

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：54701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12009

研究課題名(和文) 重合メッシュ法による実務設計を目指した建築物と地盤の動的連成解析法

研究課題名(英文) Dynamic coupling simulation technique of buildings and ground for practical design by finite element mesh superposition method

研究代表者

山東 篤 (Sando, Atsushi)

和歌山工業高等専門学校・知能機械工学科・准教授

研究者番号：50435442

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)： 建築構造物と地盤の一体モデルの作成において、両者のメッシュ分解能が大きく異なるためメッシュの整合性を考慮する必要がないモデリング手法は有用である。さらに、連成解析において建築構造物と地盤の境目が設計上最も重要であるため、境目付近の高精度化も望まれている。

本研究では「はみ出しを有する重合メッシュ法」を用いた建築構造物・地盤一体モデルの効率的モデリングを提案し、静的解析、固有値解析、時刻歴応答解析において簡便なモデリングでFEM参照解とよく一致する解析結果が得られることを確認した。さらに、モデリングと解析精度の関係をパラメトリックスタディにより明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子力建屋などの特殊な建築構造物の設計では詳細な地震応答の把握が必要であることから、質点を用いた簡易モデルでなく構造物とその周辺地盤も含めた一体モデルを用いたFEM解析が求められている。一体モデルで効率的なメッシュ分割を目指せば、メッシュの分解能が大きく変わりモデル化が困難となる箇所が生じる。本研究成果は不整合メッシュを用いることができるためメッシュ作成や部分修正の労力を大幅に削減し、さらに高い解析精度が必要となる境目付近だけを微細メッシュにできる優位点がある。本提案手法が汎用化できれば、多点拘束法と併用してFEMが苦手とするモデリングを容易に実現できる代替手法となることが期待できる。

研究成果の概要(英文)： In the development of integrated models of a building structure and the ground, a modeling method that does not require consideration of mesh connectivity is useful because the mesh resolutions of the two differ greatly. Furthermore, since the boundary between the building structure and the ground is the most important in the structural design in coupled analysis, it is desired to improve the accuracy near the boundary.

In this study, we propose efficient modeling of an integrated model of building structure and ground using the s-version finite element mesh superposition method with mesh protrusions. It was confirmed that simple modeling can be used in static analysis, eigenvalue analysis, and time history response analysis to obtain analysis results that are in good agreement with the FEM reference solution. Furthermore, the relationship between modeling and analysis accuracy was clarified by a parametric study.

研究分野：計算力学

キーワード：重合メッシュ法 不整合メッシュ 固有値解析 時刻歴応答解析

1. 研究開始当初の背景

有限要素法を用いた上部構造物と周辺地盤の単一モデルでは、スケールの異なる構造要素の境目でメッシュを整合させる必要がある。杭の考慮や周辺地盤が傾斜地、三次元モデルである等の複雑化の因子が増えるほど構造要素間のメッシュの整合は困難となる。そのため、メッシュを整合させるためだけに本来微細化する必要性の少ない箇所まで微細メッシュとせざるを得ない状況が起こりうる。

このような問題に対する対策の一つは不整合メッシュでモデル化できる解析手法を用いることである。重合メッシュ法は解析モデル全体の局所的な一部分だけを微細メッシュに置き換えることができる構造解析手法である。重合メッシュ法では解析モデル全体と微細メッシュに置き換える部分を別々の不整合メッシュで表し、それらを重ね合わせて一つの解析モデルとみなすことから、不整合メッシュのモデル化に応用することを考えた。

本研究の開始にあたり、それを実現するための手順として、(a)三次元幾何学的処理を伴う高精度数値積分法を用いて高精度に質量マトリックスを計算する手法の構築、(b)実務設計を想定した建築物と地盤を結合する適切なモデリングのガイドラインの構築、を進めることとした。

2. 研究の目的

研究開始初期において、Fish が最初に提案した「従来の重合メッシュ法」を用いた際に、上部構造物と周辺地盤の単一モデルで質量マトリックスや剛性マトリックスが特異行列になりやすいことを確認した。その原因はメッシュの重ね合わせ方が広い範囲で単調になりすぎることであることを突き止め、その対策として「はみ出しを有する重合メッシュ法」の活用を新たに考案した。

従来の重合メッシュ法では、ローカルメッシュはグローバルメッシュの内部に完全に含まれることが前提であるが、幾何学的境界条件を適切に設定することでローカルメッシュの一部がグローバルメッシュからはみ出るモデリング(はみ出しを有する重合メッシュ法)も可能である。これは2つの不整合メッシュの一部を重ね合わせ、重なった領域を結合して1つの解析モデルとしていることからアセンブリ構造解析と同等のモデリングといえる。

はみ出しを有する重合メッシュ法は静的解析において実現可能であることがすでに示されているものの、両メッシュの重ね合わせ方が解析精度に与える影響の評価や、動的解析への適用可能性については十分に検討された例がなく未解明である。本研究では、上部構造と周辺地盤を模した不整合メッシュの結合方法としてはみ出しを有する重合メッシュ法を用いるための定式化を示し、高精度数値積分法を用いて質量マトリックスを計算するアルゴリズムを開発し、モデリングが解析精度に与える影響を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1)高精度数値積分法による連成質量マトリックスの計算アルゴリズム

重合メッシュ法を動的問題に拡張するにあたり、変位場 \mathbf{u} と同様の定義を加速度場 $\ddot{\mathbf{u}}$ にも適用する。解析モデルを構成する部分領域 Ω^1, Ω^2 内で独立に定義した加速度場は形状関数により離散化され、仮想仕事式に代入して式を整理すると、式(1)のような離散化された運動方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}^1 & \mathbf{M}^{12} \\ \mathbf{M}^{21} & \mathbf{M}^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{d}}^1 \\ \ddot{\mathbf{d}}^2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}^1 & \mathbf{K}^{12} \\ \mathbf{K}^{21} & \mathbf{K}^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{d}^1 \\ \mathbf{d}^2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{f}^1 \\ \mathbf{f}^2 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで、上付添字は部分領域を表している。 $\ddot{\mathbf{d}}$ は節点加速度ベクトル、 \mathbf{d} は節点変位ベクトル、 \mathbf{M} は質量マトリックス、 \mathbf{K} は剛性マトリックス、 \mathbf{f} は外力ベクトルである。 \mathbf{M}^{12} は質量に関する2つのメッシュの相互作用を表す連成項であり、積分範囲内において被積分関数に折れ曲がりが存在するため積分範囲全体を一度にガウス積分等で数値積分すると計算誤差が生じる。

$$\mathbf{M}^{12} = \int_{\Omega^1 \cap \Omega^2} \mathbf{N}^{1T} \rho \mathbf{N}^2 d\Omega = \mathbf{M}^{21T} \quad (2)$$

この問題は剛性に関する連成項 \mathbf{K}^{12} の数値積分でも同様であり、文献 の高精度数値積分法を用いることで解決することを確認している。高精度数値積分法で積分範囲を分割する過程は $\mathbf{K}^{12}, \mathbf{M}^{12}$ の計算の両方で共用できるため、計算プログラムにおいて \mathbf{K}^{12} を計算する箇所に式(2)を計算する部分を書き足し、積分点数を適切に設定することで \mathbf{M}^{12} の計算プログラムを開発できる。

(2)はみ出しを有する重合メッシュ法のグローバル/ローカルの区別と静的解析の精度

はみ出しを有する重合メッシュ法では2つのメッシュのいずれも解析モデルの一部だけを表しているため、2つのメッシュをグローバルメッシュ、ローカルメッシュと区別する指標が明確でない。しかし、そもそも重合メッシュ法においてグローバル/ローカルの区別が定式化に与える影響は、節点変位の並びと連成項の数値積分をローカル側の要素毎に行う点だけで

ある式(1)を導出する定式化においてグローバル/ローカルの設定を入れ替えると、上添字の1と2が単に入れ替わるだけであった。そのため、理論的にはグローバル/ローカルの区別が解析精度に与える影響はない。

本研究ではそれを確認するため、コンクリート構造物と地盤を模した簡易的な平面ひずみモデルを用いてグローバル/ローカルを入れ替えた際の解析結果を比較した。

(3)はみ出しを有する重合メッシュ法の固有値解析、時刻歴応答解析の精度調査とパラメトリックスタディによるモデル化と解析精度の関係の調査

コンクリート構造物と地盤を模した簡易的な平面ひずみモデルを用いて、提案手法とFEMモデルの解析結果(参照解)を比較し、提案手法の解析精度を調査した。

4. 研究成果

(1)連成質量マトリックスの計算プログラムの開発

二次元解析プログラムおよび三次元解析プログラムの高精度数値積分法による連成質量マトリックス計算プログラムは Matlab 環境において研究方法の手順で完成した。二次元解析プログラムは後述のはみ出しを有する重合メッシュ法の性能評価に用いた。三次元解析プログラムを用いた解析例は学会発表(山東篤, はみ出しを有する重合メッシュ法による三次元不整合メッシュの効率的モデリング, 2022 年度日本建築学会大会(北海道) 学術講演会, 投稿中)で公開した。

(2)はみ出しを有する重合メッシュ法のグローバル/ローカルの区別と静的解析の精度

はみ出しを有する重合メッシュ法を用いて図1のモデルを2つの不整合メッシュの重ね合わせでモデル化するとき、グローバル/ローカルの設定が静的解析の結果に与える影響を確認した。図2はモデリングに用いた2つの不整合メッシュであり、上部構造物および周辺の地盤を表す微細メッシュをメッシュ1、地盤部分のみを表すメッシュをメッシュ2とする。上半分の領域Aの物性値はコンクリート、下半分の領域Bの物性値は地盤の値を用いた。外的な境界条件はメッシュ2の両側面及び底面を固定、構造物上辺に水平荷重1000Nとする。

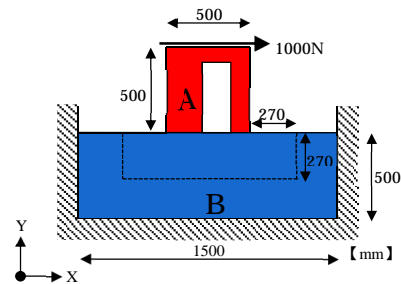


図1 解析モデル

解析条件はG1, G2と呼称する2つの解析ケースとする。

G1はグローバルメッシュをメッシュ1, ローカルメッシュをメッシュ2とする。G2はグローバルメッシュをメッシュ2, ローカルメッシュをメッシュ1とする。比較対象は図2(c)に示した一体モデルの水平方向の評価線におけるY方向変位分布とする。

図3は評価線上のY方向変位分布であり、解析ケースG1の節点変位を赤色, G2の節点変位を青色で表している。G1とG2の変位分布は重なっていることから、両者はほぼ一致しているといえる。解析モデル全体を図2(b)と同サイズでメッシュ分割したFEMモデルによる参照解と本解析結果の最大主応力分布は図4のようになり、ほぼ同一の応力分布が得られていることが確認できた。最大主応力の最大値の数値を比較すると、参照解に対する提案手法の相対誤差の大きさは約0.3137%であった。(文献)

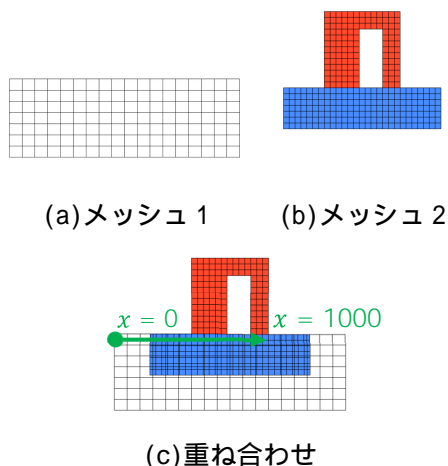


図2 重合メッシュモデル

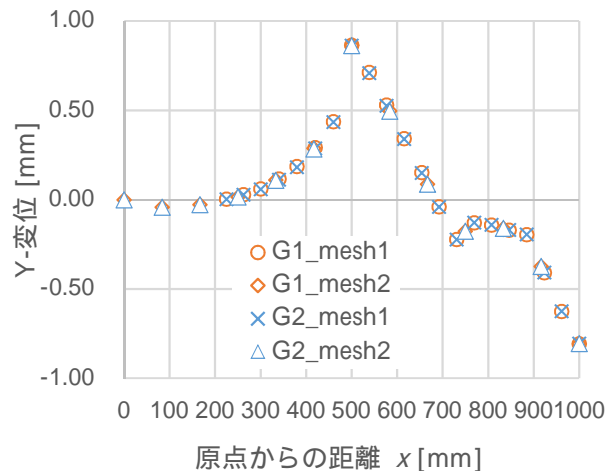


図3 評価線上のY方向変位分布

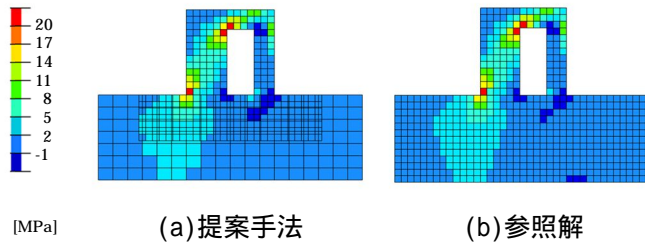


図4 最大主応力分布

(3)はみ出しを有する重合メッシュ法の固有値解析，時刻歴応答解析の精度調査とパラメトリックスタディによるモデル化と解析精度の関係の調査

図2の解析モデルを用いて固有値解析を行い，固有値解析における提案手法の解析精度を調査した．比較対象は提案手法とFEM参照解で解析した1~9次固有振動数の相対誤差および固有モード図の照合とする．

表1は提案手法と参照解の1次~9次固有振動数および相対誤差の一覧である．提案手法の解と参照解を比較すると，提案手法の固有振動数は全ての次数で参照解より大きめであるが，その相対誤差は最大でも約2.11%と小さかった．提案手法で用いたメッシュは地盤部分のメッシュが参照解メッシュより粗いため，この結果は本提案手法の性質に加えてメッシュサイズの影響も含まれていると考えられる．図5は提案手法とFEM参照解の1~2次固有モード図であり，両者はほぼ同一のモードであることを確認できた．

表1 固有振動数($\times 10^2$ Hz)と相対誤差

次数	提案手法	参照解	相対誤差
1	1.8758	1.8591	0.89817%
2	4.0493	3.9772	1.81213%
3	4.2278	4.1619	1.58380%
4	6.6472	6.5912	0.85049%
5	7.2105	7.1498	0.84893%
6	7.5423	7.4561	1.15597%
7	7.9263	7.8378	1.12923%
8	10.051	9.9064	1.45760%
9	10.197	9.9855	2.11397%

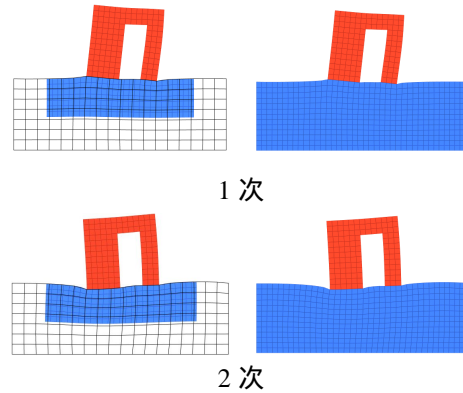


図5 提案手法(左)と参照解(右)の1次~2次固有モード

次に，図6のようなコンクリート構造物と地盤の一体モデルの時刻歴応答解析を通して，提案手法におけるメッシュ1とメッシュ2の重ね合わせ領域の重ね方と解析精度の関係性を調査した．解析結果の比較対象は図中に示した点P1のX軸方向最大変位の相対誤差である．境界条件として地盤の左右端部と底面を固定し，コンクリート上部構造物の上面のX軸方向に図7のような時刻歴荷重 $f(t)$ を作用させる．その他の解析条件として，減衰は考慮せず，時間積分法はNewmarkの法($\gamma = 0.25$)を採用する．また，解析時間は0.2秒，時間増分は 2.5×10^{-3} 秒(80ステップ)とする．

提案手法の解析モデルは，地盤部分を 5×15 分割した地盤部分を表す粗いメッシュ1と，地盤部分の領域の幅と高さの両方，高さだけ，幅だけを2要素~10要素まで変化させた微細なメッシュ2を組み合わせたものとする．メッシュ1は節点数96，要素数75，要素寸法は $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ である．メッシュ2の要素寸法は $38.5\text{mm} \times 38.5\text{mm}$ であり参照解モデルと同一である．図8は地盤部分の幅と高さの両方，高さだけ，幅だけを変えたメッシュ2をメッシュ1に重ね合わ

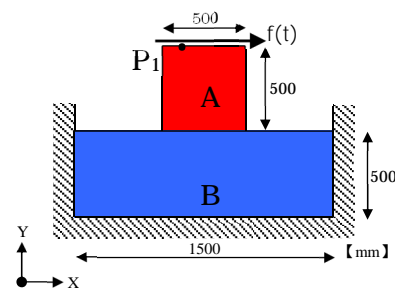


図6 時刻歴応答解析モデル

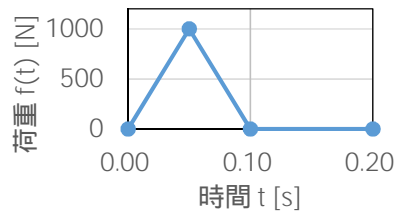


図7 時刻歴荷重

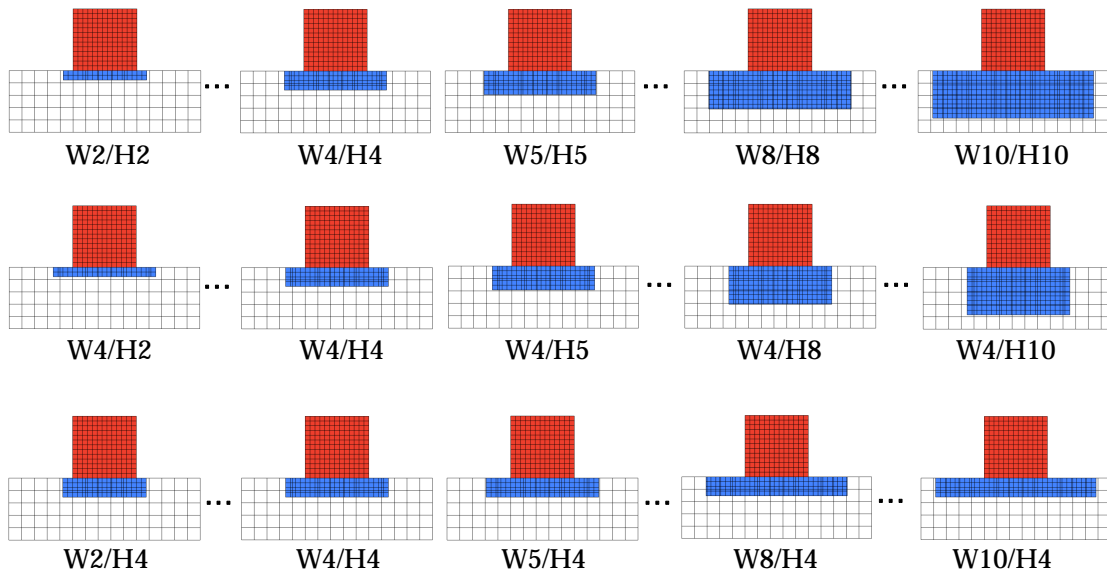


図8 地盤部分のサイズを変えたメッシュ2とメッシュ1の重ね合わせ（一部抜粋）

せた図の一部抜粋である．メッシュサイズを固定したうえで高さ方向(H)と幅方向(W)の要素数を同時に2要素から10要素まで変えたモデルをW2/H2～W10/H10とし、図8上段にはW2/H2、W4/H4、W5/H5、W8/H8、W10/H10を図示している．地盤部分の幅方向の要素数(W)を4に固定して高さ方向の要素数(H)だけを2要素から10要素まで変えたモデルをW4/H2～W4/H10とし、高さ方向の要素数(H)を4に固定して幅方向の要素数(W)だけを2要素から10要素まで変えたモデルをW2/H4～W10/H4とする．

図9は、点P1に生じるX方向最大変位における提案手法の参照解に対する相対誤差の片対数グラフである．グラフ横軸の要素数Nは凡例のWとHの後のNに対応している．幅と高さの両方を同時に変えたWN/HNにおいて、N=2のW2/H2の相対誤差は43.55%であり、重ね合わせ領域の要素数Nを増やしていくと、N=4のW4/H4で相対誤差が13.13%となり、N=5のW5/H5で

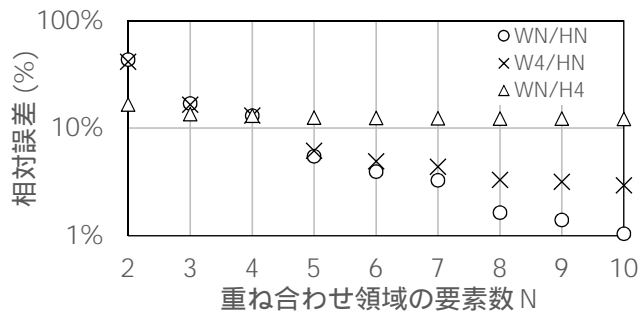


図9 モデリングと相対誤差

5.484%と一気に半分以下まで改善し、N=6のW6/H6では3.962%とさらに改善した．さらにN=8のW8/H8で1.640%とほぼ半減し、最終的にN=10のW10/H10の相対誤差は1.043%となった．次に、幅方向の要素数を4に固定して高さ方向の要素数を増加させたW4/HNでは、その相対誤差はW4/H2(N=2)の41.43%からN=5のW4/H5で6.169%となり、N=6のW4/H6で4.918%、N=8のW4/H8で3.309%、N=10のW4/H10で2.949%となった．一方、WN/H4では、その相対誤差がW2/H4の16.67%からW5/H4で12.59%となったが、それ以降はほとんど変化がなくW10/H4でも12.27%と相対誤差がWN/HN、W4/HNほど改善しなかった．WN/HNの相対誤差のグラフでは、N=2からN=3、N=4からN=5と6にかけて、N=7からN=8で急激に相対誤差が改善している．W2/H2でメッシュ2と重なり合うメッシュ1のY方向の要素数は1層であるが、W3/H3ではそれが2層に増えている．重なり合う層数はW3/H3～W5/H5で2層であるがW5/H5はほぼメッシュ1の2層目の大部分を含んでおりW6/H6～W7/H7は3層となる．そしてW8/H8はそれが4層になる境目であることから、メッシュ2と重なり合うメッシュ1の要素層数も解析精度に影響していると考えられる．(文献)

<引用文献>

- 山東篤, 自動メッシュ分割を用いて重合メッシュ法の連成項を高精度に数値積分するための積分範囲の適切な分割方法, 日本計算工学会論文集, pp.20110011, 2011.
- 山東篤, ローカルメッシュがグローバルメッシュからはみ出た重合メッシュ法におけるグローバル/ローカルの設定が解析結果に与える影響, 第34回計算力学講演会, GS-1, 2021.
- 山東篤, はみ出しを有する重合メッシュ法による構造物・地盤一体モデルの効率的モデリング, 構造工学論文集B, Vol.68, pp.284-292, 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 山東 篤	4. 巻 68B
2. 論文標題 はみ出しを有する重合メッシュ法による構造物・地盤一体モデルの効率的モデリング	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 構造工学論文集B	6. 最初と最後の頁 284-292
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aijjs.68B.0_284	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山東 篤
2. 発表標題 ローカルメッシュがグローバルメッシュからはみ出た重合メッシュ法におけるグローバル/ローカルの設定が解析結果に与える影響
3. 学会等名 第34回計算力学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山東 篤
2. 発表標題 重合メッシュ法を用いた構造物と地盤の一体モデルの時刻歴応答解析
3. 学会等名 2021年度日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山東篤, 岸田怜哉
2. 発表標題 はみ出しを用いた重合メッシュ法による時刻歴応答解析
3. 学会等名 第26回計算工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山東篤
2. 発表標題 重合メッシュ法による構造物・地盤一体モデルの動的解析に関する基礎検討
3. 学会等名 第25回計算工学講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山東篤
2. 発表標題 重合メッシュ法を用いた構造物と地盤の一体モデルの固有値解析
3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山東篤
2. 発表標題 重合メッシュ法による構造物・地盤一体モデルの動的解析に関する基礎検討
3. 学会等名 第25回計算工学講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山東篤
2. 発表標題 重合メッシュ法を用いた構造物と地盤の一体モデルの固有値解析
3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会（関東）学術講演会
4. 発表年 2020年

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------