

天井に生じる慣性力を負担する壁に関する研究

(その9) スタッド降伏発生時の考察

キーワード：鋼製下地 間仕切り壁
振動台実験 壁支持天井

正会員 ○小林 俊夫*1

1. はじめに

耐震天井の工法の一例として、天井の地震時水平力を周辺の間仕切壁に負担させるケースを想定し、昨年は間仕切壁に対する静的加力実験を実施し、本年は壁と天井に対し振動台を用いた動的振動実験を実施した。本報では天井と壁の衝突と、スタッドの降伏発生との関係について、主に試験体 Case4-1 (前報¹⁾ 参照) を対象として考察する。

2. 実験結果

すべての試験体の終局状況は、天井に破壊は生じず壁の降伏で終了した。試験体 Case4-1 についてスタッドの降伏発生前後の 0.3 秒間における天井と衝突側壁の変位及び天井面中央加速度の三者の時刻歴を重ねて図 1 に示す。衝突の瞬間には天井面に最大で 4G 前後の大きな加速度が発生しているが、ビデオ観察によるとこの衝突の瞬間には損傷は発生していない。衝撃時のパルスの加速度は損傷を発生させるだけのパワーが無い。損傷は変位振幅のピーク付近で発生している。すなわち、衝突が終了し、天井と壁が一体となって (反発係数 $e = 0$)、両者の速度が持つ運動 Energy が壁を押し続け、それが壁の曲げ変形 Energy に変換される時、運動 Energy が壁の曲げ変形 Energy の吸収限界を超えた時点で損傷が発生している。

損傷形態はスタッドの降伏で、天井面からの加力位置において曲げ応力の圧縮側(天井側)のフランジに局部座屈が発生して曲げ降伏している。この降伏モードは静的実験と振動実験とで共通であった。

3. 衝突時エネルギーの分析

天井と壁の衝突に対して剛体同士の衝突理論を適用する。

M, V : それぞれ天井の質量、速度

m, v : それぞれ衝突側壁の質量、速度

η : 天井と衝突側壁の合計の重心の速度

右添え字(j)の意味: $j=1 \rightarrow$ 衝突前、 $j=2 \rightarrow$ 衝突後
重心の速度の定義より

$$\eta_j = (MV_j + mv_j) / (M + m) \quad \rightarrow \quad MV_j + mv_j = (M + m) \eta_j \quad (1)$$

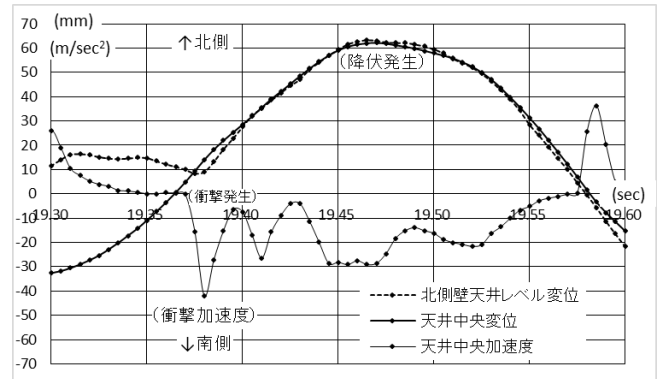
$$\text{運動量保存則より} \quad MV_1 + mv_1 = MV_2 + mv_2 \quad (2)$$

$$(1) \text{式と}(2) \text{式より} \quad \eta_1 = \eta_2 \quad (3)$$

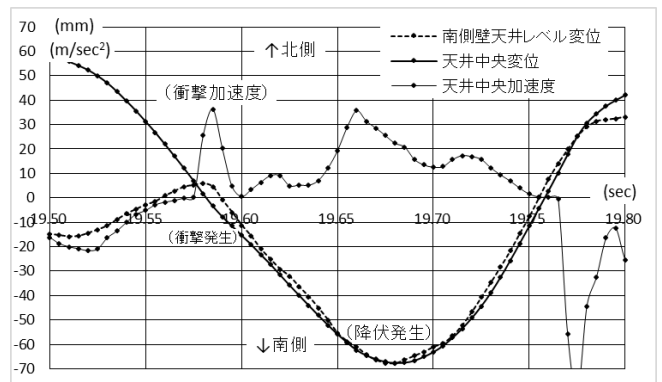
すなわち、衝突の前後で重心の速度は変化しない。

全体の運動 Energy E_j は

$$E_j = (1/2)MV_j^2 + (1/2)mv_j^2 \\ = (1/2) \left((MV_j + mv_j)^2 / (M + m) + Mm(V_j - v_j)^2 / (M + m) \right)$$



(a) 北側壁と天井



(b) 南側壁と天井

図 1 降伏発生前後の 0.3 秒間の変位及び加速度時刻歴

$$= (1/2) (M + m) \eta_j^2 + (1/2) (Mm / (M + m)) (V_j - v_j)^2$$

$$= {}_c E_j (\text{重心速度の Energy}) + {}_r E_j (\text{相対速度の Energy})$$

$${}_c E_j = (1/2) (M + m) \eta_j^2 \quad (3) \text{式より} \quad {}_c E_1 = {}_c E_2 \quad (4)$$

$${}_r E_j = (1/2) (Mm / (M + m)) (V_j - v_j)^2 \quad (5)$$

$$\text{反発係数}(e) \text{の定義式} \quad (V_2 - v_2) = -e(V_1 - v_1) \quad \text{より} \\ {}_r E_2 = e^2 {}_r E_1 \quad (6)$$

衝突に伴う消失 Energy を ΔE とすると

$$\Delta E = E_1 - E_2 = ({}_c E_1 + {}_r E_1) - ({}_c E_2 + {}_r E_2) \\ = ({}_c E_1 + {}_r E_1) - ({}_c E_1 + e^2 {}_r E_1) = (1 - e^2) {}_r E_1 \\ = (1/2) (Mm / (M + m)) (1 - e^2) (V_1 - v_1)^2 \quad (7)$$

すなわち、衝突に伴う消失 Energy ΔE は、

$(V_1 - v_1)^2$: 衝突前の相対速度に関わる因数

$(1 - e^2)$: 反発係数に関わる因数

$Me = (Mm / (M + m))$: 有効質量 Me に関わる因数

の三つの因数の積の $(1/2)$ になっている。

衝突に伴う消失 Energy ΔE の主な要因としては、

- 天井や壁の破壊や塑性変形として消費
 - 天井や壁の内部振動(熱も含む)となりやがて減衰
 - 音や空気振動として散逸
- 等が考えられる。

4. 有効質量

ここに、有効質量 M_e と質量比 p 、さらに質量有効係数 $f(p)$ を以下のように定義する。

$$M_e = Mm / (M + m), \quad p = m/M, \quad f(p) = p / (1 + p) \quad (8)$$

その結果、

$$M_e = M \times f(p) \quad (9)$$

となる。即ち、衝突に伴う消失 Energy ΔE ((7)式) に関与する有効質量 M_e は、天井質量 M の $f(p)$ 倍になる。

p の関数 $f(p)$ を図 2 に示す。これには以下の特徴がある。

- 天井に比べ壁側の質量が大きいと ($p \rightarrow$ 大) 有効質量 M_e は天井質量 M に近づく。
- 天井と壁の質量が等しいとき ($p = 1$) 有効質量 M_e は天井質量の半分になる。
- 天井に比べ壁の質量が小さくなると ($p \rightarrow$ 小) 有効質量 M_e は 0 に近づく。

従って天井の周辺を質量の大きな構造体で支持した場合と、質量の小さな間仕切壁で支持した場合とを比較すると、前者は衝突により損傷が発生しやすいのに対し、後者は衝突による損傷が発生しにくい。

5. 衝突時の加速度分布形

図 3 に衝突発生時と直後の天井と南北壁の各測点 (測点配置は文献¹⁾を参照) における加速度応答時刻歴を示す。

天井の加速度応答は各点同位相となっていて、天井全体が剛体的に反応していることがわかる。これは衝撃力が天井の面内方向に作用するためである。

南北壁の加速度応答は各点毎に位相が異なり、壁全体が剛体的には反応していないことがわかる。これは衝撃力が壁の面外方向に作用するためである。従って衝突現象における壁の質量効果は、壁全体が関与するのではなく衝突部分近傍のみが関与するものと思われる。その効果は (8) 式における p を減少させ、(7) 式の損傷 Energy ΔE を減少させる。

6. おわりに

振動実験結果の内、試験体 Case4-1 の降伏発生前後の記録を分析することにより以下の結論を得た。

- 破壊は衝突時の衝撃では発生しなかった。
- 衝突時の衝撃で破壊が発生しない原因として衝突に伴う消失 Energy ΔE に関与する有効質量の減少が考えられる。
- 衝突終了後は天井と天井高さの壁とが一体となって変位している。これより、反撥係数 $e = 0$ と考えられる。
- 損傷は衝突終了後の運動 Energy が壁を押し続けることによりスタッドの曲げ降伏として発生した。

参考文献

- 1) 刀禰勇郎他: 天井に生じる慣性力を負担する壁に関する研究(その5) 振動台実験概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、2016年8月

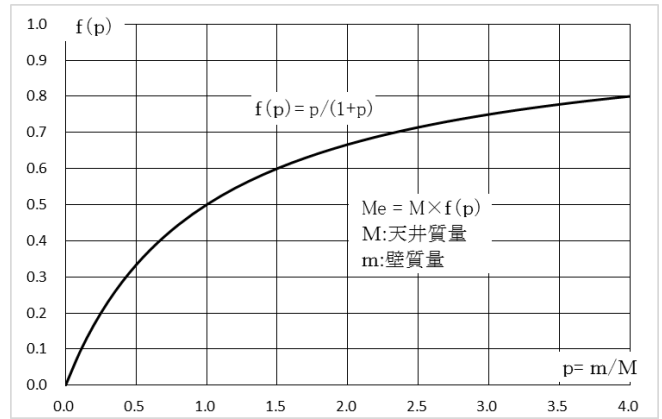
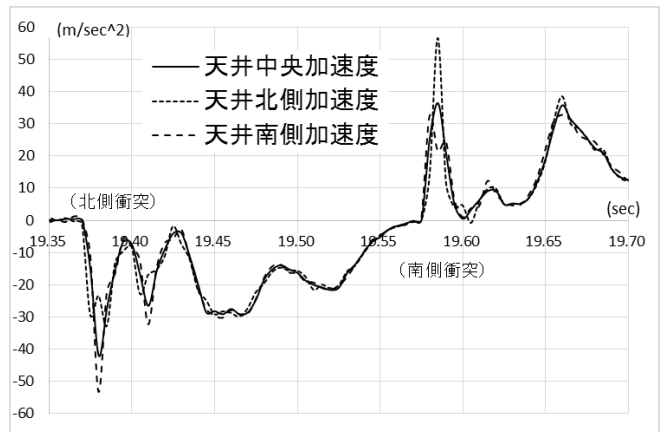
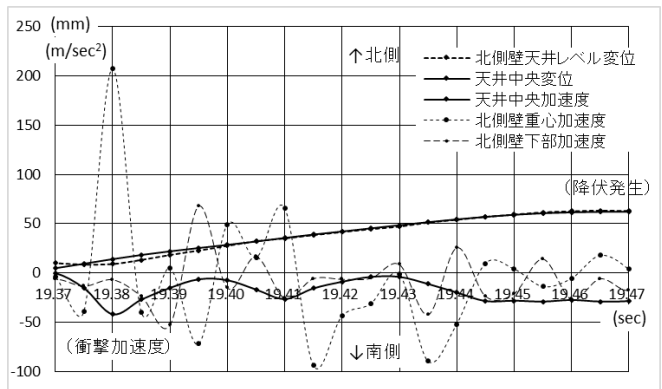


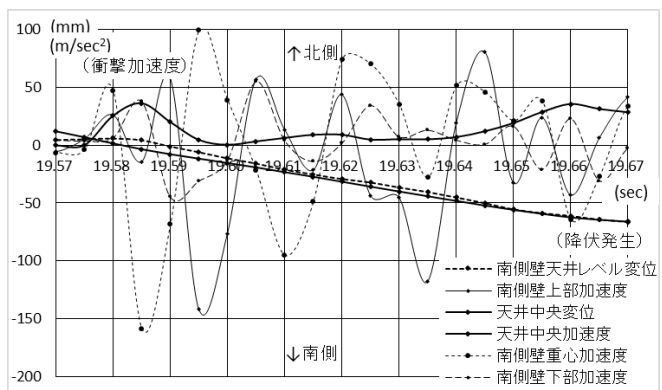
図 2 質量有効係数 $f(p)$



(a) 天井



(b) 北側壁



(c) 南側壁

図 3 衝突時の加速度分布形

*1 桐井製作所 工学博士