

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21991

研究課題名（和文）実時間ハイブリッドシミュレーションによる流体-構造連成応答評価プラットフォーム

研究課題名（英文）Platform for assessment of fluid-structure interaction using real-time hybrid simulation

研究代表者

五十嵐 晃（Igarashi, Akira）

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：80263101

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：流体-構造相互作用の評価のための実時間ハイブリッドシミュレーションの提案に基づき、その実現のための小型実験システムの構成を試み、ハイブリッドシミュレーションを行う上で必要となる、構造モデルに対する変位の制御とそれに伴う流体から作用する荷重の計測が可能であることを確認した。提案する実験システムは、これまでに試みられたことのない、従来にない新規性が高い手法である。基本的な実時間ハイブリッドシミュレーションの実験手法の考え方にはこれまでの蓄積があることから、本システムをさらに発展させて制御アルゴリズムと組み合わせることで、実現の可能性が見込まれることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

流体力が構造系に作用した場合の実時間ハイブリッドシミュレーションシステムの安定性や精度の問題などは未知の領域である。今後のそうした技術開発に向けての研究を実施する上での基礎が検証された。本実験手法や実験システムの十分な性能の向上が達成された場合、将来的には例えば流体関連振動（Fluid-Induced Vibration）の実験的検証にも応用の適用範囲が広がる可能性につながり、有用性が高い。

研究成果の概要（英文）：Based on the proposal of application of real-time hybrid simulation for evaluation of fluid-structure interaction, a prototype experimental system was developed and the proposed experimental system can control the displacement of the structural model and measure the fluid loads. The proposed experimental method is a novel and unconventional method that has never been attempted before. Since the basic concept of the experimental method for real time hybrid simulation has been accumulated so far, it is confirmed that the system can be further developed and combined with the control algorithm to realize the system.

Translated with www.DeepL.com/Translator (free version)

研究分野：構造力学

キーワード：実時間ハイブリッドシミュレーション 流体力 構造実験 水理実験

1. 研究開始当初の背景

例えば建物や橋、プラント等の施設構造物に対する津波、洪水や波力の作用の問題では、構造物への作用を静止する物体に作用する浮力・静水圧や流体力に対する荷重を、浸水深と水の流速を主な支配要因として考えることが一般的である。計算機による大規模数値解析による評価の研究や数値計算手法の開発による研究成果が示されているが、一方で水理実験に基づく実験的なアプローチでは、流体力が作用する構造物を剛体とみなした構造物模型を用いた実験が一般的に行われてきた。しかしながら、流体に起因する動的荷重に対する構造物の変位・変形が荷重の評価にあたって無視できない場合には、流体 - 構造の動的連成系としての効果を考慮する必要があると考えられる。現在一般的な、剛体模型を構造物として扱う水理実験ではこのような現象は評価できない。柔性を考慮した構造物模型を用いた水理実験の実施が考えられるが、柔性や流体による変形を適切に制御できるような構造物模型を用いた水理実験の遂行には、多大な困難が伴うという課題がある。

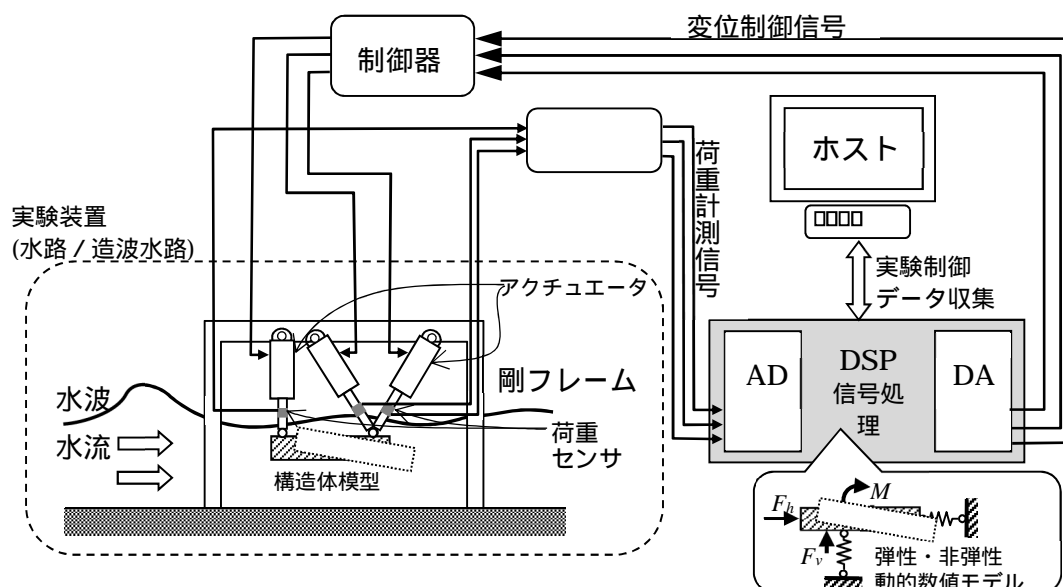
このような問題を解決するために、計算機による数値解析と実験を連動させながら同時に進行させる、実時間ハイブリッドシミュレーション (RTHS: Real-Time Hybrid Simulation)の技術を活用することが考えられる。実時間ハイブリッドシミュレーション(RTHS)とは、主に地震工学において構造物の振動特性や動的地震応答を実験的に評価するために開発されてきた手法の一つであり、想定構造系より一部分を取り出した実験供試体に対する振動台やアクチュエータによる動的加振と、構造系の残りの部分の応答を求めるための数値計算や他の動的実験部分を、振動台・載荷装置とオンラインで接続された計算機により同時に進行させることで実験を遂行する手法である。実時間・動的載荷実験法として最も進んだ方法の一つであり、特に構造工学への応用の研究が続けられている手法である。

2. 研究の目的

本研究は、流体 - 構造の動的連成系としての実現象に即した流体力の構造物への作用の評価を行うことを目的として、計算機による構造物の動的応答解析と水理実験を併用した RTHS を実施するための実験システムの開発と構築を行い、流体 - 構造の動的相互作用評価を行うための実験的枠組みとしての有効性を検証することを目的とする。

3. 研究の方法

例として自由表面を有する水流中の弾性構造物に関する流体 - 構造の動的相互作用の問題の場合、動的変位制御が可能なアクチュエータで保持した構造模型を実験水路中に設置する。一方で構造物の弾性(あるいは非弾性)復元力特性は質量による慣性作用等を考慮した数値構造モデルの動的応答の実時間計算・信号処理システムを構築しておく。ここでは実時間処理に特化した計算用半導体プロセッサである DSP によるシステムを想定する。流体の作用により構造模型に生じる荷重をロードセルなどのセンサで計測し、これを動的作用荷重とした場合の構造モデルの動的応答を高速に計算する。算出された構造モデルの変位に基づき、実験システムのアクチュエータへの制御信号を生成し、構造模型の動きを制御する。このような実験システムを構築することで、提案する実験手法による流体 - 構造連成応答や動的特性の与える影響が評価できることを実証する。



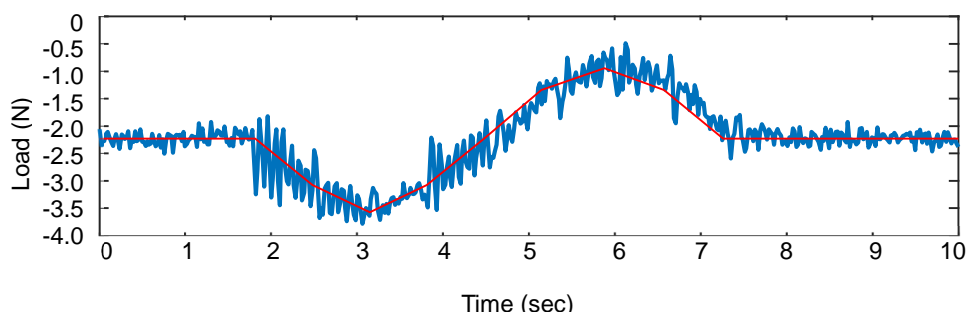
4. 研究成果

(1) ハイブリッドシミュレーションのコンセプトは、「特性が未知な、あるいはモデル化が困難な構造部材や要素の復元力特性を載荷実験により検出してオンラインで計算機内に取り込み、全体系の動的応答の数値計算により評価を行うもの」である。すなわち、載荷実験と数値計算を混合して同時に進める実験手法である。構造部材の変位 - 復元力特性を数学的モデルに頼ることなく載荷実験からそのまま検出し、解析プログラム内にオンラインで取り込んで、全体系の時刻歴応答計算を行うため、複雑な復元力特性を有する部材でも比較的容易に扱うことができ、数学的復元力モデルを用いた数値解析と比較することによって、そのモデルの妥当性を検証することも可能である。実時間ハイブリッドシミュレーション技術は、構造実験技術の中でも特に注目されている手法として、これまで主に構造工学・地震工学の分野で精力的に研究が進められてきた手法であり、その高度化の研究が日米欧中などの地域で国際的に活発に行われているのが現状である。実験検証対象のスケールアップ、慣性力や粘性減衰力など加速度・速度に依存する力の再現や構造特性の経時的変化の検出にも適用可能であり、また構造要素の特性の変更に柔軟に対応した試験が可能であることなど、大きなメリットの享受が期待できる手法である。

実時間ハイブリッドシミュレーションの実現に際して、実験システムに用いるハードウェアに加えて、最も技術的に重要となるのは計算システムモジュールにおいて実行される実時間実験制御のための計算アルゴリズムである。上述のように、このための計算アルゴリズムの問題については様々な研究グループにより開発や提案、研究が積み重ねられてきている。本研究課題では、ここで想定する流体 - 構造の動的相互作用の問題で、かつ振動数帯は上限として 1 Hz 程度までの振動数が比較的低い問題への適用に適していると考えられるものを適用することとして、そのための基本アルゴリズムを整理した。

(2) 基本的な時間積分アルゴリズムとして、Operator Splitting 法を用いた。この方法は与えられた設定初期剛性が実験対象構造モデルの剛性よりも大きいという条件が成立している限り、時間刻み幅に関わらず常に安定であることが保証されている。したがって安定条件に拘束されずに時間刻み幅の大きさを決められることから、実験の高速化に適している手法であると言える。また、疑似静的な載荷の手順を用いるタイプのハイブリッドシミュレーション(ハイブリッド実験)手法では、各ステップにおいて目標変位を計算により求め、それに基づいてアクチュエータ変位を制御する。しかしながら、ここで適用を想定している流体 - 構造相互作用の問題においては、全ての物理的な現象や荷重の発生が動的に生じるため、アクチュエータ変位の制御のステップと、目標変位の計算の完了を交互に待機する方法を用いると、物理的な時間進行と実験における時間進行を合わせることが困難になるため、実時間載荷のためのアクチュエータ制御手法とする必要がある。そこで、目標変位に加えて時間積分法により得られる前ステップの速度の情報を併用して載荷を行う、速度ベース載荷アルゴリズムが適しているとの提案を行った。速度ベース載荷の概念は、次のように整理される。まず時間ステップ i において目標変位、および速度 $v(i)$ を取得する。変位制御されたアクチュエータが速度 $v(i)$ で運動するよう変位制御信号の出力を開始し、時間ステップ間隔 Δt の間継続する。出力開始から Δt の時間が経過したら、復元力の計測と次ステップの目標変位・現ステップの速度 $v(i+1)$ を算出し、アクチュエータを停止させずにストローク速度を変更して、次の載荷を開始する。この過程を時間ステップごとに繰り返す。

(3) 上述の提案手法による実時間ハイブリッドシミュレーションを実施するための実験システムの実現に向けて、小型の検討システムの構築と基本的なメカニズムの実現性についての検討を行った。長さ 60cm × 幅 20cm × 高さ 25cm のガラス製水槽に、深さ 10cm の水を貯め、そこに直方体 (20cm × 10cm × 5cm) 形状で半分水中に位置している質量の小さいスチロール模型を構造模型と想定している。試作した実験システムを用いて、構造模型に対して変位制御を行う試験を行い、計測値と作用力の推定値を比較したところ、整合性のある結果が得られ、本システムの実現は十分に可能であることを示した。



実験結果の例 (赤線：予測値 青線：計測値)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中田 成智 (Nakata Narutoshi) (00815318)	徳島大学・大学院社会産業理工学研究部(理工学域)・准教授 (16101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関