

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：15201

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2022

課題番号：19K23549

研究課題名（和文）新たな減衰機構に基づく制振鋼構造に関する研究

研究課題名（英文）Study on Passive Control Steel Structures Using a New Damping Mechanism

研究代表者

小松 真吾（Komatsu, Shingo）

島根大学・学術研究院環境システム科学系・助教

研究者番号：60845618

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、弾性ひずみエネルギー吸収という新たな減衰機構を有するNCブレース鋼構造架構の制振設計法構築が目的である。まず、1層架構の静的載荷実験の結果から弾性ひずみエネルギー吸収量の評価式と、非線形挙動を説明する履歴則を作成した。次に、1層架構に観測地震波を入力する振動台実験を実施して、弾性ひずみエネルギー吸収による地震応答低減を実証した。そして、構造物動的特性と入力地震波の特性により決まるNCブレース架構の非線形応答性状と力学特性を詳細に考慮した等価線形化法を提案した。時刻歴応答解析の結果との比較から、本手法は高い精度で地震応答を予測でき合理的設計が可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究代表者らが提案しているNCブレース架構のみに生じる弾性ひずみエネルギー吸収という新たな現象に関する成果である。静的および動的実験の実施により、現象の実証だけでなくその力学的評価法を作成している。また時刻歴応答解析の結果に基づき、最大地震応答を広範な条件下にわたり高精度で予測可能な応答評価手法にまで展開している。このように、本研究の成果は新規性や独創性が高く、さらに実験、解析、理論と多岐にわたっており、その学術的意義は大きい。また、実応答傾向の詳細な考慮による応答予測の高精度化という他の研究にも波及しうる新たな展開も示すことができた。

研究成果の概要（英文）：This research aims to construct a passive control design method of NC braced steel structures having elastic energy accumulation as a new damping mechanism. Firstly, an evaluation formula of the elastic strain energy and the hysteresis rules, which account for non-linear behavior, were developed by single-story static loading tests' results. Next, shaking table tests on single-story specimen subjected to recorded earthquake inputs demonstrated the response reduction due to the elastic strain energy accumulation. Further, a new equivalent linearization method considering detailed non-linear response characteristics and mechanical properties of NC braced frame was proposed. The evaluation obtained from the method is predicted the time history analysis result with excellent accuracy over an extensive range.

研究分野：建築構造

キーワード：鋼構造 NCブレース 弾性ひずみエネルギー吸収 静的載荷実験 振動台実験 時刻歴応答解析 等価線形化法 地震応答予測

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

研究代表者らが提案している Non-Compression (NC) ブレース鋼構造架構は、圧縮力が作用しない NC ブレースの力学特性により、ブレース弾性範囲において弾性ひずみエネルギー吸収という新たな減衰機構を発揮する。弾性ひずみエネルギー吸収により、初期固有周期と減衰定数の等しい弾性架構と比較して、最大絶対加速度などの地震応答を大幅に低減できるが、ブレース配置によっては高い加速度低減を得る反面、変位応答が増大してしまうという課題があった。また NC ブレース架構の地震応答を、コンピュータを利用した時刻歴応答解析によらず簡易に評価する手法を既に開発したが、構造物の動的特性として重要な指標である等価粘性減衰定数については言及しておらず、弾性ひずみエネルギー吸収に基づいた地震応答低減の効果は不明であった。

2. 研究の目的

本研究課題の目的を述べる。まず、弾性ひずみエネルギー吸収による絶対加速度と変位応答の低減を両立できる新たなブレース配置を提案し、この配置を含む各種ブレース配置架構の力学特性や性能を各種実験で確認する。そして、NC ブレース架構の地震時挙動を等価線形化法に反映させることで、地震応答を精度良く評価できる応答評価法を構築する。NC ブレース鋼構造架構の制振設計が合理的に行えることを示す。

3. 研究の方法

本研究では、図1に示す X 型(X-type)、Z 型(Z-type)、非対称 Z 型(ASZ-type)の NC ブレース配置を対象とする。非対称 Z 型は  $x$  方向と  $y$  方向のブレース配置が同一回転方向であるものを SR、互いに逆回転方向であるものを RR と呼ぶ。Z や ASZ (SR) の非対称配置の場合、架構の層間変形が一方に漸増し増大するが (漸増変形特性と呼ぶ)、ASZ (RR) ではこのような漸増変形特性に基づいて生じた変形を互いに直交する方向で相殺することにより抑制を図ることが可能である。本研究では基礎的な検討として一方入力に限定して研究する。

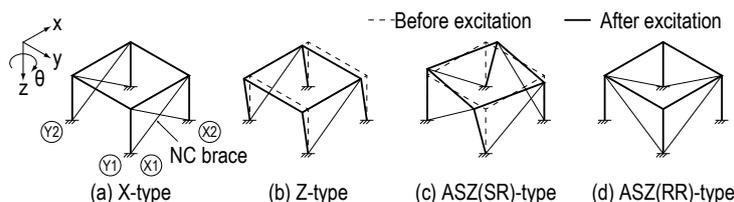


図1 対象とする NC ブレース配置

(1) NC ブレース架構の静的載荷実験

試験体は柱  $\square$ -60x60x6 (STKR400) と梁 H-150x150x7x10 (SS400) を隅肉溶接接合して製作した 1 層 1 スパン立体架構であり、ブレース径は  $\phi$ 5.2, 7, 9 の 3 種とする (図2)。実験変数は図1の4種ブレース配置および3種ブレース径の組合せ 12 ケースである。実験は試験体第1層屈心位置の  $x$  方向層間変形角 (Z 型では、弾性時には荷重, 弾塑性時には相対的な層間変形角とする) を制御値とする正負交番漸増繰り返し載荷とした。

(2) NC ブレース架構の振動台実験

試験体は柱  $\square$ -40x40x2.3 (STKR400) と梁 H-100x100x6x8 (SS400) を隅肉溶接接合して製作した 1 層 1 スパン立体架構である (図3)。実験は地震波を試験体の  $x$  方向に入力する加振実験であり、地震波形は本試験体の寸法が実大構造物の 1/6 程度であることを考慮し時間軸を  $1/\sqrt{6}$  倍した JMA 神戸 NS と El Centro NS である。

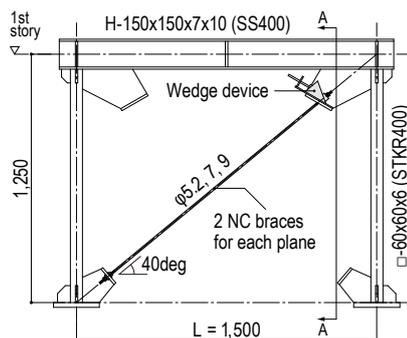


図2 静的載荷実験の試験体

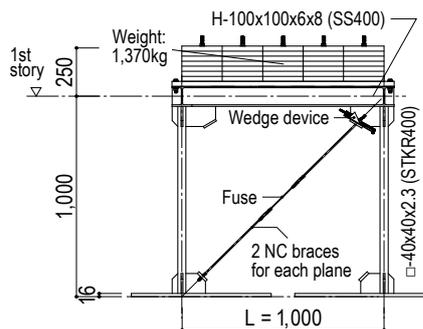


図3 振動台実験の試験体

### (3) 非線形弾性履歴則の作成

静的載荷実験結果の考察から、NC ブレース架構の弾性履歴は、経験した最大の荷重に依存して拡大することが分かった。この性質を利用してNC ブレース架構を1自由度系に縮約し、その非線形弾性履歴則の数学的表現を与えた。また、非対称Z型では振り挙動を正確に表現する2自由度モデルを作成した。

以上を組込んだ自由度縮約モデルと架構モデルの時刻歴応答解析をそれぞれ実施し、それらの結果を比較して自由度縮約モデルの妥当性を検証した。

### (4) NC ブレース架構の時刻歴応答解析

#### ①解析モデル

X型、Z型は(3)の非線形弾性履歴則を組込んだ1自由度縮約モデル、非対称Z型は偏心挙動を正確に再現できる2自由度縮約モデルで解析を行った。

#### ②解析変数

- ・ブレース配置 (4種) : X, Z, ASZ (SR), ASZ (RR)
- ・初期固有周期 (5種) :  $T_0 = 0.2, 0.5, 1, 2, 5\text{sec}$
- ・ブレース剛性比 (6種) :  $K_b / K_f = 0.5, 1, 2, 4, 8, 16$
- ・入力地震波 (32種)

#### ③解析条件

数値積分はNewmarkの $\beta$ 法 ( $\beta = 0.25$ の平均加速度法)である。2自由度モデルの初期振り固有周期 $T_\theta$ は、 $T_0$ の $1/\sqrt{3}$ とした。減衰は架構全体の初期剛性比例型を仮定し、減衰定数は $\zeta_0 = 0.02$ を設定した。2自由度モデルの場合、 $T_0, T_\theta$ の減衰定数が共に0.02のRayleigh型を設定した。

### (5) 等価線形化法

NC ブレース架構の非線形挙動は同一変位振幅において過渡的であり、一般の弾塑性系のように定常的ではない。よって一般弾塑性系のように原点を中心とした1サイクルの定変位振幅ではなく、NC ブレース架構ではサイクル開始点の原点からの移動を考慮に入れた半サイクルに着目して定式化を行い、時刻歴応答解析の結果との比較を通して予測精度の検証を行う。

## 4. 研究成果

### (1) NC ブレース架構の静的載荷実験

各試験体の弾性サイクル終了時の弾性ひずみエネルギー吸収量と作成した評価式を比較する。図4はX, Z, ASZ (SR), (RR)の各サイクル終了時の弾性ひずみエネルギー吸収量 $W_e$ の実験結果と、評価値の曲線をそれぞれ比較している。いずれのブレース配置、ブレース径でも評価式によりブレース架構の弾性ひずみエネルギーを良好な精度で評価できる。

新しいブレース配置であるASZ(RR)の変形抑制効果をASZ(SR)と比較する。図5はブレース径 $\phi 9$ 試験体のASZ(RR)とASZ(SR)の変形性状を比較したものであり、図5aがY1, Y2構面骨組(図1参照)の変位、図5bが第1層の振り角である。ASZ(RR)は直交方向のブレース抵抗により外周構面の変位の偏りがASZ(SR)のそれよりも少なく、よって加力終了後の振り角はASZ(SR)と比べて41.5%と半分以下であり変形抑制効果を発揮している。

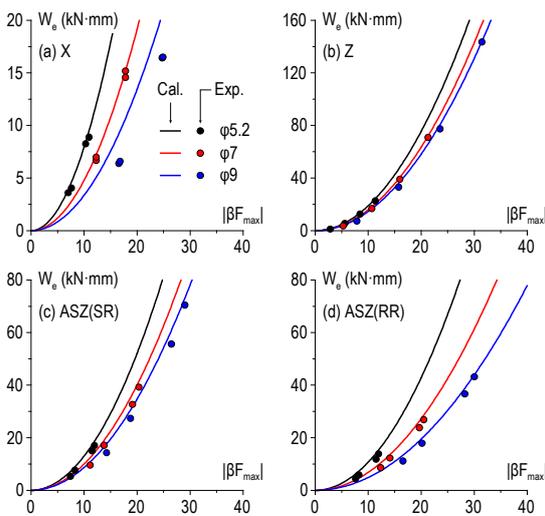


図4 弾性ひずみエネルギー吸収量

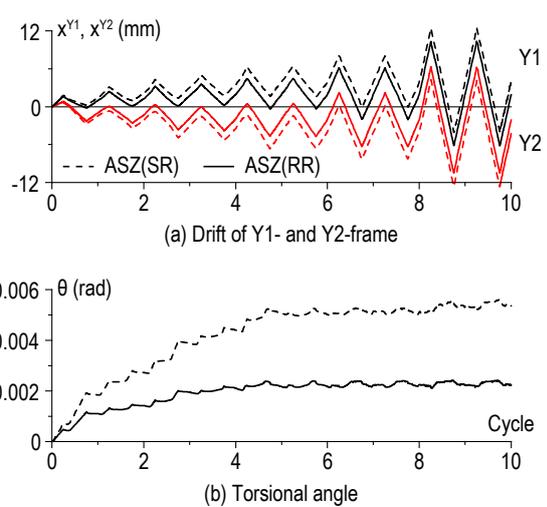


図5 ASZの変形( $\phi 9$ )

### (2) NC ブレース架構の振動台実験

図6にはブレース初期張力を導入し弾性ひずみエネルギー吸収がない試験体に対する弾性ひずみエネルギー吸収がある試験体の絶対加速度の低減を4種ブレース配置、JMA神戸NSとEl Centro NSについて示す。地震波のスペクトル特性とブレース配置により応答比率は様々だが、

いずれの試験体も弾性ひずみエネルギー吸収により地震応答を低減できている。

### (3) 非線形弾性履歴則の作成

架構および自由度縮約モデル( $T_0 = 1\text{sec}$ ,  $\zeta_0 = 0.02$ ,  $K_b / K_f = 4$ )に El Centro NS を入力したときの重心変位応答の時刻歴を図 7 に示す。並進振動のみの X, Z は 1 自由度モデルで, ASZ は 2 自由度モデルで架構モデルの時刻歴応答や履歴挙動を完全に再現できることを確認した。

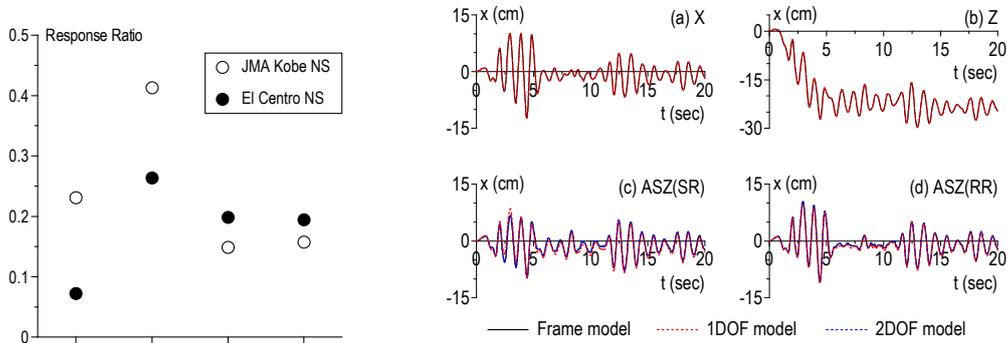


図 6 絶対加速度応答比

図 7 重心変位応答時刻歴  
( $T_0 = 1\text{sec}$ ,  $\zeta_0 = 0.02$ ,  $K_b / K_f = 4$ , El Centro NS)

### (4) 等価線形化法

#### ① 等価線形化法の概要

弾塑性系の塑性率  $\mu$  に相当する半サイクル開始点を基準とした指標をエネルギー吸収率  $\mu_{ea}$  とする。  $\mu_{ea} > 1$  の半サイクルの数を非線形応答サイクル数  $n_{NL}$  とし, さらに, 最後の非線形半サイクルまでに生じた線形応答の半サイクル数  $n_L$  も予測精度向上のため考慮した。(4)の時刻歴応答解析の結果を用いて  $n_{NL}$  と  $n_L$  を経験的に決定し, サイクル数  $n = 1$  から  $n_{NL} + 1$  までのそれぞれに  $\mu_{ea}$  の値を対応付ける。Newmark と Rosenbluth の平均減衰法を拡張し,  $\mu_{ea}$  を応答サイクル  $n$  上で 1 から  $n_{NL} + n_L + 1$  まで平均することで地震応答性状を詳細に考慮に入れた等価粘性減衰定数の評価法を構築した。そして, 笠井の応答予測法に NC ブレース架構の力学特性を反映させて最大応答の予測法まで展開した。

図 8 に  $\zeta_0 = 0.02$  の場合に  $K_b / K_f = 1, 2, 4, 8$  として計算した各 NC ブレース架構の等価粘性減衰定数  $\zeta_{eq}$  を  $n_{NL} = 5$  から 30 まで 5 刻みで示す。図 8 より,  $\zeta_{eq}$  は  $n_{NL}$  が多くなると線形サイクルの寄与が増すため減少し,  $K_b / K_f$  が高くなると弾性ひずみエネルギー吸収の効率が高くなるため上昇する。ブレース配置毎の  $\zeta_{eq}$  の大小関係は  $X < ASZ(RR) < Z \approx ASZ(SR)$  である。

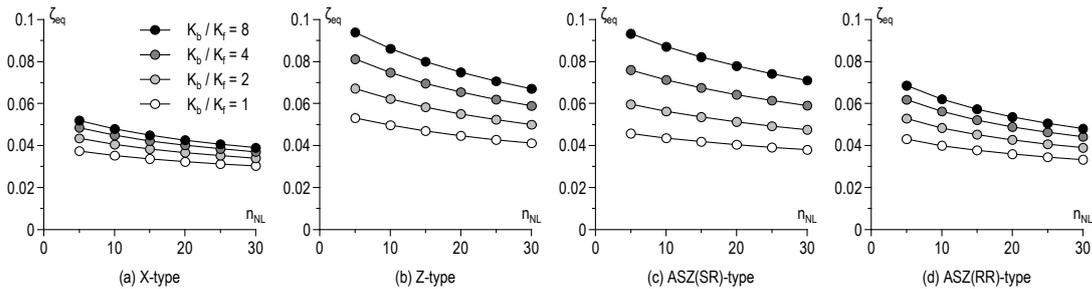


図 8 NC ブレース架構の等価粘性減衰定数

#### ② 応答予測精度の検証

NC ブレース架構の等価線形化法による地震応答の予測精度を検証した。表 1 には各ブレース配置の最大加速度(Acc.)と最大重心変位(Disp.)の予測値を解析結果で除した比の平均と標準偏差を示す。平均は殆どのブレース配置とブレース剛性比  $K_b / K_f$  の組合せで加速度, 変位ともに概ね 1 を満足しており, また標準偏差は高い  $K_b / K_f$  では非線形性が強いため大きくなるが, 比較的安定していると言える。X, ASZ(RR)は  $K_b / K_f = 16$  と高い場合でも予測精度は安定しているが, Z と ASZ(SR)では  $K_b / K_f = 8$  以上で平均と標準偏差がともに増している。これは  $K_b / K_f$  が高くなると, それぞれ, Z では正側と負側の最大応答の偏りが大きくなるため, ASZ(SR)では振り挙動の影響が大きく静的理論との乖離が大きくなるためである。

表 1 最大加速度(Acc.)と重心変位(Disp.)の応答予測精度  
上段：平均，下段：標準偏差

$K_b/K_f$	X-type		Z-type		ASZ(SR)-type		ASZ(RR)-type	
	Acc.	Disp.	Acc.	Disp.	Acc.	Disp.	Acc.	Disp.
0.5	1.011	1.024	0.962	0.970	0.995	1.023	1.009	1.027
	(0.056)	(0.063)	(0.084)	(0.114)	(0.065)	(0.074)	(0.062)	(0.070)
1	1.018	1.036	0.967	0.943	1.002	1.044	1.019	1.044
	(0.076)	(0.090)	(0.120)	(0.132)	(0.090)	(0.109)	(0.085)	(0.103)
2	1.021	1.040	0.987	0.935	1.019	1.066	1.030	1.056
	(0.093)	(0.113)	(0.169)	(0.161)	(0.123)	(0.148)	(0.109)	(0.134)
4	1.023	1.036	1.031	0.967	1.056	1.091	1.038	1.055
	(0.104)	(0.132)	(0.227)	(0.210)	(0.163)	(0.197)	(0.131)	(0.163)
8	1.022	1.028	1.118	1.067	1.139	1.107	1.043	1.040
	(0.112)	(0.148)	(0.302)	(0.293)	(0.213)	(0.259)	(0.145)	(0.185)
16	1.022	1.019	1.239	1.241	1.288	1.071	1.045	1.020
	(0.116)	(0.159)	(0.397)	(0.418)	(0.300)	(0.344)	(0.153)	(0.203)
0.5 to 16	1.019	1.031	1.051	1.021	1.083	1.067	1.030	1.041
	(0.095)	(0.122)	(0.261)	(0.268)	(0.206)	(0.211)	(0.119)	(0.151)

③ 応答スペクトル一定領域における最大応答の傾向

応答スペクトルが一定の場合において、初期固有周期  $T_0$ 、初期減衰定数  $\zeta_0$  の弾性架構からの弾性ひずみエネルギー吸収による最大応答の変化を考察した。この弾性架構の最大復元力、最大変位を  $F_{EL}$ 、 $U_{EL}$ 、また NC ブレース架構の最大復元力、最大重心変位を  $F$ 、 $U$  と表す。

図 9 には、例として擬似速度一定領域での  $F/F_{EL}$  と  $U/U_{EL}$  の関係を表す曲線を、 $K_b/K_f=0$  から 16 まで、 $n_{NL}=1$  から 50 までの範囲で示す。 $K_b/K_f$  が高くなると弾性ひずみエネルギー吸収効率が上がるため最大復元力の低減効果は上昇するが、非線形サイクル数  $n_{NL}$  が大きくなると必然的に線形挙動や弱い非線形挙動を多く含むこととなり最大復元力の低減効果は低下する。X、ASZ(SR)、ASZ(RR)の最大重心変位は最大復元力と同様に低減されることを示す。これは、ASZ(RR)で二方向入力を考えれば、高い最大復元力の低減効果とともに外周構面の変位も低減できることを示唆する。Zは最大復元力の低減効果は高くなる反面、 $K_b/K_f$ が高い場合に変位が著しく増大する。

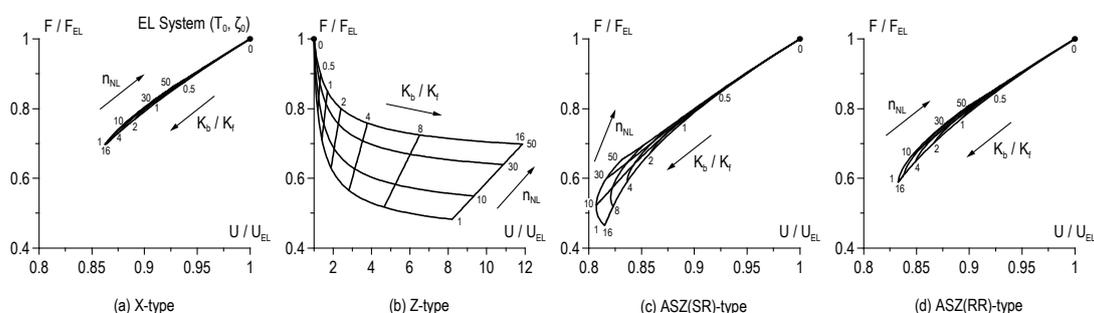


図 9 擬似速度スペクトル一定領域における最大復元力および最大重心変位の傾向

(5) 研究成果の位置づけと今後の展望

本研究課題は、研究代表者らが提案する NC ブレース架構に固有の現象である弾性ひずみエネルギー吸収を実験により実証し、次いで解析と理論に基づきこの減衰機構による応答低減効果の評価方法まで展開した。そのため、本研究成果は高い新規性を有していると言える。

今後の展望としては、ASZ に二方向入力を行う場合の振動台実験と時刻歴応答解析の実施、多層架構の応答予測への展開、ASZ で初期偏心による振り挙動を伴う場合への拡張、制振構造設計で採用されている主架構応答を基準とした設計法への展開などが考えられる。以上を含めて、研究助成期間終了後も複数の査読付き学術論文へ研究成果を投稿できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 小松真吾, 山西央朗, 高松隆夫	4. 巻 27
2. 論文標題 偏心を有する非対称Z型NCブレース架構の挙動に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 鋼構造論文集	6. 最初と最後の頁 53-66
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11273/jssc.27.108_53	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 -

1. 著者名 小松真吾, 山西央朗, 高松隆夫	4. 巻 87
2. 論文標題 エネルギーの釣合に基づく多層NCブレース架構の地震応答予測	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 579-590
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.87.579	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 -

1. 著者名 小松真吾, 山西央朗, 高松隆夫	4. 巻 -
2. 論文標題 ノンコンプレッションブレース架構の非線形弾性履歴則と時刻歴解析モデルの自由度縮約	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本建築学会技術報告集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 小松真吾
2. 発表標題 NCブレース架構の等価粘性減衰定数に関する研究(その1 静的載荷実験によるエネルギー定式化)
3. 学会等名 日本建築学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小松真吾
2. 発表標題 偏心を有する非対称Z型NCブレース架構の地震応答性状
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小松真吾
2. 発表標題 エネルギーの釣合に基づく多層NCブレース架構の地震応答予測
3. 学会等名 日本建築学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小松真吾
2. 発表標題 NCブレース架構の変位応答低減に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小松真吾
2. 発表標題 NCブレース架構の等価粘性減衰定数に関する研究（その2 非線形弾性履歴則の定式化）
3. 学会等名 日本建築学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小松真吾
2. 発表標題 NCブレース架構の等価粘性減衰定数に関する研究（その3 非線形弾性応答特性の把握）
3. 学会等名 日本建築学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小松真吾
2. 発表標題 NCブレース架構の等価粘性減衰定数に関する研究（その4 等価線形理論に基づく応答予測法）
3. 学会等名 日本建築学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2023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