR=0.875$

図5 時間平均圧力分布