

側面開口部の形状変化が矩形柱のギャロッピング不安定性に及ぼす影響

京都大学 学生員 ○高田 篤史
 京都大学 正会員 野口 恭平
 京都大学 非会員 山本 宗一郎

京都大学 正会員 八木 知己
 横浜国立大学 正会員 王 嘉奇
 京都大学 非会員 宮元 鴻

1. 序論

既往の研究¹⁾から、側面のスパン方向に開口部と閉塞部が交互に現れるような構造 (TypeA 模型) を有する断面辺長比 $B/D=2$ の矩形柱において、側面開口部の形状が空力振動特性に影響を与えることが分かっている。そこで本研究では、このような側面開口部が空力振動特性に与える影響及びメカニズムの解明を目的とし、一連の風洞実験を行った。また、模型周りの流れ場をより単純化し開口部の空力振動特性に対する影響を検討するために、構造的な三次元性を排除した二次元的な開口部形状模型 (TypeB 模型) を用いて同様の風洞実験を行った。

2. 実験概要

本実験では図1に示す模型を用いた。これらの模型は、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、開口部を完全に閉じると断面辺長比が $B/D=2$ (幅員 $B=140\text{mm}$, 高さ $D=70\text{mm}$) の矩形柱となる。側面開口部形状を一意的に定めるためのパラメータとして、開口部面積率 Opening area Ratio (OR) を TypeA 模型は $OR = a / (a + b)$, TypeB 模型は、 $OR = d / D_0$ で定義した (a : 開口部スパン方向長さ [m], b : 閉塞部スパン方向長さ [m], d : 開口部高さ [m], D_0 : 上下板間距離 [m])。OR が空力特性に与える影響を検証するために $OR = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 0.875, 1$ に対して一連の風洞実験を行った。

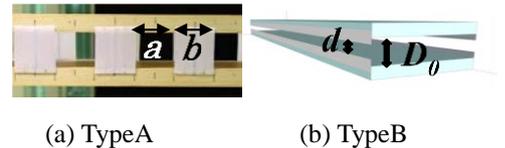


図1 矩形柱模型

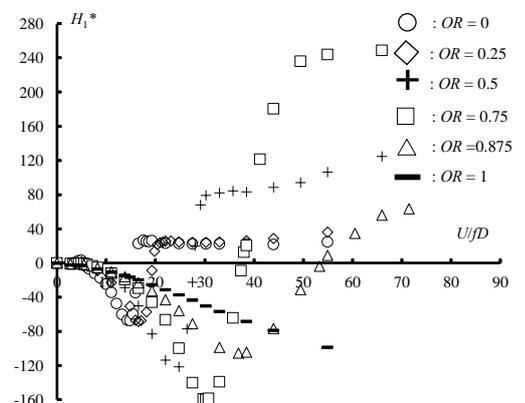
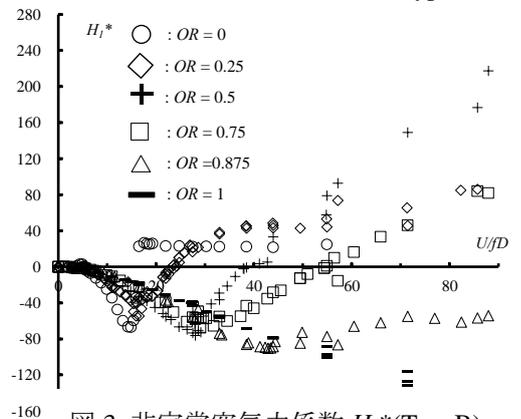
3. 実験結果および考察

TypeA, TypeB 模型の空力応答特性を把握するため、非定常空気力測定実験を行い、以下の式における非定常空気力係数 H_1^* を算出した²⁾。

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

$Lift$: 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/m^3], U : 風速 [m/s], k : 換算振動数 ($= b\omega/U$), ω : 加振角振動数 [rad/s]。ここで H_1^* は、鉛直たわみ方向の空力減衰を表す係数で、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。各 OR における両模型の H_1^* を図2, 図3に示す。両模型共に OR が大きくなるほどギャロッピングの発現風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後の H_1^* の正の値は、TypeA 模型では OR が大きくなるほど $OR=0\sim 0.75$ では大きくなり、 $OR=0.75\sim 1$ では小さくなる。一方、TypeB 模型では OR が大きくなるほど $OR=0\sim 0.5$ では大きくなり、 $OR=0.5\sim 1$ では小さくなる。以上のような OR の変化とギャロッピングとの関係について以下のように検証を行った。

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。TypeA 模型では、OR が大きいほどカルマン渦周波数が小さくなるため、物体の振動数とカルマン渦放出周波数が同期する無次元風速が高

図2 非定常空気力係数 H_1^* (TypeA)図3 非定常空気力係数 H_1^* (TypeB)

キーワード 側面開口部, ギャロッピング, カルマン渦, 圧力

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 Tel 075-383-3170

風速にな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したと考えられている¹⁾。TypeB 模型の $OR < 0.5$ では TypeA 模型と同様の傾向が見られたが、 $OR \geq 0.5$ では静的空気力測定実験においてカルマン渦の放出が確認出来ず、かつ非定常空気力測定実験から得られた無次元揚力振幅についても、TypeB 模型の $OR \geq 0.5$ においては TypeA 模型でみられたカルマン渦に対応するピークはみられなかった(図4)。ここで、既往の研究結果³⁾から、 $B/D = 2$ 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する可能性が指摘されている。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ており、TypeB 模型の $OR \geq 0.5$ 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、発現風速が高風速に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。静的圧力測定実験より得られた TypeA 模型の桁外部での時間平均圧力分布(迎角 $0^\circ, 1^\circ$)を図5に示す。なお、桁内部における空気力は桁全体の空気力に対して寄与が小さいこと、開口部と閉塞部の圧力分布に差が見られないことを別途確認している。 OR が大きいほど桁後縁の圧力が大きいことから、剥離流れが桁後縁に近づいていると考えられる。次に、ギャロッピング不安定性の指標である揚力係数勾配 $dC_l/d\alpha$ について検討するため、迎角 1° での圧力分布に着目する。 $OR \leq 0.75$ 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近づくため、 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上昇が大きくなるためと考えられる。その結果、 $OR \leq 0.75$ では OR が大きいほど、ギャロッピングの励振力は大きくなったと考えられる。

一方、 $OR = 0.875$ の迎角 0° での剥離流れは $OR = 0.75$ と比較して模型表面に接近することで、圧力上昇がより前縁側から生じる。その結果、 1° に変化した際、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。その結果、 $OR = 0.875$ では $OR = 0.75$ と比較して、ギャロッピングの励振力が小さくなるのが分かった。また、TypeB 模型を使用して行った静的圧力測定実験の結果からも TypeA 模型と同様の傾向が見られ、上記のような原因で $OR = 0.5$ においてギャロッピングの励振力が最大となることが判明した。

4. 結論

- (1) 開口部面積率 OR が大きいほど、TypeA 模型では $1/S_t$ が大きくなり、ギャロッピングの発現風速が大きくなる一方、TypeB 模型の $OR \geq 0.5$ では自己励起型渦がギャロッピングの発現に干渉する可能性が考えられる。
- (2) 両模型共にある OR に至るまでは、剥離流れが桁後縁に近づくためギャロッピング発現後の励振力が大きくなり、より OR が大きくなると、下面後縁付近で再付着が促進されることで圧力上昇が顕著になるため、励振力が弱くなるのが分かった。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 20H02232 の助成を受けた。

参考文献 1) Wang et al., Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 206, 2020.

2) Scanlan and Tomko, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.97, EM6, 1717-1737, 1971.

3) 八木ら：構造工学論文集 vol.59, 552-561, 2013.

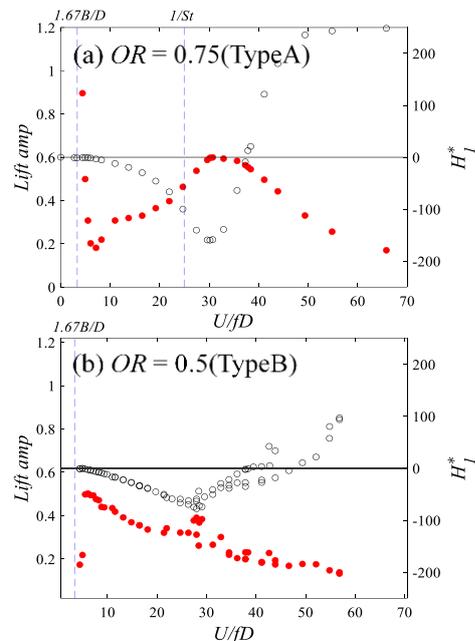


図4 非定常空気力係数 H_1^* と

無次元揚力の振幅

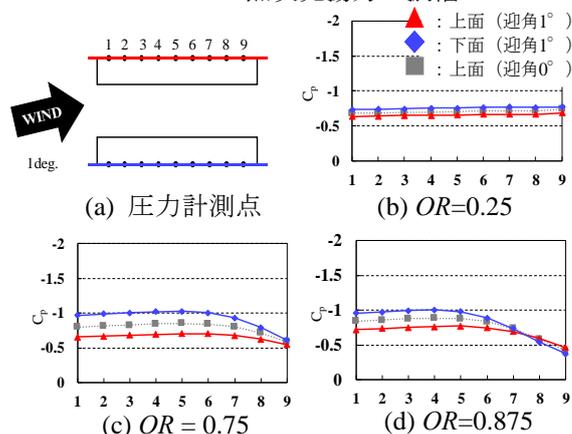


図5 時間平均圧力分布