

桁幅桁高比および底面隅角部形状による鋼箱桁橋の耐風改善法

Improvement of aerodynamic instability of long span steel box girder bridge by changing bottom corner shape

永田琢哉*, 久保喜延**, 恒富智子***, 木村吉郎****, 加藤九州男*****

Takuya NAGATA, Yoshinobu KUBO, Tomoko TUNETOMI, Kichirou KIMURA, Kusuo KATO

*九州工業大学大学院 工学研究科 建設社会工学専攻 博士前期課程 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1)

**九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1)

***倉測建設コンサルタント(株)設計部 (〒710-0038 岡山県倉敷市新田 2527-6)

****九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1)

*****九州工業大学助手 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1)

Steel box girder bridges have been often used for the bridge with longer span length than 100m. The possibility of occurrence of aerodynamic vibration is increasing with increment of span length. Up to now, in order to suppress the aerodynamic vibrations, additional aerodynamic devices such as flap and skirt have been adopted. However, since these devices are not structural members, additional installation cost and maintenance cost for long term usage are needed. If the aerodynamic instability of the bridge is improved without such additional devices, the construction cost and maintenance cost of the bridge will be reduced. In the present research, it was investigated whether the aerodynamic vibrations of both vortex-excited vibration and galloping could be suppressed by only changing bottom corner shape of the steel box girder without using additional aerodynamic devices.

Key words : steel box girder bridge, aerodynamic vibration, suppression of vibration

1. はじめに

今日, 100m 以上の径間では, 鋼箱桁橋形式が採用されている。しかし, 橋梁の長大化に伴い, 空力弾性振動が発生する可能性が相対的に高くなってきており, 耐風安定性を確保することが重要課題となっている。これらの振動現象の抑制策の 1 つとして, フラップやスカート等の構造用部材以外の付加部材を設置することがこれまでに行われてきている。しかし, このような付加部材は, 耐久性, 維持管理面において問題が顕在化しているのが現状である。そこで, 耐久性の高い構造部材のみで耐風制振対策を行うことが可能であるかを検討することにした。

これまでの検討において, 鋼箱桁橋の桁下角部の面取形状を変化させて応答実験を行った結果, 面取化を施していない基本断面ではギャロッピングのみが発生し, 面取化を施した断面では渦励振のみが発生するという結果が得られた¹⁾。この結果より, 適切な面取化を行えば, ギャロッピングと渦励振の両方を抑制できる桁断面を得ることが出来るのではないかと考えた。

その場合, 空力弾性振動の発生を抑制する手法として, 久

保が提案してきている剥離干渉法が考えられる。剥離干渉法の基本的な考え方は, 以下のとおりである。図 1 に示すように断面上流側に 2 つの剥離点を設けて, それぞれを 1 次剥離点, 2 次剥離点とし, 1 次剥離点からの剥離流を 2 次剥離点で制御することによって, 空力弾性振動の原因となる剥離渦の生成を抑制するものである。これまでの研究により, 1 次剥離点と 2 次剥離点とが物体表面となす角度 θ が 30° の場合が剥離渦の生成をもっとも抑制できることがわかっている²⁾。

このことにより, 鋼箱桁橋の底面隅角部形状の変化による耐風改善が可能となれば, 付加部材の設置による新たな設置費用および付加部材の維持管理費が削減でき, 経済的な設計が行えると同時に, 耐久性の高い安全な桁の設計を実現することが出来る。

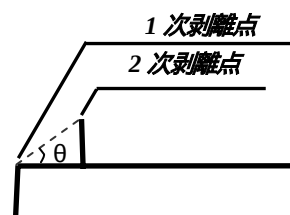


図 1 剥離干渉法概略図

以上を踏まえ、本研究では、長径間鋼箱桁橋において底面隅角部における面取り形状を変化させることにより、ギャロッピングと渦励振の両現象を抑制できる断面を探すことを目的とした。

2. 実験方法

実験には、九州工業大学建設社会工学科所属の回流式空力弾性試験用風洞（測定断面：1780mm×910mm）を使用し、一様流中においてコイルバネを介し、模型を鉛直たわみ1自由度で支持し、たわみ1自由度応答実験を行った。また、流れの2次元性を確保するために模型の両端に端板を設置した。

本実験では、実験用模型には、想定実橋の縮尺率 1/78 の2次元剛体模型を用いた。図2に桁断面模型の概略図を示す。本実験で用いた模型は、図2に示す斜線部を脱着可能な部材とすることで、桁幅を固定して桁高を変化させて風洞実験を行えるようにした。また、表1に応答実験用模型の諸元を示す。ここで、対数構造減衰率を $\delta=0.0030$ としているが、空力特性を把握するために減衰を極力小さくした。また、模型の橋軸方向長さは800mmとした。

本研究の結果を今後の橋梁設計において使用できるようにするため、これまでに架設された橋梁の橋長、最大スパン、全幅員(B)、桁幅(W)、桁高(D)について調査した。得られた桁幅桁高比(W/D)、桁幅全幅員比(W/B)、桁高全幅員比(D/B)についてまとめた。その結果を表2に示す³⁾。表2より、桁幅全幅員比(W/B)には差が見られなかったため、桁幅、全幅員は変化させないものとした。しかし、桁幅桁高比(W/D)において既存の橋梁で差が見受けられたため、桁高を変化させて検討することとした。

実験ケースについては、既存の橋梁の調査結果より、桁幅桁高比(W/D)に着目し、 $W/D=1.7, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4$ とした。これらの各ケースにおいて h/D を変化させて表3に示す実験ケースについて検討を行った。

3. 実験結果および考察

3-1 結果と考察

(1) 桁幅桁高比 $W/D=1.7$

応答実験の結果を、横軸に換算風速 ($V_r=V/fD$)、縦軸にたわみ無次元倍振幅 ($2A/D$) とした応答図として図3に示す。

どのケースにおいても換算風速 $V_r=5$ 付近で渦励振が発生し、換算風速 $V_r=6$ 付近で振幅が最大となっているため、最大振幅の比較を行った。また、ギャロッピングは、面取高の小さい $h/D=0, 0.05$ の2ケースにおいて大きな発散振動が生じ、面取高を大きくしていくにつれて、振幅が小さくなっていくことがわかった。今回実験した断面は、添加物が設置された類似する実橋断面の実験結果と比べると適切な h/D を採用した断面では、添加物がある場合の断面に比べ、ギャロッピングがより抑制できていると考えられる⁴⁾。また、この結果をわかりやすくするために、すべての W/D の実験ケースにおい

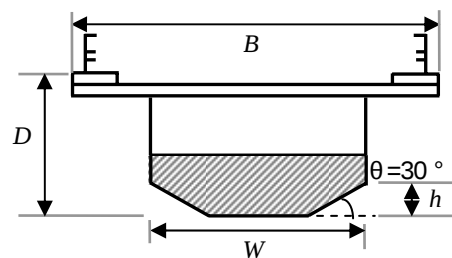


図2 模型桁断面の概略図

表1 模型諸元

項目	単位	想定橋梁	実現値
全幅員	mm	12750	164
桁幅 (W)	mm	7700	98.4
代表長 (D)	mm	3200	45
模型重量	kgf	-	1.25
振動数	Hz	-	7.75
構造減衰率		-	0.0030
スクリーン数		-	1.099

表2 既存の橋梁の桁断面³⁾

橋梁名	W/D	W/B	D/B
A 橋	1.6	0.4	0.27
B 橋	1.4	0.4	0.29
C 橋	2.4	0.6	0.25
D 橋	1.8	0.4	0.25
E 橋	2.0	0.5	0.26
F 橋	1.7	0.5	0.28
G 橋	2.0	0.5	0.24
H 橋	2.1	0.4	0.20
I 橋	1.9	0.5	0.27

表3 全実験ケース

W/D	h/D (×10 ⁻²)							
1.7	0	5	9	12	17	18	19	23
1.8	15	16	17	18	19	20		
2	0	6	10	14	16	18	22	
2.2	0	5	10	12	14	15	16	17 18 19 20
2.4	0	5	12	14	15	17	20	22 24

て、統一して検討するために、各 W/D の実験ケースで共通した換算風速の中で、値が最大の箇所で比較することとし、換算風速 $V_r=28$ 付近におけるギャロッピング域の振幅の比較も行った。それぞれの結果を図4、図5に示す。

渦励振域の最大振幅については、面取高を大きくする、つまり、面取桁高比 h/D を大きくすると、それに従い振幅が一度大きくなり、 $h/D>0.12$ になると小さくなる。またギャロッピング域の振幅は、面取高を大きくするとともに応答が小さくなる。

次に、空力的に安定な断面について、渦励振とギャロప్ప

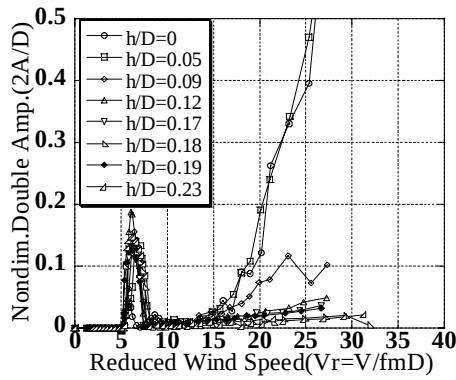


図3 応答図 (W/D =1.7)

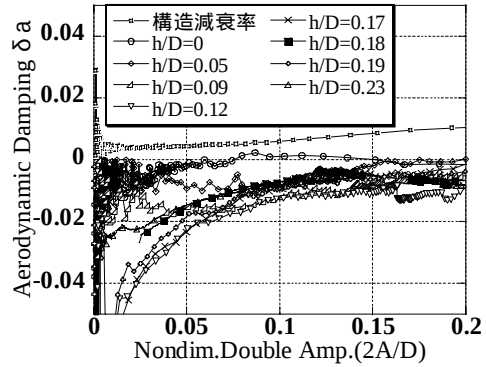


図6 渦励振時 振幅 - 空力減衰率図 (W/D =1.7)

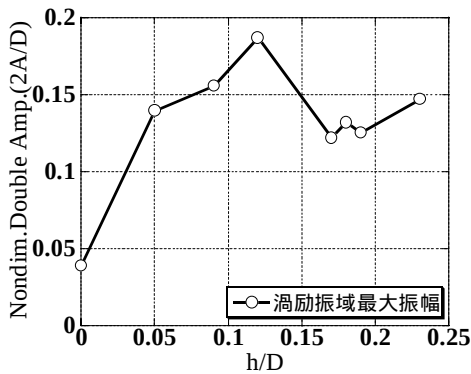


図4 渦励振域最大振幅 (W/D =1.7)

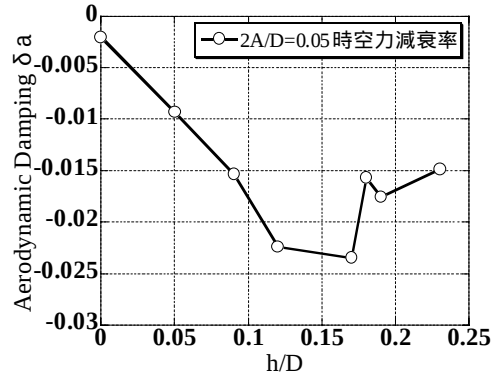


図7 2A/D=0.05 時の空力減衰率 (W/D =1.7)

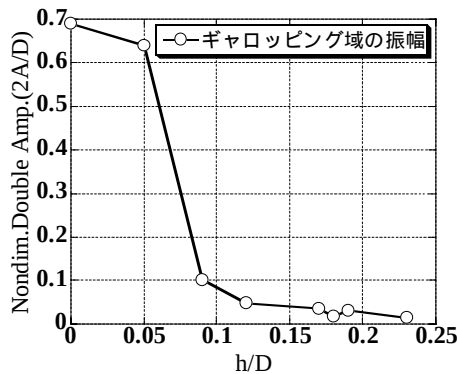


図5 ギャロッピング域振幅 (W/D =1.7)

ングの双方から検討を進める。

まず、渦励振について検討する。実構造物において空力的に安定であると判断される条件は、ゴム支承を採用した場合の桁橋の対数構造減衰率に関しては、従来の桁橋の構造減衰より小さい傾向にあり、 $\delta = 0.35/\sqrt{L}$ より算出される。ここで、算出式内の L は最大支間長であり、250m を想定し、安全側を見て対数構造減衰率が $\delta_s = 0.02$ の場合として考察している。したがって、空力減衰率 $\delta_a = -0.02$ 以上となる場合が空力的に安定となる。その条件に関して検討を進めるために、渦励振時の振幅 - 空力減衰率図を図6に、無次元倍振幅 $2A/D = 0.05$ 時の空力減衰率を図7に示す。ここで、空力減衰率 δ_a とは、振動が生じた風速域で模型を強制的に所定の振幅になるまで加振して自由減衰させた場合の対数減衰率 δ_y 、

模型の振動を強制的に静止させてから発散させた場合の対数減衰率 δ を振幅ごとに計算した値から、模型の対数減衰率 δ_s を差し引いたものである。つまり、空力減衰率 δ_a は、 $\delta_a = \delta - \delta_s$ より求めたものである。図7において上記の条件を満たしている面取桁高比は $h/D = 0, 0.05, 0.09, 0.18, 0.19, 0.23$ の6ケースである。

次に、ギャロッピング域の振幅について検討する。ここで、渦励振の検討時に、無次元倍振幅 $2A/D = 0.05$ について検討していることから、ギャロッピング域では、無次元倍振幅 $2A/D = 0.05$ を下回る振幅であった場合に空力的に安定な断面として扱うこととする。このことから、図5において、ギャロッピング域で空力的に安定であるといえる断面は、今回用いた条件より、面取り桁高比 $h/D = 0.12, 0.17, 0.18, 0.19, 0.23$ の5ケースである。

以上より、桁幅桁高比 $W/D = 1.7$ において空力的に安定である断面は、今回の条件であれば、渦励振に関しては $h/D = 0, 0.05, 0.09, 0.18, 0.19, 0.23$ の断面となり、ギャロッピングに関しては $h/D = 0.12, 0.17, 0.18, 0.19, 0.23$ の断面となる。

以下、桁幅桁高比 W/D すべての実験ケースにおいて同じ検討を進めたため、簡略化して述べることにする。

(2) 桁幅桁高比 $W/D = 2.0$

渦励振時の最大振幅の比較を行い、結果を図8に、また、ギャロッピング域に関しては、換算風速 $V_e = 28$ 付近におけるギャロッピング域の振幅の比較を行い、結果を図9に示す。渦励振域の最大振幅については、面取桁高比 h/D を変化さ

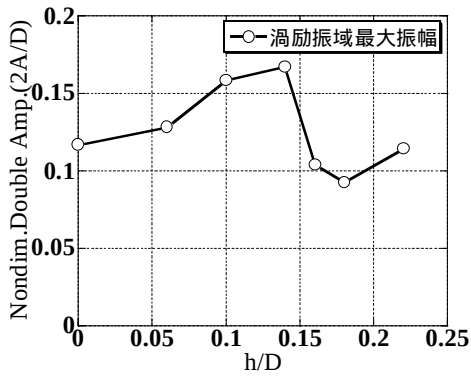


図8 渦励振域最大振幅 (W/D =2.0)

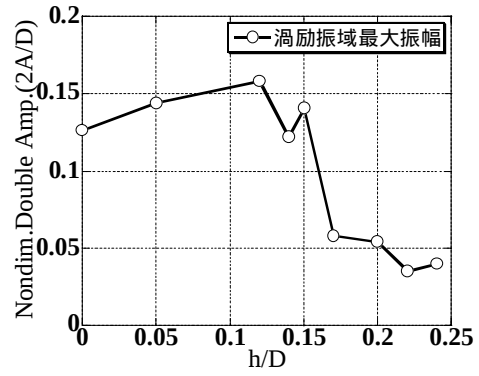


図11 渦励振域最大振幅 (W/D =2.4)

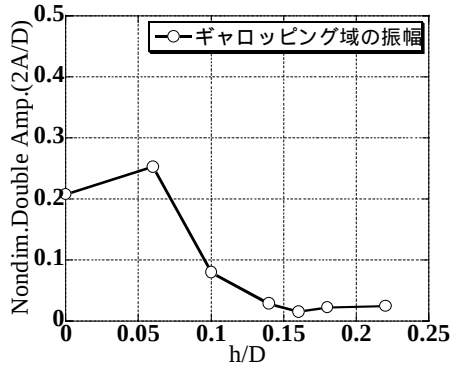


図9 ギャロッピング域振幅 (W/D =2.0)

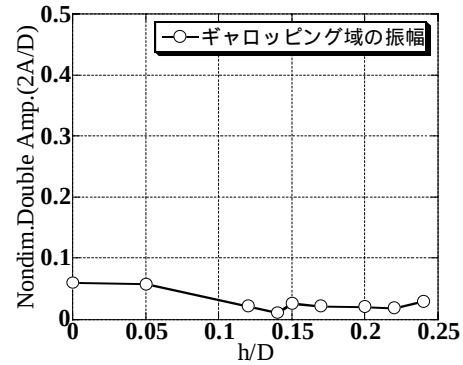


図12 ギャロッピング域振幅 (W/D =2.4)

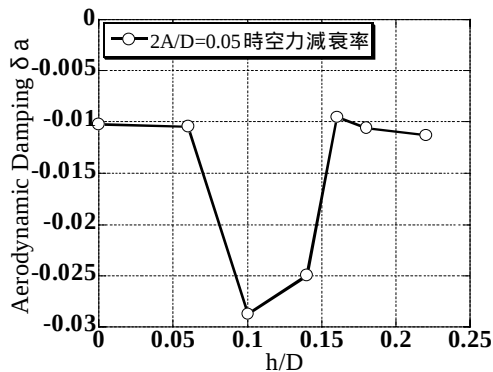


図10 2A/D=0.05 時の空力減衰率 (W/D =2.0)

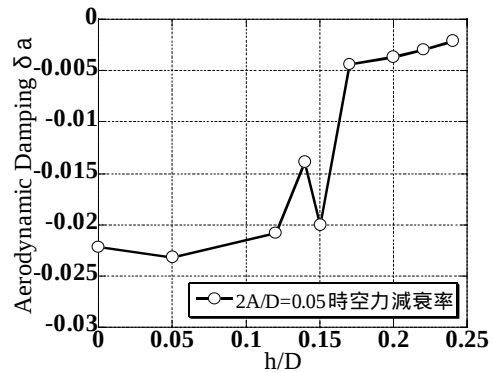


図13 2A/D=0.05 時の空力減衰率 (W/D =2.4)

せると、振幅が一度大きくなり、 $h/D > 0.14$ になると小さくなる。これは、 $W/D=1.7$ の場合と似た傾向である。またギャロッピング域の振幅も $W/D=1.7$ と同様の傾向にあり、 $h/D=0.06$ 以上になると、面取高を大きくするとともに応答は小さくなる。また、 $W/D=2.0, 1.7$ の2つの実験より、桁高が大きい方がギャロッピング域の応答が大きくなっている。

次に、空力的に安定な断面について、前ケースと同様に検討を進める。

まず、渦励振については、前ケースと同じ条件で検討する。その条件に関して検討を進めるために、渦励振時における無次元倍振幅 $2A/D=0.05$ 時の空力減衰率を図10に示す。図10より上記の条件を満たしている面取桁高比は $h/D=0, 0.06, 0.16, 0.18, 0.22$ の5ケースである。

次に、ギャロッピング域の振幅について検討する。ここでも、前ケースで行った検討方法を用いる。これより、図9に

において、ギャロッピング域で空力的に安定である断面は、面取桁高比 $h/D=0.14, 0.16, 0.18, 0.22$ の4ケースである。

(3) 桁幅桁高比 $W/D=2.4$

渦励振域最大振幅の比較を行い、その結果を図11に、また、ギャロッピング域に関しては、換算風速 $V_t=28$ 付近におけるギャロッピング域の振幅の比較を行い、結果を図12に示す。

渦励振域の最大振幅については、面取桁高比 h/D を大きくするに従って振幅は一度大きくなり、 $h/D=0.12$ から小さくなり、 $h/D=0.17$ ではさらに小さくなる。また、ギャロッピング域の振幅は $W/D=1.7$ と同様に、面取高を大きくするとともに小さくなる。この実験より、桁高が小さいと面取高が小さくても耐風効果が得られる。

次に、空力的に安定な断面について検討を進める。

まず、渦励振に関しては前2ケースと同じ条件で検討する。

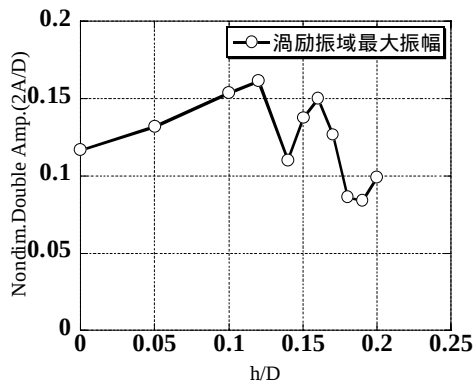


図 14 渦励振域最大振幅 (W/D =2.2)

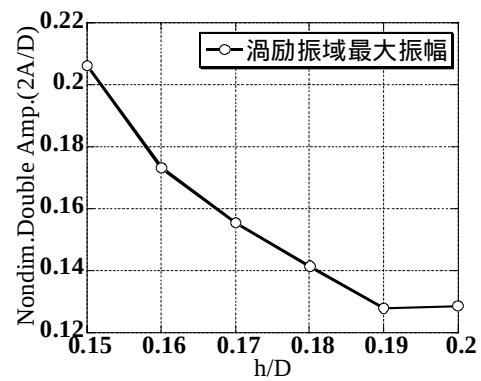


図 17 渦励振域最大振幅 (W/D =1.8)

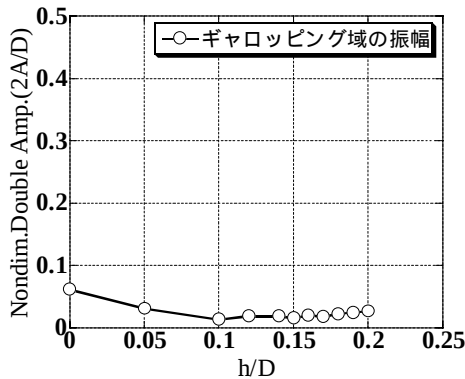


図 15 ギャロッピング域振幅 (W/D =2.2)

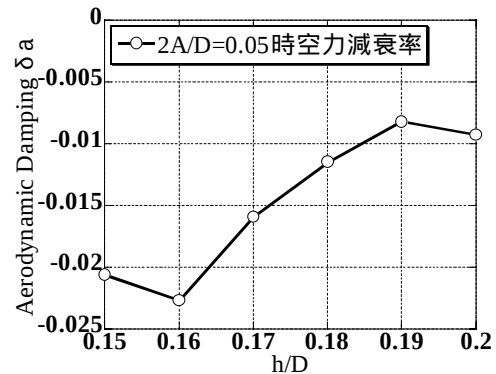


図 18 2A/D=0.05 時の空力減衰率 (W/D =1.8)

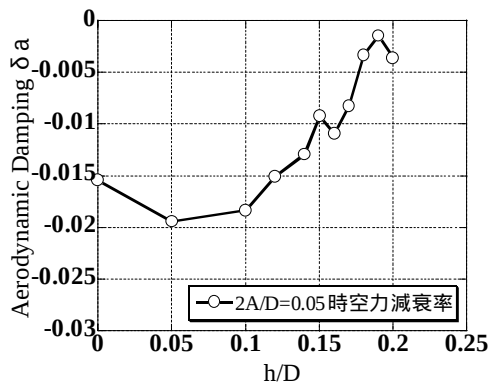


図 16 2A/D=0.05 時の空力減衰率 (W/D =2.2)

渦励振時の無次元倍振幅 $2A/D=0.05$ 時の空力減衰率を図 13 に示す。図 13 において上記の条件を満たしている面取桁高比は $h/D=0.14, 0.15, 0.17, 0.20, 0.22, 0.24$ の 6 ケースである。

次に、ギャロッピング域の振幅について検討すると、図 12 において、ギャロッピング域で空力的に安定であるといえる断面は、面取り桁高比 $h/D=0.12, 0.14, 0.15, 0.17, 0.20, 0.22, 0.24$ の 7 ケースである。

(4) 桁幅桁高比 W/D=2.2

渦励振域最大振幅の比較を行い、その結果を図 14 に、また、換算風速 $V_f=28$ 付近におけるギャロッピング域の振幅の比較も行い、結果を図 15 に示す。

渦励振域の最大振幅については、前ケースで検討したような傾向はみられなかったが、面取桁高比 h/D を大きくするに

従って振幅は一度大きくなり、 $h/D=0.12$ あたりを境に小さくなる傾向にある。また、 $W/D=1.7$ の場合と比べて、振幅が全体的に小さく、面取高を大きくした場合の渦励振の抑制が見られた。また、ギャロッピング域の振幅は $W/D=2.4$ と同様、面取高を大きくするとともに応答が小さくなる。この実験より、やはり桁高が小さいと面取高が小さくても耐風効果が得られることが確認できた。

次に、空力的に安定な断面について検討を進める。

まず、他のケースと同じ条件で、渦励振について検討する。渦励振時の無次元倍振幅 $2A/D=0.05$ 時の空力減衰率を図 16 に示す。図 16 において、すべての実験ケースにおいて上記の条件を満たしている。故に $W/D=2.2$ の断面は他のケースとは異なり、空力的に安定な優良断面であると考えられる。

次に、ギャロッピング域の振幅について検討すると、図 15 から、ギャロッピング域で空力的に安定であるといえる断面は、面取り桁高比 $h/D=0.05, 0.10, 0.12, 0.14, 0.15, 0.16, 0.17, 0.18, 0.19, 0.20$ の 10 ケースである。

(5) 桁幅桁高比 W/D=1.8

渦励振域最大振幅の比較を行い、その結果を図 17 に示す。また、ギャロッピングについては他の W/D の場合に行った検討を行っていない。 $W/D=1.8$ の断面では、 h/D の実験ケースを $h/D=0.15 \sim 0.20$ としており、高風速域においてギャロッピング域での振幅が小さな断面であることが他の W/D の場合の結果よりわかっていたためである。

渦励振域の最大振幅については、前実験ケースで検討した

ような傾向はみられなかったが、面取桁高比 h/D を大きくするに従って振幅は小さくなる傾向にある。このことにより、面取高を大きくした場合の渦励振の抑制が確認できた。

次に、空力的に安定な断面について検討を進める。

まず、渦励振域について検討する。渦励振時の無次元倍振幅 $2A/D=0.05$ 時の空力減衰率を図 18 に示す。図 18 において、上記の条件を満たしている面取桁高比は $h/D=0.17, 0.18, 0.19, 0.20$ の 4 ケースである。

ギャロッピング域の振幅については、応答図として示してはいないが、前に述べた通り、すべての実験ケースにおいて条件を満たすことから、ギャロッピング域に関しては空力的に安定であるといえる。

3-2 結果の総括

- 1) 渦励振について見ると、どの桁高においても共通していたことは、今回測定した断面において、 $h/D=0.05\sim 0.12$ と面取化を行った断面では、面取化をしていない基本断面より振幅が大きくなることである。面取高を変化させた場合、面取桁高比 h/D が 0.15 より大きくなると、程度は異なるが、それぞれの断面で振幅が小さくなる。
- 2) 最も振幅が小さくなり、耐風制振効果が高かったのは、桁高が小さい $W/D=2.4$ の断面であった。このことより、扁平な断面の方がより耐風制振効果が得られることがわかった。
- 3) さらに、 $W/D=2.2$ の断面では、面取化を施すすべての断面において空力的に安定であった。この断面は特に空力的に安定な優良断面であることがわかった。
- 4) ギャロッピングについてみると、桁高比 $W/D=1.7, 2.0$ の断面においては、基本断面から面取を行った $h/D=0.05$ 付近の断面で振幅が大きくなった。また、面取桁高比が $h/D=0.15$ より大きくなると、どの断面においても同じ程度まで振幅が小さくなり、面取による耐風制振効果はどの桁高でも得られた。

全ての実験ケースにおいて W/D と h/D の関係図を、渦励振、ギャロッピング双方の観点から総括したものを図 19 に示す。ここで仮に、渦励振時において、無次元倍振幅 $2A/D=0.05$ 時で、空力減衰率 $\delta a=-0.02$ 以上が空力的に安定であるとした断面、かつ、ギャロッピング域において、無次元倍振幅 $2A/D=0.05$ を下回る振幅であった場合の断面を空力的に安定な断面として○、上記の条件を満たしていない断面を不安定な断面として×で示す。

4. 結論

図 19 を見てわかるように、渦励振、ギャロッピング双方を抑制することが出来る空力的に安定な断面とするには、桁高を大きくするに従い、面取桁高比も大きくする必要があるということがわかる。また、 W/D と h/D の間には空力的に安定

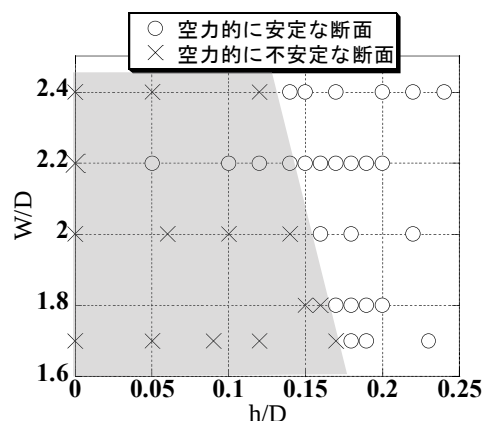


図 19 全実験ケースにおける W/D と h/D の関係

な断面と不安定な断面の境界が存在（図 19 網掛け部）し、特に空力的に安定であると考えられる $W/D=2.2$ の断面を除けば、箱桁が扁平になると面取りの量が減っている傾向にあるといえる。また、過去の矩形断面の面取り、隅切の研究事例と比較すると、ギャロッピング域については多少の差異は見られたが、渦励振の発現風速、最大振幅ともに、似た傾向にある⁹⁾。ここで、空力的に安定とした断面では、実際に底面隅角部を落とした場合、下フランジの幅が従来構造の半分以上になる場合がある。そこで、支間中央部では、板厚が厚くなるなどのデメリットも考えられるが、耐風性の面から考えると、図 19 中の○で示す断面が良好な断面である考えられる。

これまでの検討を踏まえ、鋼箱桁橋の桁下角部の面取形状を変化させることで、渦励振、ギャロッピングの両現象を抑制できる断面が存在することがわかった。これにより、鋼箱桁橋の底面隅角部形状の変化による耐風改善が可能となるのではないかと考えられる。

実橋の設計に反映できるようにするため、耐風制振メカニズムの解明、風の傾斜角や乱れ強度に対する応答特性に関する検討を今後進める予定である。

参考文献

- 1) 山内一朗，久保喜延，木村吉郎，加藤九州男：鋼箱桁橋の幅員桁高比および底面隅角部形状による耐風改善法，土木学会西部支部研究発表会，第 1 部門 21，p. p. 41～42
- 2) 田中洋介，野田辰徳，久保喜延，木村吉郎，加藤九州男：扁平矩形柱における剥離干渉効果の PIV による検討，土木学会西部支部研究発表会，第 1 部門 22，p. p. 43～44
- 3) 社団法人 日本橋梁建設協会：橋梁年鑑 平成 7～16 年版
- 4) 松尾善章，今金真一，本田明弘，齊藤通，杉山真人：伊王島大橋の耐風安定性検討について，土木学会第 60 回年次学術講演会第 1 部門 295，p. p. 585～586
- 5) 白石成人他：吊橋主塔の空力特性とその耐風安定化対策，第 12 回風工学シンポジウム，p. p. 369～374

(2006 年 9 月 11 日受付)