

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：51303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06316

研究課題名(和文) 東日本大震災における鉄骨置屋根型構造物の損傷メカニズムの解明と損傷制御法の提案

研究課題名(英文) Elucidation of the damage mechanism and proposal of damage control method in space structure

研究代表者

藤田 智己 (Fujita, Tomomi)

仙台高等専門学校・総合工学科・准教授

研究者番号：10552458

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は災害時の避難所として使用される空間構造物で発生した地震被害について、その損傷メカニズムの解明と損傷制御法の提案を目的としている。数種の解析プログラムを用いた静的増分解析および地震応答解析により、支承部の損傷が妻構面から中央構面に向けて進行することを明らかとした。また、損傷するまでのベースシア係数が屋根面およびつなぎ梁のせん断剛性に影響され、つなぎ梁のせん断剛性を高めることで、支承部損傷までのベースシア係数を高めることができることを確認した。加えて、支承部を免震化することで屋根面の水平および鉛直の応答を制御でき、鉄骨置屋根構造の地震に対する安全性を確保できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：This study aims to elucidate the damage mechanism of the earthquake caused by the space structure used as a shelter at the time of a disaster and to propose a damage control method. Pushover analysis and seismic response analysis using several analytical programs revealed that the damage of the bearing part progresses toward the center frame from side frame. Moreover, it was confirmed that the base shear coefficient of the bearing when it is damaged is influenced by the shear stiffness of roof and tie beams. Increasing the shear stiffness of the tie beam, the base shear coefficient at the time of damage to the bearing part can be increased. In addition, we confirmed that the horizontal and vertical response of the roof can be controlled by seismic isolation of the bearing part, and safety of the space structure against earthquake can be secured.

研究分野：建築工学、耐震工学

キーワード：鉄骨置屋根構造 空間構造物 支承部 損傷メカニズム 免震

1. 研究開始当初の背景

災害時の避難所の多くは市町村あるいは学校などの体育館が使用される。東北地方太平洋沖地震では、この避難所の重要施設である空間構造物で被害が多く発生し、顕在化した。被害に遭った空間構造物の中には、RC造の下部構造に鉄骨の屋根が置屋根状に設置された構造（以降、鉄骨置屋根構造と呼ぶ。）があり、鉄骨屋根版とRC造躯体を接合部（以降、支承部と呼ぶ。）におけるアンカーボルトの引き抜き破断・せん断破壊および敷きモルタルの圧壊といったこれまでに報告事例の見られない被害が多発した。空間構造物の支承部では鉄骨屋根版の自重により生じる軸力が小さく、屋根とRC下部構造の接合面における摩擦力に期待できないため、せん断力は直接アンカーボルトで支持される。また、接合面ではRC下部構造の変形による回転角と、屋根面の上下動に起因する回転角が強制されることになり、支承部は一般的な露出柱脚と類似する形式であるが、その損傷メカニズムは大きく異なると考えられる。避難所として使用される空間構造物の被害は被災者にとって生死に関わる大問題であり、被害の発生メカニズムの解明および耐震診断、補強方法の開発が急務となっている。

2. 研究の目的

本研究では、鉄骨置屋根構造における支承部の損傷メカニズムを解明し、既存空間構造物の損傷制御法の提案を行うことを目的としている。

3. 研究の方法

実際に被災したNS方向にメインフレームを11構面有する建物について、図1、2に示すように1~6通り構面の1/2解析モデルを有限要素解析プログラムABAQUS(詳細解析

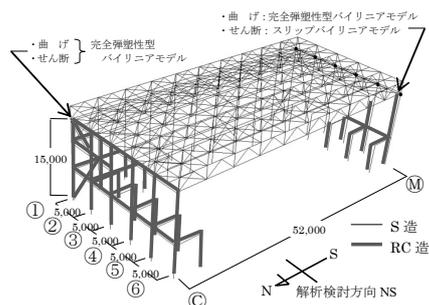


図1 詳細解析モデル：ABAQUS

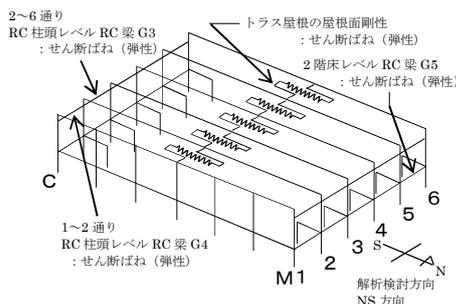


図2 簡易解析モデル：FRAME-D

モデル) および弾塑性解析プログラムFRAME-D(簡易解析モデル)のそれぞれに対して作成し解析を実施した。

(1) 詳細解析モデル

C、M 通り側の支承部の復元力モデルについて、せん断は、ピン形式のC 通り側で完全弾塑性型のバイリニアモデル、ルーズホールを有する M 通り側ではルーズホールの限界変位に達するまで線形履歴を持ち、最大静止摩擦力 $Q_0=12kN$ に到達後、C 通りと同様な完全弾塑性型の履歴特性を持つように設定している。曲げは、両側とも完全弾塑性型のバイリニアモデルに設定している。

(2) 簡易解析モデル

基本特性は詳細解析モデルと同様に設定しており、支承部の形式のみ C、M 通りの両側をピン形式に設定している。

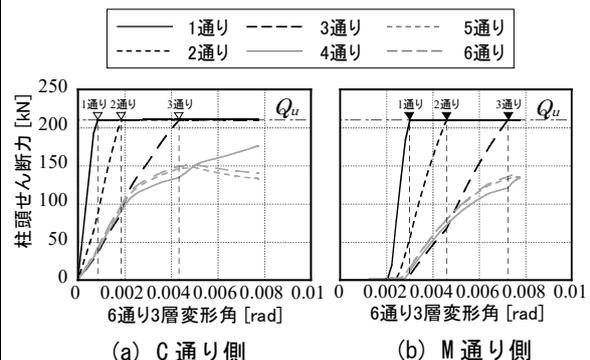
上述した2つの解析モデルに対し、静的増分解析および地震応答解析を実施した。特に、詳細解析モデルは、実際の被害状況と地震被害シミュレーションの比較から解析モデルの妥当性と被害メカニズムの検証に重点を置き、加えて、ルーズホール幅が損傷メカニズムに与える影響を検討した。簡易解析モデルでは、屋根面およびRC下部構造のつなぎ梁のせん断剛性をパラメータとした解析により、各部材特性が鉄骨置屋根構造の損傷メカニズムに与える影響を明らかにした。

4. 研究成果

(1) 詳細解析モデルに対する静的増分解析

図3(a)、(b)はC、M 通り側の支承部に作用するせん断力(以降、柱頭せん断力と呼ぶ。)とC 通り側6 通り柱頭変位を1 層柱脚から3 層柱頭までの高さ15mで除した6 通り3 層変形角の関係である。図中には終局せん断耐力 Q_u を示し、▽、▼はC、M 通り側の各通りで支承部の損傷が発生した時点を示している。

解析結果より、鉄骨置屋根構造における支承部の損傷メカニズムとして、C 通り側では1 通り構面の支承部が早期に終局せん断耐力に達し、1 通り構面に近い構面から順に支承部の損傷が発生することが明らかとなった。また、M 通り側では、図3(b)に示すように6 通り3 層変形角が0.002付近で1 通りが剛性を発揮し始め、こちらもC 通り側と同様、妻



(a) C 通り側

(b) M 通り側

図3 柱頭せん断力と6 通り3 層変形角関係

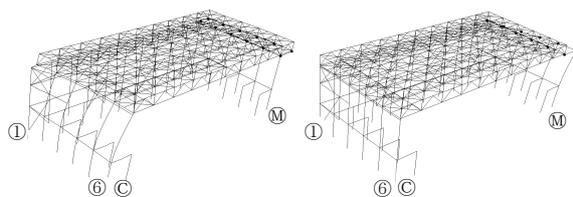
構面（1 通り構面）側から順に終局せん断耐力に達することがわかった。M 通り柱頭が水平剛性を発揮し始めると同時に、C 通り側で 4~6 通りの柱頭せん断力と 6 通り 3 層変形角の関係における勾配が小さくなり、M 通り側の 2 通り柱頭が損傷に至ると C 通り側の 5 通りと 6 通りの柱頭せん断力は減少に転じる。

(2) 詳細解析モデルに対する地震応答解析

① 解析諸元と固有値解析結果

解析モデルに用いる減衰は、個々の要素単位で Rayleigh 型を与える減衰とし、1 次及び 2 次の減衰定数を RC 部材で 5%、鉄骨部材で 2%を与えた。入力地震波は、2011 年東北地方太平洋沖地震の際、仙台高等専門学校で観測された NS 記録を用いた。

図 4(a)、(b)は固有値解析結果の 1 次、2 次の振動モードである。1 次モードは、ルーズホールを有する M 通り側の水平変形は見られず、C 通り側の RC 下部構造と屋根トラスが一体となり水平変形する。一方、2 次モードは M 通り側の RC 下部構造のみ水平変形する。どちらの振動モードも妻構面から 6 通りに向かい水平変形が大きくなっている。



(a) 1 次モード (b) 2 次モード

図 4 固有値解析結果：主要変形モード

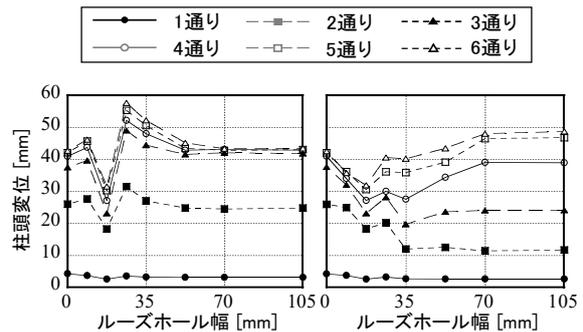
② ルーズホール幅による最大柱頭変位への影響

図 5(a)、(b)は C、M 通り側の最大柱頭変位とルーズホール幅の関係である。

図 5(a)より、C 通り側では、何れのケースにおいても 6 通りの最大柱頭変位が他の通りよりも大きくなっている。LH-17.5 (ルーズホール幅 17.5mm) の場合には、全ての通りで最大柱頭変位が最小となり、LH-26.25 の場合に全ての通りで最大となった。また、LH-26.25 よりルーズホール幅が大きくなるに従って、3~6 通りにおける最大柱頭変位が減少するとともに各通りの差がなくなり、約 43mm の応答となる。

M 通り側では、図 5(b)よりルーズホール幅が 0~17.5mm までのケースでは、2~6 通りの最大柱頭変位は減少傾向にある。ルーズホール幅が 17.5mm 以上になると、2 通りと 3 通りは減少傾向が続き、一方で 4~6 通りは増加傾向になる。2、3 通りは水平剛性の高い 1 通りからの水平変形拘束が強いことに加え、ルーズホール幅が大きくなることでトラス屋根からの慣性力が低減され、最大柱頭変位が減少するものと考えられる。4~6 通りは、ルーズホール幅が大きくなることで RC 下部構造の振動が拘束されず、図 4(b)に示す 2 次

モードのように振動することで最大柱頭変位が大きくなったものと考えられる。



(a) C 通り側 (b) M 通り側

図 4 ルーズホール幅と最大柱頭変位の関係

③ ルーズホール幅による最大柱頭せん断力への影響

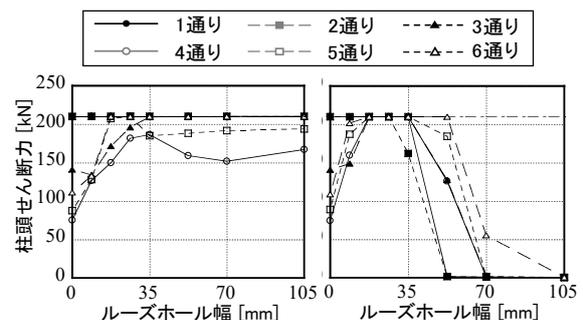
図 5(a)、(b)は C、M 通り側の最大柱頭せん断力とルーズホール幅の関係である。図中には終局せん断耐力 Q_u を併記している。

図 5(a)より、C 通り側における 1、2 通りは、ルーズホール幅に関わらず終局せん断耐力に達している。1 通りおよび 2 通りでは、RC 下部構造の剛性が高いため、他の通りからトラス屋根を通じて水平力が集中し、支承部の損傷を発生させたものと考えられる。3~6 通りでは、ルーズホール幅の違いによって支承部の損傷発生箇所が変化している。

LH-0 の場合は、C、M 通り両側の支承部でトラスに生じる慣性力を負担するため、3~6 通りの柱頭せん断力は終局せん断耐力に達しない。また、4~6 通りについては、ルーズホールのあるどのケースよりも柱頭せん断力は小さくなる。

LH-17.5 では、5、6 通りがほぼ終局せん断耐力に達し、その値は LH-0 の場合の約 2 倍である。ルーズホール幅をさらに大きくした場合、3 通りでは柱頭せん断力が増加し、LH-35 で終局せん断耐力に達している。4、5 通りでは、LH-35 よりルーズホール幅を大きくしても終局せん断耐力には達せず、支承部の損傷は発生しない。

M 通り側では、図 5(b)に示すように LH-17.5、LH-26.25 の場合で全ての柱頭が終局せん断耐力に達する。LH-35 の場合には 2 通り柱頭でせん断力が低下する。LH-52.5 になると 6

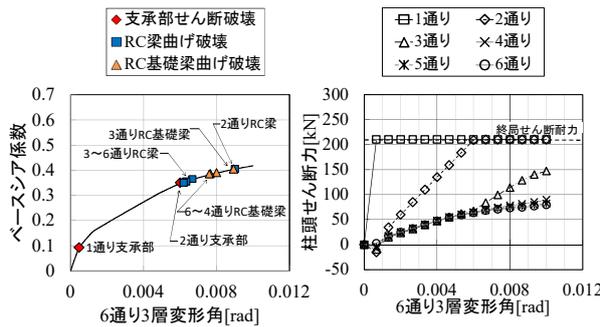


(a) C 通り側 (b) M 通り側

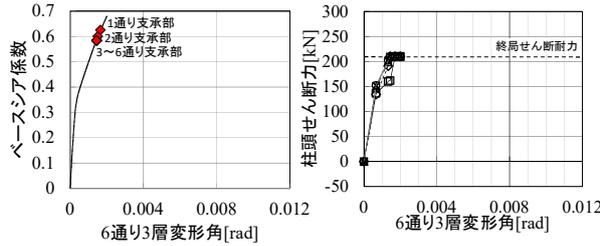
図 5 ルーズホール幅と最大柱頭せん断力の関係

がせん断破壊する際のベースシア係数 (0.35) は基本モデル (0.28) より大きくなる。

つなぎ梁のせん断剛性が高くなると、RC 下部構造における各構面の水平剛性が相対的に均一化し、屋根面に作用する水平力は各構面に均等に分配されるようになる。その結果として、置屋根支承部がせん断破壊するまでのベースシア係数は増加する。せん断剛性 100 倍 (=剛体) の場合には、RC 下部構造に作用する水平力は RC つなぎ梁を通じて 1 通りに伝達され、柱頭せん断力は屋根面に作用する水平力のみとなる。このとき、置屋根支承部は各通りでほぼ同時にせん断破壊に至り、5 通りと 6 通りの支承部損傷時のベースシア係数は 0.584 と最大になる。



(a) 0.1 倍 (=つなぎ梁無)



(c) 100 倍 (=剛体)

図 7 ベースシア係数および柱頭せん断力と 6 通り 3 層変形角の関係
パラメータ：RC つなぎ梁せん断剛性

表 2 支承部損傷時の柱頭せん断力分布 [kN]
：RC つなぎ梁

せん断剛性	1 通	2 通	3 通	4 通	5 通	6 通
0.1 倍	116	8	12.2	14.6	15.9	8.2
	94	-23.6	-22.2	-20.4	-19.1	-19.2
基本モデル	117	13.2	16.6	18.7	19.8	20.2
	93	-20.9	-21.7	-20.3	-18.5	-18.8
10 倍	132	47	54.5	57	58	58.2
	78	-14.3	-17.6	-18.3	-18.3	-18.4
100 倍	188	170	208	210	210	210
	-25	29	-2	-1	0	0

(4) 支承部の免震化

支承部の免震化による地震に対する応答低減効果を確認するために、任意形状立体フレームの弾塑性解析ソフト SNAP (図 8 免震モデル) を用いた解析も実施した。

免震装置は天然ゴム系積層ゴムと曲面すべり支承の組み合わせとして表 3 に示すケースを設定し、梁間方向 (Y 方向) の 1 方向解析を行った。入力地震波は、2016 年熊本震の本震 (KiK-net 益城) の EW 成分を用いた。

図 9、10 は各モデルによる地震応答解析の結果として、各層の重心位置における応答値を示したものである。また、図 11、12 は最大応答変位時の変形モードである。

支承部の免震化により、図 10 に示すように水平方向の応答加速度を低減することが可能であるが、応答変位は屋根部で大きく変形する (図 11)。また、屋根部の挙動は図 12 に示すように併進振動となり、加えて、屋根面の上下応答も小さくなる (図 12)。免震層

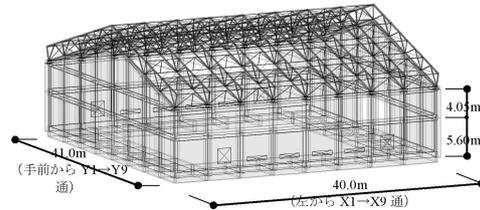


図 8 免震モデル：SNAP

表 3 免震モデルケース

解析モデル	免震支承の台数		免震層固有周期 [sec]
	天然ゴム系積層ゴム	曲面すべり支承	
従来型モデル (非免震)	-	-	-
免震モデル 1	2 (X5 通)	16	2.38
免震モデル 2	4 (X1,9 通)	14	1.82
免震モデル 3	6 (X1,5,9 通)	12	1.53
免震モデル 4	8 (X1,3,7,9 通)	10	1.35
免震モデル 5	10 (X1,3,5,7,9 通)	8	1.22

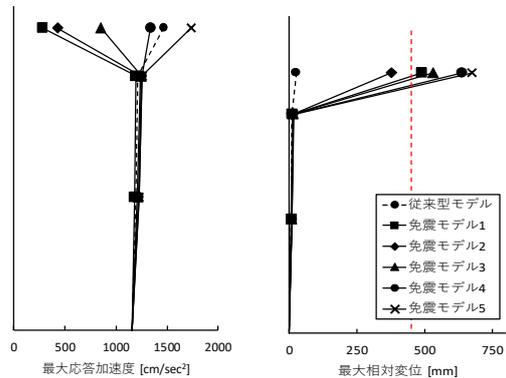


図 9 最大応答加速度 図 10 最大応答変位

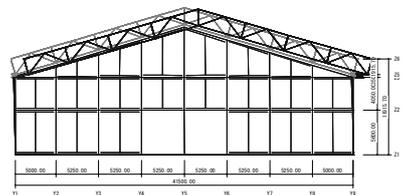


図 11 変形モード：免震モデル 2

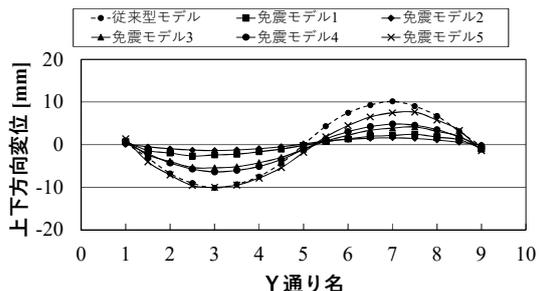


図 12 屋根面の上下方向応答変位：X5 通り

が大きく変形するため、減衰装置の併設が必要となるが、免震層の固有周期を短周期化させるダンパーの場合、屋根面の上下応答を増幅させる可能性があるため注意が必要であることがわかった(図 12)。免震層の応答は加速度応答スペクトルと同様の傾向がみられ、1 質点系へ置換して簡易に設計できる可能性も確認できた。

以上の結果より、支承部の免震化で屋根面の損傷制御が可能となり、鉄骨置屋根構造を有する空間構造物の避難施設としての機能維持を実現する一つの解決策となり得ることを確認した。

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) 藤田智己, 木村祥裕, 飯藤将之: 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 巻, (印刷中), 2018. 7
- (2) 鈴木敦詞, 藤田智己, 木村祥裕: 東北地方太平洋沖地震で被害を受けた鉄骨置屋根形式を有する体育館の損傷メカニズム, 鋼構造論文集第 23 巻第 91 号 PP. 17-29, 2016. 9
- (3) 藤田智己, 鈴木敦詞, 木村祥裕: 鉄骨置屋根構造の損傷メカニズムに対するトラス屋根と RC 下部構造の接合形式の影響, 鋼構造年次論文報告集第 23 巻, PP. 745-749, 2015. 11
- (4) 藤田智己, 鈴木敦詞, 木村祥裕, 飯藤将之: RC 下部構造を有する鉄骨置屋根空間構造物の損傷メカニズムに関する解析的検討, コンクリート工学会年次大会論文集, 第 37 巻, pp. 1069-1074, 2015. 7

[学会発表] (計 9 件)

- (1) 藤田智己, 船木尚己, 畑中友, 田中礼二: 置屋根支承部に免震部材を用いた鉄骨置屋根体育館の動的特性に関する解析的研究 その 1 山形ラーメン架構を対象とした地震応答解析, 日本建築学会東北支部研究報告集, 構造系, C-23, PP. 101-104, 2018. 6
- (2) 藤田智己, 猪股史也, 木村祥裕, 飯藤将之: 鉄骨置屋根構造の柱頭支承部の損傷メカニズムに与える屋根勾配の影響 その 1 解析モデルの概要と固有値解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, 査読無, PP. 807-808, 2017. 9
- (3) 猪股史也, 藤田智己, 木村祥裕, 飯藤将之: 鉄骨置屋根構造の柱頭支承部の損傷メカニズムに与える屋根勾配の影響 その 2 地震応答解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, 査読無, PP. 809-810, 2017. 9

- (4) 飯藤将之, 藤田智己, 木村祥裕: 鉄骨置屋根構造の損傷メカニズムにおける横つなぎ材剛性の影響 その 1 基本解析モデルの概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, PP. 931-932, 2016. 8
- (5) 藤田智己, 木村祥裕, 飯藤将之: 鉄骨置屋根構造の損傷メカニズムにおける横つなぎ材剛性の影響 その 2 屋根面および RC 梁に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, PP. 933-934, 2016. 8
- (6) 藤田智己, 鈴木敦詞, 木村祥裕, 飯藤将之: 柱頭形式の違いが鉄骨置屋根構造の損傷メカニズムに与える影響 その 1 静的増分解析に基づく検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, PP. 1287-1288, 2015. 9
- (7) 飯藤将之, 鈴木敦詞, 藤田智己, 木村祥裕: 柱頭形式の違いが鉄骨置屋根構造の損傷メカニズムに与える影響 その 2 地震応答解析に基づく検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, PP. 1289-1290, 2015. 9
- (8) 藤田智己, 鈴木敦詞, 木村祥裕: 鉄骨置屋根構造の損傷メカニズムに対する柱頭形式の影響 その 1 静的増分解析及び地震応答解析に基づく検討, 日本建築学会東北支部研究報告集, 構造系, C-23, PP. 25-28, 2015. 6
- (9) 鈴木敦詞, 藤田智己, 木村祥裕: 鉄骨置屋根構造の損傷メカニズムに対する柱頭形式の影響 その 2 ルーズホール幅に関するパラメトリックスタディ, 日本建築学会東北支部研究報告集, 構造系, C-23, PP. 29-32, 2015. 6

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤田 智己 (Fujita, Tomomi)
仙台高等専門学校・総合工学科・准教授
研究者番号: 10552458

(2) 研究分担者

木村 祥裕 (Kimura, Yoshihiro)
東北大学・未来科学技術共同研究センター・教授
研究者番号: 60280997

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし