

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01583

研究課題名（和文）事業継続を目標性能とした既存不適格鉄骨大スパン建屋の終局限界状態の解明

研究課題名（英文）Clarification of ultimate limit states of old large span steel structures for aseismic retrofit considering business continuity.

研究代表者

井戸田 秀樹 (Idota, Hideki)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10203192

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,000,000円

研究成果の概要（和文）：H形鋼梁と組立トラス梁を対象とし、座屈後の大変形領域に至る梁の繰返し挙動を主に実験的な手法で解明するとともに、細長比、幅厚比、モーメント勾配をパラメータとした汎用的な繰返し履歴モデルを提案した。H形鋼梁については、梁に接合される柱と補剛材の影響を終局状態に至るまで実験で確認し、梁の境界条件が終局挙動に与える影響を明らかにした。また、柱の境界条件によって梁の座屈モードが異なることを解明した。一方、トラス梁については、梁端部の弦材の破断が梁の終局状態を決定するため、座屈後の挙動を破断も含めて定式化するとともに、破断を考慮した繰返し履歴モデルを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

座屈によって性能が決定される既存不適格の梁に対して、座屈発生後の終局状態に至る繰返し性能を実験および解析によって明らかにし、それを数学的な繰返し履歴モデルとして提案した。提案した履歴モデルは、耐震改修が必要な鉄骨構造物の保有耐震性能を合理的に評価する上で有用なものであり、現状の保有性能を精度良く評価することで合理的かつ現実的な鉄骨大スパン建物の耐震改修方法を導くことができる。また、梁の境界条件が与える影響を明確にしたことで、耐震改修時の課題や注意点をより具体的に把握することができる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop hysteretic models for H-shaped steel beams and steel truss beams under cyclic loading. Parameters of the hysteretic model are slenderness ratio, width-thickness ratio and moment gradient. It is also clarified that the boundary conditions effects on buckling modes of beam. On the other hand, the ultimate behavior of steel truss beams are determined by the fracture of chord member at the end of the beam. The proposed hysteretic model for steel truss beams can consider the fracture of chord member based on the test results.

研究分野：建築構造学

キーワード：建築構造 鉄骨大スパン構造 耐震安全性 耐震改修 繰返し履歴モデル

## 1. 研究開始当初の背景

従来、座屈現象は想定する範囲内では生じないことを前提に扱われてきた。したがって、座屈に関する研究の多くは座屈を発生させないための条件を提示する形で整理されてきた。しかし、座屈により終局限界状態が決定されるような建物の耐震性能を精緻に評価しなければならない場合には、繰返し荷重下における座屈発生後の挙動を把握し、それを一般的な形で整理する必要がある。本研究課題の核心は、既存建物の部分的な損傷を許容しつつ人命保護と事業継続を保証するための技術の確立であり、座屈発生後の地震時繰返し挙動をいかに精緻に評価できるかが学術的な「問い」である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、現行設計の枠組みにとらわれることなく、座屈発生後の大変形繰返し領域まで含めた挙動を解明することにある。したがって、座屈する部材の繰返し履歴モデルの提案が必要になる。また、個材の座屈を骨組全体の中で位置づけ、大スパン建物全体の挙動を表現できる繰返し履歴モデルの提案も行う。これらの提案は既存不適格の鉄骨大スパン工場建屋でよく用いられてきたトラス梁、および比較的横座屈細長比の大きいH形鋼梁を対象とする。座屈現象を含んだ履歴モデルは従来では筋かい材の繰返し挙動を対象としていたが、本研究ではトラス梁弦材の曲げ座屈やH形鋼梁の横座屈現象を表現する履歴モデルを任意の境界条件の下で提案するという点が学術的独創性であり、また、部材の座屈後挙動を含めた骨組全体の履歴モデルを構築するという点が学術的創造性である。

## 3. 研究の方法

本研究の具体的な方法は、研究課題ごとに下記の3つに分類される。

### (1) 繰返し荷重下の大スパン鉄骨梁部材の終局限界挙動の解明

座屈を許容しながら倒壊や梁の落下という事象を評価するためには、梁部材の座屈後大変形領域での繰返し弾塑性変形のような極限的な終局限界状態に対する知見が必要である。そこで、本研究ではH形鋼梁と組立トラス梁を対象とし、従来ほとんど検討されてこなかった座屈後の大変形領域に至る梁の繰返し挙動を主に実験的な手法で解明するとともに、細長比、幅厚比、モーメント勾配をパラメータとした汎用的な繰返し履歴モデルを提案する。

### (2) 座屈する梁を含む鉄骨大スパン骨組の履歴モデルの提案

工場建屋の柱にはH形鋼などの開断面部材が多く、梁端部の断面の反りや面外回転に対する境界条件の適切な評価が重要となる。また、梁に接続する母屋・つなぎ材による座屈拘束効果の影響も少なくない。これらの影響は、建物全体を二次部材も含めて3次元モデル化し、その立体解析を動的荷重下で行うことで把握できるが、一般的な設計業務の中でこうした手法を用いるのは非現実的であるだけでなく、その妥当性の検証も難しい。そこで、課題(1)で提示した梁部材の繰返し履歴モデルと骨組全体の履歴とを結び付け、鉄骨大スパン建屋全体の時刻歴応答解析を合理的に行うための簡便な解析モデルとその動的解析のための履歴モデルを提案する。

### (3) 振動台実験による骨組履歴モデルの検証

課題(1)(2)を通して構築した既存不適格鉄骨大スパン骨組の繰返し履歴モデルの妥当性を検証するためには、立体架構に対する実験的検証が不可欠となる。そこで、本研究では提案した履歴モデルの妥当性を検証するため、骨組全体あるいは一部を二次部材まで含めてモデル化した試験体を用いた振動台実験を実施する。振動台実験では先に述べた周辺部材による座屈拘束効果の検証に加え、座屈発生による局所的なひずみ集中がもたらす部材破断についても確認する。

なお、(3)については、当初の計画では振動台を用いた骨組実験を台湾国立成功大学の鍾育霖教授の協力のもと実施の予定であったが、新型コロナウイルス感染症のため台湾への渡航が実現せず、静的な代替実験を国内で実施せざるを得ない状況となった。急遽ラーメン骨組を対象とした実験を研究代表者の所属する機関にて実施し、繰返し漸増載荷方法を採用することにより当初予定していた振動台を用いた実験で想定されたものと同様な成果が得られた。

## 4. 研究成果

### (1) 繰返し荷重下の大スパン鉄骨梁部材の終局限界挙動の解明 (H形鋼梁)

従来の研究で対象とされてこなかった、限界細長比付近のH形鋼梁について有限要素法解析を用いた繰返し載荷を行い、その終局限界挙動を解明した。横座屈細長比が0.4~0.9の範囲では、図1に示すように同一変位振幅で繰返したときに耐力劣化が生じる振幅と生じない振幅があり、その臨界点を定常限界変位振幅と呼ぶ。この定常限界変位振幅を細長比とモーメント勾配の関数で定式化した。図2は定式化した関数と数値解析解との対応を示したものであり、十分な精度で評価できている。

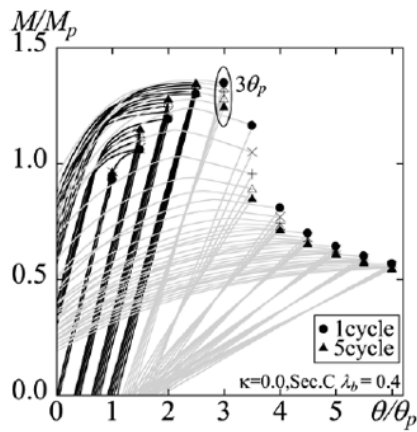


図1 定常限界変位振幅

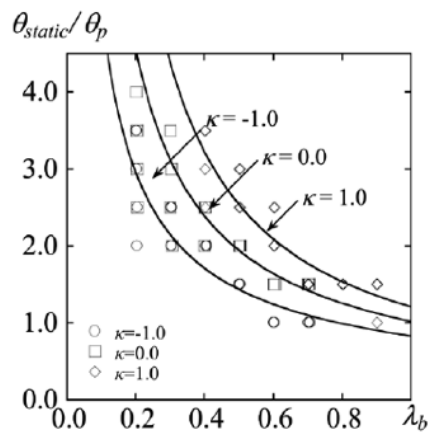


図2 提案式と解析値の対応

(2) 繰返し荷重下の大スパン鉄骨梁部材の終局限界挙動の解明 (トラス梁)

既存不適大スパン工場の持つ基本的な耐震性能を繰返し荷重下での大変形領域まで含めて実験的に把握した。実験に用いた試験体、および荷重装置はそれぞれ図3、図4に示す通りである。

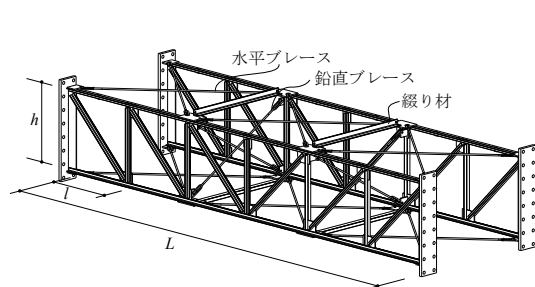


図3 平行弦トラス梁試験体

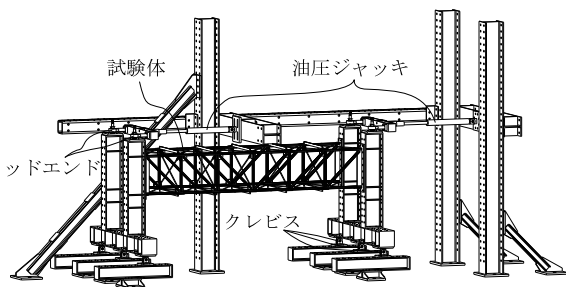
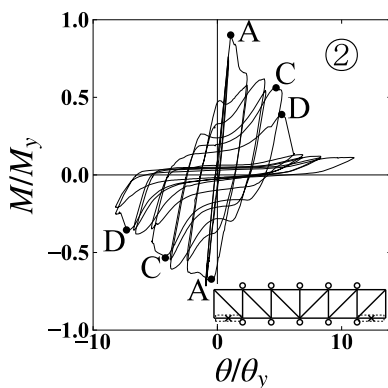
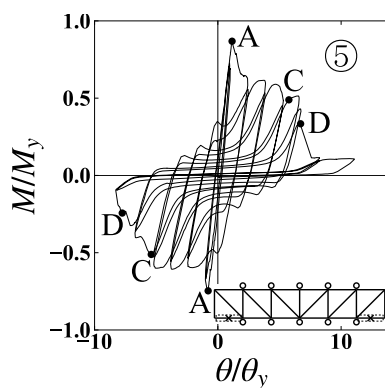


図4 トラス梁の繰返し荷重装置

実験結果を図5に示す。トラス梁の耐力は弦材端部の補剛区間における曲げ座屈により決定されるが、座屈後発生後の繰返し荷重によって弦材が破断し、耐力を失う。



(a) 各節点補剛+弦材細長比 79



(b) 各節点補剛+弦材細長比 102

- A : 下弦材座屈発生
- B : 上弦材座屈発生
- C : 下弦材亀裂発生
- D : 下弦材破断発生

図5 トラス梁の終局繰返し挙動

(3) 繰返し履歴モデルの提案 (H形鋼梁)

H形鋼梁を対象とした繰返し荷重下での終局限界挙動の成果に基づき、定常限界変位振幅・徐荷剛性の低下・剛性変化点の検討を行い、繰返し荷重履歴モデルを提案した。提案した履歴モデルとFEM解析結果との対応を図6に示す。いずれの細長比でも、提案した履歴モデルは精度良く解析結果を再現できている。

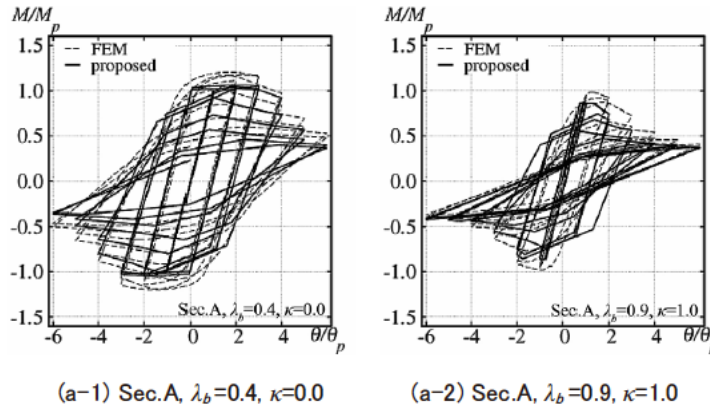


図6 提案したH形鋼梁の繰返し载荷履歴モデルと有限要素法解析結果との対応

(4) 繰返し履歴モデルの提案 (トラス梁)

トラス梁では、弦材の座屈後の繰返し载荷により弦材の破断が発生し、それによって終局状態が決定される。そこで、弦材単体の繰返し载荷実験を行い、繰返し回数と破断の関係を定量化するとともに、その結果に基づいて繰返し履歴モデルを提案した。図7は提案したトラス梁の繰返し载荷履歴モデルと実験結果との対応である。良い精度で実験結果を再現できていることがわかる。

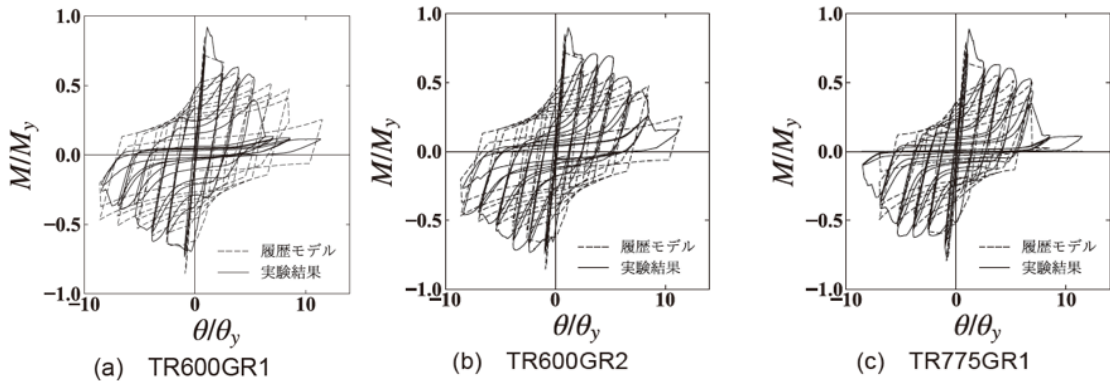


図7 提案するトラス梁の繰返し载荷履歴モデルと実験結果との対応

(5) 骨組履歴モデルの検証 (H形鋼梁ラーメン骨組)

(1) ~ (4) の成果を踏まえ、梁が支持される柱の境界条件の影響を把握するためラーメン骨組の载荷実験を行い、骨組としての挙動を解明した。逆対称曲げを受けるラーメン骨組では、柱および仕口の剛性に応じて座屈モードが異なり (図8)、それによって終局までのエネルギー吸収量に差が出ることを明らかにした (図9)。

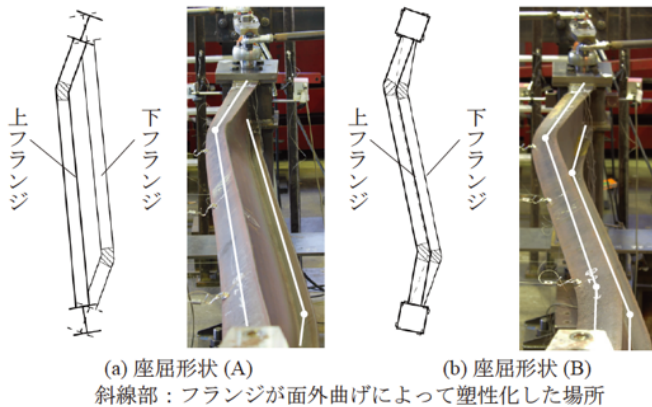


図8 柱および仕口の境界条件により異なる座屈モードが発生

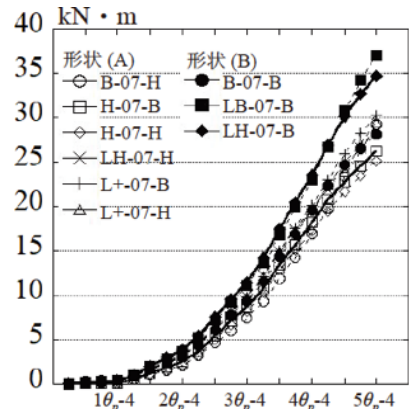


図9 エネルギー吸収量

(6) 骨組履歴モデルの検証 (H形鋼梁山形ラーメン骨組)

鉄骨大スパン構造で多用される山形ラーメン構造に対し、載荷実験を実施して境界条件を考慮した骨組としての繰り返し挙動を把握した。実験装置と試験体の概要を図 10 に示す。また、梁を支持する柱や補剛点の境界条件を考慮した有限要素法解析モデルを提案し (図 11)、実験結果と十分な精度で対応することを確認した。

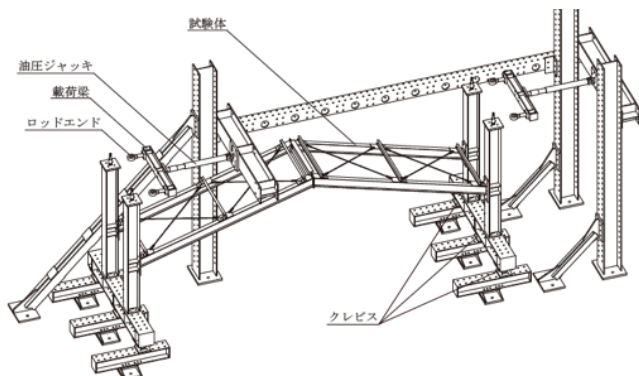


図 10 山形ラーメン骨組の繰り返し載荷実験

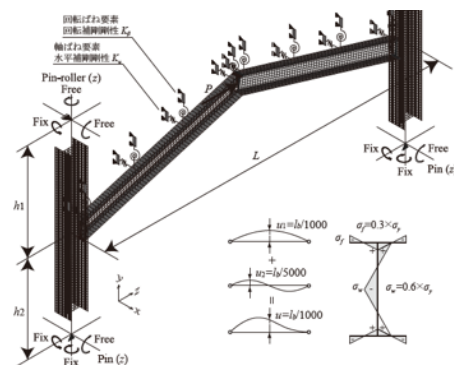


図 11 境界条件を考慮した FEM モデル

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 OHTANI Yuka, IDOTA Hideki	4. 巻 84
2. 論文標題 A HYSTERETIC MODEL FOR LATERALLY UNSUPPORTED H-SHAPED STEEL BEAMS CONSIDERING LOCAL AND LATERAL BUCKLING UNDER CYCLIC LOADING	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 1475 ~ 1484
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.84.1475	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5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 伊藤嘉邦・井戸田秀樹
2. 発表標題 鉄骨山形ラーメン架構の繰返し終局挙動
3. 学会等名 日本建築学会東海支部研究報告集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浅野七生哉, 井戸田秀樹
2. 発表標題 既存不適格鉄骨トラス梁の大変形繰返し挙動 その1 トラス梁の大変形繰返し載荷実験
3. 学会等名 日本建築学会東海支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浅野七生哉, 井戸田秀樹
2. 発表標題 既存不適格鉄骨トラス梁の大変形繰返し挙動 その2 弦材の繰返し曲げ座屈実験
3. 学会等名 日本建築学会東海支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小野 和也, 井戸田 秀樹
2. 発表標題 逆対称曲げを受けるH形鋼梁の横座屈性状に及ぼす梁端拘束条件の影響
3. 学会等名 日本建築学会東海支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大谷 友香, 井戸田 秀樹, 梅村 恒
2. 発表標題 H形鋼梁の連続的繰返し履歴モデルにおける指向点の検討
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019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
研究分担者	齊藤 大樹  (SAITO Taiki)  (00225715)	豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授   (13904)	
研究分担者	長江 拓也  (NAGAE Takuya)  (90402932)	名古屋大学・減災連携研究センター・准教授   (13901)	

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