

## はじめに

2011年東日本大震災から早や4年が経過した。多くの沿岸諸地域が津波により甚大な被害を受けたが、再建はまだその途上にある。一日も早い復興と新たな発展を祈りたい。

建築被害に関しては、津波被害があまりにも大きかったため、地震動による被害がやや隠れてしまった感もある。主体構造の被害については、1981年の建築基準法改正や1995年阪神淡路大震災の後の耐震診断・改修の促進によって、かなり軽減されたと考えられる。しかし、天井落下などの非構造材の被害により死傷者が出るなど、これまでの耐震設計の盲点と思われる被害が多数生じた。このような地震時と地震後の建物の安全・機能維持の問題は、今回の地震で示された大きな課題の一つと言えよう。

とくに、地震後の避難施設として使われるべき体育館に、鉄骨屋根部とRC軸組部の接点の被害や非構造壁の振動被害などが発生し、そのために使用不能となり、避難所としての機能を果たし得なかった事例が多数生じた。これは社会の防災上きわめて重大な問題であり、今後その原因究明と被害防止について十分な検討が必要と考えられる。被害を生じた建物はいずれも類似の構造のものであり、以下これを鉄骨置屋根構造と呼ぶ。

建築研究振興協会東北分室（分室長 田中礼治）では、東北耐震診断改修委員会の中に鉄骨置屋根耐震検討WGを設けて、東日本大震災における鉄骨置屋根構造の被害に関する調査を行った。その結果を基に、2012年「東日本大震災における鉄骨置屋根構造の被害調査報告書」を刊行し、同年8月東京の日本建築会館において報告会を開催した。

更に、鉄骨置屋根構造の被害原因の分析と耐震診断の指針の検討のため、2013年より建築研究開発コンソーシアム内に鉄骨置屋根構造の耐震性能に関する研究会（委員長 柴田明德）を組織し、研究・分析を進めた。また、仙台において技術WGを随時開催し、被害分析の検討を行った。

この検討の成果を基に、「鉄骨置屋根構造の被害分析および耐震診断の進め方」を取りまとめて2013年9月に、また、さらにその耐震診断および改修の諸問題について東京および仙台における研究会で検討を加え、「2014年度鉄骨置屋根構造に関する研究会報告書」として取りまとめて2015年3月に、東京晴海の建築研究コンソーシアムにおいて報告会を開催した。

この度、それらの研究成果をもとに「鉄骨置屋根構造の耐震診断・改修の考え方」を取りまとめ、技報堂出版より出版することとした。

これから、鉄骨置屋根構造の既存体育館等の耐震診断、改修を行うことがあれば、本書を御一読いただき参考にさせていただければ幸いである。

# 編集委員会

委員長	柴田 明德	東北大学名誉教授
副委員長	竹内 徹	東京工業大学教授
幹事	田中 礼治	東北工業大学名誉教授
委員	小野瀬順一	東北工業大学名誉教授
	山下 哲郎	工学院大学教授
	木村 秀樹	(株)竹中工務店
	川邊 祥一	(株)構造システム
	安岡 千尋	(株)竹中工務店
	平塚正一郎	(株)コンステック

# 執筆者一覧

小野瀬順一	東北工業大学名誉教授 (2.1, 3.1)
川邊 祥一	(株)構造システム (2.1, 3.1)
木村 秀樹	(株)竹中工務店 (2.3, 3.3)
柴田 明德	東北大学名誉教授 (はじめに)
竹内 徹	東京工業大学教授 (第1章, 2.2, 3.2, A1.3, A1.4)
田中 礼治	東北工業大学名誉教授 (A1.1, A1.2, おわりに)
平塚正一郎	(株)コンステック (A1.1)
安岡 千尋	(株)竹中工務店 (2.3, 3.3, A1.2)
山下 哲郎	工学院大学教授 (A2.1)

(2015年8月現在, 五十音順, 敬称略, ( )内は執筆担当)

# 第1章 鉄骨置屋根構造の耐震診断・改修の考え方

1. 総則
2. 建物の調査
3. 構造モデルの設定
4. 想定地震力
5. 応答量推定と耐震性能評価
6. 耐震改修の考え方

注：この章は、鉄骨置屋根構造の耐震診断に対する考え方の一例を取りまとめたもので、以降便宜的に「本指針」と呼んでいる。本章中の図・表番号は節番号に準じて振られているので注意されたい。

本章には、下記報告・指針案から引用された図版類が用いられている。

- 1) 日本建築学会：東日本大震災合同調査報告 建築編 3, 鉄骨造建築物 / シェル・空間構造, 2014.9
- 2) 日本建築学会：ラチスシェル屋根構造設計指針, 2016

# 1. 総 則

## 1.1 本指針の位置づけと適用範囲

本章は、学校体育館や公共スポーツホール等において、鉄骨造の大スパン空間構造が鉄筋コンクリート下部構造の上に設置されたいわゆる鉄骨置屋根構造を主な対象とし、空間構造特有の応答特性・被害特性を考慮した耐震診断・補強手法について既往の耐震診断・改修指針を補足する形で記述する。

### 本指針で対象とする鉄骨置屋根構造の定義

本指針で対象とする「鉄骨置屋根構造」とは、図 1.1.1 に示すように学校体育館やスポーツホール等、トラス構造等で構成された鉄骨大スパン屋根が、屋根支持部まで立ち上がった鉄筋コンクリート（RC）構造の上に載った形式の構造で、特に接続部がベースプレートとアンカーボルトで構成された露出柱脚形式によるものを指す。梁間方向が鉄骨フレームで構成されているが、妻面など屋根面まで RC 架構が立ち上がっている構面を有するものも対象範囲内となる。鉄骨屋根は基本的に自己釣合い系の構造となっていることが多いが、支持構造隅部にスラスト力を伝達する形式のものもある。後述するように本形式の構造物は、2011 年東日本大震災において支承部周りに多くの被害が発生した。本指針はこれらの被害を防止するためのものである。

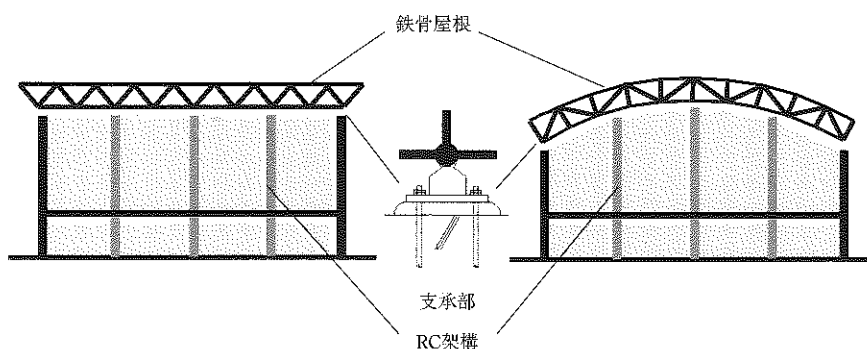


図 1.1.1 鉄骨置屋根構造の定義

現在、学校の体育館や公共スポーツホール等の空間構造の耐震診断・補強は、文献 1-1.1) ~ 1-1.2) 等によって行われることが多い。これらの指針類はいずれも剛強な床面を有する重層構造の振動特性に基づき設定された耐震診断・補強方法を準用したものである。しかしながら、後述するように本指針で取り扱う空間構造では、その振動特性に重層構造と異なる部分も多く、これが実質的な耐震診断・補強を難しくするとともに、従来の指針で捕捉できない被害形態を許容する状態となっている。本指針では東日本大震災で顕在化した鉄骨置屋根構造特有の被害形態に対応し、文献

1-1.1) ~ 1-1.2) の考え方をベースに、不足している部分の補足を行う。まず、空間構造特有の地震応答特性について以下に述べる。

空間構造の構造形式と地震応答特性

空間構造の代表的な屋根形状を図 1.1.2 に示す。空間構造の屋根はこれらの形状に広く分布しているが、屋内競技場、学校体育館に関しては長方形平面を覆う屋根形状として (b) 円筒シェル、(c) 山形フレーム、(d) 平板が多く見られる。これ以外に寄せ棟、方形形状も多く採用されている。

鉄骨ラチス屋根の代表的な構成要素を図 1.1.3 に示す。スパン 30 m 以下の小規模シェル・空間構

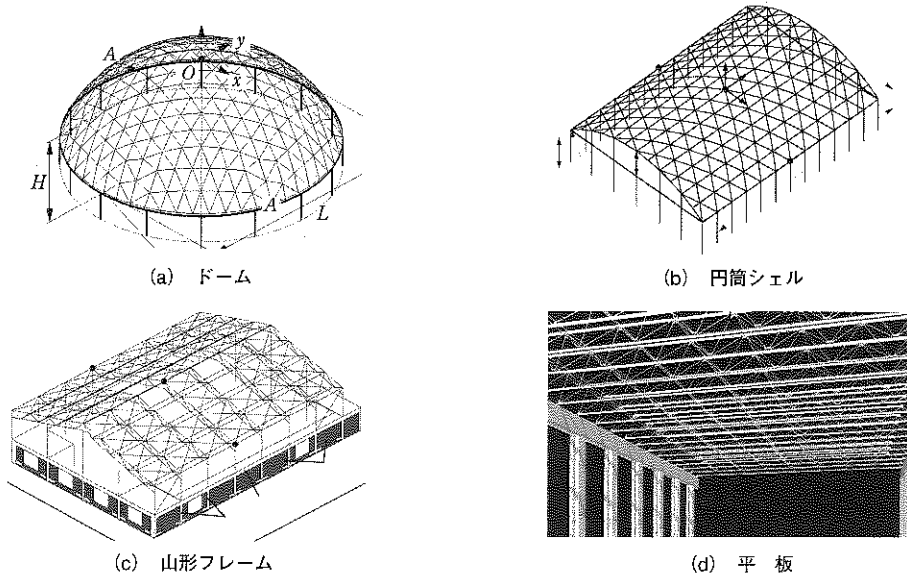


図 1.1.2 空間構造の屋根形状<sup>1-1.7)</sup>

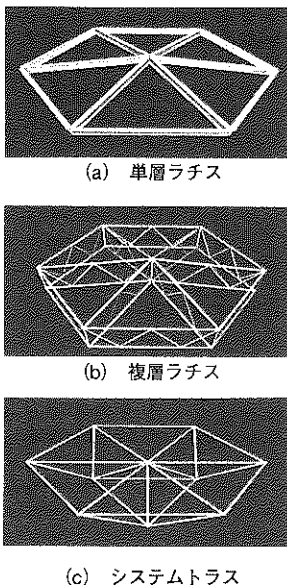


図 1.1.3 ラチス屋根の構成要素<sup>1-1.7)</sup>

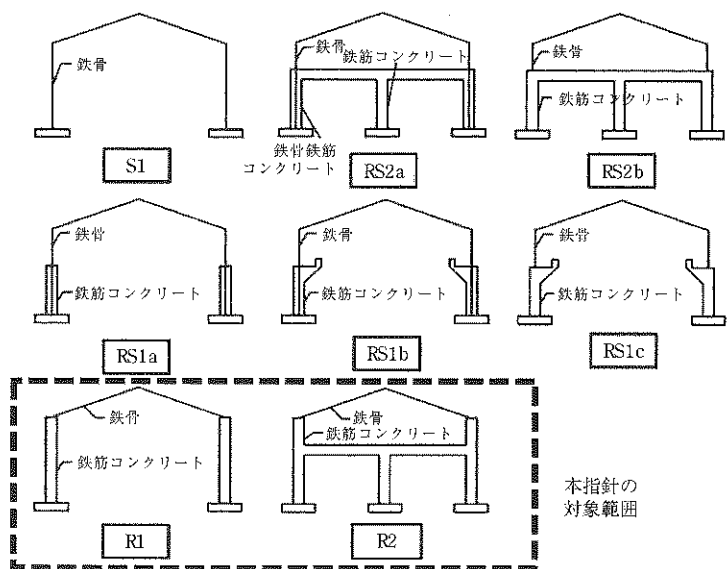


図 1.1.4 体育館の構造種別<sup>1-1.7)</sup>

造では単材フレームで屋根が架け渡されることが多い。これに対し、スパンの大きい中大規模のシェル・空間構造ではトラス梁を格子状に組み合わせたフレームシステムか、ボールジョイントを用いた立体トラスによるユニットシステムが用いられる例が多い。

文献 1-1.1) による学校体育館の構造種別の定義を図 1.1.4 に示す。屋根部の構造種別はほとんどが鉄骨造である。これに対し、下部支持構造が鉄骨造である S 型、下部支持構造が鉄筋コンクリート造である R 型、支持構造の上部が鉄骨、下部が鉄筋コンクリート造である RS 型等に分類されている。また、これ以外に屋根架構まで鉄筋コンクリート造で建設された体育館も見られる。本指針で対象とするのは図 1.1.4 中の R1, R2 の形式であり、本形式の構造を以降「鉄骨置屋根構造」と呼称することとする。

このようなシェル・空間構造の応答性状は、一般的な重層構造と異なることが知られている<sup>1-1.3)</sup>。例えば、ライズを有する屋根では図 1.1.5 に示すように水平地震入力に対しても鉛直応答が励起され、屋根トラスを座屈させたり天井・照明等の取り付け部材を損傷・落下させる要因となる。図 1.1.6 に円筒ラチスシェルおよび山形屋根架構の卓越振動モード例を示す。屋根が鉛直方向にも大きく振動する様子がわかる。

鉄骨屋根が壁付き鉄筋コンクリート造の独立柱の上に置かれている置屋根形式の構造では、RC 独立架構が構面外に応答変形し、鉄骨屋根との支承部・接続部を破損させたと考えられる被害例が多く見られる。また、妻面が壁付き鉄筋コンクリート造、内部が鉄骨フレームの組み合わせになっている体育館では、それぞれの層間変形が大きく異なり、境界部の屋根プレースを座屈・破断させたり支承部を破壊することにつながりやすいと考えられる。これらは剛床仮定の成り立たないシェル・空間構造特有の応答特性と言える。

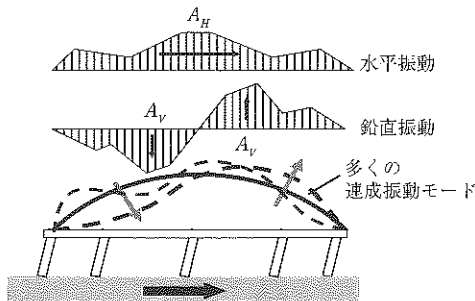


図 1.1.5 水平入力下の鉛直応答

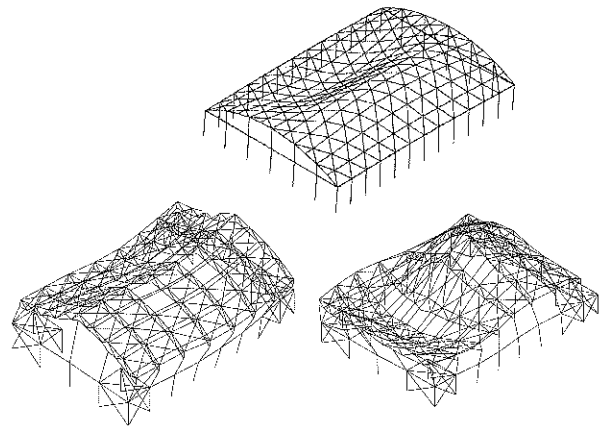


図 1.1.6 円筒シェル・山形屋根架構の卓越振動モード例<sup>1-1.7)</sup>

## 鉄骨置屋根構造に共通に見られた被害

空間構造特有の応答特性を認識したうえで、東日本大震災において鉄骨置屋根構造に共通に見られた被害について概括する<sup>1-1.7)</sup>。

### (1) 支承部の破壊

鉄骨屋根構造を支持する下部構造が鋼構造の場合には、柱脚は通常の鉄骨造建物と同様に露出柱脚または根巻き・埋め込み柱脚の納まりとなる。しかし、支持構造が鉄筋コンクリート造で鉄骨架

構が置屋根形式となる場合には、屋根架構が直接コンクリート柱頭またはコンクリート梁に定着されることが多い。この際の納まりは、図 1.1.7 に見るようにアンカーボルトとベースプレートを用いた露出柱脚に近い支承部となる場合がほとんどである。その際、1) ベースプレートのアンカー孔を通常孔とし（孔に詰め物をするともある）、ピン支承とし設計する、2) ベースプレートのアンカー孔をルーズホールとし、1方向または2方向のローラー支承として設計する（ベースプレート下にはステンレス板、テフロン板等を敷きこみ、摩擦係数の低減を図る場合が多い）等の方式が一般的に用いられている。

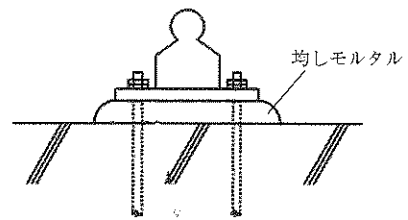


図 1.1.7 典型的な鉄骨屋根支承部の納まり

今回の空間構造の震害例では、屋根架構以上に支承部での被害が数多くみられた。その破壊形式は支承部の水平移動等により、a) アンカーが破断する形式、b) アンカー定着部の被りコンクリートが側面破壊、剥落する形式（図 1.1.8）または c) 均しモルタルが粉砕される形式（図 1.1.9）に大きく分類される。こういった被害例は阪神・淡路大震災以来共通して報告されてきたが、それ以降に設計・建設された新しい建物においても今回の地震で多くの同様の被害例が報告された。改善があまり見られない理由として以下の要因が考えられる。

- ① 鉄骨屋根と支持 RC 構造の設計プロセスおよび設計担当者が異なることが多く、境界部となる支承部の納まり（アンカー周りの配筋等）が設計時に十分に検討されていない場合が多い。
- ② 鉄骨屋根は鉄骨業者が製作・建方を行う一方で、支持 RC 構造およびアンカーボルトセットは元請建設会社により行われ、アンカー部の精度やモルタル厚等の管理に課題が残る。支持 RC 架構の精度の調整に均しモルタルを厚盛りする処置も多く行われる。
- ③ 支承部のせん断耐力の検討、特に定着アンカーの側方破壊に対する検定が行われていない。
- ④ 空間構造特有の地震応答特性を考慮した支承部に加わる反力、変形が適切に評価できていない。例えばライズを有する屋根構造は水平入力に対しても逆対称モードの鉛直応答を生ずることが知られ、片持ち状態となっている RC 支持架構の挙動と合わせて、支承部にせん断力だけでなく回転曲げを与える可能性が指摘されている<sup>1-1.8)</sup>。
- ⑤ 屋根支承部の設計には鉄骨柱脚の設計方法が流用されることが多い。しかし一般的な鉄骨柱

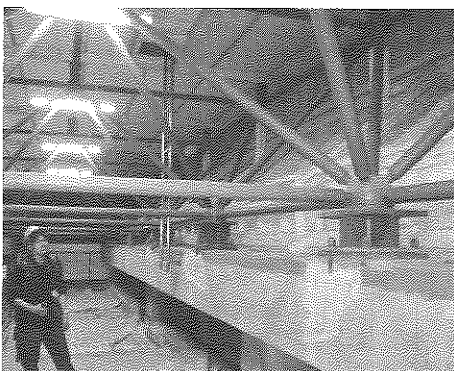


図 1.1.8 定着部側面破壊（側方破壊）<sup>1-1.7)</sup>



図 1.1.9 定着部破壊（モルタル粉砕）<sup>1-1.7)</sup>





に宮城県 M 町トレーニングセンター体育館では図 1.1.14 に見るように鉄骨屋根架構と RC 架構との接続部が破壊され片持架構が 200 mm 程構面外変形した状態で残留しており、茨城県 N 高校体育館では図 1.1.11 に見るように接続部の破壊、妻面近傍の屋根ブレースの座屈とともに独立柱に多くの曲げひび割れが観察されるなど、片持 RC 架構の構面外応答を示唆する形跡が数多く残っている。

次項より、これらの鉄骨置屋根構造に対する耐震診断方法について概説する。

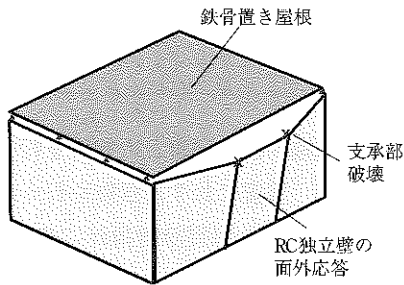


図 1.1.12 片持ち RC 架構の面外応答変形<sup>1-17)</sup>

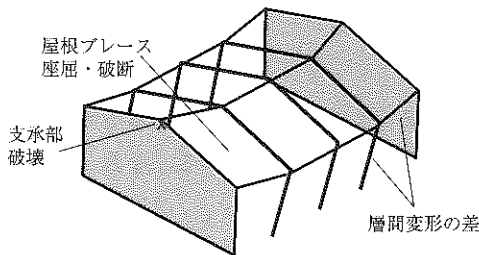


図 1.1.13 RC 架構と鉄骨架構の層間変形差による被害<sup>1-17)</sup>

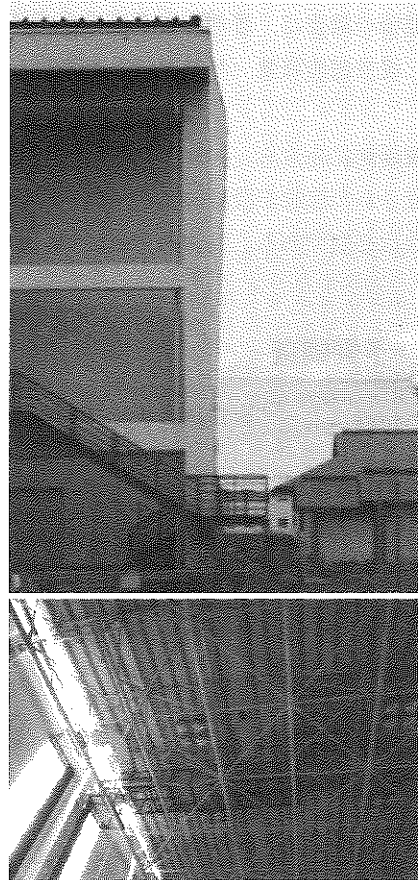


図 1.1.14 片持ち RC 架構の面外残留変形<sup>1-17)</sup>

## 2. 建物の調査

### 2.1 一般

建物の調査は、耐震診断を行う際に必要となる建物の力学的性質を確認するために、現地調査、設計図書収集、材料試験など適切な方法によって行う。

耐震診断に先立ち、対象となる建物の現地調査および材料試験、設計図書との照合を行う。実際に建設された建物が設計図書と一致していない場合も多いため、現況に対する診断を行うための現地調査は必須である。具体的方法については、文献 1-2.1) 等の既往の耐震診断指針に準拠する。

### 2.2 予備調査

本指針によって耐震診断を行う場合には、適切な予備調査を実施し、本指針適用の可否を検討する。

本指針は鉄骨屋根架構が RC 架構の上に載った鉄骨置屋根架構に関する耐震診断指針である。設計図書、現地調査により対象建物が鉄骨置屋根架構に該当することを確認する。なお、鉄骨ラーメン構造でも RC 妻壁がある場合などは適用範囲内となる。

### 2.3 調査項目

建物の調査は、耐震診断において必要となる以下の調査項目などについて実施する。

- (1) 構造モデルを設定するために必要な、構造部材および非構造部材の材料強度、断面寸法、配筋状況
- (2) 構造部材のきれつ・変形の発生状況
- (3) 非構造部材の被害状況
- (4) 老朽化の程度と範囲

特に鉄骨屋根架構と RC 支持架構間の接合部、支承部の状況（アンカーボルト、均しモルタル、定着部鉄筋等）について留意し調査する。

## おわりに

東日本大震災では大型体育館などで多用されている鉄骨置屋根構造に多くの被害が発生した。鉄骨置屋根構造で造られている体育館などは、これから大きな地震が来るかもしれないと想定されている東京直下型、東海、東南海、南海の地域にも多数存在していると考えられる。体育館は避難の重要施設であり避難所の被害は被災者の生死を左右しかねない。

そのようなことから、建築研究振興協会東北分室(室長 田中礼治)の東北耐震診断改修委員会(委員長 柴田明德 東北大学名誉教授)では東日本大震災後、鉄骨置屋根構造に関して鉄骨置屋根構造耐震検討WGを設け被害調査を行った。被害調査結果については「東日本大震災における鉄骨置屋根構造の被害調査報告」としてまとめ、2012年8月30日に日本建築学会ホールにて被害報告会(建築研究振興協会、建築研究開発コンソーシアム共催)を行った。その後、鉄骨置屋根構造の研究は建築研究開発コンソーシアム「鉄骨置屋根構造の耐震性能に関する研究会」(委員長 柴田明德 東北大学名誉教授)に引き継がれ、被害分析、耐震診断の進め方などについて検討を加えてきた。検討結果を「鉄骨置屋根構造の被害分析および耐震診断の進め方」として報告書にまとめ、2013年9月に建築研究開発コンソーシアムにおいて報告会を行った。その後、被害分析に基づいて耐震診断および耐震改修の方法ならびに計算例などについても検討を行い、2015年3月30日に「2014年度鉄骨置屋根構造に関する研究会報告書」として取りまとめた。本書は本報告書を抜粋し、加筆修正したものである。

多分、多くの体育館はすでに耐震診断、耐震補強を終了しているかもしれない。本報告に示した被害について検討済であろうか。もし検討していないとしたら、早急に再検討が必要である。地震は待ってくれない。再検討は早いに越したことはない。鉄骨置屋根構造について不明なことがあったら、東北耐震診断改修委員会の方にご連絡いただきたい。

最後になったが、鉄骨置屋根構造に関する検討は、日本建築学会シェル・空間構造運営委員会、建築研究振興会東北耐震診断改修委員会、被害調査に貴重な時間を割いていただいた東北地方・北関東の構造関係の方々、日本権利句構造技術者協会東北支部および仙台建築構造設計事務所協会の皆様的一方ならぬご協力によるものである。ここに心より感謝したい。また、建築研究開発コンソーシアム「鉄骨置屋根構造に関する研究会」委員および事務局の皆様を重ねて深くお礼を申し上げ、まとめの言葉としたい。

鉄骨置屋根構造の耐震診断・改修の考え方

定価はカバーに表示してあります。

2015年9月10日 1版1刷発行

ISBN 978-4-7655-2584-8 C3052

編 集 一般社団法人日本建設技術高度化機構  
鉄骨置屋根構造耐震研究編集委員会

〒108-0014 東京都港区芝5丁目26-20 建築会館4階  
電 話 (03)(6435)4670  
F A X (03)(6435)4671

発行者 長 滋 彦

発行所 技報堂出版株式会社

〒101-0051 東京都千代田区神田神保町1-2-5  
電 話 (03)(5217)0885  
編 集 (03)(5217)0881  
F A X (03)(5217)0886

振替口座 00140-4-10

U R L <http://gihodobooks.jp/>

日本書籍出版協会会員  
自然科学書協会会員  
土木・建築書協会会員

Printed in Japan

© 一般社団法人日本建設技術高度化機構, 2015

落丁・乱丁はお取り替えます。

装丁 ジンキッズ 印刷・製本 昭和情報プロセス

**JCOPY** <(社)出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複写は著作権法上での例外を除き禁じられています。復写される場合は、そのつど事前に、(社)出版者著作権管理機構(電話:03-3513-6969, FAX:03-3513-6979, E-mail:info@jcopy.or.jp)の許諾を得てください。