

# 天井の耐震性に関する研究

## (その12) ルーバー天井の面内変形評価

正会員 ○小林 俊夫\*<sup>1</sup>

ルーバー天井 耐震天井 野縁受け 面内変形 クリップ 回転剛性

### 1. はじめに

ルーバーを用いて天井を構成する工法の一例として野縁受けからクリップを介して直接ルーバーを設置する場合がある(写真1)。このときルーバー方向の地震時水平力に対しては野縁受けの曲げ剛性で抵抗することになるが、実験結果によるとクリップ(写真2、3)の水平面内の回転剛性が野縁受けの曲げ変形を拘束する効果が確認できたので、この効果を定量的に評価することでより合理的な耐震ルーバー天井を提供すべく定式化し、その妥当性を実験により確認した。

### 2. 定式化

図1の表記を用い対称条件より左半分を解析対象とすると、クリップの曲げ戻しモーメント  $\Delta Ma(x_i)$  は(1)式で表わされる。

$$\Delta Ma(x_i) = K\theta \times dy(x_i)/dx \quad (1)$$

ここに、 $K\theta$ はクリップの水平面内の回転剛性である。

ステップ関数として離散化している曲げ戻しモーメント( $\Delta Ma(x_i)$ )を、取り扱いの簡略化を目的として連続モーメント( $m(x)$ )へ近似置換する。

$$\begin{aligned} dm(x)/dx &\doteq \Delta Ma(x_i)/\Delta L \\ &= (K\theta/\Delta L) \times dy(x)/dx = k\theta dy(x)/dx \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 $k\theta = K\theta/\Delta L$ 、 $\Delta L$ : ルーバーの配置ピッチ

#### 実験結果を対象とした定式化

ブレース間中央加力( $P=2Q_0$ )時に野縁受けに作用する曲げモーメント  $M(x)$  は(4)式となる。

$$M(x) = Q_0 x - m(x) \quad (4)$$

曲げの釣り合い式は(5)式となる。

$$EI d^2y(x)/dx^2 = -M(x) = -Q_0 x + m(x) \quad (5)$$

$$EI d^3y(x)/dx^3 = -Q_0 + dm(x)/dx = -Q_0 + k\theta dy(x)/dx \quad (6)$$

$$EI d^3y(x)/dx^3 - k\theta dy(x)/dx = -Q_0$$

この微分方程式の解は同次解と特解の和として未定係数A、B、Cを用いて(7)式で表される<sup>1)</sup>。

$$y(x) = A \exp(\lambda x) + B \exp(-\lambda x) + (Q_0/k\theta)x + C \quad (7)$$

未定係数A、B、Cは境界条件( $y(0) = 0$ 、 $d^2y(0)/dx^2 = 0$ 、 $dy(L)/dx = 0$ )で決定され、最終的には(8)式となる。

$$\begin{aligned} y(x) &= (Q/(\lambda^2 EI)) ((\exp(-\lambda x) - \exp(\lambda x)) \\ &\quad / (\lambda (\exp(\lambda x) + \exp(-\lambda x))) + x) \end{aligned} \quad (8)$$

#### 耐震設計を対象とした定式化

ブレース間に等分布荷重( $w$ )が作用した時に野縁受けに作用する曲げモーメント  $M(x)$  は(9)式となる。



写真1 ルーバー天井

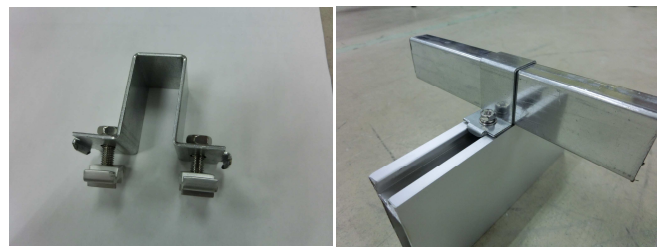


写真2 クリップ

写真3 接続部

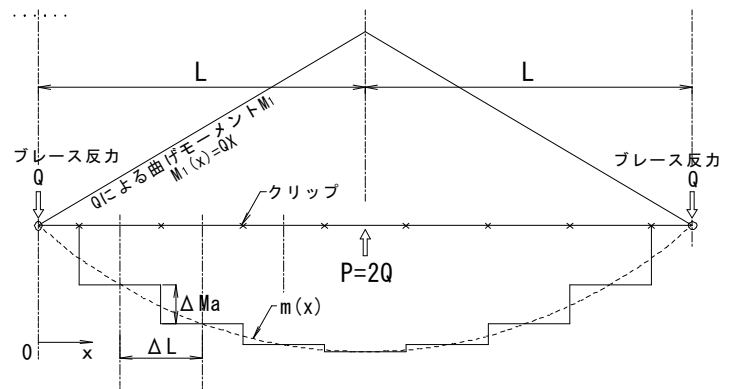


図1 定式化のための記号および座標系の定義

$$M(x) = wx(L - x/2) - m(x) \quad (9)$$

以降の手続きは前例の(5)、(6)式に倣い、(7)、(8)式に対応する表現は(10)、(11)式となる。

$$\begin{aligned} y(x) &= A \exp(\lambda x) + B \exp(-\lambda x) + (wL/k\theta)x \\ &\quad - (w/(2k\theta))x^2 + C \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} y(x) &= (w/(\lambda^2 k\theta)) ((\exp(-\lambda x)\exp(\lambda L) \\ &\quad + \exp(\lambda x)\exp(-\lambda L))/(\exp(\lambda x) + \exp(-\lambda x)) \\ &\quad - 1 + \lambda^2 Lx - \lambda^2 x^2/2) \end{aligned} \quad (11)$$

### 3. 実験結果との比較

#### クリップの水平面内回転剛性測定実験

クリップの回転剛性を加力実験で評価する際、野縁受け(C-40-20-1.6)の曲げ変形を避けるため外形は野縁受けと同じで剛性が高い鋼管(□-40-20-1.6)を写真4に示すよう

にルーバーにクリップで接続し、モーメントを加力した。実験結果得られたモーメント-回転角の関係を図3に示す。これより図4におけるb点の部材角(40/1200=0.033)を参考に $K_{\theta}$ として図3のPQ間の傾きを採用し(12)式とした。

$$K_{\theta} = 417,000 \text{ N mm/rad} \quad (12)$$

### 天井ユニットに対する静的加力実験

図2に示す試験体に対し中央にジャッキで水平力を加えた。試験体両端の支持部( $d_s, d_n$ )に対する中央部( $d_c$ )の相対変形( $d = d_c - (d_s + d_n)/2$ )と加力との関係を図4に示す。同図より、安定的な直線部分(ab間)の傾きから面内剛性( $K_0$ )を求めると(13)式となる。

$$K_0 = (870\text{N} - 220\text{N}) / (40\text{mm} - 8\text{mm}) = 20.31\text{N/mm} \quad (13)$$

一方、式(8)より求まる剛性( $K_1$ )は(14)式となる。

$$K_1 = P/y(L) = 2Q_0/y(L) = 21.48\text{N/mm} = 1.06K_0 \quad (14)$$

同じく、クリップの回転拘束を考慮しない単純梁としての剛性( $K_2$ )は(15)式となる。

$$K_2 = 48EI / (2L)^3 = 9.16\text{N/mm} = 0.45K_0 \quad (15)$$

クリップの回転拘束を考慮した $K_1$ は実験結果 $K_0$ より若干大きい剛性となっているが設計的には許容範囲であろう。

一方、クリップの回転拘束を考慮せず単純梁とした場合の $K_2$ は実験結果 $K_0$ の約半分の剛性となっている。

### 4. 試設計

静的水平震度に対する面内変形の基本特性を把握する目的で、平面形状が正方形で各辺の中央に辺に平行にV字ブレースを一組配置した各種サイズの天井に対し、(12)式の値に基づき(11)式により面内変形を評価した。表1にその結果を示す。2.4m角の場合は本法によると面内変形が18mm程度で単純梁想定時はその2.4倍になるのに対し、4.8m角の場合は本法によると120mm程度で単純梁想定時はその6.6倍になる。

### 5. おわりに

ルーバーを野縁受けに直接接合する天井工法に関し、両者を接合するクリップがルーバー方向地震時水平力による野縁受けの曲げ変形を拘束する効果に着目し、より合理的な天井の設計とすべく天井の面内変形の算定にこれを考慮した評価法を提案した。まず実験によりその有効性を確認し、さらにこの効果を考慮した試設計例を提示した。

天井と周辺壁との衝突を避けるためにはこの面内変形のほかにさらにブレース系の変形と建物本体の層間変形分を考慮する必要があるが、これらに関しては既に過去に蓄積された知見が転用できる。

野縁受け方向地震時水平力に対してはルーバーに十分な曲げ剛性があるので面内変形はほとんど生じない。

<謝辞> 実験実施に際しアイカ工業株式会社殿よりルーバー及びクリップ留め具を提供して頂きました。記して謝意を表します。

参考文献1)：例えば、「微分方程式 [東京大学基礎工学 2]」、東京大学応用物理学教室、東京大学出版会、1965年3月25日 第5刷

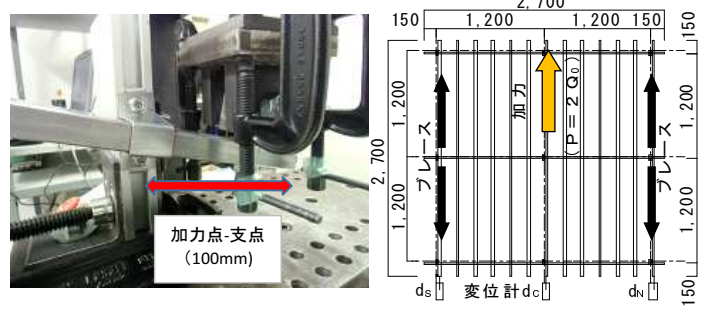


写真4 クリップの回転剛性測定実験状況

図2 天井ユニットの試験体平面図

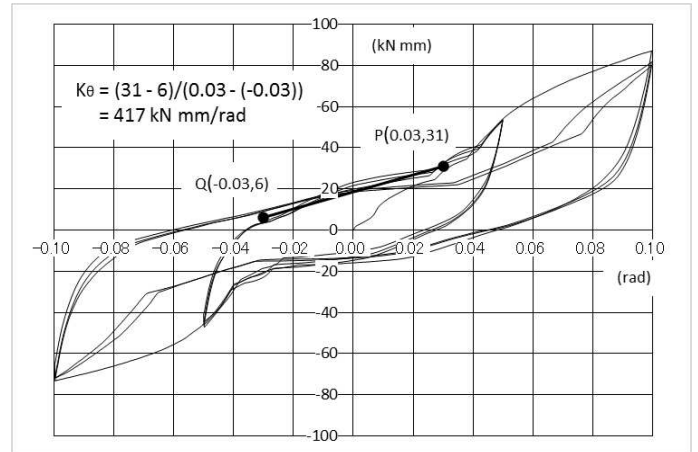


図3 クリップの水平面内回転剛性測定実験結果

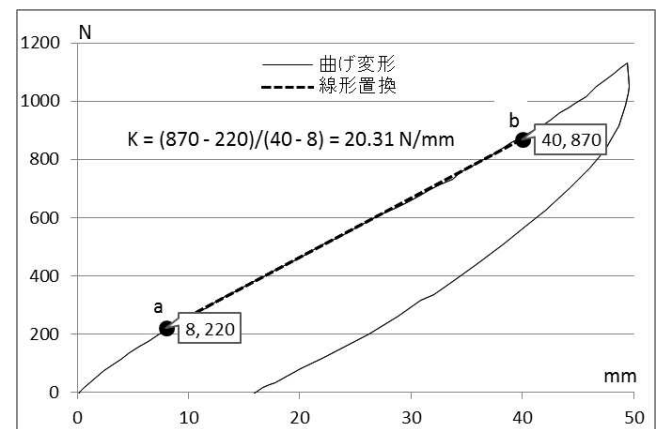


図4 天井ユニットに対する静的加力実験結果

表1 ルーバー天井の試設計

| 天井サイズ TL×D                   | 2.4m×2.4m   | 3.6m×3.6m   | 4.8m×4.8m   |
|------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| 天井幅 TL                       | 2400 mm     | 3600 mm     | 4800 mm     |
| 天井奥行 D                       | 2400 mm     | 3600 mm     | 4800 mm     |
| 野縁受け本数 n                     | 3 本         | 4 本         | 5 本         |
| 天井半幅 L                       | 1200 mm     | 1800 mm     | 2400 mm     |
| 無次元化固有値 ζ                    | 1.847       | 2.771       | 3.695       |
| 総重量 W                        | 28.8 kg     | 64.8 kg     | 115.2 kg    |
| 一本当り分布荷重 w                   | 0.0862 N/mm | 0.0970 N/mm | 0.1035 N/mm |
| 中央面内変位 y <sub>2</sub> (L)    | 17.7 mm     | 58.2 mm     | 123.0 mm    |
| 単純梁想定 y <sub>2</sub> (L)     | 42.3 mm     | 241.2 mm    | 813.1 mm    |
| 倍率 = y <sub>2</sub> (L)/y(L) | 2.4         | 4.1         | 6.6         |

| 共 通 事 項                 |                          |                         |
|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 野縁受 C40 20 1.6 I        | 4291.5 mm <sup>4</sup>   | 単位幅当回転ばね k <sub>θ</sub> |
| ヤング率 E                  | 205000 N/mm <sup>2</sup> | 固有値 λ                   |
| 設計震度 k                  | 2.2                      | 面密度 ρ                   |
| ルーバーピッチ ΔL              | 200 mm                   | 野縁受けピッチ ΔD              |
| クリップ回転ばね K <sub>θ</sub> | 417000 N mm              |                         |

\*1 桐井製作所 工学博士