

E-ディフェンス実験に基づく大規模空間吊り天井の脱落被害低減技術開発  
その12 フェイルセーフ機能の設計とその有効性

正会員 佐々木智大<sup>\*1</sup> 同 ○橋口寛史<sup>\*2</sup>  
同 青井淳<sup>\*1</sup> 同 梶原浩一<sup>\*1</sup>

大規模空間 吊り天井 脱落被害  
フェイルセーフ機能 ワイヤロープ E-ディフェンス

### はじめに

ある条件を満たす増改築において既存の特定天井(高さ 6m 超, 平面積 200m<sup>2</sup>超)に対し, 技術基準の代替として落下防止措置を取ることが認められている<sup>1)</sup>. 本報では, この落下防止措置として導入した, ワイヤ, ネットにより脱落した天井を受け止めるフェイルセーフ機能の有効性について検証する.

### フェイルセーフ機能の設計

本試験体に導入したフェイルセーフ機能は, 図 1 に示すように, 脱落した天井を天井面の下に格子状に配置したワイヤロープ(展開ロープ)およびその上に取り付けたネットで受け止める構造とした. 吊り天井が全面脱落した場合を想定し, 天井面より 400mm 下方に展開ロープとネットを配置し, 屋根頂部の小梁からつり下げた吊り材と, 柱から接続した展開ロープの柔軟な伸びによって, 天井板が落下した際の落下エネルギーを吸収できるよう設計している. なお, 落下物は自由度があればあるほど衝撃力, 衝撃エネルギーを蓄えてしまうことから, 最小限の落下距離とすることが望ましいが, 実験を行う上で展開ロープが天井面に接触し, 破壊メカニズムに影響を与えてしまうことのないようにするために, 天井面と展開ロープとの間隔は 400mm とした.

展開ロープには径 10mm の 7×7 G/O ワイヤロープを使用し, これを 800mm 間隔で設置した. このワイヤロープの破断荷重は 64.4kN である. 吊り材には φ22mm の丸鋼を使用した. 吊り材に使用した材料は S25C で, 短期許容引張応力 0.22kN/mm<sup>2</sup> から吊り材の許容引張荷重を求めるとき 83.6kN となる.

なお, 天井板が落下する際, 片側のネット構造を構成する展開ロープには等分布荷重がかかるものと仮定し, 展開ロープの伸びにより天井の落下エネルギーを吸収すると考え, 天井の落下エネルギーと展開ロープのひずみエネルギーの釣り合いから適切な展開ロープの種類, 設置間隔を設定した.

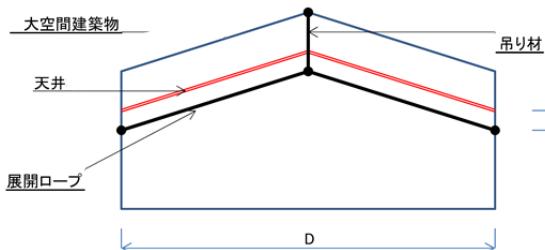


図 1 ワイヤロープ・ネットによる落下防止措置

片側のネット構造の上の天井が落下することにより生じるエネルギー  $E_c$  は次式で求められる.

$$E_c = \left\{ \frac{2}{3} (f_0 + f) + H \right\} \frac{W}{2} \quad (1)$$

ここで,  $f_0$  は展開ロープの初期たわみ,  $f$  は天井を受け止めたことにより生じる展開ロープのたわみ,  $H$  は天井面から展開ロープまでの距離,  $W$  は天井全体の重量である.

これに対し, 展開ロープが吸収するエネルギー  $E_r$  は展開ロープのひずみエネルギーから次式で求められる.

$$E_r = N_w \cdot \left( \frac{1}{2} T \Delta l - \frac{1}{2} T_0 \Delta l_0 \right) \quad (2)$$

ここで,  $N_w$  は展開ロープの本数,  $T$ ,  $\Delta l$  は天井を受け止めたときの展開ロープの張力とそのときのロープの伸び,  $T_0$  は初期張力,  $\Delta l_0$  は初期たわみによるロープの伸びである.

天井を受け止めた際に生じるたわみ  $f$  はエネルギーの釣り合いなどから求めることはできるが, 非線形の方程式を繰り返し計算で解く必要があり, 容易には求められない. しかし, 図 2 に落下エネルギー  $E_c$  と展開ロープのひずみエネルギー  $E_r$  の関係を示すが, 両者は展開ロープのたわみ量の増加に伴い単調に増加し, たわみ量が天井を受け止めた際に生じるたわみ  $f$  と一致したときに両者は一致する. また, たわみ量が天井を受け止めた際に生じるたわみ  $f$  を超えると, 展開ロープの歪エネルギー  $E_r$  は落下エネルギー  $E_c$  よりも大きくなる. そこで, 展開ロープにかかる張力が許容張力を超えない適当なたわみ量を許容たわみ  $f'$  とし, そのときの落下エネルギー  $E_c$  とひずみエネルギー  $E_r$  を求め, これが  $E_r > E_c$  となるよう展開ロープの種類と設置間隔の設計を行えば, 天井を受け止めた際に展開ロープに生じる張力は許容張力以下となり, 全面脱落した天井を受け止めることができると言える.

一方, 吊り材や吊り材と展開ロープを固定するブラケット等の設計では, 展開ロープの破断荷重に相当する荷重が作用した状態でも許容引張荷重以下になるよう設計した. なお, 吊り材の設計では, 両方のネット構造の展開ロープの破断荷重の合力が作用すると仮定して照査した. 落した天井をきちんと受け

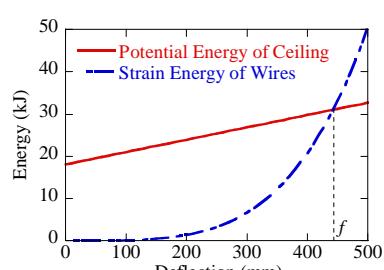
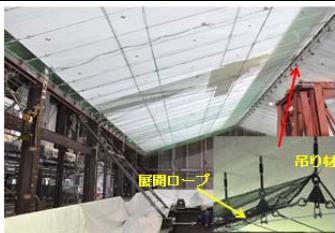


図 2 エネルギーの釣り合い

表1 フェイルセーフ機能の設計

| 項目                | 仕様  |
|-------------------|---|
| 天井の落下エネルギー $E_c'$ | 31.2kJ                                      |
| 展開ロープ             | ロープ仕様 $\phi 10\text{mm} 7\times7\text{G/O}$ |
|                   | 断面積 $48.7\text{mm}^2$                       |
|                   | 弹性係数 $137\text{kN/mm}^2$                    |
|                   | 破断荷重 $64.4\text{kN}$                        |
|                   | 許容張力 $32.2\text{kN}$                        |
|                   | 固定距離 $9.3\text{m}$                          |
|                   | 設置本数 $37\text{本}(800\text{mm 間隔})$          |
|                   | 初期たわみ $f_0$ $0.02\text{m}$                  |
|                   | 許容たわみ $f'$ $0.45\text{m}$                   |
|                   | 初期たわみによる伸び $\Delta l_0$ $0.4\text{mm}$      |
|                   | 許容たわみが生じたときの伸び $\Delta l$ $58.5\text{mm}$   |
|                   | 初期張力 $T_0$ $0.2\text{kN}$                   |
|                   | 許容たわみが生じたときの張力 $T$ $30.6\text{kN}$          |
|                   | ひずみエネルギー $E_r'$ $33.2\text{kJ}$             |
| 吊り材               | 使用材料 S25C                                   |
|                   | 直径 $\phi 22\text{mm}$                       |
|                   | 断面積 $380\text{mm}^2$                        |
|                   | 許容引張荷重 $83.6\text{kN}$                      |
|                   | 設置間隔 $800\text{mm}$                         |
| その他(ガセットプレート等)の材料 | SS400                                       |

写真1 フェイルセーフ機能  
の端部については、H200×200 を柱間にピン接合し、これに固定することとした。

展開ロープの上には、天井脱落に伴い発生する破損したクリップ等も受け止められるよう建築現場で一般的に使用される目合い30mmの養生ネットを設置した。

表1は、大規模空間に設置された吊り天井の加振実験に用いる試験体に対し、上述した方法で設計したフェイルセーフ機能についてまとめた表である。また、写真1に実際に試験体内部に設置したフェイルセーフ機能を示す。

### フェイルセーフ機能の加振実験による検証

大規模空間に設置された吊り天井の加振実験では、耐震対策のない既存の天井(未対策天井)を対象とした実験ではK-NET仙台波50%の加振実験で、平成26年4月施行の技術基準による天井(耐震天井)では、JMA神戸波100%の加振実験で、天井脱落被害が発生し、フェイルセーフ機能により脱落した天井を受け止めた。写真2に加振実験後のフェイルセーフ機能を示す。なお、これらの加振実験での詳細な天井被害の状況については、その7～その9を参照いただきたい。

未対策天井の実験では、K-NET仙台波50%加振により約

60m<sup>2</sup>の石膏ボードと岩綿吸音板が野縁とともに脱落した。フェイルセーフ機能はこれらのボード類を受け止め、加振後の損傷調査でも大きな損傷もなかった。外れたクリップなどもネットで受け止められている。

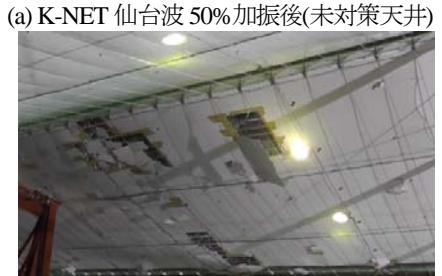
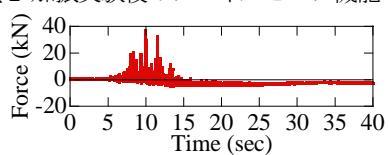


写真2 加振実験後のフェイルセーフ機能

図3 展開ロープに作用した張力  
の測定結果。最大値約40kNの波形を示す。

一方、この展開ロープに落ちた天井ボードは、集録した映像から確認すると約5m<sup>2</sup>(石膏ボード3枚程度)であり、重量に換算すると約540Nである。この重量は、展開ロープ直上にある天井面積からすると、およそ半分のボードが脱落したことになる。しかし、表1に示したとおり、測定された張力の最大値は、全面脱落したと想定し求めた張力と同程度であることから、実際に全面脱落した場合には、設計想定の2倍程度の荷重が作用することも考えられる。さらなる検証を進めたい。

この耐震天井の実験に使用した展開ロープを2本取りだし、残存耐力を引張試験にて確認したところ、73.0kNと77.0kNであった。ただし、残存耐力が73.0kNであったロープは、引張試験では素管の割れによる破断が生じたことから、実験により何らかの損傷を受けた可能性もあるため、注意が必要である。

### まとめ

本報では、大規模空間に設置された吊り天井の脱落による被害を抑えるためのフェイルセーフ機能の設計とその有効性についてまとめた。加振実験により、細かい金具まで受け止めることができ、有効であったことは確認されたが、脱落による衝撃で設計想定の2倍程度の張力が作用していた。フェイルセーフ機能の設計精度の向上に向け、今後、実験結果を詳細に検討していきたい。

### 参考文献

- 一般社団法人 建築性能基準推進協会：建築物における天井脱落対策に係る技術基準の解説、2013。

\*1 (独)防災科学技術研究所

\*2 東京製綱㈱

\*1 National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

\*2 Tokyo Rope MFG. Co. Ltd.