

## 10. 流体関連振動

とりまとめ：長尾文明 (徳島大学)

論文題目：“我国におけるテナタゲートの崩壊事故”著者：石井徳章, 阿南景子, 巻幡敏秋, 奥達也, 大原健史  
掲載：Vol.53A, pp.589-596, 2007 年 3 月

◆討議 [長尾文明 (徳島大学)]

アメリカにおける事故も我国と同様に試験湛水中に生じたのでしょうか。

◆回答：米国で起こった事故は、試験湛水中ではなく、通常の使用時に発生しました。オペレータは、普段通りにゲートを巻上げているときに通常ではない振動を感じ、緊急停止ボタンを押してゲートを振り返るとゲートが崩壊していたと証言しています。事故調査の結果、微小振動が繰り返し発生していたことも確認されています。

◆討議 [木村吉郎 (九州工業大学)]

事故の起きていないゲートでも、同様の振動現象が生じる可能性はあるのでしょうか。もし、そうだとするとどのような対策が今後必要でしょうか。

◆回答：テナタゲートは、ある限られた条件下で自励振動を引き起こします。現在世界中でたくさん使用されているテナタゲートの中には、放水時に自励振動を引き起こし、微小開度で放水できないものが実際に存在します。また、振動は表面化していないけれども、本質的な不安定性を具備しているゲートも存在します。したがって、実用されているすべてのテナタゲートで振動現象が生じる可能性があると言えます。今後、著者らの確立した振動試験手法および理論解析手法によって、すべてのテナタゲートの本質的な動的不安定性を解析し、危険なものについては、補強等の対策を行うことが必要です。著者らの解析を用いれば、どのような補強が適切であるかを提示することも可能です。

◆討議 [平野廣和 (中央大学)]

ゲートを振動させる外力として水流より生じることはないのでしょうか。6-8Hz 程度の振動数であれば、フルード数の高い流れの場合、ゲートを振動させる外力になるのではないのでしょうか。

◆回答：ゲートの下流側が水没しているような場合には、下端からの放水流の影響により振動が生じることがあり

ます。しかし、今の場合のように、下流側が水没していないような場合には放水流の影響でゲート本体が揺らされるような振動は起こりません。放水流の変動は、ゲートを振動させる外力として作用することはなく、振動エネルギーの供給源としてのみ作用します。

論文題目：“溢流を伴う矩形水槽の非線形スロッシング評価”著者：酒井理哉, 東貞成, 佐藤清隆, 田中伸和  
掲載：Vol.53A, pp.597-604, 2007 年 3 月

◆討議 [巻幡敏秋 (元日立造船株)]

水深が浅い場合の底板の変形や流れ場などが減衰に及ぼす影響を教えてください。

◆回答：水深が浅い場合の加振実験は、水槽中段に十分剛な板厚 10mm の木製底板を設置しています。加振時に若干の変形が生じる可能性がありますが、減衰評価を行った自由振動試験では、5gal 程度の微小正弦波を 5 波程度加振しただけであり、この加振レベルでは、底板の変形は生じていないものと推察されます。このため減衰評価時の自由振動における底板の変形の影響は無いものと判断しました。スロッシングの減衰は、波高計のロッド部、水槽壁面の摩擦、矩形水槽端部に生じる流れの乱れの影響などが、主たる原因と考えられます。

◆討議 [木村吉郎 (九州工業大学)]

波高計を付けない状態の実験は行われないのででしょうか。

◆回答：スロッシング周期は 1.7s~1.8s 程度であり、自由振動の計測でも 1 分程度の測定が必要であり、地震波加振では加振終了後も計測し全体の計測時間は 160s 程度でした。波高計以外の画像計測では、高速ビデオカメラのメモリの制限で 15s しか測定できず、スロッシングの全体挙動の測定が難しいため、波高計を付けざるを得ない状況でした。

◆討議 [石井徳章 (大阪電気通信大学)]

波形がきれいですが、線形理論では解けない現象でしょうか。

◆回答：画像計測でのビデオにおける液面形状は、今回

の加振ではそれほど複雑形状になっていませんが、水槽端部から溢流を伴う非常に非線形性の強い現象です。また、自由振動による実験でも、水槽内部の流れの乱れに起因する減衰挙動を評価しており、どちらも線形理論では評価できない現象です。

論文題目：“浮屋根式タンクのスロッシング時の挙動把握のための流れと構造の連成解析”

著者：平野 廣和，松田 宏，長沼 寛樹，井田 剛史，樽川 智一

掲載：Vol.53A, pp.605-613, 2007年3月

◆討議「吉住文太（三井造船）」

(1)今回の検討の結果、浮き屋根のある場合のスロッシングを解析する際、浮き屋根と貯蔵液体の連成解析を行う必要があるという結論でしょうか。

(2)浮き屋根モデルの有無による固有振動数の変化がみられず、固有振動モードの変化も少ないものと推察されます。その場合、最初に液体単独の応答解析を行い、その結果得られた自由表面の液面応答を浮き屋根モデルに強制変位で与えて強度解析を行う、というように連成させずに2段階で検討することはできないでしょうか。浮き屋根の構造形式にもよるかと思いますが、連成解析の必要性について教えてください

◆回答：(1)結論として、浮屋根と貯蔵液体との連成解析は必要となります。これは、数値解析だけではなくモデル実験(苫小牧で被害を受けた直径40mタンクの1/66<sup>1)</sup>、1/10<sup>2)</sup>)からも明らかで、わずかな剛性を有する浮屋根の有無で液面の挙動が変わって来ます。この現象に大きく寄与しているのが減衰であり、浮屋根の有無で大きく減衰が変わります。

(2)強制加振時(地震発生時)は、上記の方法で安全側の設計は可能と思われま。しかし、各種の実験(我々の行った実験<sup>2)</sup>や消防研究センターでの7m直径の実験<sup>3)</sup>)から、減衰時の浮屋根の挙動を把握する必要性が論じられています。減衰時(浮屋根が減衰して行く過程)が、浮屋根の構造上のクリティカルになる可能性があります。そのためにも連成解析が必要となります。

◆討議「豊田幸宏(電力中央研究所)」

自由振動で高次モードが生じるのは流体の有限振幅領域が効いており、ポテンシャルのモデル化では再現できないのではないのでしょうか。

◆回答：浮屋根の構造上の問題となる高次モードは、ポ

テンシャル理論で求まる固有値となっています。そのため、ポテンシャル理論を用いても現象を再現可能と考えております。

◆討議「石井徳章(大阪電気通信大学)」

Rayleigh減衰はどのように決定されたのでしょうか。

◆回答：本論文においては、直径4mモデルの実験結果より決定しました。なお、この値ですが、廣川らが行った実験<sup>4)</sup>などとほぼ同じ値となっています。

<参考文献>

- 1) 井田剛史，平野廣和，鈴木森晶，坂東譲，佐藤尚次：浮屋根式貯蔵タンクのスロッシング減衰対策 -0.6mタンクモデルの振動実験-，土木学会論文集 A 編，Vol.63, No.1, pp.242-251, 2007.3.
- 2) 井田剛史，平野廣和，有田新平，佐藤尚次，奥村哲夫：スロッシング発生時の貯槽浮屋根挙動の一考察 -φ4000タンクモデルでの振動実験-，土木学会論文集 A 編，Vol.63, No.2, 2007.7.
- 3) 総務省消防庁：やや長周期地震動に係わる危険物施設の技術基準に対応した合理的回収法の開発に関する調査検討報告書，2007.3.
- 4) 廣川幹浩，座間新作，山田實，西晴樹，畑山健：石油タンクのスロッシング減衰定数，消防研究所報告，第98号，pp.66-73, 2004.9.

論文題目：“スパン方向に有限な長さを持つ円柱の流れ直角方向振動に関する数値解析”

著者：六郷 彰，岡島 厚，木村繁男，木綿隆弘

掲載：Vol.53A, pp.614-621, 2007年3月

◆討議「長尾文明(徳島大学)」

アスペクト比が小さいほど渦励振応答が増加する解析結果は、スパン中央部の対称境界条件に起因しているのではないのでしょうか。対称境界条件を用いない3次元解析や実験結果との比較は行われているのでしょうか。

◆回答：他のアスペクト比(AR)に比べて、AR=2.5では励振エネルギーの減衰が小さく、円柱スパン長さ全体にわたって、比較的大きな励振エネルギーを受けるために振動振幅が大きくなったものと考えられます。この傾向はARが大きくなるほど根元近傍で励振エネルギーが小さくなるためにARが大きくなるほど振動振幅は小さくなるものと考えております。ただし、この現象がスパン中央部の境界条件に起因しているのかはフルモデルでの解析

を行っておらず、また実験においてもこのような低レイノルズ数におけるものはないので、比較は行っておりません。また2次元円柱における $Re=1000$ での特異な現象と今回の解析結果について何か関連があることも考えられますので、より低いレイノルズ数における解析及び3次元解析について、現在検討中です。

論文題目：“再付着断面に与えた微弱な周期攪乱の圧力変動への伝達特性”

著者：野田稔，長尾文明，宇都宮英彦，中出敦士，岡村美世

掲載：Vol.53A, pp.622-627, 2007年3月

◆討議「木村吉郎（九州工業大学）」

揚力の形成には断面周りの渦度の分布が重要だと思いますが、パルス状の噴流による周期的攪乱を乱流の構成要素とすることは適切でしょうか。

◆回答：ご指摘の通り、揚力の形成は断面周りの渦度の分布に支配されます。また、パルス状の噴流を如何に合成しようとも、乱流場を再現することはできないことから、本研究で用いた周期的攪乱を乱流の構成要素とすることはご指摘の通り適切ではないかもしれません。

乱流は、空間的・周波数的に分布した刺激として断面周りの流れや渦度の形成に影響し、圧力変動を生じさせています。そこで、本研究では、局所的な刺激の一種と考えられるパルス状噴流の微小周期攪乱が、圧力変動にどのように伝わるかを検討することによって、空間的・周波数的に分布する刺激の一種である乱流が断面周りの渦度分布を形成し、変動揚力を生み出すプロセスを明らかにするための一助としようと考えています。

論文題目：“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”

著者：永田琢哉，久保喜延，恒富智子，木村吉郎，加藤九州男

掲載：Vol.53A, pp.628-633, 2007年3月

◆討議「勝地 弘（横浜国立大学）」

(1)実験結果を箱桁幅との比で整理されていますが、桁全幅との比ではない理由を教えてください。

(2)面取りは箱桁のスカートと同等のメカニズムと考えられるのでしょうか。

◆回答：(1)箱桁橋は桁高が場所によって変化するのが通常ですので、桁全幅員を一定として検討しました。その場合、桁全幅員をパラメータにしますと、箱桁部の特性を把握しにくいと考えました。

(2)スカートのメカニズムを検討したことはありませんが、剥離干渉法のメカニズムの検討をしている他の研究結果と対応すると、面取りとスカートのメカニズムは近いものであろうとも考えられます。スカートと面取りとの大きな違いは、面取りは構造部材としての役目を持っており、経済性と耐久性において格段に優れているということです。

論文題目：“付加物を有する二箱桁断面における耐風安定性の検討”

著者：出野麻由子，吉住文太，曾我明，井上浩男

掲載：Vol.53A, pp.634-641, 2007年3月

◆討議「平野廣和（中央大学）」

迎角0度の時はBC1、迎角-5度の時にはBC1D3が最もフラッター風速が高くなっていますが、この理由を教えてください。

◆回答：フラッター発生風速が高くなっている理由を非定常空気力特性から考察しますと、いずれの場合も、①まず、ねじれ運動に対するねじれの空力減衰( $C_{M0l}$ )が不安定ではなく、従って、まずねじれ1自由度で不安定とならないこと、②ねじれ運動に対して発生するねじれの空力剛性( $C_{M0R}$ )がほとんど発生しないため、風速の上昇に対してねじれの振動数の低下がみられず、たわみ振動との連成が生じにくくなり、連成フラッターも起こりにくくなっていることが考えられます。一方、迎角0度のときのBC1D3あるいは迎角-5度のときのBC1では、ねじれの空力剛性( $C_{M0R}$ )が、翼(Theodorsen理論)より小さいものの発生し、それにより風速の上昇とともにねじれ振動数の低下がもたらされ、たわみ振動との連成フラッターに至ります。

このように、今回は、ねじれの空力剛性の違いがフラッター性能に大きく影響しています。このような非定常空気力の違いが、迎角や付加物の位置の違いにより、なぜもたらされるのかについては、断面周りの変動圧力場や流れ場の観察が必要となりますが、今回はそこまで追求できておりません。ご質問の直接の回答にはなりません。圧力場について一部計測を行っており、それによると、センターバリアーを設置することで、断面周りの変動圧力は小さくなり、それから検査車レールを付けたとさらに小さくなる傾向にあります。付加物により、変動圧力ひいては非定常空気力が小さくなっていることは

確かなようであり、付加物がない断面 A からフラッター発生速度が向上するのはこの理由によると思われます。ただし、フラッターの安定性には、各部の変動圧力の位相関係も重要であり、ご質問のように迎角によりフラッター性能の優劣が入れ替わるのは、その影響が大きいものと考えております。圧力計測と並行して CFD による検討も進めており、機会を改めて報告できればと考えています。

なお、図-8(a)の対数減衰率の図で、断面 A の曲線で誤って振動数の線が描かれていますが、対数減衰率の線は 46[m/s]程度で 0 以下になり、フラッター発生風速は表-4 のとおり 46[m/s]程度です。

論文題目：“斜張橋用 2 主鋼箱桁の床版位置が耐風性能に及ぼす影響”

著者：野田辰徳，久保喜延，木村吉郎，加藤九州男  
掲載：Vol.53A, pp.642-649, 2007 年 3 月

◆討議「勝地 弘（横浜国立大学）」

床版位置を上下させてキャビティ高さを変えています。床版を中央にした場合には、端部に壁高欄が設置されたような構造となりますが、それをイメージされてこのように変化させたのでしょうか。

◆回答：壁高欄をイメージするというよりも、構造部材が壁高欄の役目をするというのができるという観点で構造としての可能性があると考えていただいた方が良いかと思えます。

論文題目：“Study on wind-induced instability of Super Long-Span Cable-Stayed Bridge”

著者：Pham Hoang KIEN, Hitoshi YAMADA, Hiroshi KATSUCHI and Eiichi SASAKI  
掲載：Vol.53A, pp.650-657, 2007 年 3 月

◆討議「木村吉郎（九州工業大学）」

中間橋脚は対象としたモデルのようにたくさん設置できないこともあると思いますが、その場合、耐風性はどの程度悪化するのでしょうか。

◆回答：中間橋脚を設置する場合としない場合の比較検討を行いました。中間橋脚設置は、面内荷重による主桁の鉛直たわみおよび各構成要素の断面力の低減をさせるためには効果的な構造対策ではありますが、耐風安定性を向上させる効果が極めて小さいとの結果が得られました。

◆討議「吉住文太（三井造船）」

ケーブルに作用する空気力の有無で限界風速が大きく変化していますが、フラッター発生時のフラッターモード形状に大きな変化はあるのでしょうか。マルチモードフラッター解析で使用するモードの違いが影響しているのでしょうか。限界風速が大きく変化する理由をモード形状から考察されていたら教えて下さい。

◆回答：フラッター発生時のフラッターモード形状を考察しましたが、大きな差異が見られません。ケーブル分割する場合としない場合のモードの数ですが、基本モードが同じになるようにモードを選定しました。両方ともモード数をたくさん取っていますのでマルチモードフラッター解析で使用するモードの違いの影響が殆どないと考えられます。

論文題目：“4 径間吊橋のフラッター特性に関する解析的研究”

著者：勝地 弘，山田 均  
掲載：Vol.53A, pp.658-665, 2007 年 3 月

◆討議「木村吉郎（九州工業大学）」

4 径間の中間橋脚の剛性を上げても、3 径間を 2 つ組み合わせた場合より耐風性は不利となるのでしょうか。

◆回答：4 径間吊橋の中間橋脚剛性を上げると、フラッター限界風速は増加するものの、剛性増加の割合が現実的なものかどうかは検討の余地があります。ところで、4 径間吊橋を考える際には、ある架橋地点で 3 径間吊橋か 4 径間吊橋かを選択することから、3 径間吊橋 2 連と 4 径間吊橋の全長を同じにする条件で考えるべきと思われる。同じ中央支間長同士では、3 径間吊橋のフラッター限界風速が高くなるものの、全長が同じ条件で比較すれば、4 径間吊橋のそれが高くなるわけであり、実務的にはそのような観点からの比較も重要と思われます。