

機関番号：54502

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560452

研究課題名 (和文) はり中央部を部分構造モデルに置換した
鋼二層ラーメンの地震応答に関する実験と解析研究課題名 (英文) NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES ON EARTHQUAKE RESPONSE
OF STEEL TWO-STORY PORTAL FRAMES WITH SUBSTRUCTURE MODEL AT
CENTRE OF BEAM

研究代表者

酒造 敏廣 (MIKI TOSHIHIRO)

神戸市立工業高等専門学校・都市工学科・教授

研究者番号：90137175

研究成果の概要 (和文)：

本研究は、はり中間部がせん断座屈崩壊する鋼門形ラーメンの地震応答解析を行っている。はり腹板をサブストラクチャモデルに置換した数値解析モデルを示し、オンライン実験法とそれに準じる仮動的な地震応答解析法を提案している。せん断座屈した腹板に特有な崩壊挙動がラーメン全体の復元力-変位関係に及ぼす影響を調べ、はり腹板のせん断崩壊が柱基部の塑性変形を抑える地震応答のメカニズムを明らかにしている。

研究成果の概要 (英文)：

This paper performs the earthquake response analysis of two-storey steel portal frames. The shear buckling behaviour of web plates in the middle of the 1st storey beam is paid attention to by the substructure pseudodynamic testing method. The numerical results illustrate the non-linear response of frames including the remarkable change in shearing resistance force of web plates due to buckling and diagonal tension-field. The damage mechanism of frames is discussed by focusing on whether or not the shearing collapse of web plates in the 1st storey beam could save the damage of another structural parts.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2008年度 | 1,700,000 | 510,000 | 2,210,000 |
| 2009年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 2010年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 2,900,000 | 870,000 | 3,770,000 |

研究分野：構造工学，橋梁工学，耐震工学

科研費の分科・細目：土木工学 構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：鋼門形ラーメン，地震応答，はり腹板，せん断座屈

1. 研究開始当初の背景

(1)研究の学術的背景

兵庫県南部地震(1995)で被害を受けた鋼製ラーメン橋脚には、はり部材腹板がせん断座屈崩壊しているものが多数あった。研究代表者らは、その発生原因を解析・実験で調べ、

以下のことを明らかにしてきた。

- ①はり腹板の損傷は、せん断耐力の小さい変断面はり中央の塑性化またはせん断座屈が隅角部腹板のそれに先行するとき起こる。
- ②はりのせん断崩壊は、隅角部とその近傍の

柱断面の塑性変形を抑える効果が大きく、かつ、塑性化が著しい場合には柱基部の塑性変形もかなり軽減される。

しかし、はり中央の薄腹板は、せん断座屈を伴った非常に複雑な力学的挙動を呈するため、ラーメンの耐震設計法に b) の利点を活用していくには、未だ解明すべき点が多い。

本研究は、サブストラクチャ・オンライン実験の考え方により、地震時の鋼二層ラーメンの揺れを忠実に再現し、強い地震でどのように揺れ、どのように破壊されるのについて、実験・解析で各種応答を追跡しながら、検討を加えるものである。ここで、サブストラクチャ・オンライン実験法とは、着目する部材のみに载荷実験を行い、その他の部材には数学モデルを用いて数値計算と実験をオンラインで結んで動的解析を行う実験手法を指す。

(2) 研究期間内に検討すること

計算と実験を組み合わせたオンライン実験 (=ハイブリッド実験) は、デジタル計算機が普及した 1980 年代から研究が盛んになった (岡田他, 1983)。土木分野では、家村ら (1991) が柱部材に着目して、二層高架橋の地震応答をサブストラクチャ・ハイブリッド実験法により調べている。せん断崩壊するはり部材に着目したオンライン実験は、せん断力を载荷する特殊な実験装置が必要になるため、見当たらない。

はりがせん断崩壊する骨組の地震応答は、多層ビルディングを対象にした Goel ら (米国 1997) の研究がある。はり部材にトラス構造を採用し、筋かいを設けたはり中間部に損傷を集中させる犠牲部材について論じており、参考になる点が多い。わが国の土木分野では、青木ら (2000) が大型モデルを用いて、はり中間部がせん断崩壊する門形ラーメンの静的繰返し载荷実験を行っている。

東京・大阪の高速道路を管理する各社では、鋼製ラーメン橋脚の設計において、はりのせん断崩壊を認める設計基準の検討が進められている。しかし、はり崩壊型となる橋脚の耐震設計の実用化については、ラーメンの地震応答性状を詳細把握すること等、今後の研究成果を待たねばならない点が多いのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、以上のような背景のもとに、地震時に一層目はり中間部がせん断崩壊する鋼二層ラーメンの弾塑性応答と損傷パターンの詳細を実験・数値解析で追跡する。

3 ヶ年の内に研究して明らかにしたい事項を具体的にまとめると、以下のとおりである。

- ① 計算機による運動方程式の数値積分法として、実験モデルに与える時間ステップ毎のせん断変形角を予測子・修正子を用いて計

算し、数値減衰も考慮できる α -OS 法を適用し、複雑な地震応答を呈するはり中央部の地震応答を精度よく捉えられるサブストラクチャ・オンライン実験法を開発する。

- ② 一層目はり中央部をモデル化した実験模型を作成してオンライン実験を実施し、はり腹板がどのように破壊されるのかを実験で再現しながら、柱基部と隅角部の損傷や塑性変形性状を考察し、ラーメン全体の地震応答性状を明らかにする。
- ③ はり中央部をシェル有限要素で精巧にモデル化し、オンライン実験の手法を汎用 FEM ソフトに適用して、2) の実験で考慮できない範囲 (地震波、腹板の幅厚比等) のラーメンの地震応答性状を明らかにする。
- ④ はり中央部のせん断崩壊が柱基部の損傷とラーメンの水平復元力に与える影響、及び、はり腹板の地震時せん断崩壊を認める耐震設計法で考慮すべき条件について考察する。

3. 研究の方法

(1) 趣旨

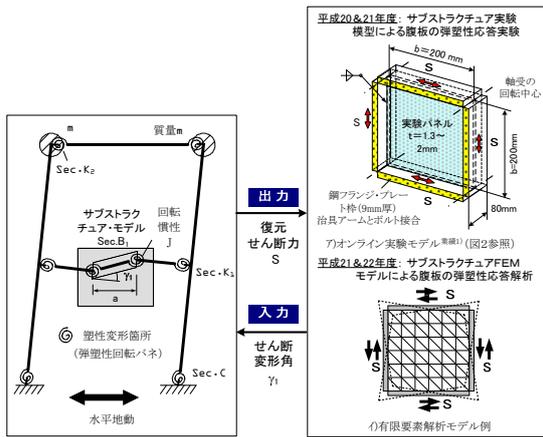
一層目のはり部材中央において、腹板がせん断崩壊する鋼二層門形ラーメンの地震応答に関する実験・解析を行う。本研究では、せん断崩壊するはり腹板を部分構造モデルに置換して、ラーメンの地震応答解析を行う点に特徴がある。まず、平成 20 年度は、腹板がせん断崩壊に至るまでの挙動を実験で精度よく追跡できるオンライン実験を行う。次年度以降は、初年度と同様な実験に加えて、オンライン実験法の実験模型を汎用 FEM 解析コード MARC を用いた弾塑性有限変位解析モデルに置き換え、ラーメン全体の地震応答解析を実施する。以上の研究を通じて、部分構造モデルを用いた応答解析法の精度、二層ラーメンの一層目はり部材のせん断崩壊が柱基部他、ラーメン各部の損傷に及ぼす影響について考察する。

- (2) 平成 20 年度の研究手法：はり中央部を部分構造モデルに置換した鋼二層ラーメンの地震応答に関するオンライン実験

① 二層門形ラーメンの解析モデルと運動方程式の検討

水平地震動を受けて、柱基部、隅角部および一層目はり中間部で塑性変形が進行する二層門形ラーメンを研究対象とする (図 1 (a) 参照)。塑性変形箇所には、Bi-Linear 型の曲げモーメント M -回転角 θ 関係を持つ弾塑性回転バネを組み込む。はり中間部では、せん断崩壊する腹板両端に二つの回転バネを仮定し、その M - θ 関係と腹板のせん断力 S -せん断変形角 γ 関係とを対応させる。

はり中央 Sec. B1 の部分構造モデルは、図 1 (b) に示すように、作用曲げモーメントが



(a) 二層鋼門形ラーメンの地震応答解析 (メインプログラム) (b) 部分構造のはり中央部腹板モデルの弾塑性応答 (サブルーチン)

図1 セン断崩壊するはり中央部腹板を部分構造モデルに置換した二層門形ラーメンの地震応答に関する実験と解析

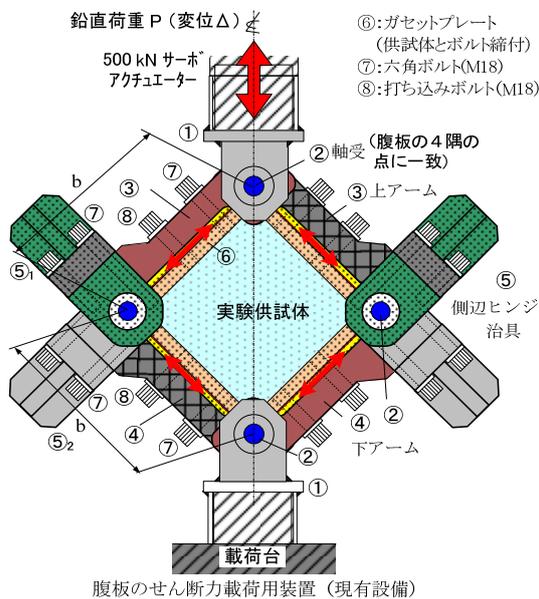


図2 部分構造モデルによる腹板の弾塑性応答実験 (平成20年度の実験)

小さいことを利用して、純せん断を受ける一枚の単一パネルに置換する。オンライン実験に用いる腹板 (図 (b)ア)) の幅厚比は、せん断座屈によるせん断耐力の低下が地震応答解析に再現できるように、100~155 の範囲で設定する (15 体)

柱頭部に集中質量 m と一層目はり中央に回転慣性 J を仮定し、はりの逆対称の曲げ変形を利用して、二自由度系の運動方程式を導く。

②運動方程式の数値積分法とオンライン実験法の精度について

中島ら (1990) が提案している OS (Operator Spriting) 法と高次振動に対して数値減衰効果を期待できる α 法 (Hilber ら, 1977) を組

み合わせた α -OS 法 (中島ら, 1993) を用いる。はり中間部では、数値積分過程で得られるせん断変形角 γ_1 を実験モデルに与えて復元せん断力 S を取り込み、それを回転バネの $M-\theta$ 関係に変換して計算を続ける。オンライン実験精度を確保して、二自由度系の動的応答解析の時間刻みをどの程度大きく取れるかについて検討する。

(3) 平成 21 年度の研究方法：部分構造の有限要素モデルを用いた鋼二層ラーメンの地震応答解析

①地震応答解析の方法

初年度に部分構造モデルに置換したはり腹板を、実験モデルではなく、有限要素の数値解析モデルに置換し、せん断力を载荷する実験装置 (図 2) が果たした役割を汎用 FEM ソフト MARC に担わせる (図 1 (b) i))。オンライン実験で用いた運動方程式の数値積分プログラムを MARC のユーザーサブルーチンの中に組み込んで応答解析を進める。はり中央部は次年度には単一パネルを考えているが、最終年度の解析ではフランジも含めて箱形部材にモデル化する計画である。

②二層ラーメンのオンライン地震応答実験と数値解析結果との比較・考察

初年度の実験結果を補い、上記の数値解析結果との比較に用いるため、オンライン実験も行う。

オンライン実験と MARC による数値解析の結果から、はり中央と柱基部の損傷や消費エネルギーの変動を調べ、ラーメンの水平復元耐力に占めるはり部材の貢献度を割り出して考察する。実験では再現できない範囲の幅厚比 (160 以上) の腹板を仮定し、二層ラーメンの地震応答解析を行い、一層目はり中央腹板のせん断崩壊による二層ラーメンの地震応答の変動について考察する。

(3) 研究のまとめ

最後に、3 カ年の研究成果をまとめる。

4. 研究成果

(1) オンライン実験手法による鋼二層門形ラーメンの地震応答解析

まず、実験と数値計算を組み合わせたオンライン実験の手法を用いて、一層目はり中央腹板がせん断崩壊する鋼二層門形ラーメンの地震応答解析を行った。ここで得られた知見は、以下のとおりである。

①一層目はり中央を実験モデルに置換した二層門形ラーメンの数値解析モデルを提示し、オンライン実験法により、はり腹板のせん断座屈崩壊を考慮して、地震応答解析を行う手順を示した。

②ラーメンの水平復元力-変位曲線は、一層目はり中央腹板のせん断崩壊挙動によって影響を受ける。しかし、腹板に斜め張

力場が発生してせん断耐力が上昇すると、一層目はり腹板のせん断崩壊がラーメンの水平復元耐力に及ぼす影響は小さくなる。

- ③はり腹板にせん断座屈が起こると、ラーメンの柱基部と二層目隅角部において、塑性変形が若干大きくなり、履歴エネルギーもそれに対応して増加する。
 - ④一層目はり中間部の腹板のせん断崩壊区間が短くなると、腹板の損傷が激しくなる。しかし、せん断崩壊区間長の変化が柱基部やラーメン全体の塑性変形性状、ならびに、ラーメン全体の消費エネルギーの応答性状に及ぼす影響は小さい。
 - ⑤ラーメンの復元力-変位関係が、一層目はり腹板の先行降伏後、その他部材が降伏するまでの間で履歴ループを描くとき、せん断崩壊する一層目はり腹板は柱基部+二層目隅角部の塑性変形を抑える効果を持ったエネルギー吸収部材として機能する。
- (2)汎用 FEM コードを用いた仮動的解析法によるはり崩壊型門形ラーメンの地震応答解析
- つぎに、オンライン実験の実験プロセスを汎用 FEM コードの構造解析ソフトで仮想化し、箱形はり中央がせん断崩壊する鋼一層門形ラーメンの地震応答解析を行った。ここで得られた結論を以下にまとめる。
- ①箱形はり中央部を薄肉シェル有限要素でモデル化して弾塑性有限変位解析を行うプロセスを構築し、オンライン実験に準じて、門形ラーメンの地震応答解析を進める仮動的解析の手法を示した。
 - ②補剛されたフランジプレートに有する箱形はり中央部に対しては、縦補剛材の影響を考慮して、中央パネルを延長した FEM 解析モデルが有効である。
 - ③幅厚比の大きいフランジプレートの縦補剛材による補剛は、せん断座屈による腹板上下の凹み量とフランジプレートの軸方向変位を抑える効果がある。
 - ④せん断崩壊する箱形はりにおいて、フランジプレートの縦補剛材の曲げ剛比の変動（必要剛比の 3~5 倍の範囲）が柱基部の塑性変形性状や履歴エネルギー分担に及ぼす影響は小さい。
 - ⑤箱形はり中央が早期にせん断座屈崩壊するとき、抵抗せん断力の低下・変動が著しくなると、履歴エネルギーが低下し、はり中央部には、柱基部の塑性変形を抑えるエネルギー吸収部材としての効果を期待できない。
 - ⑥このとき、はり中央部の履歴エネルギー分担の下限は、はり腹板の降伏点をせん断座屈応力に置き換え、ラーメンのプッシュオーバー解析を行うことにより、ほぼ評価

できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ①山田 幸, 酒造敏廣: はりがせん断崩壊する鋼一層門形ラーメンのオンライン実験法による地震応答解析, 土木学会論文集 A, 査読あり, Vol. 65, No. 2, pp. 348-361, 2009 年 4 月.
- ②酒造敏廣, 山田 幸, 都築 禅: 一層目はり中央がせん断崩壊する鋼二層門形ラーメンのオンライン実験法による地震応答解析, 土木学会・構造工学論文集, 査読あり, Vol. 55A, pp. 525~536, 2009 年 3 月.
- ③山田 幸, 篠瀬圭介, 酒造敏廣: はり中央のせん断座屈崩壊を考慮した鋼門形ラーメンの地震応答シミュレーション, 地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 査読なし, 第 12 回, 土木学会, pp. 231~238, 2009 年 1 月.
- ④山田 幸, 都築 禅, 酒造敏廣: α -OS 法による鋼製門形ラーメンの弾塑性地震応答解析, 大同工業大学紀要, 査読なし, 第 44 巻, pp. 143~149, 2008 年 12 月.

[学会発表] (計 9 件)

- ①酒造敏廣, 山田 幸, 水澤富作, 戸田智規: 汎用 FEM コードを用いたはり崩壊型鋼門形ラーメンの地震応答解析, 平成 23 年度土木学会関西支部年次学術講演会・講演概要集, 2011 年 6 月.
- ②上野山拓也, 山田 幸, 酒造敏廣: 柱基部に局部座屈を伴う鋼片持ち柱の弾塑性地震応答解析, 平成 23 年度土木学会関西支部年次学術講演会・講演概要集, 2011 年 6 月.
- ③山田 幸, 戸田智規, 酒造敏廣: 一層目の補剛箱形はり中央のせん断崩壊を伴う鋼二層ラーメンの地震応答解析, 土木学会第 65 回年次学術講演会概要集, I-58, 2010 年 9 月.
- ④戸田智規, 山田 幸, 酒造敏廣: 補剛箱形はり部材がせん断崩壊する鋼一層門形ラーメンの地震応答解析, 平成 22 年度・土木学会関西支部・年次学術講演会概要集, 2010 年 5 月.
- ⑤戸田智規, 篠瀬圭介, 山田 幸, 酒造敏廣: 一層目はり中央のせん断座屈崩壊を考慮した鋼二層門形ラーメンの地震応答解析, 平成 21 年度・土木学会・第 64 回年次学術講演会概要集, 2009 年 9 月.
- ⑥都築 禅, 戸田智規, 山田 幸, 酒造敏廣: 一層目はり中央腹板のせん断崩壊区間長に

よる二層門形ラーメンの地震応答性状の変動, 平成 20 年度研究発表会・講演概要集, 土木学会中部支部, I-37, 2009 年 3 月.

- ⑦篠瀬圭介, 山田 宰, 酒造敏廣: はり中央のせん断座屈崩壊を考慮した鋼門形ラーメンの地震応答シミュレーション, 平成 20 年度研究発表会・講演概要集, 土木学会中部支部, I-38, 2009 年 3 月.
- ⑧都築 禪, 山田 宰, 酒造敏廣: サブストラクチュア・オンライン実験法による鋼二層ラーメンの動的応答解析, 平成 20 年度・土木学会・第 63 回年次学術講演会概要集, I-373, 2008 年 9 月.
- ⑨山田 宰, 篠瀬圭介, 酒造敏廣: 柱基部の損傷に着目したはり崩壊型一層鋼門形ラーメンの地震応答解析, 平成 20 年度・土木学会・第 63 回年次学術講演会概要集, I-140, 2008 年 9 月.

[その他]

ホームページ等

①<http://godos3.dyndns.org/>

②<http://www.kobe-kosen.ac.jp/department/staff/toshi/tmiki.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒造 敏廣 (MIKI TOSHIHIRO)

神戸市立工業高等専門学校・都市工学科・教授

研究者番号: 90137175

(2) 研究分担者

水澤 富作 (MIZUSAWA TOMISAKU)

大同大学・工学部・教授

研究者番号: 60113081

山田 宰 (YAMADA OSAMU)

和歌山工業高等専門学校・環境都市工学科・准教授

研究者番号: 30550173