

5. 振動・振動制御

とりまとめ：深田宰史（金沢大学）

論文題目：“反共振周波数に着目したはりの損傷位置同定に関する基礎的研究”

著者：内藤英樹，大竹雄介，渡辺孝和，鈴木基行，中野聡，岩城一郎，木皿尚宏

掲載：Vol. 58A, pp. 150-161, 2012年3月

◆討議 [武田篤史 (㈱大林組)]

高次の反共振点に着目すれば，損傷位置をもっと細かく特定することは可能でしょうか。

◆回答：理論的には可能です。しかし，高次の反共振点を精緻に測定することが難しいため，目的とする健全性評価に対して測定精度の検証などが必要と考えております。

◆討議 [米田昌弘 (近畿大学)]

目視などと比べて，反共振点を測定して損傷を探す手法の長所はどこにあるのでしょうか。

◆回答：目視による主観的かつ定性的評価に付加して，物理的な根拠に基づく定量的評価を示すことができます。簡単な振動試験によって大雑把な損傷レベルと損傷位置が同時に示せるならば，有用性であると考えます。

また，桁下からの目視が容易ではない構造物や，シート補強後のコンクリート部材の再劣化調査など，目視が困難な箇所の点検にも有用と考えます。

◆討議 [山本亨輔 (京都大学)]

振動モニタリングは目視点検の見落としした二重チェックに適用するのが良いと考えます。その場合，目視では見落としやすい「局所的」な損傷を対象とすべきだと思われませんが，今回のFEM・実験では「広範囲」な損傷が対象となっております。この点についてのコメントをお願いします。

◆回答：論文・発表では提案手法の概念を説明するため，簡単な単純ばりを扱いました。この手法は単純ばり以外にも発展できると考えており，これによって局所的な振動モードに着目した部材レベルの診断が可能になります。

◆討議 [中島章典 (宇都宮大学)]

例えば，劣化箇所が複数あった場合にも損傷位置を同定できるのでしょうか。

◆回答：現時点では，最劣化箇所のみが判断されます。今後の研究の継続と手法の発展が必要です。

論文題目：“構造モデルの並列演算型実時間動的応答シミュレータのFPGAへの実装”

著者：五十嵐晃，間嶋純一

掲載：Vol. 58A, pp. 162-169, 2012年3月

◆討議 [樋口匡輝 (オイレス工業㈱)]

計算速度にメモリ等の記録容量の影響があるのでしょうか。例えば，長い地震動を使用すると計算速度が落ちるのでしょうか。

◆回答：FPGAの特性として，論文でも述べている有限個のLogic Elementが利用可能な内部リソースであり，それらが記録用レジスタあるいは論理回路などの機能別に振り分けられて構成されることとなります。したがって一般論としては，必要記録容量が大きくなれば，並列計算回路に振り向けられるリソースの最大の大きさに影響し，ひいてはご指摘のように計算速度に影響することはあり得ます。継続時間の長い地震動入力をデータとしてレジスタとして用意する場合には，かなりの容量を消費することとなります。本研究で構築したシステムでは，応答シミュレータへの地震動入力は，外部入力インターフェースを通してリアルタイムに信号として供給する方法を用いています。内部に用意する記憶領域を低減することは，リソースを有効に活用するために，有効な解決手法の一つと考えられます。

◆討議 [深田宰史 (金沢大学)]

将来的に，解析モデルの自由度と演算時間の関係はどのような見込みでしょうか。

◆回答：解析モデルの自由度数が大きくなるにつれて必要となる計算量は大きいものになりますが，計算対象となる最高次モードの固有周期に対する数値積分の安定限界および精度確保のため，逆に1ステップあたりの計算完了時間の要求値は一般に短くなる傾向があります。ここから，一定の計算能力のシステムで扱うことができる解析モデルの最大自由度数が制約されることとなります。通常対象として想定するモデルおよび着目する振動数領域と，それに対する計算安定限界および精度確保の観点から考えた時，本論文で設定した1ステップの計算時間1msは目標として達成目標として妥当な値であると考えています。それに対して実現可能な解析モデルの自由度数はFPGAシステムの能力に依存しますが，有限要素モデルなどを想定した場合，本論文で達成可能として示した1,600自由度よりもさらに大きな数千のオーダーの自由度数を実現することが目標として考えられます。

◆討議 [宮森保紀 (北見工業大学)]

FPGAの回路は，一度製作すると，他のモデルやハードウェア（アクチュエータ）でも利用することができるのでしょうか。

◆回答：FPGAの回路データやパラメータは，論文中でも説明しました通り，HDLで書かれたコードで作成されております。ハードウェアを実際に構成する元データは記述コード情報で用意され，一定の手続きで直ちにハードウェアと

して実装することができることがFPGAの特色となっています。したがって、計算モデルを変更したり、他の実験装置に接続するという場合でも情報の再利用が容易に行えると言えます。ただし、現状では計算モデルのHDL上の構築方法は、汎用の動的解析ソフトのように利用者の利便性が高い形では整備されていませんので、様々な計算モデルに柔軟に対応できるようなユーザーインターフェースの整備はこれからの課題と考えております。

論文題目：“構造物に作用する動的風荷重のリアルタイム推定”

著者：湊順子，澤田祐一

掲載： Vol. 58A, pp. 170-179, 2012年3月

◆討議 [米田昌弘 (近畿大学)]

ガスト応答解析の出力応答を用いれば動的風荷重を逆算できると思いますが、風の作用は3次元的で時間によって変化しますので、実際の構造物に適用するのは難しいのではないのでしょうか。

◆回答：ガスト応答解析により、一定時間蓄積したセンサ入力値を用いてオフラインで風荷重の解析を行った研究例は数多くありますが、継続的なセンサ入力値を用いてオンラインで風荷重の推定を行っているものは筆者の知りうる限りほとんどありません。これに対し、本論文では、オンラインでの風荷重推定を実現しております。

また実際の構造物への応用に関しては、構造物の正確なモデル化や雑音の考慮等が課題として考えられます。これは一般的なガスト応答解析にも共通の課題です。本論文においては、上記課題のうち、観測誤差およびモデル誤差に対処するため、雑音を考慮した確率的な定式化を行い良好な風荷重推定結果を得ております。その意味で提案手法は、実際の構造物への適用の際の課題のうちの一つを解決していると考えられます。

◆討議 [山本亨輔 (京都大学)]

逆フィルタは、一般的に不安定な挙動を示しますが、本研究では、何か工夫した箇所はありますか。

◆回答：本研究では、数値計算手法そのものの工夫というより、非正則性に対処するため理論的な工夫をしております。実際に、逆フィルタ設計における逆行列 (14a, b)における B^{-1} , C^{-1} 等を求める際に、一般的に用いられているような特異値分解による疑似逆行列を使うのではなく、174頁4-14行目記載のような方法を用いております。理論的な検証は今後の課題ですが、数値計算的にはこの部分が安定性に最も寄与していることを確認しております。

論文題目：“鋼トラス橋の部材破断が橋梁および走行車両の加速度応答に及ぼす影響”

著者：山本亨輔，伊勢本遼，大島義信，金哲佑，杉浦邦征

掲載： Vol. 58A, pp. 180-193, 2012年3月

◆討議 [米田昌弘 (近畿大学)]

“損傷があるのかないのかもわからない”とした場合、経済的に損傷を見つけることができるのでしょうか。

◆回答：最終的な本研究の目標はその点にあります。多点計測などの詳細な計測であれば可能であると言えますが、経済性を向上させるためには限られた計測点数やデータに基づいて損傷を検知する必要があります。今回はそのための基礎的な情報収集を行いました。

◆討議 [中島章典 (宇都宮大学)]

損傷あり、なしの計測の時間差はどの程度ですか。また、複数の車両走行時にも適用可能でしょうか。

◆回答：実験は二日間に分けて行いました。損傷あり、なしの計測の時間差は一日から数時間程度です。複数の車両走行時についても実験を実施しており、今後、検討いたします。

◆討議 [深田宰史 (金沢大学)]

時間経過により、路面性状が変化した場合、計測で得られる応答値の再現性がなくなると思われます。それでも本手法は有効でしょうか。

◆回答：路面性状の変化が振動分析結果に及ぼす影響は大きいと考えられます。したがって、路面性状の変化が生じないように短期間に健全時と損傷時のデータ収集を行う必要があります。実施回数を多く取ることでこのような問題に対処できると考えられます。

論文題目：“水平歩行外力の提案式と神経振動子に組み込んだ歩道橋の動的応答解析”

著者：米田昌弘

掲載： Vol. 58A, pp. 194-206, 2012年3月

◆討議 [五十嵐晃 (京都大学)]

検討に用いた神経振動子モデルの実験あるいは観測に基づいた検証等は既に行っているのでしょうか。もし、何らかの検証が行われているのであれば、このモデルの信頼性について確認できていることを教えてください。

◆回答：中央支間長が62.4mの人道吊橋を対象として歩行実験 (5人が1m間隔で歩行する実験) を行い、解析値と実測値の対比を行っています。その結果、歩行者の歩調が水平対称1次振動数と同じかやや小さい場合、神経振動子モデルを組み込んだ解析の最大水平変位は、実測値の最大値とほぼ一致する結果が得られました。それゆえ、本文で提案した水平歩行外力式と神経振動子モデルに組み込んだ解析手法は概ね妥当であると考えています。ただし、歩行者の歩調が水平対称1次振動数よりも幾分大きい場合、解析では引き込み現象は認められなかったのに対し、実測では引き込み現象が生じ、実測値は解析値よりも幾分大きな値となりました。それゆえ、神経振動子モデルについては、さら

なる改良の余地が残されていると考えています。

◆討議 [角本周 (オリエンタル白石)]]

①群集荷重となって、2歩/秒で歩行できない場合でも、同じような引き込み現象が生じるのでしょうか。

②群集荷重で渋滞した際でも、実際の歩調は2歩/秒なのでしょうか。

◆回答：群衆が押し寄せて橋面が混雑すれば、2歩/秒で歩行（前進）するのは困難です。ただし、歩行しないでその場で足踏みするような場合でも、重心の水平移動で水平方向に加振力が生じ、水平加振の周波数と橋の水平振動数が近い場合には、当然ですが、橋は水平方向に振動することになります。

論文題目：“炭素繊維複合材ケーブルの減衰自由振動特性に関する基礎的研究”

著者：中村一史，中川康治，田島遼，前田研一，張治成，謝旭，榎本剛，牛島健一

掲載：Vol. 58A, pp. 207-215, 2012年3月

◆討議 [米田昌弘 (近畿大学)]]

①減衰にターゲットをしばって、実験された主たる目的は何でしょうか。

②面内と面外の振動数はほぼ一致しているので、面内と面外を合成した波形の減衰を測定しているのではないのでしょうか（1つのモード減衰ではないのでは）。

◆回答：①炭素繊維複合材ケーブル（CFCC）は、従来の鋼製ケーブルと比べて材料特性が異なるため、本研究では、両者の相対的な比較から、CFCCの基本的な減衰特性を明らかにすることを目的としています。

②面内と面外における固有振動数の差異は僅かであり、分離することが困難であったため、ご指摘の通り、面内と面外を合成した波形の減衰を評価しています。

◆討議 [宮森保紀 (北見工業大学)]]

リサーチ図では、楕円振動の卓越する方向が変化しているが、これは一般的な傾向でしょうか。また、どのようなメカニズムで発生するのでしょうか。実験と実構造の違いで何かコメントがあればお願いします。

◆回答：ケーブルの空力振動現象は、その振動発生機構が極めて複雑であり、本研究の範囲では、発生のメカニズムを把握するまでに至っていません。楕円振動の卓越する方向が変化する要因の一つとして、ケーブル面内のサグなどの影響により振動モードが面内方向と面外方向に分離されるとともに、両者の振動数の差異が僅かに生じることから、本実験では、一種のうなりのような現象が発生し、それが影響しているのではないかと考えています。

論文題目：“人道吊橋の振動計測におけるスマートセンサーの適用と耐低温測定システムの開発”

著者：宮森保紀，坂和平，大島俊之，三上修一，山崎智之
掲載：Vol. 58A, pp. 216-225, 2012年3月

◆討議 [米田昌弘 (近畿大学)]]

①無補剛吊橋は、重橋床式ですか。それともストームケーブル（耐風索）を設置した吊橋でしょうか。

②ストームケーブルを設置した吊橋であれば、ストームケーブルが振動して補剛桁の振動に影響を及ぼしたことがなかったでしょうか。

◆回答：本橋は耐風索を有する吊橋です。振動モードの中には水平方向で耐風索が振動するものもあり、補剛桁の振動に影響を与えるモードもあります。

ただし、本橋は架設からかなりの年月が経過しており、左右の主ケーブルや耐風索、ハンガーの張力にかなりのばらつきがあり、複雑なモード形状になっております。より精緻なモード形状の把握には、3次元計測の結果に基づく分析が必要であり、現在検討中です。

◆討議 [五十嵐晃 (京都大学)]]

①計測システムにおいて、電力消費の大きい部分は、計測とデータ送信のどちらでしょうか。また、電力消費対策として考えていることがあれば教えてください。

②論文で記述している以外にバッテリーの低温対策として考えていることがあれば説明をお願いします。

◆回答：①予備実験の結果から、本論文で採用したシステムでは、データ送信時の消費電力が大きくなります。しかしながら、使用するソフトウェアや通信するデータにより電力消費の傾向は異なります。

電力消費対策として、通信するデータ量そのものを削減するため、子ノード上でデータ処理を行い、卓越振動数や振幅のみを送信するような工夫を提案する研究もあります。本研究では、スマートセンサーによる振動計測の基本的な適用性を検討するため、測定データをすべて親ノードに送信しております。いずれにしても、長期にわたって継続的な測定を行うためには、太陽光発電や小型の風力発電などで電力を自足できるシステムを導入することが必要であると考えられます。

②低温特性に優れた電池を利用することが有効な方法で有ることは間違いありません。一方、センサーノードが動作する際はCPU等の発熱が必ずありますので、本研究で提案したようにケース内部の断熱によりその熱を逃さない工夫をすれば、実際の動作温度はかなり改善すると考えられます。

今後は、気温が低くても日射がある場合に熱を取り込む工夫や、逆に夏季や温暖地での熱暴走に対する対策が検討課題となると認識しております。

論文題目：“PC 連結桁橋の構造条件が車両走行時の動的応答に与える影響”

著者：角本周，深田宰史，松永昭吾，西村一朗

掲載：Vol. 58A, pp. 226-236, 2012年3月

◆討議 [米田昌弘 (近畿大学)]]

ゴム支承を設置すると交通振動が大きくなる理由は何でしょうか。

◆回答：一般に、金属支承に比べてゴム支承は剛性が低くなるため、交通振動が大きくなると言われておりますが、今回の検討範囲では、必ずしも剛性（鉛直、水平）が低いと交通振動が大きくなるという結果とはなっておりません。ゴム支承は鉛直剛性が低くなるので、活荷重による上部構造のかけ違い部の段差が大きくなり、交通振動を励起している可能性もあります。また、走行車両が制動行為を行った場合には、上部構造の水平振動が励起される可能性もありますが、これらについては、今後の検討課題と考えております。

◆討議 [五十嵐晃（京都大学）]

本論文においては、支承の水平剛性、鉛直剛性の変化について分析をしていますが、支承の回転剛性の有意な影響はないと考えてよいのでしょうか。

◆回答：今回の検討対象としたPC連結桁橋の中間支点は2点支承であるので、中間支点での上部構造の回転拘束度は、支承そのものの回転剛性による拘束度よりも、2点支承の鉛直剛性×支承間距離で決まる拘束度が大きいと考えられる。そこで、本検討では、支承そのものの回転剛性はフリーとし、鉛直剛性をパラメータとして検討を行った。

◆討議 [山本亨輔（京都大学）]

車両のパラメータが変化すれば、路面凹凸の5-11mの波長以外で起因する橋梁振動が卓越することはありますか。

◆回答：今回の検討は、道路橋示方書で想定している大型車両を元にして、リーフサスペンション車を想定したパラメータを設定しております。エアサスペンション車の場合、後軸ばね上振動数が1～2Hz程度になるので、橋梁振動が励起される路面波長はより長くなることが想定されます。また、走行速度によっても異なることがわかっております。

論文題目：“RC 中空床版橋周辺の地盤振動対策と路面評価”

著者：浜博和、深田宰史、阿川清隆、岡田裕行、梶川康男、樺山好幸

掲載：Vol. 58A, pp. 237-249, 2012年3月

◆討議 [小幡卓司（大阪府立大学工業高等専門学校）]

工事前と工事後の状態はどのように変わっていましたか。

◆回答：構造的な変化としては、主版たわみの低減が認められることから、床版上面増厚補強による剛性向上が確認できます。しかし、それとともに死荷重も増えたため、問題となっていた卓越周波数にほとんど変化が認められませんでした。このため、増厚補強後に認められた振動レベルの低減には、路面の平坦性が改善されたことが大きく影響していたと考えられます。

なお、工事前は頻繁に路面の補修を繰り返しておりましたが、増厚補強することで長期間にわたって舗装の健全性を確保することができ、実際1年近くたった現在も舗装の劣化やそれに伴う振動レベルの増大などは報告されておりません。

◆討議 [米田昌弘（近畿大学）]

IRIモデルは乗用車をモデル化したものです。ここでの交通振動は大型車両に起因するので、IRIモデルを適用するにあたり、問題はないでしょうか。

◆回答：IRIの算出に用いているモデルは、当該橋梁で発生している振動の卓越周波数（11Hz）とクォーターカーの持つバネ特性（固有値）が一致していることを確認した上で解析に用いております。

このように、モデル化する際は、問題となっている橋梁の周波数特性とモデルの固有値が一致するように各係数を調整すべきであると考えられます。