

鉄骨置屋根構造における地震力の伝達メカニズム

山口 優樹（仙台高等専門学校専攻科） 藤田 智己（仙台高等専門学校）
飯藤 将之（仙台高等専門学校）

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震、2016年の熊本地震等、近年発生した大地震において鉄骨大スパン屋根がRC柱の上に露出柱脚形式で接合された空間構造物（以降、鉄骨置屋根構造とする）の体育館におけるRC下部構造と鉄骨置屋根の接合部（以降、屋根支承部とする）の損傷が確認され、避難所として十分機能できない事例が起きている¹⁾。

著者らは被害建物を対象として立体モデルを作成し静的、動的解析による鉄骨置屋根構造の被害メカニズムの検討を実施してきており、地震力が屋根面を通じて妻構面に集中する現象とともに、屋根部のつなぎ梁と下部構造の直交梁の耐力・剛性により地震力の伝わり方が変化し、屋根支承部の損傷に影響を与える可能性があることを示してきた²⁾。

本論文では鉄骨置屋根構造の3構面の縮小試験体を作成し、各構面を繋ぐつなぎ梁と直交梁のせん断剛性を模擬した板バネをパラメータとした振動台加振試験とシミュレーション解析を実施し、つなぎ梁と直交梁のせん断剛性と各構面に分配されるせん断力の関係を確認する。

2. 縮小試験体の振動台加振試験

2.1 試験概要

本研究では、東北地方太平洋沖地震で被害のあった体育館を基に妻構面と中央構面からなる簡略化した縮小試験体を用いた。図1～図3に縮小試験体の概要を、写真1に試験体全景を示す。妻構面の固有周期は0.2sec、中央構面の固有周期は0.4secとなっており、質量は各構面同等で柱頭部が1.6kg、屋根部が1.6kgである。図2に示す柱頭部と屋根部との接合はペアリングを介して連結し、ピン接合としている。各構面は屋根部と柱頭部において、つなぎ梁と直交梁を模擬した板バネによって接続される。

入力には正弦波と地震波を用いる。正弦波は、中央構面が大きく揺れる1次モード、中央構面と妻構面が逆位相で揺れる2次モードに合わせて周波数を設定し、振動台の入力加速度は30galとした。地震波はEl-centroNS波(1940年Imperial Valley地震)、八戸EW波(1978年十勝沖地震)、JMA神戸NS波(1995年兵庫県南部地震)を用い、振動台の最大入力加速度が1m/sec²程度となるように設定した。

試験ケースは表1に示すように、各構面を繋ぐつなぎ梁と直交梁の太さを10mm, 15mm, 20mmの3種類とし、屋根部につなぎ梁があるケース、屋根部と柱頭部につなぎ梁と直交梁があるケースの計12ケースとした。表内には各ケースごとのつなぎ梁と直交梁のせん断剛性と括弧内に梁幅を示している。つなぎ梁と柱のせん断剛性kは

$$k = \frac{12EI}{H^3} \quad (1)$$

で求めている。ここで、 I は断面 2 次モーメント、 E はヤング係数[195000 N/mm²]、 H は部材長さである。

2.2 計測方法

実験データの計測には加速度計、レーザー変位計、ひずみゲージを用いた。屋根部の応答加速度の計測は、小型加速度計を各構面の屋根面に計 3 箇所設置して行った。振動台の加速度は、振動台の南側に設置した加速度計で計測した。振動台と各構面の柱頭部の変位を測定するため、試験体とは独立してレーザー変位計を振動台の外部に計 4 箇所設置した。ひずみゲージは各構面の柱とつなぎ梁の両端とその裏側に計 4 箇所設置した。各部材に作用するせん断力は、各部材に設置したひずみゲージで得られたひずみ ε の値より、

$$Z = bh^3/6 \quad (2)$$

$$M = \varepsilon \cdot Z \cdot E \quad (3)$$

$$Q = \frac{M}{l} \quad (4)$$

で求めた。ここで、 Z は断面係数、 b は断面の幅、 h は断面の厚さ、 E はヤング係数[195000 N/mm²]、 l は上下端に設置したひずみゲージの中心間距離である。

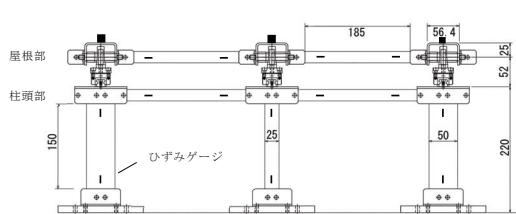


図 1 縮小試験体立面図 EW 方向

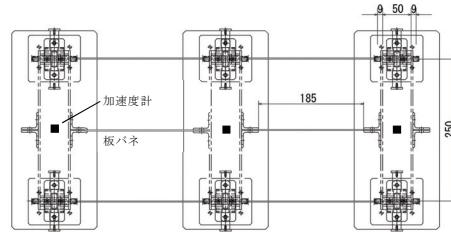


図 2 縮小試験体平面図

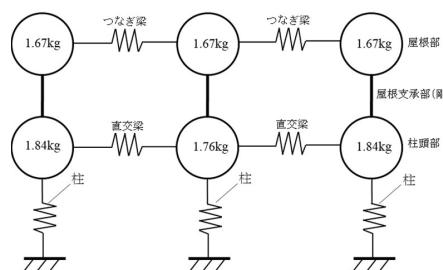


図 3 試験体概略図

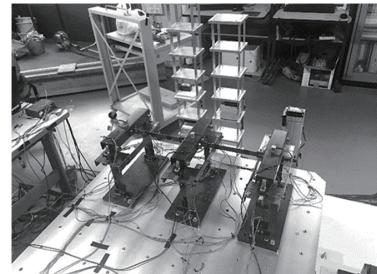


写真 1 試験体全映

表 1 実験ケースごとの各構面のつなぎ梁と直交梁せん断剛性【N/mm】と幅【mm】

CASE せん断剛性	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
屋根部 つなぎ梁	0.57 (20)	0.43 (15)	0.28 (10)	0.57 (20)	0.43 (15)	0.28 (10)	0.57 (20)	0.43 (15)	0.28 (10)	0.57 (20)	0.43 (15)	0.28 (10)
柱頭部 直交梁	△△	△△	△△	0.57×2 (20×2)	0.57×2 (20×2)	0.57×2 (20×2)	0.43×2 (15×2)	0.43×2 (15×2)	0.43×2 (15×2)	0.28×2 (10×2)	0.28×2 (10×2)	0.28×2 (10×2)

※括弧内はつなぎ梁の幅【mm】を示す。

3. 試験結果

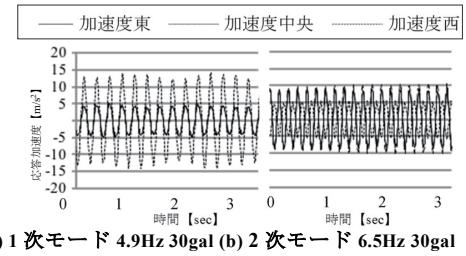
3.1 各モードの振動応答

正弦波加振試験によって得られた時刻歴波形のうち、CASE 1 の 1 次モードと 2 次モード結果を図 4 に示す。図中には、東側妻構面、西側妻構面、中央構面の応答加速度の時刻歴波形を重ね合わせて示している。

図 4 に示すように、1 次モードでは中央構面が妻構面に比べ応答が大きく、2 次モードでは中央構面と妻構面が逆位相で振動するモードとなる。1 次モードの振動の場合、妻構面に比べ中央構面では 2.5~3.5 度の応答増幅があった。2 次モードでは各構面が交互に振動し、中央構面の応答は 1 次モードより小さく、妻構面の 2~3 倍程度であった。

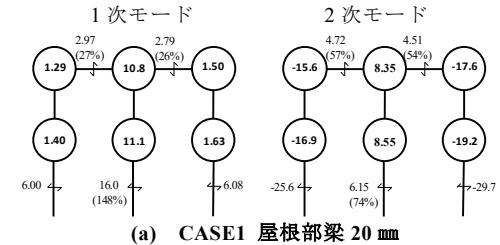
3.2 つなぎ梁と直交梁のせん断剛性と作用せん力の関係

正弦波加振試験および地震波加振試験の代表的な結果として、CASE1, CASE6 における各構面の作用地震力および、柱と梁に流れるせん断力とその割合を図 5, 6 に示す。各構面に作用する地震力は屋根部および柱頭部の質量と応答加速度の積として図中に太字で示し、図中括弧内には中央構面屋根部の地震力に対する柱と梁に流れるせん断力の割合として示している。また、中央構面屋根部に作用した地震力に対する中央構面柱、つなぎ梁、直交梁のせん断力の割合を示している。また、屋根部のつなぎ梁および中央構面の柱に作用したせん断力の総和に対するつなぎ梁と柱のせん断力の割合（以降、せん断力比とする）と屋根面等価せん断剛性比の関係を図 7 に示す。ここで、屋根面等価せん断剛性比は、妻構面の柱のせん断剛性とつなぎ梁、直交梁が直列ばねで連結された時のせん断剛性と中央構面柱のせん断剛性との比である。正弦波入力時において、CASE1~3 のように、つなぎ梁が屋根部のみに設置されるケースでは、中央構面の屋根部に作用する地震力に対して、つなぎ梁のせん断剛性が大きくなるほど、つ

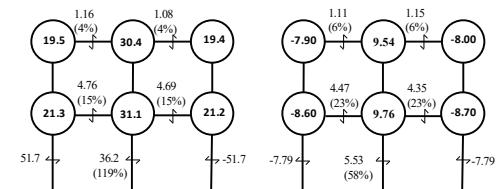


(a) 1 次モード 4.9Hz 30gal (b) 2 次モード 6.5Hz 30gal

図 4 加速度時刻歴波形：CASE1 屋根部梁 20mm

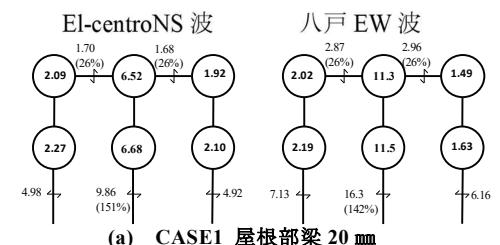


(a) CASE1 屋根部梁 20 mm

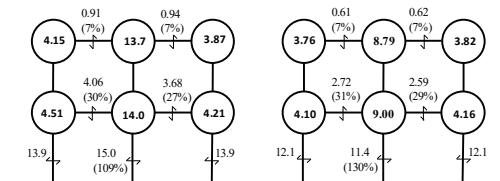


(b) CASE6 屋根部梁 10 mm 柱頭部梁 20 mm

図 5 各構面に流れるせん断力（正弦波）



(a) CASE1 屋根部梁 20 mm



(b) CASE6 屋根部梁 10 mm 柱頭部梁 20 mm

図 6 各構面に流れるせん断力（地震波）

なぎ梁に流れるせん断力が大きくなることを確認した。また、中央構面の柱には、屋根部から流れる地震力と柱頭部に作用する地震力の和としてせん断力が作用し、つなぎ梁のせん断剛性が大きくなるほど中央構面の柱のせん断力が小さくなることを確認した。CASE4~12 のように柱頭部に直交梁が設置されるケースでは、つなぎ梁のせん断力比は、屋根部のみにつなぎ梁が設置されるケースより小さくなり、さらに、柱頭部の直交梁のせん断剛性が高くなるほどその傾向は顕著になることを確認した。また、全ケースにおいて、1 次モードより 2 次モードの応答時で、つなぎ梁に伝達されるせん断力が大きくなり、その分中央構面の柱に伝達されるせん断力は小さくなることがわかつた。

地震波入力時では、屋根部のつなぎ梁に作用するせん断力が最大となる時、中央構面に作用する地震力に対するつなぎ梁と中央構面の柱に作用するせん断力の割合が、すべてのケースで正弦波加振試験における 1 次モード応答時と傾向が似ていることが確認できた。

4. シミュレーション解析

4.1 解析モデル概要

任意形状立体フレームの弾塑性解析ソフト SNAP を用いて、実験のシミュレーション解析を行う。本試験における多質点系モデルを図 8 に、モデル概要を表 2 に示す。

シミュレーション解析では、振動台加振試験では計測できなかった屋根支承部に作用するせん断力に着目し、各構面のつなぎ梁のせん断剛性と屋根支承部に作用するせん断力の関係を確認する。

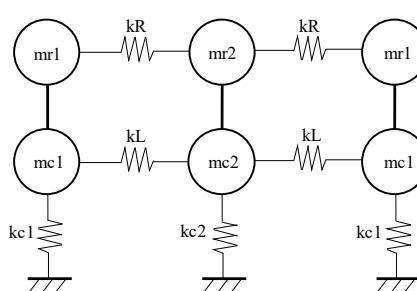


図 8 質点系モデル図

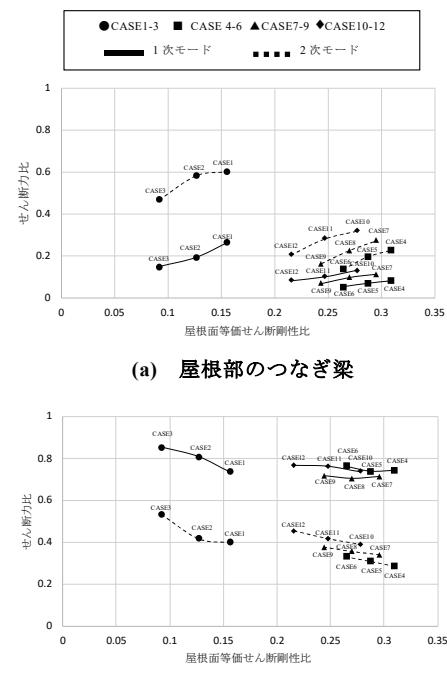


図 7 各部材のせん断力と屋根面等価せん断剛性比の関係

(b) 中央構面の柱

表 2 モデル概要

柱頭部の質量 (kg)	mc1 : 1.84 mc2 : 1.76
屋根面の質量 (kg)	mr1 : 1.67 mr2 : 1.67
柱のせん断剛性 (N/mm)	kc1 : 4.78 kc2 : 2.39
屋根面のせん断剛性 (N/mm)	20mm kR : 0.54 15mm kR : 0.41 10mm kR : 0.27
柱頭部のせん断剛性 (N/mm)	20mm kL : 0.54 15mm kL : 0.41 10mm kL : 0.27

4.2 解析結果

シミュレーション解析の結果として、図9に解析結果と試験結果の時刻歴波形の重ね合わせを、図10に各構面のつなぎ梁と屋根支承部に流れるせん断力、屋根部の水平力とその割合を示す。なお、図中の左側が1次モード、右側に2次モードの結果である。

シミュレーション解析と振動台加振試験の時刻歴波形は概ね同様の応答をすることが確認でき、さらに図10と図5の比較より、各部材に作用するせん断力についても概ね対応していることが確認できた。CASE1とCASE7の比較より、柱頭部に直交梁が設置されたことで中央構面の屋根支承部に作用するせん断力の割合が低下している。これは、柱頭部に設置した直交梁の影響により中央構面の下部構造の見かけ上のせん断剛性が高くなり、屋根面に作用した地震力が下部構造に伝達されやすくなつたためである。また、つなぎ梁と直交梁のせん断剛性の総和が同じCASE6とCASE7を比較すると、屋根部のつなぎ梁のせん断剛性が大きく柱頭部の直交梁のせん断剛性が小さいCASE7の方が中央構面の屋根支承部に作用するせん断力の割合が小さくなることが確認された。以上のことから、柱頭部に設置された直交梁と柱のせん断剛性の総和が低く、もしくは屋根部に設置されたつなぎ梁のせん断剛性が高いほど、中央構面の支承部に伝達されるせん断力は小さくなり、その一方で、屋根面を通じて妻構面の支承部に伝達されるせん断力が大きくなることがわかった。

CASE1の2次モード振動時では、中央構面の支承部のせん断力の割合が負の値を示している。これは柱頭部に作用した地震力が屋根部へ伝達されたことを意味し、重層構造として地震力が上から下へと伝達される現行の設計手法の考え方と異なる現象である。この上部へ流れる力は、中央構面の屋根部に作用した地震力とともに妻構面へと伝達されることになる。

上述した解析結果に加え、妻構面フレームの固

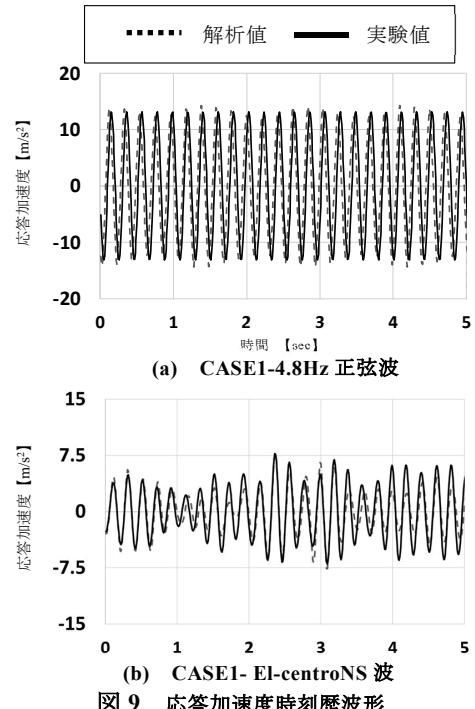


図9 応答加速度時刻歴波形

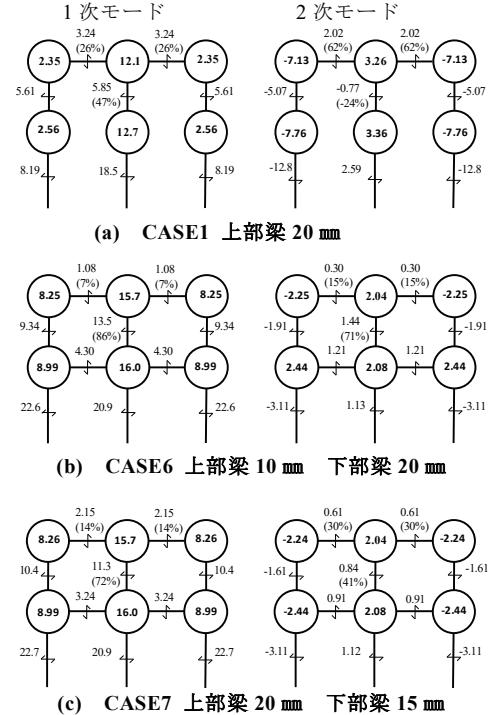


図10 屋根支承部に流れるせん断力の割合

有周期を 0.13sec, 0.1sec, 0.05sec とし、中央構面に対しより剛にした場合について正弦波入力の解析を実施した。最大入力加速度 0.3m/sec^2 で、各ケースの 1 次固有周期の正弦波として解析全ケースにおける各構面の屋根支承部に作用するせん断力と屋根支承部層の総せん断力の比（以降、支承部せん断係数とする）と屋根面等価せん断剛性比の関係を図 11 に示す。妻構面フレームの固有周期が短い場合、すなわち屋根面等価せん断剛性比が大きくなると、中央構面の支承部せん断係数は減少し、剛性比が 1.0 以降に 1 次モード振動時でも負のせん断力が発生する。また、妻構面の固有周期が短いほど支承部せん断係数は負の値を取りやすい。一方、妻構面の支承部せん断係数は剛性比とともに増加し、剛性比が 1.0 以降に支承部せん断係数は 0.5 を超え、屋根部に作用した地震力以上の力を両端の妻構面の支承部で支持することとなる。

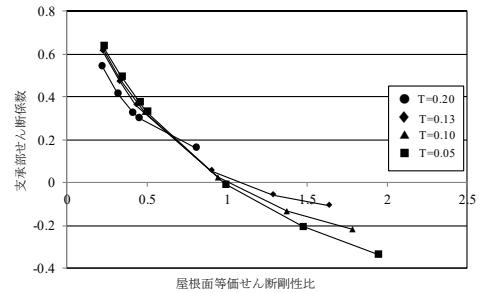
以上の結果より、妻構面の柱のせん断剛性および屋根部のつなぎ梁のせん断剛性が高い場合には、中央構面の柱頭部に作用する地震力が屋根面に伝達される可能性があり、設計時の想定以上の水平力が屋根面および妻構面の屋根支承部に作用する危険性がある。

5.まとめ

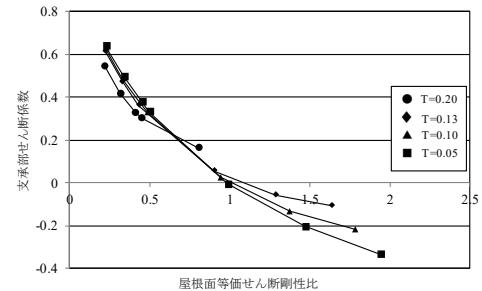
振動台加振試験およびシミュレーション解析により、屋根部のつなぎ梁と RC の直交梁のせん断剛性や妻構面の水平剛性が高くなることで、中央構面の柱頭部に作用する地震力が屋根面に伝達され、想定以上のせん断力が妻構面の屋根支承部に作用する危険性があることを確認した。今後は、実建物の屋根面等価せん断剛性比の調査を実施し、本解析結果との比較から被害状況との関係性の確認をしていく予定である。

参考文献

- 1) 一般社団法人 建築研究振興協会：東日本大震災における鉄骨置屋根構造の被害調査報告，2012
- 2) 藤田智己ほか：RC 下部構造と鉄骨置屋根の接合部への作用応力に関する横つなぎ材剛性の影響，コンクリート工学会年次大会論文集，第 40 卷，pp.787-792，2018



(a) 中央構面の屋根支承部



(b) 妻構面の屋根支承部

図 11 屋根支承部せん断力係数と屋根面等価せん断剛性比の関係