

面外振動数に着目した 2 段積み ALC 間仕切壁の構造 2 次部材選定法の検討

SELECTION METHOD OF STRUCTURAL SUB-MEMBERS FOR PARTITION WALLS MADE OF STACKED ALC-PANELS BASED ON FREQUENCY FOR OUT-OF-PLANE BEHAVIOR

石田 琢志*¹, 石原直*², 松下 健一*³, 田口 尚*³, 渡壁 守正*⁴

Takushi ISHIDA, Tadashi ISHIHARA, Ken'ichi MATSUSHITA,
Hisashi TAGUCHI and Morimasa WATAKABE

In the Great East Japan Earthquake, many large-scale partition walls made of stacked ALC(AAC) panels were damaged. Those walls are constructed with intermediate sub-beams. Strong motion observations and shaking table tests by authors clarified that large vibrations in out-of-plane direction can occur in those walls during earthquakes. A countermeasure to suppress vibrations is to select stiff members enough to keep high frequencies. In this paper, simplified formulas for calculating out-of-plane natural frequencies are established based on the results of shaking table tests. According to the formulas, we propose a practical selection method of structural sub-members as in a tabular form. And also, validations of the proposed selection method are discussed by comparing the results by FEM.

Keywords : ALC panel, Intermediate sub-beam, Out-of-plane vibration, Natural frequency, FEM
ALC パネル, 中間梁, 面外振動, 固有振動数, FEM

1. はじめに

東日本大震災における 2 段積み ALC 間仕切壁の地震被害¹⁾を踏まえ、これまでに被災建築物における地震観測²⁾や振動台実験³⁾による検討を行ってきた。縦壁ロッキング構法等を採用することで面内の強制変形に対する追従性は高いと考えられるが、地震時には比較的大きな面外方向の振動・変形が生じうることを明らかにした。間仕切壁の面外振動を抑えるためには、間仕切壁単体の固有振動数を把握して、設置される建築物との共振が生じないようにすることが考えられるが、固有振動数を正確に把握するためには詳細なモデル化が必要となるため³⁾、実務上で扱うことは難しく、設計手順としても煩雑となかなかねない。そこで、間仕切壁に一定以上の固有振動数を持たせることで地震時の面外振動を抑制することを目指し、実務上で活用できるような比較的簡易な方法を検討することとした。

本稿では中間梁を渡して ALC パネルを 2 段積みとする間仕切壁を対象とし、実験結果を踏まえた面外方向の固有振動数の略算法と、それによる中間梁や間柱といった構造 2 次部材の断面選定法を提案する⁴⁾。また、選定法の妥当性を FEM により検証した結果についても併せて示す⁵⁾。

2. 中間梁のある間仕切壁の振動数の略算法と部材選定表

本稿では柱間に中間梁のみが設置される場合を扱

う。間柱が入る場合は次章で取り上げる。機構は本文中のほか、付録でも説明する。

2.1 一定以上の振動数を確保するための略算法

図-1 のような 1 質点 1 自由度系を考える。図中の記号は、 M が質量、 K が剛性、 ω が固有円振動数 ($\omega = \sqrt{K/M}$)、 k が水平震度、 g が重力加速度である。間仕切壁の面外方向振動に関して 2 段積みを想定し、質量 M は上下パネルの 1/2 ずつの質量とする。

地震力 kMg が作用した場合の静的な変位を Δ とすれば、固有振動数を $f (= \omega/2\pi)$ として、

$$\Delta = kMg / K = kg / \omega^2 = kg / (2\pi f)^2 \quad (1)$$

図-2 のような中間梁の面外方向のたわみ形状(モード)をサイン半波とすると、梁中央の変位 δ と単純な 1 質点 1 自由度系(図-1)の変位 Δ との関係は、 $\Delta = (\pi/4)\delta = 0.79\delta$ となるので、次のようにおく。

$$\Delta \approx (4/5)\delta \quad (2)$$

単純梁が等分布荷重(単位長さ当たりの荷重を w とする。)を受ける場合のたわみで振動モードを代用すれば、

$$\delta = 5wL^4 / 384EI_{eq} \quad (3)$$

ここで、 L は梁の長さ、 E は梁(鋼材)のヤング率であり、 I_{eq} は略算用の断面 2 次モー

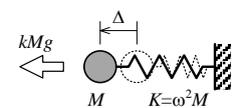


図-1 1 質点 1 自由度系

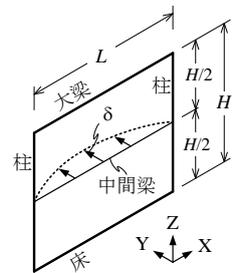


図-2 中間梁のたわみ

*1 戸田建設株式会社技術開発センター 修士(工学)

*2 国土交通省国土技術政策総合研究所 博士(工学)
(元(国研)建築研究所)

*3 ALC 協会

*4 広島工業大学 教授・工博

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M. Eng.

Nat'l Inst. for Land and Infrastructure Management, Dr. Eng.

(Formerly, Building Research Institute)

ALC Association

Prof. Hiroshima Institute of Technology, Dr. Eng.

メント（後述）の値とする。wは次式で表せる。

$$w = kg(m_b + \rho tH/2) \quad (4)$$

ここで、 m_b は中間梁の単位長さ当たりの質量、 ρ はALCパネルの単位容積質量、 t はALCパネルの厚さ（本稿では全て $t=100\text{mm}$ ）、 H は階高、である。

式(2)(3)(4)を考慮すると式(1)は次式のように変形できる。

$$L = \frac{1}{\sqrt{\pi f}} \left(\frac{24EI_{eq}}{m_b + \rho tH/2} \right)^{1/4} \quad (5)$$

この式は階高 H の間仕切壁に対してある中間梁の断面を仮定した場合に所要の固有振動数 f を満足するための最大のスパン L を与える。この式は水平震度 k によらないので、地震力を具体的に決めなくとも、壁の固有振動数を確保するのに利用できる。

2.2 略算用の断面2次モーメント

前節で導入した略算用の断面2次モーメント I_{eq} について、既報³⁾の実験における試験体の1次固有振動数を参照して検討する。図-3に試験体の概要、図-4に中間梁が縦使いの場合の断面図、表-1に試験体一覧を示す。高さと同幅（スパン）がそれぞれ約6mの鉄骨のフレームに中間梁H-194×150×6×9を設けてALCパネルを2段積みとしたものである。中間梁は縦使いと横使いの場合がある。固有振動数は4.3～5.5Hzであった。詳細は既報³⁾を参照されたい。

まず、縦使いの場合を検討する。図-4(a)の断面で定規アングルは中間梁に溶接接合されているため、壁の面外方向への曲げ抵抗に対して定規アングルが寄与することが考えられた。そこで、中間梁と定規アングルとの合成断面として後述の式(7)より固有振動数を求めると、実験の4.3Hzに対して4.28Hzとなり、比較的正確な値が得られた。

しかし、現実的には定規アングルの位置を物件ごと、壁ごとに判定するのは煩雑であり実務向きでない。小さめの断面で評価した振動数が一定以上であれば、実際にはより高振動数となるので、中間梁単独の断面2次モーメントを採用する。すなわち、

$$\text{縦使い: } I_{eq} = I \quad (6)$$

次に、横使いの場合を検討する。振動台実験における横使いの試験体（表-1のNo.2）で固有振動数は5.5Hzであったのに対して、中間梁を単純梁（ねじれなし）と考えた場合の計算値7.2Hzであった³⁾。単純梁の曲げねじれ振動で評価すると5.2Hzで実験値に近いが、取り付け詳細等が関係するため実務的には煩雑になる。

単純梁の固有振動数の計算値は次のとおりである。

$$f_1 = \omega_{b1} / 2\pi = \left\{ \pi / (2l^2) \right\} \sqrt{EI / m} \quad (7)$$

ここで、 f_1 : 曲げの1次固有振動数、 ω_{b1} : 曲げの1次固有円振動数、 l : 梁の長さ、 I : 梁の断面2次モーメント、 m : 単位長さ当たりの質量、である。

式(7)より、1次固有振動数 f_1 は断面2次モーメント I の平方根に比例する。実験値と計算値との比を用いて、横使いでの略算用の断面2次モーメント I_{eq} を

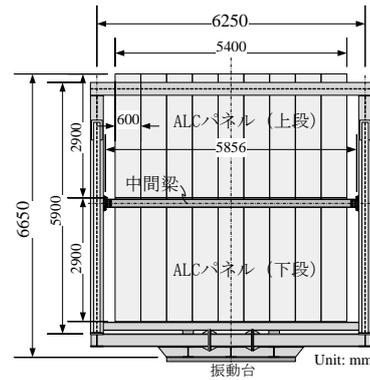
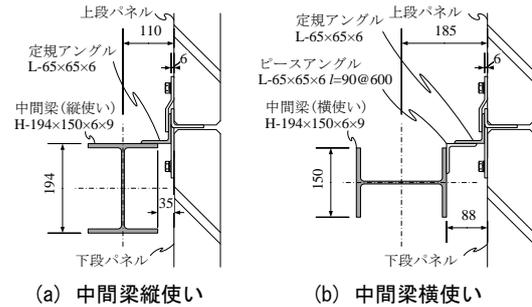


図-3 試験体概要³⁾



(a) 中間梁縦使い (b) 中間梁横使い

図-4 中間梁とパネル取付部の断面図

表-1 試験体一覧

No.	中間梁		ALCパネル		固有振動数 (Hz)
	向き	端部	埋設アンカー	重量 (N/枚)	
1	縦	ピン	標準	1,343	4.3
2	横	ピン	標準	1,273	5.5
3	縦	剛	高荷重	1,277	4.5

表-2 中間梁（縦使い）の断面によるスパンの制限値（式(5)、 $f=5\text{Hz}$ ）

設定振動数 f (Hz)	t (m)	階高 H (m)			備考
		5.8	7.8	9.8	
5.0	0.1				
中間梁の断面	I_x (cm ⁴)	m_b (kg/m)	最大スパン L (m)		
H-148×100×6×9	150	20.7	3.5	3.2	3.1
H-150×150×7×10	563	31.1	4.8	4.5	4.2
H-194×150×6×9	507	29.9	4.6	4.3	4.1 試験体
H-200×200×8×12	1600	49.9	6.0	5.7	5.4
H-250×125×6×9	294	29.0	4.1	3.8	3.6
H-244×175×7×11	984	43.6	5.4	5.1	4.8
H-250×250×9×14	3650	71.8	7.3	6.9	6.6 検証対象
BH-250×250×13×18	4691	92.5	7.6	7.2	6.9 検証対象
H-298×149×5.5×8	442	32.0	4.5	4.2	4.0
H-300×150×6.5×9	508	36.7	4.6	4.3	4.1
H-294×200×8×12	1600	55.8	6.0	5.7	5.4
H-300×300×10×15	6750	93.0	8.3	7.9	7.6
BH-300×300×15×20	9007	124.8	8.7	8.3	8.0 検証対象

表-3 中間梁（横使い）の断面によるスパンの制限値（式(5)、 $f=5\text{Hz}$ ）

設定振動数 f (Hz)	t (m)	階高 H (m)			備考
		5.8	7.8	9.8	
5.0	0.1				
中間梁の断面	I_x (cm ⁴)	m_b (kg/m)	最大スパン L (m)		
H-148×100×6×9	1000	20.7	4.9	4.6	4.3
H-150×150×7×10	1620	31.1	5.5	5.1	4.9
H-194×150×6×9	2630	29.9	6.2	5.8	5.5 試験体
H-200×200×8×12	4720	49.9	7.0	6.6	6.3 検証対象
H-250×125×6×9	3960	29.0	6.8	6.4	6.1 検証対象
H-244×175×7×11	6040	43.6	7.5	7.0	6.7 検証対象
H-250×250×9×14	10700	71.8	8.4	7.9	7.6
BH-250×250×13×18	13196	92.5	8.7	8.2	7.9 検証対象
H-298×149×5.5×8	6320	32.0	7.7	7.2	6.8
H-300×150×6.5×9	7210	36.7	7.9	7.4	7.0
H-294×200×8×12	11100	55.8	8.6	8.1	7.7
H-300×300×10×15	20200	93.0	9.6	9.1	8.8
BH-300×300×15×20	25757	124.8	10.0	9.5	9.1

次のようにおく（記号「≡」は定義）。

$$\text{横使い: } I_{eq} \equiv (f_1 \text{ 実験} / f_1 \text{ 計算})^2 I = (5.5 / 7.2)^2 I \approx 0.6 \cdot I \quad (8)$$

すなわち、横使いの場合には低減係数0.6を掛ける。低減するのは縦使いに比べて中間梁のねじれの影響

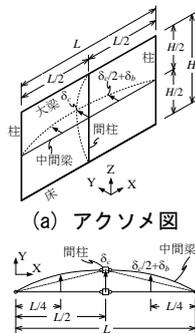
が大きいためである³⁾。なお、持ち出し長さや間柱の影響は考えていないことに注意する。

2.3 スパンの制限値の例

例として、振動数を $f=5\text{Hz}$ とし、スパンの制限値 L を求めると縦使いの場合は表-2、横使いの場合は表-3 のようになる。ここで、 $E=205 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ 、 $\rho=650 \text{ kg/m}^3$ ⁶⁾ とし、階高は $H=5.8, 7.8, 9.8\text{m}$ の 3 種類とした。スパンの制限値 L に対する階高 H の影響はあまり大きくない。何故なら $m_b = 0$ とすると $L \propto H^{-1/4}$ であり、 H が 2 倍でも L は $2^{-1/4} \approx 0.84$ 倍に過ぎないためである。例えば、試験体³⁾ に用いた $\text{H-194} \times 150 \times 6 \times 9$ の横使いで振動数 5Hz とするにはスパンは $5 \sim 6\text{m}$ 程度に制限される。 $\text{H-300} \times 300 \times 10 \times 15$ の断面でも 5Hz を確保しようとする、スパンは 10m 未満とすることがある。

3. 間柱と中間梁のある間仕切壁の振動数の略算法と部材選定表

図-5 のような均等な 2 分割を考える。間柱と中間梁とはガセットプレートを通じて接合され、互いに剛接合とみなせない場合も多いと考えられるので、間柱を通し材として中間梁は間柱にピン接合されているとする。間柱と中間梁とを剛接合とすれば交差梁として扱えるが、本稿では対象としない。



(a) アクソメ図
(b) 中間梁レベルの平面図
図-5 間柱とたわみ

3.1 間柱のたわみ制限

振動数の観点から、まず間柱中央のたわみ δ_c を制限することを考える。中間梁から伝達される集中力 P_b と自重によるたわみの和として、 δ_c は、

$$\delta_c = \frac{5(kg m_c)H^4}{384EI_c} + \frac{P_b H^3}{48EI_c} \quad (9)$$

ここで、 m_c : 間柱の単位長さ当たりの質量、 I_c : 間柱の断面 2 次モーメントである。集中力 P_b には中間梁の自重の影響もあるが、まずは中間梁によらずに間柱の断面を選定することを考えて、次のようにおく。

$$P_b = kg(\rho t L H / 4 + m_b L / 2) \approx (3/8)kg \rho t L H \quad (10)$$

ここで、パネルの質量を 1.5 倍とすることで中間梁の質量 m_b を十分に考慮できると考えている^{注1)}。

前章の 1 質点系を想定して $\Delta = (4/5)\delta_c = kg / (2\pi f)^2$ とおき、式(9)(10)を代入して整理すれば、

$$L = \frac{1}{\rho t} \left(\frac{40EI_c}{\pi^2 f^2 H^4} - \frac{5m_c}{3} \right) \quad (11)$$

この式から所要の振動数 f を満足する最大のスパン L を算定することができる。

例として、 $f=5\text{Hz}$ として種々の断面に対するスパン L を計算すると表-4 のようになる。間柱は H 形鋼とし、面外方向は強軸曲げの向きとする。階高 H の影響が大きく、 $H=10\text{m}$ ではスパン L を 10m 以上とする

表-4 間柱の断面によるスパンの制限値 (式(11), $f=5\text{Hz}$)

設定振動数 f (Hz)	t (m)	階高 H (m)			備考
		6	8	10	
5.0	0.1	最大スパン L (m)			
間柱の断面	I_c (cm ⁴)	m_c (kg/m)			
H-194×150×6×9	2630	29.9	9.6	2.5	0.6
H-200×200×8×12	4720	49.9	17.3	4.6	1.1
H-250×125×6×9	3960	29.0	14.9	4.2	1.3 検証対象
H-244×175×7×11	6040	43.6	22.7	6.4	2.0
H-250×250×9×14	10700	71.8	40.4	11.5	3.6 検証対象
H-298×149×5.5×8	6320	32.0	24.1	7.1	2.4 観測、検証対象
H-300×150×6.5×9	7210	36.7	27.5	8.1	2.7
H-294×200×8×12	11100	55.8	42.4	12.4	4.2 検証対象
H-300×300×10×15	20200	93.0	77.3	22.8	7.9
H-400×200×8×13	23500	65.4	91.0	27.7	10.3 検証対象
H-400×400×13×21	66600	172.0	258.3	78.7	29.6

表-5 中間梁 (縦使い) の断面によるスパンの制限値 (式(14), $f=5\text{Hz}$)

設定振動数 f (Hz)	t (m)	階高 H (m)			備考
		6	8	10	
5.0	0.1	最大スパン L (m)			
中間梁の断面	I_c (cm ⁴)	m_b (kg/m)			
H-148×100×6×9	150	20.7	5.8	5.4	5.1
H-150×150×7×10	563	31.1	7.9	7.5	7.1
H-194×150×6×9	507	29.9	7.7	7.3	6.9 観測
H-200×200×8×12	1600	49.9	10.1	9.5	9.1 検証対象
H-250×125×6×9	294	29.0	6.8	6.3	6.0
H-244×175×7×11	984	43.6	9.0	8.5	8.1
H-250×250×9×14	3650	71.8	12.2	11.5	11.0 検証対象
H-298×149×5.5×8	442	32.0	7.5	7.0	6.7 検証対象
H-300×150×6.5×9	508	36.7	7.7	7.2	6.9
H-294×200×8×12	1600	55.8	10.0	9.5	9.0
H-300×300×10×15	6750	93.0	13.9	13.2	12.7 検証対象

表-6 中間梁 (横使い) の断面によるスパンの制限値 (式(14), $f=5\text{Hz}$)

設定振動数 f (Hz)	t (m)	階高 H (m)			備考
		6	8	10	
5.0	0.1	最大スパン L (m)			
中間梁の断面	I_c (cm ⁴)	m_b (kg/m)			
H-148×100×6×9	1000	20.7	8.2	7.6	7.3 検証対象
H-150×150×7×10	1620	31.1	9.1	8.5	8.1
H-194×150×6×9	2630	29.9	10.3	9.7	9.2 検証対象
H-200×200×8×12	4720	49.9	11.7	11.0	10.5
H-250×125×6×9	3960	29.0	11.4	10.7	10.2 検証対象
H-244×175×7×11	6040	43.6	12.5	11.7	11.2 検証対象
H-250×250×9×14	10700	71.8	14.0	13.3	12.7 検証対象
H-298×149×5.5×8	6320	32.0	12.8	12.0	11.4
H-300×150×6.5×9	7210	36.7	13.1	12.3	11.8
H-294×200×8×12	11100	55.8	14.3	13.5	12.9
H-300×300×10×15	20200	93.0	16.1	15.3	14.7

には $\text{H-400} \times 200$ などの大きな断面にしなければならない。地震観測を行った倉庫²⁾の間柱の断面 $\text{H-298} \times 149$ では階高 $H=8\text{m}$ の場合に $L=7.1\text{m}$ となり、実際の寸法 ($H=8.4\text{m}$, $L=10.5\text{m}$) で 5Hz にするには断面がやや小さい。

3.2 中間梁のたわみ制限

間柱で分割された中間梁はその中央位置 ($L/4$ の位置) でたわみ $\delta_c/2 + \delta_b$ を生じる。ここで、 δ_c は前節の値であり、 δ_b は次式で与えるとする。

$$\delta_b = 5w(L/2)^4 / 384EI_{eq} \quad (12)$$

ここで、 w は前章と共通 (式(4)) である。

前節で間柱のたわみ δ_c を振動数から制限したので、中間梁のたわみも δ_c 以内となるようにその断面を選定する。中間梁では中央のたわみ $\delta_c/2 + \delta_b$ で代表させることにすると、

$$\delta_b = \delta_c / 2 = (5/4)kg / \{2(2\pi f)^2\} \quad (13)$$

式(12)(13)より、スパン L の制限として整理すると、

$$L = \frac{1}{\sqrt{\pi f}} \left(\frac{192EI_{eq}}{m_b + \rho t H / 2} \right)^{1/4} \quad (14)$$

式(14)によるスパン L の最大値を $f=5\text{Hz}$ として求めると、縦使いの場合は表-5、横使いの場合は表-6 となる。横使いの場合には断面を $\text{H-200} \times 200$ 又はそ

れ以上とすればスパン10m以上まで対応可能となる。縦使いの場合には広幅のH-250×250などとしなければ10m以上のスパンに対応できない。地震観測をした倉庫²⁾の中間梁は縦使いのH-194×150であり、実際の寸法 $L=10.5\text{m}$ では振動数が5Hzを下回る。

設計では対象となる間仕切壁の階高とスパンに応じて、表-4から間柱の断面を、表-5又は表-6から中間梁の断面をそれぞれ決定する。例えば、階高とスパンがともに10mである場合、表-4から間柱の断面としてH-400×200を、表-5又は表-6から中間梁の断面として、縦使いではH-250×250、横使いではH-200×200を選択する。

4. 中間梁のある間仕切壁を対象としたFEMによる部材選定法の検証

2章同様、本章では柱間に中間梁のみが設置される場合を扱い、間柱が入る場合は次章で取り上げる。

4.1 解析概要とモデル化の妥当性の検証⁷⁾

4.1.1 解析概要

検証は振動台実験³⁾の試験体を対象とした。解析モデルの概要を図-6に示す。ALCパネルは曲げ剛性を考慮するため梁要素でモデル化し、約150mm間隔で要素分割することで質量分布も考慮している。上段パネル取付け部の境界条件はピン接合、下段パネルのそれは中間梁と下段パネルがほぼ一体となって回転している実験結果³⁾から剛体連結に設定した。中間梁と鉄骨フレーム(上・下段梁、柱)はねじれ等を考慮できるよう板要素でモデル化した。また、上述の通り、中間梁には定規アングルが溶接接合されており、面外振動に対してその寄与が考えられることから定規アングルを板要素でモデル化した。定規アングルからパネルの取付けボルト位置までは変形および回転が連続すると考え、剛体連結要素により接続した。上・下段梁も中間梁と同様に、板要素でモデル化した定規アングルと剛体連結要素によりALCパネルと接続した。中間梁横使いでのピースアングル部分は剛体連結要素でモデル化した。

ALCパネルの単位容積質量 ρ は試験体受入検査の結果から、曲げ剛性 EI_{ALC} は曲げ強度試験の結果からそれぞれ求めたものとし、表-7に示す。単位容積質量が設計指針⁶⁾で示されている $\rho = 650\text{kg/m}^3$ よりも大きいのは、出荷後間もなかったため含水率が大きかったことによる。

4.1.2 モデル化の妥当性の検証

実験結果との比較により、上述したモデル化の妥当性を確認する。比較項目は固有振動数と回転角、振動モード形とし、結果を表-8、図-7に示す。振動モードの測定点は図-6(a)中に併記した。回転角は文献⁷⁾で示した中間梁中央での単位水平変位に対する回転角を指す。実験結果の固有振動数はwhite noise加振、回転角は1自由度系の応答波加振により各々求めたものであり、詳細は文献³⁾を参照されたい。

中間梁を縦使いにした場合では、固有振動数と回転角、振動モードのいずれも実験と解析は良い対応を示している。中間梁を横使いにした場合では、実

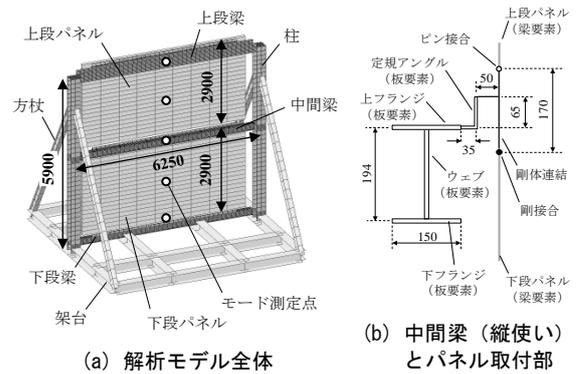


図-6 解析モデルの概要

表-7 ALCパネルの材料物性

中間梁の向き	縦使い	横使い
単位容積質量 $\rho(\text{kg/m}^3)$	787.1	745.9
曲げ剛性 $EI_{ALC}(\text{kNm}^2)$	168.0	

表-8 実験と解析結果の比較

中間梁の向き	縦使い		横使い	
実験/解析	実験	解析	実験	解析
固有振動数(Hz)	4.3	4.3	5.5	6.0
回転角(rad/m)	0.38	0.37	0.71	1.14

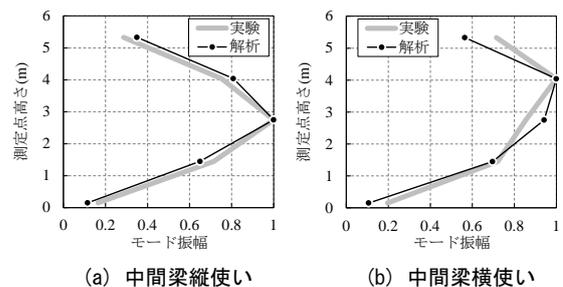


図-7 振動モード形の比較

験と解析で固有振動数、回転角ともに若干の差異が見られるが、上段パネル中央が大きな振幅をもつ振動モード形を同様に示している。以上のことから、解析モデルは妥当性があるものと判断した。

4.2 部材選定法の妥当性の検証⁷⁾

4.2.1 検証概要

検証は、階高 $H=5.8\text{m}$ 一定でスパン $L=6.25, 7.45, 8.65\text{m}$ に変化させた場合、スパン $L=6.25\text{m}$ 一定で階高 $H=5.8, 7.8, 9.8\text{m}$ に変化させた場合、の2ケースとした。上記の条件を満足する部材断面を表2,3の部材選定表から選択した。選択した断面を同表中に網掛けと太字で示す。なお、ここではモデル化の都合のため、ロールH形鋼の板厚を大きくしたBH形鋼として、BH-250×250×13×18とBH-300×300×15×20を設けている。また、一般性を考慮してALCパネルの単位容積質量 ρ は文献⁶⁾の $\rho = 650\text{kg/m}^3$ とし、パネルの曲げ剛性 EI_{ALC} は既報⁴⁾で示されているパネル長さ L_{ALC} との対応を求めた近似式(式(15))から算出した。

$$\text{近似式: } EI_{ALC}(\text{kNm}^2) = 110 + 20(L_{ALC}(\text{m}) - 3)^2 \quad (15)$$

4.2.2 検証結果

固有振動数とスパン L 、階高 H の関係を図-8,9に、中間梁を縦使いとした場合の振動モード形を表-9,10

に各々示す。表中にはスパン中央における、上・下段梁と中間梁上、パネル中央の振動モード形を併せて示している。また、図中の固有振動数として、▲は両端をピン接合とした 1 枚の ALC パネルの固有振動数 f_{ALC} (式(16)) である。

$$f_{ALC} = \left\{ \pi / (2L_{ALC}^2) \right\} \sqrt{EI_{ALC} / m_{ALC}} \quad (16)$$

ここで、 m_{ALC} は単位長さ当たりの ALC パネル 1 枚の質量である。■は式(5) の f を未知数として求めた中間梁の固有振動数 f_{SB} であり、●は ALC パネルが中間梁等の構造 2 次部材に取付けられていることから、直列の質点バネ系と見なした式(17)より、間仕切壁の固有振動数 f_{PW} を近似できる⁸⁾⁹⁾としたものである。

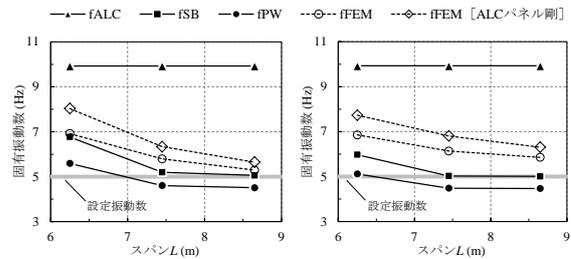
$$f_{PW} \approx (f_{SB}^{-2} + f_{ALC}^{-2})^{-1/2} \quad (17a)$$

$$T_{PW} \approx \sqrt{T_{SB}^2 + T_{ALC}^2} \quad (17b)$$

ここで、 $T_* = 1/f_*$ (* : PW, SB, ALC) は対応する固有周期である。また、○は FEM により求めた間仕切壁の固有振動数 f_{FEM} であり、さらに◇は部材選定表の妥当性を検証するため、その計算仮定に倣い ALC パネルを十分に剛、両端を単純支持とした FEM により求めた間仕切壁の固有振動数 f_{FEM} [ALC パネル剛] である。

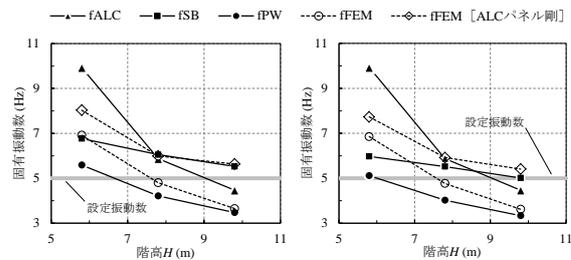
階高 $H = 5.8m$ 一定でスパン $L = 6.25, 7.45, 8.65m$ に変化させた場合では、表-9 より、いずれのスパンも上・下段のパネル中央とともに中間梁の振幅が比較的大きな振動モード形を示している。図-8 より、 f_{FEM} ○と f_{FEM} [ALC パネル剛] ◇は縦・横使いともに設定振動数 5Hz 以上であり、部材選定表の妥当性が確認できる。 f_{ALC} ▲は階高 H が一定でパネル長さが変化しないため、スパン L に依らず約 10Hz の一定値をとる。 f_{PW} ●は f_{FEM} ○よりも 7~8 割ほど低振動数側に評価されているが、スパン L の増大とともに振動数が低下していく傾向は同じである。 f_{PW} ●が低振動数側に評価される理由として、部材選定表は前述の通り、縦使いの場合には中間梁単独の断面 2 次モーメントを用い定規アングルの寄与を考慮していないこと、横使いの場合には低減係数 0.6 を掛けていることが挙げられる。

スパン $L = 6.25m$ 一定で階高 $H = 5.8, 7.8, 9.8m$ に変化させた場合では、表-10 より、 $H = 7.8m$ 以上において上・下段ともパネル中央の振幅が卓越し、中間梁のそれはさほど大きくないモード形を示す。図-9 では、 f_{FEM} ○は縦・横使いともに階高が高いほど低下する傾向にあり、 $H = 7.8m$ 以上で設定振動数の 5Hz を下回る。これは f_{ALC} ▲がパネルの曲げ剛性の平方根に比例する一方でパネル長さの二乗に反比例して低下するため、階高が高いと中間梁よりも ALC パネルの固有振動数が低くなり、間仕切壁としての振動モードは ALC パネルの曲げ振動が支配的となるためである。一方で、 f_{FEM} [ALC パネル剛] ◇は $H = 7.8m$ 以上においても設定振動数の 5Hz を満足し、部材選定表の妥当性を確認できる。 f_{PW} ●は f_{FEM} ○よりもやはり低振動数側に評価されるが、階高が高いほど対応は良くなる傾向にある。



(a) 中間梁縦使い (b) 中間梁横使い

図-8 階高 $H = 5.8m$ 一定でスパン L を変化させた場合の固有振動数



(a) 中間梁縦使い (b) 中間梁横使い

図-9 スパン $L = 6.25m$ 一定で階高 H を変化させた場合の固有振動数

表-9 階高 $H = 5.8m$ 一定でスパン L を変化させた場合の振動モード形 (中間梁: 縦使い)

中間梁縦使い, 階高 $H = 5.8m$		
$L = 6.25m$	$L = 7.45m$	$L = 8.65m$
モード算出点	モード算出点	モード算出点
6.9Hz	5.8Hz	5.3Hz

表-10 スパン $L = 6.25m$ 一定で階高 H を変化させた場合の振動モード形 (中間梁: 縦使い)

中間梁縦使い, スパン $L = 6.25m$		
$H = 5.8m$	$H = 7.8m$	$H = 9.8m$
モード算出点	モード算出点	モード算出点
6.9Hz	4.8Hz	3.7Hz

以上より、中間梁のみの間仕切壁において、ALCパネルを剛としたFEMが、設定振動数を満足することを確認し、部材選定表の妥当性を示した。一方で、ALCパネルの柔性も考慮した間仕切壁としての固有振動数は、階高が高いすなわちパネル長が長い条件において設定した振動数を満たさない場合があることを確認した。

5. 間柱と中間梁のある間仕切壁を対象としたFEMによる部材選定表の検証

5.1 解析概要とモデル化の妥当性の検証¹⁰⁾

5.1.1 解析概要

解析モデルは2012年から2013年にかけて地震観測²⁾を実施した、宮城県仙台市にある某倉庫の間仕切壁一構面とした(図-10, 11)。観測の詳細は文献²⁾を参照されたい。解析モデルを図-12に示す。ブレースはトラス要素、その他の部材は梁要素でモデル化した。壁両側の柱の上端部と間柱の下端部、屋根大梁と水平ブレースの接合部はそれぞれピン支持とし、両側柱の下端部は固定支持とした。また、間柱と中間梁、間柱と屋根大梁の接合部はそれぞれピン接合とした。

ALCパネルは図-13に示すように、中間梁および屋根大梁から持ち出したフラットバーの先端に設けた定規アングルと接合するモデル化とした。ALCパネル取り付け部の境界条件は基本的には前章に倣うが、下段パネルの下端部は試験体の下段梁と異なり、十分に剛な床スラブと接合するためピン支持とした。ALCパネルの曲げ剛性は式(15)により算出し、単位容積質量は $\rho = 650\text{kg/m}^3$ とした。

5.1.2 モデル化の妥当性の検証

地震観測記録との固有振動数および振動モード形を比較し、上述したモデル化の妥当性を確認する。地震観測位置は図-10に併記した○□位置で床スラブ上(ID8)、中間梁上(ID11, 13, 40, 53)、屋根大梁上(ID75, 76)である。観測記録は期間中に記録された計27波を対象とした。

間仕切壁単体の固有振動数および振動モード形を部分空間法により同定した。部分空間法は図中に示した○位置(ID8, 11, 53, 75, 76)を入力、□位置(ID13, 40)を出力とした5入力2出力モデルを構築し、解析アルゴリズムはMOESP法、ハンケル行列のブロック行数は200として計算した。床(ID8)の応答速度最大値と同定した固有振動数の関係を図-14に示す。図中には解析の固有振動数(3.2Hz)を併記した。

観測の固有振動数は床応答速度の増大とともに3Hz付近に漸近していく傾向を示しており、解析の固有振動数と概ね対応する。床応答速度が小さい領域(3cm/s以下)で観測の固有振動数が高いのは部材間の摩擦等による影響と考えられる。また、観測期間中に最大であった2013年8月4日の地震について、観測点ID13で基準化した中間梁の振動モード形を示した図-15からも、観測と解析は概ね対応することが確認できる。以上のことから、前項で示したモデル化は概ね妥当性があるものと判断した。

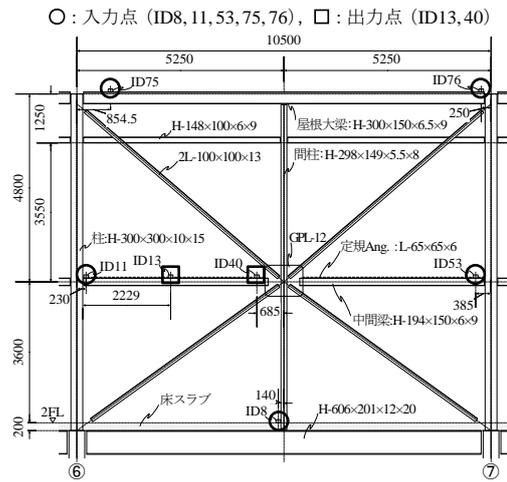


図-10 地震観測位置

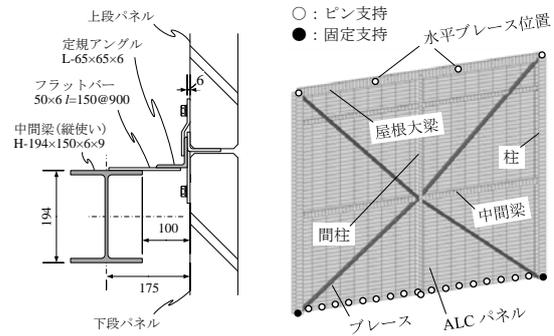


図-11 中間梁とパネル取り付け部の断面

図-12 解析モデル

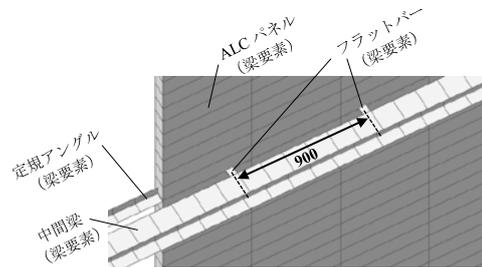


図-13 中間梁とパネル接合部のモデル化

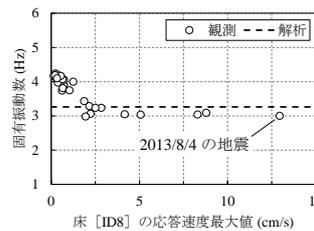


図-14 床応答速度最大値と固有振動数

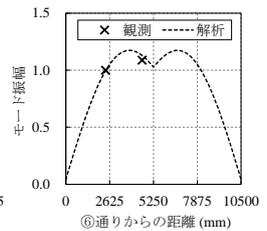


図-15 振動モード (2013/8/4の地震)

5.2 部材選定表の妥当性の検証¹⁰⁾

5.2.1 検証概要

検証は、階高 $H = 8\text{m}$ 一定でスパン $L = 6.9, 8.7, 10.5, 12.3\text{m}$ に変化させた場合、スパン $L = 10.5\text{m}$ 一定で階高 $H = 6, 8, 10\text{m}$ に変化させた場合、の2ケースとした。中間梁の高さは階高中央($H/2$)、屋根大梁と水平ブレースの接合部はスパン L を3分割する位置とした。上述した階高 H とスパン L の条件に対し、表-4~6に基づき、間柱と中間梁の部材断面を選択した。表-2, 3と同様、選択した断面を同表中に網掛けと太字で示す。注2)。

5. 2. 2 検証結果

固有振動数 (f_{ALC} ▲, f_{FEM} ○, f_{FEM} [ALC パネル剛]) とスパン L , 階高 H の関係を図-16, 17 に, 中間梁を縦使いとした場合の振動モード形を表-11, 12 に各々示す. 表中には表-9, 10 と同様にスパン中央における振動モード形を併せて示している. なお, 図-8, 9 に示した f_{SB} ■ と f_{PW} ● は, 間仕切壁が中間梁のみの場合の計算値であるためここでは図示していない.

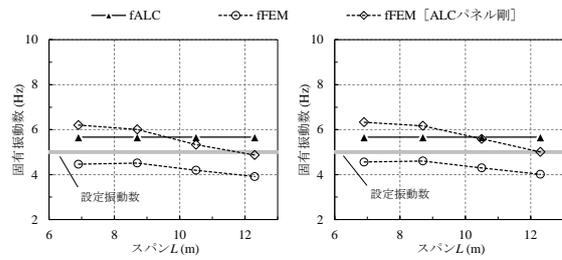
階高 $H=8m$ 一定でスパン $L=6.9, 8.7, 10.5, 12.3m$ に変化させた場合では, 図-16 より, f_{FEM} ○ はスパン L に依らず設定振動数の 5Hz を下回っている. 表-11 では, いずれも上段パネル中央の振幅が卓越し, 中間梁のそれはさほど大きくないモード形であることが見てとれる. 図-16 に示した通り, f_{ALC} ▲ は約 5Hz であることから, 間仕切壁としての振動モードは ALC パネルの曲げ振動が支配的となり, 設定振動数である 5Hz を下回ったといえる. 一方, ALC パネルを剛とした f_{FEM} [ALC パネル剛] ◇ は中間梁を縦使いとしたスパン 12.3m においては 5Hz を若干下回るものの, その他の条件では 5Hz を満足し, 部材選定表の妥当性を確認することができる. スパン 12.3m で 5Hz を若干下回ったのは, 屋根大梁の支持点をスパン L を 3 分割する位置としたことによる, 間柱上部の屋根大梁の変形のためと考えられる (表-11).

スパン $L=10.5m$ 一定で階高 $H=6, 8, 10m$ に変化させた場合では, 図-17 より, f_{FEM} ○ は $H=6m$ において縦・横使いとも設定振動数の 5Hz を満足するが, 階高がそれよりも高い場合には 5Hz を下回る結果となり, 4.2.2 項で示した中間梁のみの間仕切壁と同様の傾向である. 表-12 より, $H=6m$ では上・下段のパネル中央とともに中間梁の振幅が大きい振動モード形であるが, $H=8, 10m$ では上段パネル中央付近の振幅が卓越し, 中間梁の振幅はさほど大きくないモード形であることから, パネルの曲げ振動が支配的であることがわかる. これは前述の通り, f_{ALC} ▲ がパネルの曲げ剛性の平方根に比例する一方でパネル長さの二乗に反比例して低下することによる. 一方, f_{FEM} [ALC パネル剛] ◇ は階高 H に依らず設定した振動数 5Hz 以上を確保しており, 部材選定表の妥当性を確認できる.

以上より, 間柱が入る場合の間仕切壁においても, ALC パネルを剛とした FEM によりほぼ全ての条件で設定振動数 5Hz を上回ることを確認し, 部材選定表の妥当性を示した.

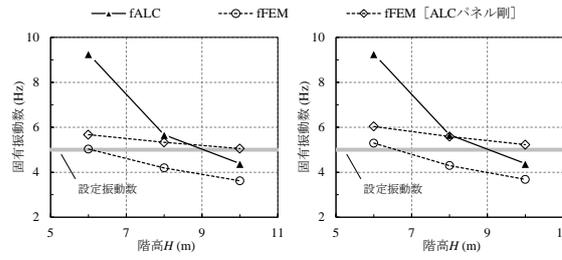
5. 3 パネル長さが上・下段で異なる場合の検証

部材選定表では中間梁は階高の中間 ($H/2$) に設けるとして計算されているが, 実物件では必ずしも $H/2$ とはならず, 下段パネルが上段パネルより長くなる傾向にある. ここでは, ALC パネル長さが上・下段で異なる場合について部材選定表の妥当性を検証する. 検証は, 中間梁を縦使いとした階高 $H=8m$, スパン $L=10.5m$ の間柱が入る場合の間仕切壁に対し, 図-18 に示す下段パネル長さを 3, 4, 5m とした 3 条件を対象とした. 間柱と中間梁の断面は表-4 ~ 6 に従い, 階高の半分 ($H/2=4m$) に対し選定される部材として,



(a) 中間梁縦使い (b) 中間梁横使い

図-16 階高 $H=8m$ 一定でスパン L を変化させた場合の固有振動数



(a) 中間梁縦使い (b) 中間梁横使い

図-17 スパン $L=10.5m$ 一定で階高 H を変化させた場合の固有振動数

表-11 階高 $H=8m$ 一定でスパン L を変化させた場合の振動モード形 (中間梁: 縦使い)

中間梁縦使い, 階高 $H=8m$		
$L=6.9m$	$L=8.7m$	$L=12.3m$
モード算出点	モード算出点	モード算出点
4.5Hz	4.5Hz	3.9Hz

表-12 スパン $L=10.5m$ 一定で階高 H を変化させた場合の振動モード形 (中間梁: 縦使い)

中間梁縦使い, スパン $L=10.5m$		
$H=6m$	$H=8m$	$H=10m$
モード算出点	モード算出点	モード算出点
5.0Hz	4.2Hz	3.6Hz

間柱と中間梁の両者ともに H-250×250×9×14 を各条件で共通して用いた。

固有振動数 (f_{ALC} ▲, f_{FEM} ○, f_{FEM} [ALCパネル剛]) と下段パネル長さの関係を図-19 に、振動モード図を表-13 に各々示す。表中には既出と同様にスパン中央における振動モード図を併せて示している。

図-19 より、パネル長さが上・下段で異なる場合には、同じ場合 (4m) に比べてパネル長が長く f_{ALC} ▲ が低下することから、 f_{FEM} ○ は 0.3Hz 以上低くなっている。表-13 より、パネル長さが上・下段で異なる場合は、長い側のパネル中央付近で振幅が大きい一方、中間梁の振幅が小さいモード形であり、パネルの曲げ振動が支配的であることが確認できる。

一方、ALC パネルを剛とした f_{FEM} [ALC パネル剛] ◇ では、上・下段でパネル長さが異なる場合においても設定振動数の 5Hz 以上を示し、構造 2 次部材が十分な剛性を確保していることを確認できる。上述した通り、部材選定表の最大スパン L に対する階高 H の影響はあまり大きくないため、パネル長さが異なる場合においても部材選定にさほど影響がないものと考えられる。従って、実務においてパネル長さが異なる場合においても部材選定表は有用であるといえる。

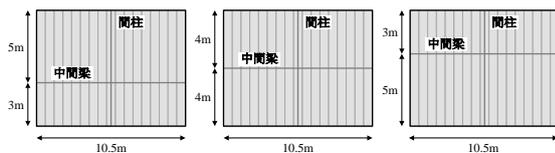


図-18 パネル長さが上・下段で異なる場合の検証条件

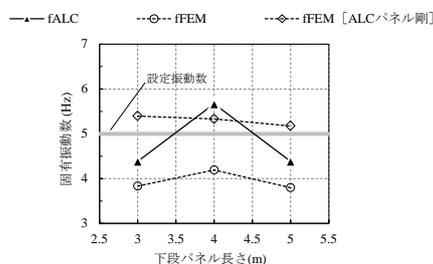


図-19 パネル長さが上・下段で異なる場合の固有振動数

表-13 パネル長さが上・下段で異なる場合の振動モード形

中間梁縦使い, 階高 $H=8m$, スパン $L=10.5m$		
下段パネル=3m	下段パネル=4m	下段パネル=5m
3.8Hz	4.2Hz	3.8Hz

6. 設計におけるその他の留意事項

本稿では地震時の面外振動に着目して部材選定表を作成したが、中間梁の断面選定にあたっては、自重に関する検討も合わせて行う必要がある。梁の自重および ALC パネルの重量が等分布に作用するものとして、梁のねじれを考慮し、たわみがスパンの 1/800 程度以内となることを確認する。これを超える場合は梁サイズや向きを変更する、吊材を設ける、ALC パネルの横目地幅を広げる (タテカベの場合) 等を検討する。なお、吊材を設ける場合は、中間梁のねじれを拘束するよう、接合部や部材選定に留意する (図-20)。

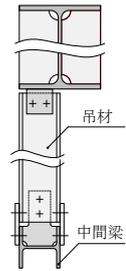


図-20 中間梁と吊材の接合例

7. まとめ

本稿では中間梁を渡して ALC パネルを 2 段積みとする間仕切壁を対象とし、固有振動数の略算法と、それによる構造 2 次部材の部材選定表を提示するとともに、その妥当性を FEM により検証した。ALC パネルを剛とした FEM により、ほぼ全ての検証条件において間仕切壁の固有振動数が設定した振動数を満足することを確認し、部材選定法の妥当性を示した。ALC パネルの柔性を考慮した場合には、パネル長が長い条件において間仕切壁の固有振動数が設定した振動数を満たさない場合があることを確認した。その一方で、中間梁を設けずに床と床、床と屋根の間に 1 枚で設けられる ALC パネルについては地震被害が目立つわけではないことから、中間梁等の構造 2 次部材の剛性を確保することが重要と考えられる。その意味では ALC パネルを剛と仮定した部材選定表を用いることで地震被害の軽減に寄与するものと考えている。

部材選定表は、日常的・感覚的には把握しにくい面外方向の固有振動数を高めるため、設計等において活用されることが期待される。

謝辞

本研究は、(国研)建築研究所、戸田建設株式会社及び ALC 協会の共同研究として実施した。また、本稿は、文献 4)5) で公表したものをまとめたものである。ここに記して関係各位に謝意を表す。

付録

主な記号とその意味を付表に示す。なお、添え字を付けて区別することがある。

付表 主な記号とその意味

記号	意味	記号	意味
δA	変位, たわみ	k	水平震度
E	鋼材のヤング率	L, l	長さ, スパンの制限値
EI_{ALC}	ALC パネルの曲げ剛性	M	1 質点 1 自由度系の質量
f	固有振動数	m	単位長さ当たりの質量
g	重力加速度	P_b	集中力
H	階高	ρ	ALC パネルの単位容積質量
I	断面 2 次モーメント	t	ALC パネルの厚さ
I_c	間柱の断面 2 次モーメント	T	固有周期
I_{eq}	略算用の断面 2 次モーメント	ω	固有円振動数
K	1 質点 1 自由度系の剛性	w	単位長さ当たりの荷重

参考文献

- 1) 例えば, 寺本隆幸: ALC 間仕切の被害から見る今後の課題, 建築技術, pp.156-159, 2012.6
- 2) 石原直, ほか: 大規模な間仕切壁を有する物流倉庫の地震観測, 鋼構造年次論文報告集, 第 21 巻, pp.725-730, 2013.11
- 3) 石原直, ほか: 中間梁に支持された 2 段積み ALC 間仕切壁の地震時面外挙動に関する実験 その 1~その 3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.445-450, 2014.9
- 4) 石原直, 石田琢志, ほか: 2 段積み ALC 間仕切壁の面外振動数に着目した構造 2 次部材選定法の提案, 日本建築学会技術報告集, 第 23 巻, 第 55 号, pp.801-804, 2017.10
- 5) 石田琢志, 石原直, ほか: 2 段積み ALC 間仕切壁の構造 2 次部材選定法に関する解析的検証, 日本建築学会技術報告集, 第 24 巻, 第 56 号, pp.29-34, 2018.2
- 6) ALC 協会: ALC パネル構造設計指針・同解説, 2013.12
- 7) 石田琢志, 石原直, ほか: 中間梁のある大規模間仕切壁の面外振動特性に関する解析, 鋼構造年次論文報告集, 第 22 巻, pp.328-333, 2014.11
- 8) ジェコブセン・エーア 著, 後藤尚男, 金多潔 共訳: 振動工学, 丸善, pp.109-116, pp.498-500, 1961
- 9) 国土交通省建築研究所 編著: 改正建築基準法の構造関係規定の技術的背景, ぎょうせい, pp.68-71, 2001
- 10) 石田琢志, 石原直, ほか: 面外振動数に着目した 2 段積み ALC 間仕切壁の構造 2 次部材の選定について その 3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.905-906, 2016.8

注

- 注1) $\rho=650\text{kg/m}^3$, $t=0.1\text{m}$, $H=8\text{m}$ とすると, $\rho tH/4=130\text{kg/m}$. m_b を重めに 100kg/m と仮定すれば $m_b/2=50\text{kg/m}$. よって, $\rho tH/4 + m_b/2 < 1.5 \times \rho tH/4$.
- 注2) 階高 $H=10\text{m}$ の間柱断面 (表 4) については, H-400×200×8×13 では最大スパン $L_{\max}=10.3\text{m}$ とスパン $L=10.5\text{m}$ に若干届かないが, 概ね近い値であることから同部材断面を採用した.