

# 大面積非構造材落下被害を有効に防ぐための ネット構造施工方法の開発

川口 健一<sup>1</sup>・荻 芳郎<sup>1</sup>・大矢 俊治<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

筆者らは天井落下被害の危険性については阪神大震災の頃から指摘し続けているが、2011年東北地方太平洋沖地震でも数多くの死傷者が発生してしまった。天井の落下防止は急務となっている。吊り天井に対する既往の耐震補強方法の多くは、作業スペースのない天井裏から下地を補強するというものであり、東日本大震災によりそれらの有する問題が顕在化された。本研究では、十分な作業スペースのとれる室内側から簡易かつ効果的に補強できる補強方法を検討し、金物の開発とその効果を実大天井の起振器実験により実証している。

キーワード 天井, 起振器, 実大実験, 制振, ケーブル, 減衰

## 1. はじめに

筆者等は阪神大震災の調査時より天井等の落下被害の危険性について指摘してきた<sup>1)</sup>。しかし残念ながら、16年経た2011年の東北地方太平洋沖地震でも夥しい数の天井落下事故が起こり、死傷者も発生してしまった。さらに、避難所等の社会的需要機能や企業施設の事業継続性等が、天井落下により著しく損なわれた。

使用時に大勢の人が集う公共空間の安全性の確保、避難所としての機能維持のために、非構造材の補強および落下防止が重要である。本研究開発では、天井裏に入らずに天井下から天井を耐震補強できる施工の容易なネット構造を開発する。研究開発では、下記の2点を大きな目標とし、実施した。

- 1) 非構造材とネットを留めつける施工の容易な金物の開発。部材実験と施工試験、
- 2) 実大実験による、開発した金物と施工法の有効性の確認。

### (1) ケーブルネットのレイアウトと非線形シミュレーションによるその補強効果の確認

研究開発の初年度には、図1に示すようなケーブルネットレイアウトの検討を行い、数値計算による有効性の確認を行った(図2)。これにより、ケーブル取り付けに要する概略の取り付け強度を把握した。また、ケーブルの変形を考慮した非線形計算により、天井材落下時にケーブルネットに発生する軸力を把握していた(図3)。

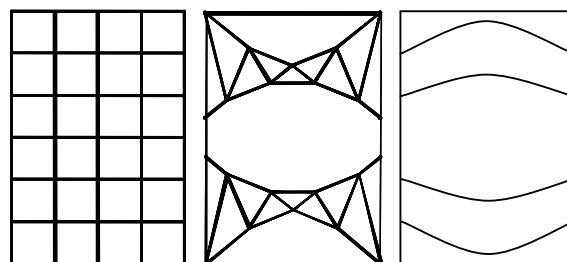


図-1 補強と落下防止を同時に行うケーブルレイアウト

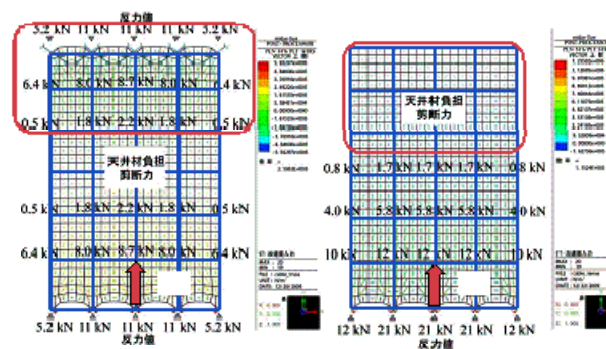


図-2 格子状ケーブル配置に対して行った数値計算の例

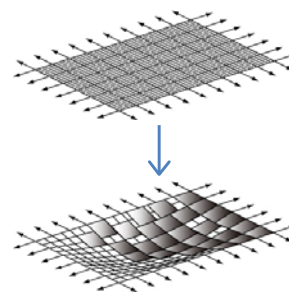


図-3 ネットの変形を考慮した非線形計算の

## (2) 既往の補強方法における問題点

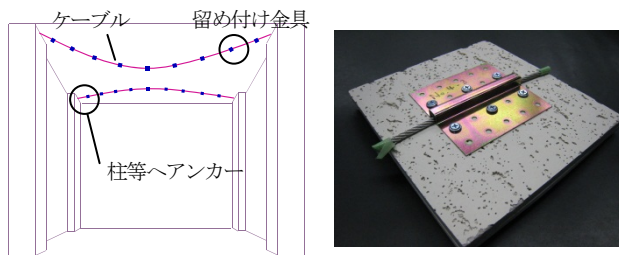
天井に対する既往の補強方法の多くは天井裏から斜め材設置やクリップ補強等の下地補強を行うもので、以下のような問題がある。

- ・既存の天井裏では補強作業が非常に困難。
- ・新築では作業工程が煩雑になり、既往の工法の利点を損なう。
- ・設備機器との取り合いからバランスの良い配置が困難。
- ・補強材により天井重量が増し、かえって地震力を呼び込む。

本研究では、以上の問題を改善するため十分な作業空間を確保できる室内側から簡易に行うことのできる補強工法の補強効果を実験により検証する。本工法は主に地震時の水平挙動を制御し、損傷低減と機能保持を目的とするものであり、人命保護のためには落下防止ネット等と併用することを原則とする。

## (3) ケーブル補強方法の概要

本研究で検討する補強方法は、室内側天井面にケーブルを放物線等の有効な形状となるように金具で天井材に留め付け、ケーブルの端部を周辺部の柱や梁等にアンカーするというものである(図4)。これにより、地震力が入力された際ケーブルが天井全体の水平挙動を抑制する効果を狙う。



(a) 補強内観イメージ (b) 留め付け金具  
図4 補強工法の概要

## 2. 留め付け金具水平及び鉛直方向載荷実験

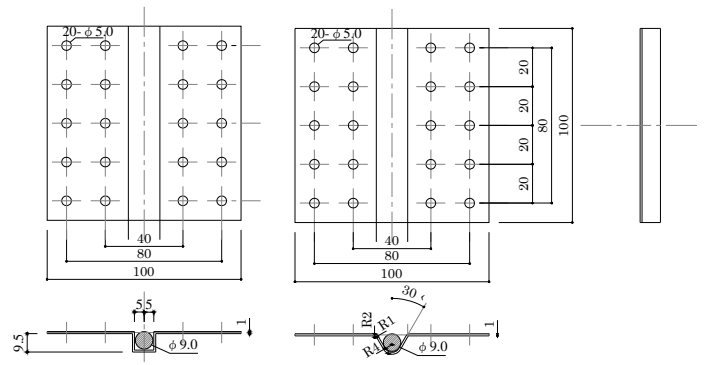
ケーブルを天井に留め付ける為ここでは鋼板 (t=1mm) を曲げて加工した10×10cmの金具を用意した。この金具一個当たりの水平及び鉛直耐力について報告する。

### (1) 水平方向載荷実験

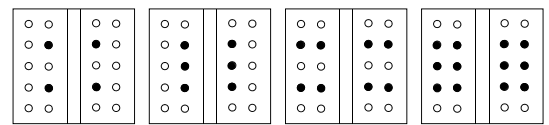
実験パラメータは、天井材材質(表1)、金具種類(図5)、ビス本数(図6)である。これらを組み合わせ、14種類の試験体に対し各3回、計42回の実験を行った。

表-1 天井材材質

石膏ボード (PB)	t = 9.5mm
ケイ酸カルシウム板 (CS)	t = 8mm
石膏ボード + ロックウール吸音板 (PB + RW)	t = 18.5mm (9.5 + 9)
ケイ酸カルシウム板 + ロックウール吸音板 (CS + RW)	t = 17mm (8 + 9)



(a) 金具 A (b) 金具 B  
図-5 金具種類



(a) A(4本) (b) B(6本) (c) C(8本) (d) D(12本)  
図-6 ビス本数

実験装置は、天井材を載せる可動台とそれを支持する支持台により構成されている(図7)。天井材(15×30cm)を可動台に載せ、ケーブルの代わりに鋼棒(SKドリルロッドφ9mm)を天井材に沿わせ、その上から留め付け金具で覆いビス留めする。鋼棒両端を当て金に固定し、ジャッキで可動台を水平に引くことで載荷を行う。載荷方法は単調載荷とし、金具の浮き上がりが確認されるまで載荷を行った。可動台とジャッキの間に挿入したロードセルにより荷重を測定し、可動台の変位をばね式変位計により測定した。しかし、この測定方法では天井材と金具のずれの他に鋼棒の変形を含んでしまう。そこで、予備実験より得られた鋼棒の剛性を用いて全体の変位から鋼棒の変形量を引き、天井材と金具のずれを抽出した。

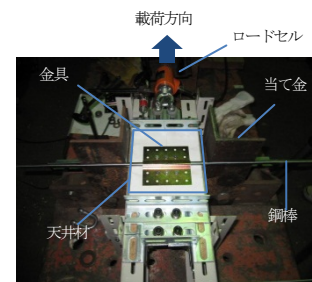


図-7 実験装置

図8に荷重-ずれ曲線を示す。載荷初期では荷重は単調に増加していくが、図中に三角で示した点で一旦荷重が低下する。このとき金具の浮き上がり(図9)が見られ、本実験ではこの点を最大水平耐力として評価する。

パラメータの違いによる最大水平耐力の比較を行う。天井材の材質に関しては、1枚張り、ロックウール吸音板との2枚張りの天井材どちらに対しても、ケイ酸カル

シウム板の方が石膏ボードより最大耐力が高く、平均で約2.9倍高い。また、2枚張りの最大耐力は1枚張りに比べ10-30%程度落ちる（図10）。これは2枚張りにすることで厚みが増し、ビスにモーメントがかかるためと考えられる。モーメントによりビスが回転し、比較的脆いロックウールを削っていることが確認された。金具種類に関しては、金具Aの方が金具Bより最大耐力が高く、平均で約1.4倍高い（図11）。これは金具Bでは鋼棒が金具の下に潜り込んでしまうためである。ビス本数に関しては、ビス本数が増えるにつれて、最大耐力が増加することがわかる。本実験範囲内ではビス本数に比例して最大耐力が高くなる傾向にある（図12）。

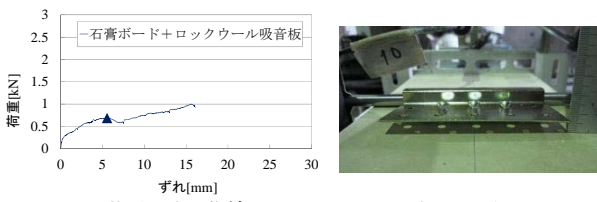


図-8 荷重-ずれ曲線

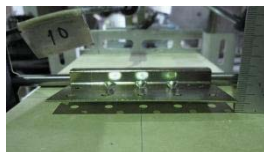


図-9 金具の浮き上がり

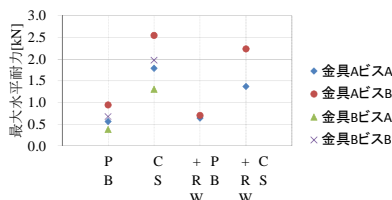


図-10 天井材材質比較

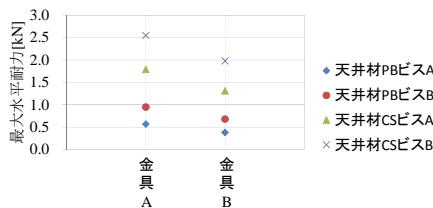


図-11 金具種類比較

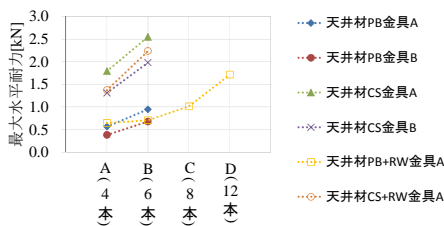


図-12 ビス本数比較

(2) 鉛直方向載荷実験

天井材に留め付けた金具に紐を通し、鉛直下向き又は上向きに人力で引っ張ることで載荷した（図13）。紐に取り付けたロードセルにより引張荷重のみ測定した。パラメータは天井材材質、ビス種類、ビス本数である。これらを組み合わせ3種類の試験体に対し各1回、計3回の実験を行った。表2に実験結果の一覧を示す。



(a) 下向き (b) 上向き

図-13 載荷風景

表-2 実験結果一覧

試験番号	載荷方向	天井材材質	ビス種類	ビス本数 [本]	最大鉛直耐力 [kN]
1	鉛直下向き	石膏ボード t=9.5mm+ ロックウール化粧吸音板 t=12mm	タッピング ねじ	2	0.29
2	鉛直上向き	石膏ボード t=9.5mm	タッピング ねじ	2	0.21
3	鉛直上向き	石膏ボード t=9.5mm	ワンタッチ スクリュー	2	0.27

実験よりビス2本で石膏ボードに留め付けた場合、金具1個当たりの鉛直耐力は0.2-0.3kNとなることがわかる。

3. 起振器を用いた実大天井加振実験

(1) 実験概要

提案する補強方法の効果の検証を目的とし、起振器を用いて実大天井の加振実験を補強前後で行った（表3）。

表-3 実験項目

	実験項目	目的
無補強天井	静的載荷実験	水平及び振れ剛性の推定
	スイープ加振実験	固有振動数の推定
	自由振動実験*	減衰定数の推定
ケーブル補強天井	スイープ加振実験	固有振動数の推定
	自由振動実験*	減衰定数の推定

(2) 天井概要及び計測器・起振器設置

仙台市若林区内のコミュニティーセンター（1層鉄骨造）内の集会室の天井を用いて実験を行った。図14に示す、中央部の天井（天井高3.3m、天井面積60m<sup>2</sup>）を試験体とした。前準備として外周部垂れ壁との縁を切った。



図-14 内観



図-15 天井裏

本天井は軽鉄下地を用いた在来工法吊り天井である（図15）。吊りボルト（φ9mm、吊り長約440mm）が両方向約900mm間隔で、梁に架けられたC型チャンネルから吊られている（図16）。天井材は石膏ボード9.5mmとリブ付ロックウール吸音板t=19mmの捨張りである。

起振器（サンエス社製Model SSV-125）を天井重心位置に母屋からチェーンブロックで天井面に設置した。

天井の挙動を把握するため、天井の4隅と重心位置、更に重心位置付近の大梁の上に無線式3軸加速度計（Colibryst社製SF3000L）を設置した（図17）。また、天

井の重心位置における変位をレーザー変位計により測定した(図18)。

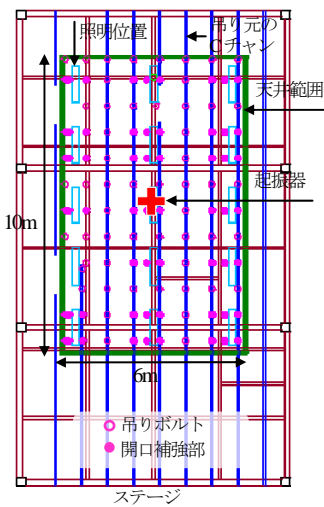


図-16 吊りボルト配置

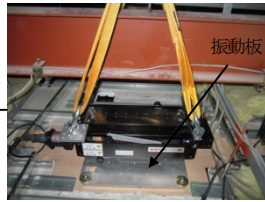


図-17 起振器設置

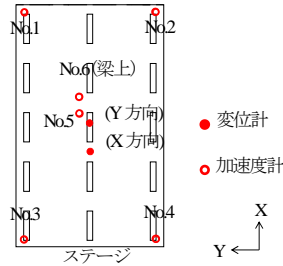


図-18 計測器配置

### (3) ケーブル設置

ケーブル配置を図19に示す。X方向の補強効果を狙い、計4本のケーブルを放物線状に配置し、ケーブル一本当たり8個の金具をそれぞれ6本のビスで留めつけた(図20)。柱にはアンカー用の溝型鋼をU字ボルトで取り付けた(図21)。溝型鋼の中央に溶接したアイボルトを利用し、ケーブルをアンカーする。ケーブル両端にはターンバックルを設置しており、両側から初期張力の調整を行う。また、ケーブル張力をモニタリングするため、ロードセルをケーブル片側端部に設置した(図22)。

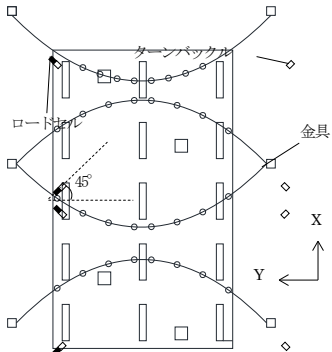


図-19 ケーブル配置



図-20 ケーブル、金具設置



図-21 アンカー用金物



図-22 ロードセル設置

### (4) 人力による静的荷重実験

天井の周囲に設置されているランナーに紐を結び付け、引っ張ることで荷重を行う(図23)。荷重は紐に取り付けたロードセルにより測定し、変位はレーザー変位計及びばね式変位計で測定した。X、Y、振れ方向に対し、それぞれ18回、12回、6回と計32回の実験を行った。



図-23 荷重風景

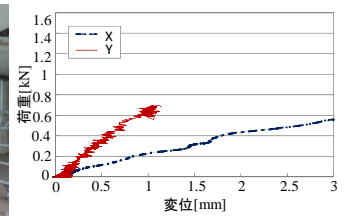


図-24 荷重-変位曲線

荷重-変位曲線から最小2乗法により剛性を算出した(図24)。得られた水平剛性の平均はX、Y方向それぞれ約0.21、0.59 kN/mmである。Y方向の水平剛性はX方向に比べ約2.79倍高い。これは、Y方向にのみ設けられている開口補強材の影響であると考えられる。また、振れ剛性の平均は約 $1.24 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$ である。

### (5) スイープ加振実験

パラメータを入力加速度、入力振動数、スイープ回数、スイープ速度とし、補強前ではX、Y方向に対し、それぞれ9回、4回と計13回の実験を行った。補強後では初期張力をパラメータとして加え、X、Y方向に対し、それぞれ45回、16回と計61回の実験を行った。各実験で得られた天井の応答加速度から加速度フーリエスペクトルを算出し、固有振動数を推定する。

実験より、補強前天井のX並進、Y並進、回転の固有振動数はそれぞれ約2.2 Hz、4.4 Hz、4.4 Hzと推定された。

静的荷重実験より得られた剛性とスイープ実験より得られた固有振動数から天井重量を求めると約8.4 kNと推定される。これは構成部材の単位重量から求めた8.1 kNと概ね一致しており、推定結果の妥当性を示している。

### (6) 自由振動実験

以下の2通りの方法により自由振動実験を行った。

- 実験1. 定常加振から起振器急停止による自由振動実験
- 実験2. 人力による強制変位からの自由振動実験

図25に自由振動波形を示す。実験1では、起振器で定常加振した後、急停止させることで自由振動させる。パラメータは入力加速度、入力振動数とし、補強前ではX、Y方向に対し、それぞれ5回、27回と計32回の実験を行った。補強後では初期張力をパラメータに加え、X、Y方向に対し、それぞれ36回、19回と計55回の実験を行った。実験2では、静的荷重時と同様紐を引っ張り強制変位を与え、一気に離すことで自由振動させる。パラメータは荷重位置、荷重人員数とし、補強前ではX、Y方向に対し、それぞれ2回、5回と計7回の実験を行った。補強後では初期張力をパラメータに加え、X、Y方向に対し、それぞれ12回、9回と計21回の実験を行った。実験1では天井重心位置の加速度を積分して得られた変位を、実験2では天井重心位置に設置した変位計のデータを用いて5周期分の振幅比から減衰定数を算出した。

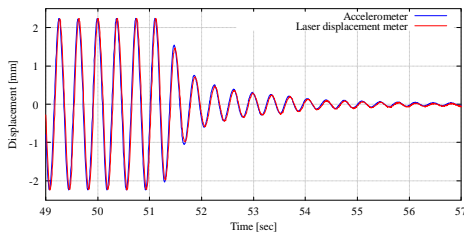


図-25 自由振動波形

実験1より得られた減衰定数は、X方向が6.0~8.0%、Y方向が2.5~8.0%であり、実験2ではX方向が4.5~5.0%、Y方向が3.0~5.0%である。X、Y方向の違いは開口補強材の影響と考えられる。

#### 4. 補強効果の検証

##### (1) 初期張力と水平剛性の関係

スイープ実験から推定された固有振動数より水平剛性を算出した。初期張力と水平剛性の関係を図26に示す。X、Y方向ともにケーブル張力に伴って水平剛性が増加する傾向にある。初期張力500N、1000Nで補強したときの無補強時に対する水平剛性の倍率は、X方向ではそれぞれ6.2、8.7倍となり、Y方向ではそれぞれ2.2、4.2倍となる。また、X方向に関しては、水平剛性は300Nまでは大きく増加し、300N以降は緩やかな増加を示している。

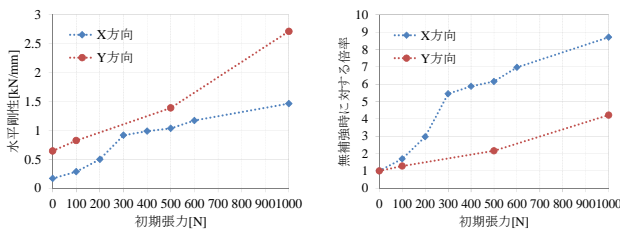


図-26 初期張力と水平剛性の関係

##### (2) 初期張力と最大応答変位の関係

スイープ実験で計測された天井重心位置の最大応答変位と初期張力の関係を図27、28に示す。X、Y方向ともにケーブル張力を上げると最大応答変位が減少する傾向にある。X方向に関して、無補強時と比較して100Nで30~40%、200Nで15~20%まで減少した。Y方向に関しては、100Nで45~70%、500Nで30~45%まで減少した。初期張力300N以上では最大応答変位の無補強時に対する比はほとんど変わらない傾向にある。

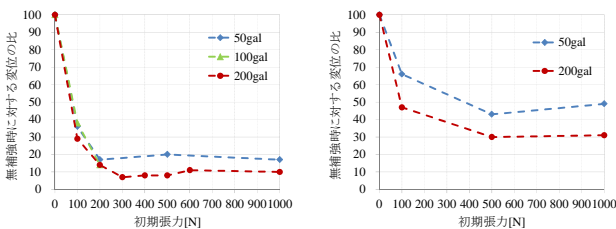


図-27 初期張力と最大応答変位の関係

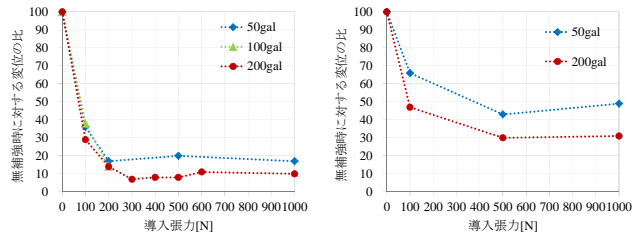


図-28 無補強時に対する最大応答変位の比

##### (3) 初期張力と減衰定数の関係

減衰定数は同じ張力でもばらつきがあり、初期張力との関係性は確認されなかった(図29)。

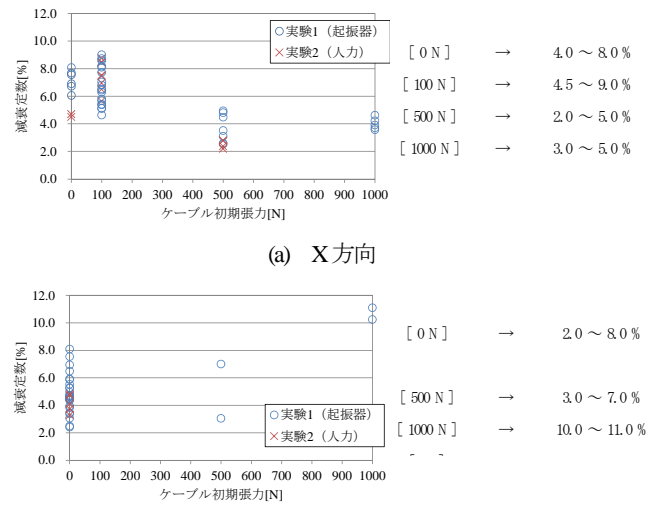


図-29 初期張力と減衰定数の関係

#### 5. 結論

天井の水平挙動制御のための新しい工法について検討し、その有効性について実大実験にて検証した。得られた知見を以下に示す。

- 非構造材とネットを留めつける施工の容易な金物の開発を行い、その有効性を確認した。
- ケーブル初期張力100 Nという僅かな初期張力でも天井の最大応答変位は4~7割近く低減された。
- 初期張力を100~1000 Nの範囲で変化させると、水平剛性は、300Nまでは大きく増加し、300N以降は緩やかな増加を示した。
- 減衰に関しては、同じ張力でもばらつきがあり、初期張力との関係性は確認されなかった。

#### 参考文献

- 1) 石川, 川口, 田川, “兵庫県南部地震による学校体育館及び公共スポーツホール等の被害調査報告”, 日本建築学会技術報告集5号, pp.96-101, 1997.