

# フラットプレート／中間層免震構造

手塚 武仁 磯田 和彦 前林 和彦  
(技術研究所) (設計本部) (プロポーザル本部)

## Flat-Plate Mid-Story Isolation System

by Takehito Tezuka, Kazuhiko Isoda and Kazuhiko Maebayashi

### Abstract

An increasing number of people want urban housing that offers the higher levels of comfort and service. Condominiums should be easily adapted to individual personalities and lifestyles, and they must also be highly durable, helping to sustain the quality of social environment. Flat-plate structures, which consist of columns and flat plates, are ideal for creating simple and open interiors. There are no beams, so rooms can be freely laid out. Flat-plate structures are seldom seen in Japan, however, because they are susceptible punching brittle failure in the column and flat-plate joint, which can occur when such structures are subjected to earthquakes.

This study investigated a flat-plate mid-story isolation system. The results gave clear that the system is released from dissipation of the energy produced by earthquakes, by these results, the system offers improved seismic performance for the same construction cost of a column-girder, rigid frame structures of the same class.

### 概 要

快適な都市居住を望む人が増えているが、都市居住には個性や生活スタイルに合わせた自由な居住空間を必要とし、良質なストック型社会に向けた高耐久化が要請される。柱とフラットプレートで構成されるフラットプレート構造は、シンプルでオープンな空間を持っており、室内には梁がなく、自由なアレンジが可能である。しかし、フラットプレート構造は柱とフラットプレート接合部のパンチング脆性破壊が生じるために、わが国では使うことが難しかった。

本研究では「フラットプレート／中間層免震構造」を検討し、この構造は地震エネルギーの消費から解放されることから、耐震性が向上し、同じ規模のラーメン構造とほぼ同じコストで建設できることを確認した。

## § 1 . はじめに

今後の都市居住を考える上での一つの視点は、「住み続けることができる」ことと言われている。建物には物理的寿命が長く、社会的陳腐化が進まず、環境に対する負荷が少ないことなどが求められる。

フラットプレート構造は天井面に梁型がでないことから、間取りや設備の変更が容易であり、社会的陳腐化を防ぐことには比較的取り組みやすい構造と思われる。一方で、フラットプレート構造は接合部の脆性破壊が生じやすく、ラーメン構造と比較すると耐震性の確保が難しく、物理的寿命を延ばすために耐震性を上げることは難しいとも思われる。

本報告は、これらの事情を省みて、中間層免震構

造を組み合わせることで、フラットプレート構造の耐震性を向上させることを検討した。また、中間層免震構造と組み合わせた時の建物コストを、建設工事費およびライフサイクルコストの観点からラーメン構造と比較して確認した。

## § 2 . 中間免震層での地震力の絶縁条件

基礎免震層と同様に、中間免震層を設ける目的は地震力の絶縁である。筆者等は、ダンパーを設置し地震エネルギーのほとんどを消費する中間免震層は、(1)式を満足する質量比の位置に配置することで満足されることを既に明らかにした<sup>1)</sup>。

$$m / M \geq 0.7 \quad (1)$$

ここで、m: 中間免震層より上の質量合計

M: 全質量

地震エネルギー入力とは建物の耐力の分布や剛性分布に係わらないものの、粘性減衰等のエネルギー消費機構を持つ実建物では、中間免震層への地震エネルギーの集中割合は、層の位置と、層の剛性や耐力の影響を受ける。ここでは中間免震層の剛性と耐力の影響について建物モデルを用いて検討し、中間免震層が地震エネルギーを絶縁する条件を求める。建物の減衰はコンクリート系構造を想定して $\eta=3\%$ の初期剛性比例型の粘性減衰で与え、地震波は観測記録波(EICentro1940NS)とした。地震入力は解析モデルに係わらず荷重効果を同一とするために、解析時間0~30秒で積算した地震エネルギー入力の等価速度で $V_E=150\text{cm/s}$ になるように加速度を基準化した。

## 2. 1 解析モデル

解析モデルは10層の建物モデルとし、(1)式で示す質量比が $m / M \geq 0.7$ となる条件から第3層を中間免震層と想定し、第3層の剛性が低下した場合、および第3層の耐力が低下した場合について中間免震層の主要パラメータを検討し、絶縁条件を求めた。

モデル建物の各階は均等重量 ( $W_i = 9800\text{kN}$ ) を持ち、バネは $A_i$ 分布のせん断力に比例する分布を持っており、固有周期は建物高さにより $T=0.7$ 秒とする。解析モデルの振動諸元を表-1に示す。

階(層)	重量 $W_i(\text{kN})$	バネ定数 $K_i(\text{kN/cm})$
10	9800	10600
9	9800	17100
8	9800	22600
7	9800	27400
6	9800	31500
5	9800	35200
4	9800	38300
3	9800	40900
2	9800	43000
1	9800	44700

表-1 解析モデル(基本モデル)の振動諸元

## 2. 2 剛性の影響(弾性地震応答)

表-1に示した解析モデルについて、中間免震層となる第3層の剛性のみが1/2および1/10となった場合の弾性地震応答を比較する。各モデルの固有周期を表-2に、刺激関数 $\beta u$ を図-1に示す。

第3層の剛性と上層の剛性との関係、および層の位置などが関係するが、第3層の剛性が小さくなるに従い上層は1質点としての挙動に近づく。第3層の剛性が小さくなると、鞭振り状態の挙動となることと、振動系は最下階で固定であり、回数に関係なく建物下層のモードは小さいために、質量比で $m / M \geq 0.7$ となる位置が中間免震層となる場合には、層の剛性が小さくなると一次モードのみが励起されることに近づくこととなる。これらの結果として、基本モデルに対して、第3層の剛性が1/2となる場合には建物全体に高次モードが刺激されやすくなるが、剛性が1/10と小さくなると一次モードが支配的とな

解析モデル	一次	二次	三次
基本モデル	0.70 秒	0.27 秒	0.17 秒
剛性 1/2 モデル	0.75 秒	0.28 秒	0.17 秒
剛性 1/10 モデル	1.07 秒	0.31 秒	0.17 秒

表-2 剛性の影響による固有周期

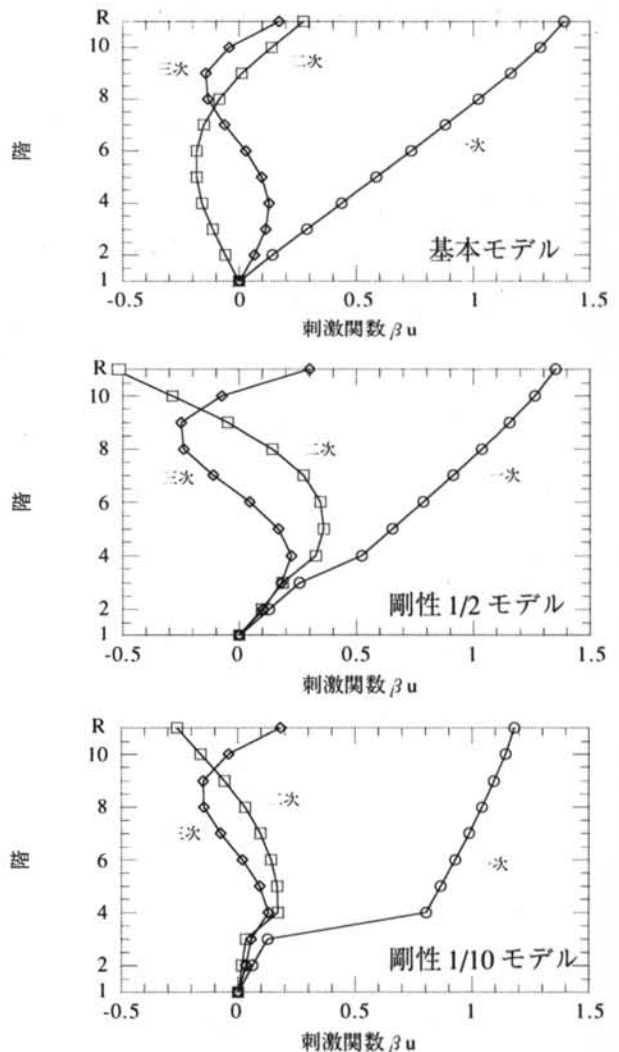


図-1 剛性の影響による刺激関数 $\beta u$

ることに近づき、高次モードの影響は小さくなってしまふ特性を持つこととなる。層せん断力の分布を図-2に、層間変形角の分布を図-3に各々示す。図中の「ori」が基本モデルを示し、「K3/2」および「K3/10」が剛性が1/2および1/10となる剛性低下モデルを示す。第3層の剛性が1/2となった場合には建物全体に高次モードの影響が現れて層せん断力が大きくなり、ベースシャで比較すると基本モデルに対して1.28倍となっている。一方、剛性が1/10となる場合には、基本モデルの層せん断力と近似する。層間変形角については剛性が低下する第3層で著しい影響を受け、変形角が大きくなるのに対して、その他の層は第3層に比較すると、影響は小さいと言える。

中間免震層の剛性を低下させることは長周期化の効果を発揮することに繋がるが、エネルギー消費機構を持たない限り、絶縁層としての役目をなさないものであり、今回の検討のように荷重効果としての地震エネルギー入力が入力である場合には、応答は低減しない。剛性の低下割合によっては、高次モードが刺激されやすくなり、そのような場合に対しては、20~30%建物の耐力を高めることを必要とする。層せん断力が大きくならない範囲で、中間免震層のみで長周期化の効果を発揮するためには、中間免震層の変形を勘案しながら、剛性を基本モデルの1/10以下に低減する必要がある。

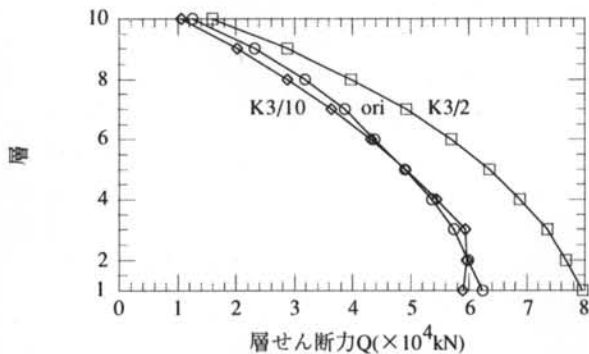


図-2 層せん断力の分布(剛性の影響)

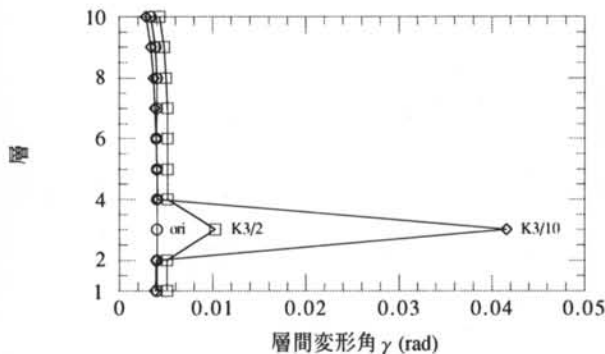


図-3 層間変形角の分布(剛性の影響)

## 2. 3 耐力の影響(第3層のみ弾塑性履歴)

剛性は表-1に示した振動諸元のままで、第3層について、図-2に示した基本モデル「ori」の地震応答(Q3=57460kN)の3/4、1/2、1/10、1/20の耐力を持つバイリニア特性の弾塑性履歴を示す場合について耐力の影響を検討する。なお、第3層を除いては弾性応答を示すものとし、第3層では履歴減衰以外の減衰能は考えないものとする。初期剛性が不変であるので固有値は一致し、検討は第3層の耐力低下による履歴減衰能の影響のみと考えられる。

層せん断力の分布を図-4に、層せん断力係数の分布を図-5に、層間変形角の分布を図-6に各々示す。図中の「ori」が基本モデルであり、「 $3_3Q_u/4$ 」、「 $3_3Q_u/2$ 」、「 $3_3Q_u/10$ 」、「 $3_3Q_u/20$ 」は耐力が3/4、1/2、1/10、1/20になったモデルの解析結果を示す。第3層の耐力に係わらず地震エネルギー入力を同一としている( $V_E=150\text{cm/s}$ となるように地震波の加速度を基準化)ので、耐力が低下すると地震エネルギーが第3層に集中し、第3層を除く層では地震エネルギー消費の負担が低減して、層せん断力が低減することに結びついていると考えられる。

第3層のバネの粘性減衰能、または弾塑性履歴を示す場合の履歴減衰能を解析時間について積算した地震エネルギーについて、下記の(2)式で定義する集中率Rpを求め、表-3に示す。弾性応答である基本モデル「ori」の場合は、第3層の粘性減衰能による消費エネルギーに関する集中率である。

$$\text{集中率 } R_p = \frac{\text{第3層の減衰能による消費エネルギー}}{\text{地震エネルギー入力}} \quad (2)$$

建物各層が均等に地震エネルギー入力を消費する考えると、集中率Rpは1/N(N:層数)に近似すると思われる。第3層の耐力が3/4程度に低下すると地震エネルギーが集中するようになるものの、せん断力と変形への影響は第3層近くに限定される。第3層の耐力が低下するに従い集中率Rpが大きくなり、せん断力と変形への影響も建物全体に及ぶようになる。第3層の耐力が1/10~1/20に低下するとRpが0.85以上となり、地震エネルギー入力の方が第3層に集中し、建物全体としての層せん断力は著しく低減する。しかし、1/10と1/20の場合の層せん断力は近似し、中間免震層となる層の耐力をこれ以上低下させても層せん断力に対する影響は大きくないように考えられる。ベースシャの低減は基本モデル「ori」の約0.4となり、極値を示すと考えられる。層間変形

角については、耐力が著しく小さくならない限り、剛性低下モデルに近似する。中間免震層の耐力が小さくなり、履歴減衰効果が現れると、中間免震層に地震エネルギーの集中が生じ、その他の層は地震エネルギー消費の負担が低減することから、建物全体の層せん断力が低減すると考えられる。集中率 $R_p$ が $3/N$  ( $N$ :層数)以下では中間免震層へのエネルギー集中が小さいと考えられ、中間免震層の履歴減衰効果を得るためには、中間免震層の耐力を弾性応答の $3/4$ 以下に低減する必要がある。

中間免震層に地震エネルギーを集中して、建物全体として地震応答を低減する絶縁の主要なパラメータは、中間免震層の耐力の低減であると考えられる。今回の検討の範囲では、地震エネルギーの集中

を示す集中率を $R_p \geq 3/N$  ( $N$ :建物層数)とすれば中間免震層への地震エネルギーの集中が生じ、 $R_p \geq 0.85$ とすると中間免震層のみに損傷を集中できて、地震力を絶縁する。絶縁となる時の中間免震層の耐力は層せん断力係数で $C=7\%$ 以下である。

以上の検討より、絶縁を目的とする中間免震層は(1)式を満足する位置に、層せん断力係数で7%程度に相当するダンパーを配置すれば良いと考えられる。

解析モデル	集中率 $R_p$
基本モデル	0.13
耐力 3/4 モデル	0.30
耐力 1/2 モデル	0.51
耐力 1/10 モデル	0.85
耐力 1/20 モデル	0.87

表-3 第3層への地震エネルギー集中率 $R_p$

### § 3. フラットプレート/中間層免震構造

#### 3.1 モデル建物

都市居住型建物である集合住宅に対して、建て替えるのではなく、フリープランなどの計画特性を実現できることが求められている。図-7は長寿命化が考慮されている超高層集合住宅のスパンと階高の例であり、階高3m前後、スパン6~10mがフラットプレート/中間層免震構造のモデル建物を設定する上での一つの参考値である。

さらに、都市居住では立体高密度を実現し、住・職・商・憩・医などを一体に組み込んだ建物とすることが特性と言われている。これは「用途混合型」の図-8のような立体高密度建物を必要としている。

以上のことを考慮して、1~2階が非住宅用途であり、3階以上が集合住宅となる図-9から図-11のような平・断面を持つ建物をモデルとした。モデル建物の架構の構造的な特徴は以下である。

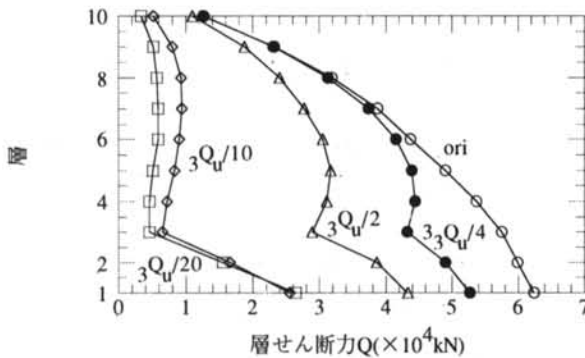


図-4 層せん断力の分布(耐力の影響)

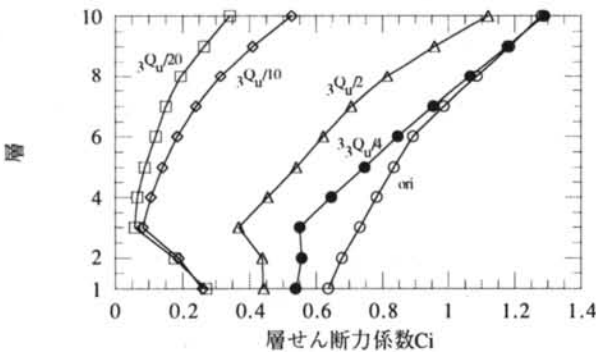


図-5 層せん断力係数の分布(耐力の影響)

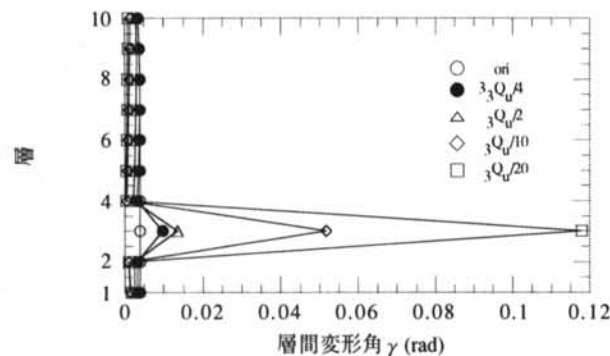


図-6 層間変形角の分布(耐力の影響)

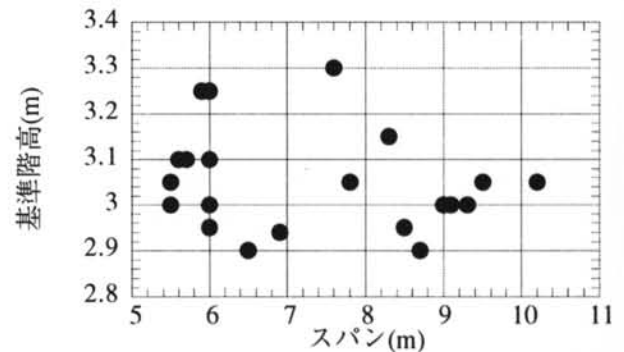


図-7 長寿命化を図った建物の階高とスパン<sup>2)</sup>

- (1) 3階以上の住宅用途部分はフラットプレート構造であり、1グリッドの大きさは6.6×7.55m、階高2.7mとする。
- (2) 1～2階は耐力維持型のラーメン構造とする。
- (3) フラットプレート架構は塑性履歴に伴うエネルギー消費が小さいので、中間免震層を設け、地震入力を低減する。
- (4) フラットプレート架構部分の目標性能は、安全限界の地震入力に対して、ベースで0.1以下のせん断力係数となることを目標とする。

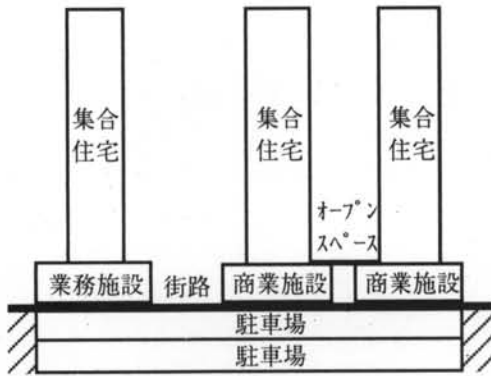


図-8 立体高密度都市のイメージ

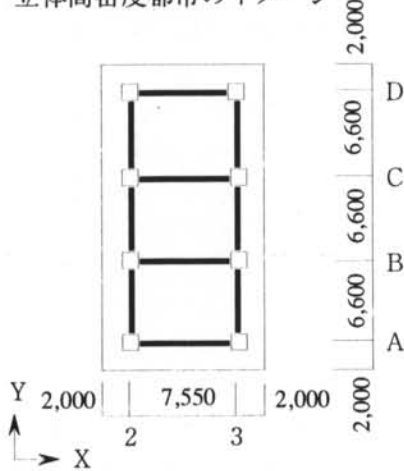


図-9 モデル建物の基準階平面 (単位: mm)

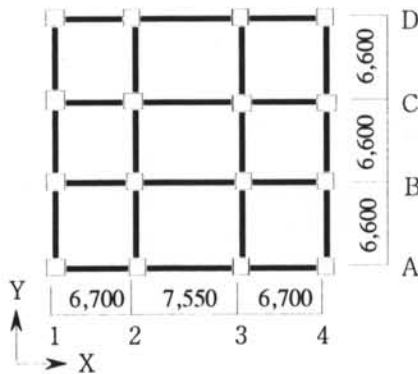


図-10 非居住用途部分の平面 (単位: mm)

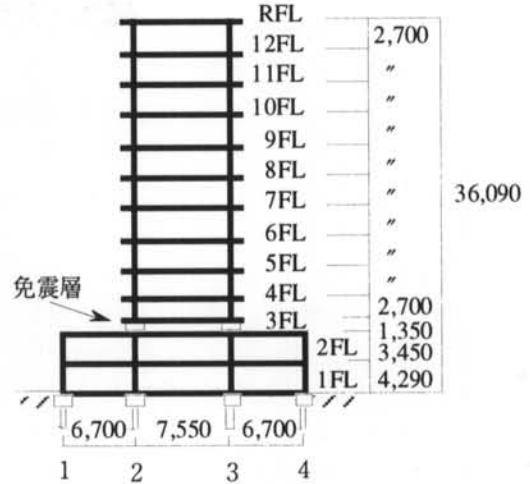


図-11 X方向主要断面体 (単位: mm)

### 3.2 断面の算定

モデル建物は鉄筋コンクリート(RC)造の地上12階建てであり、1～2階は非居住用途、3～12階が集合住宅として計画されている。1～2階はラーメン構造とし、3～12階をフラットプレート構造とした。

部材断面は以下の仮定により決定した。

- (1) 使用材料 コンクリート  $F_c = 36 \text{ N/mm}^2$   
鉄筋 SD390(D29以上)  
SD345(D19～D25)  
SD295A(D16以下)

- (2) 設計荷重

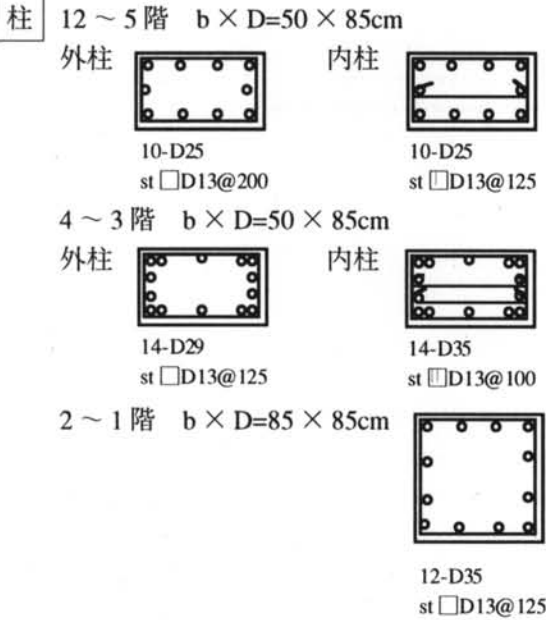
		単位: kN/m <sup>2</sup>	
		長期	地震
屋根		8.63	7.94
一般階		8.58	7.89

- (3) 設計地震力 ( $T = 0.7$  秒  $R_t = 1.0$   $C_0 = 0.15$ )

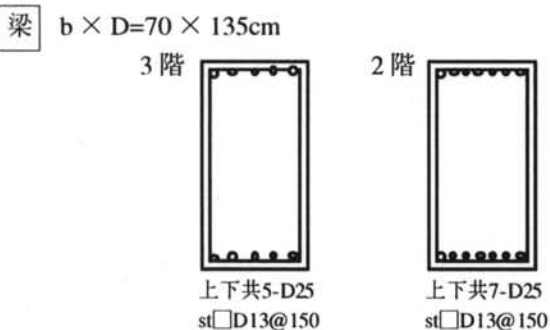
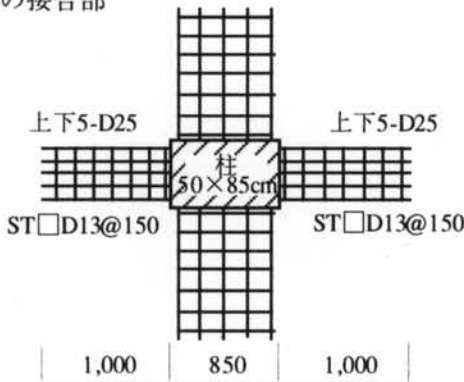
層	Wi(kN)	$\Sigma Wi(kN)$	$\alpha_i$	Ai	Qi(kN)
12	2785	2785	0.065	2.74	1147
11	2383	5168	0.121	2.24	1736
10	2383	7551	0.176	2.00	2265
9	2383	9934	0.232	1.83	2726
8	2383	12320	0.288	1.71	3158
7	2383	14700	0.344	1.61	3550
6	2383	17080	0.399	1.53	3923
5	2383	19470	0.455	1.46	4266
4	2383	21850	0.511	1.40	4590
3	2383	24230	0.566	1.34	4874
2	10010	34240	0.800	1.14	5855
1	8542	42780	1.0	1.0	6414

表-4 設計地震力

- (4) 応力はラーメン式の計算法により算定し、フラットプレートの部材剛性はスパン中央までの幅を持つ梁部材に置き換える
- (5) フラットプレート部分の長期応力は、RC 規準 11 条の解説の式により算定する
- (6) 断面算定は建物の Y 方向とし、算定した部材断面は以下である。



- フラットプレート** R～3 階 厚さ 30cm
- 柱列帯 端部 上下共 D22@150  
中央 上下共 D22@300
- 柱間帯 端部 上下共 D19@300  
中央 上下共 D19@300
- 柱との接合部



- (7) 部材端の曲げ耐力は下式により算定した
- 柱 ひび割れ  $M_c = (1.8 \sqrt{F_c} + N/bD) \cdot Z$   
降伏  $M_y = 0.8 \sum a_i \cdot \sigma_y \cdot d + 0.5ND(1 - N/bDF_c)$
- 梁 ひび割れ  $M_c = 1.8 \sqrt{F_c} \cdot Z$   
降伏  $M_y = 0.9 \sum a_i \cdot \sigma_y \cdot d$
- フラットプレート  
ひび割れ  $M_c = 1.8 \sqrt{F_c} \cdot Z$   
降伏  $M_y = M_t + M_f + M_v$

フラットプレートの曲げ耐力については手塚等の研究<sup>3)</sup>を基に以下の算定式により求めた。

捩じり抵抗モーメント(柱側面の捩じりせん断応力)

$$M_t = \sum 6 \sqrt{F_c} \cdot (B_{j1} - D_j / 3) \cdot D_j^2 / 2$$

曲げ抵抗モーメント(柱前後面の補強筋の曲げ応力)

$$M_f = \sum (\sum a_i \cdot \sigma_y \cdot D_j) \cdot L / L'$$

偏心モーメント(柱前後面の補強筋のダボ効果)

$$M_v = v_s \cdot B_{j2} \cdot D_j \cdot B_{j1}$$

ここで、 $F_c$ : コンクリートの設計基準強度、 $b$ 、 $D$ : 断面寸法、 $Z$ : 断面係数、 $N$ : 柱軸力、 $L$ : スパン、 $L'$ : 内法スパン、 $a_i$ : 曲げ補強筋の断面積、 $\sigma_y$ : 曲げ補強筋の降伏強度、 $\sum a_i$ : 曲げ補強筋の断面積の合計

$$V_s \text{ (kgf/cm}^2\text{)} = 14.06 + 0.8p_s \sigma_y$$

$$p_s = \sum a_i / (B_{j2} \cdot D_j)$$

フラットプレートの算定断面は図-12であり、曲げ補強筋が耐力( $\sum a_i \cdot \sigma_y$ )を発揮するためには藤井・森田の研究<sup>4)</sup>を参考として下式の定着長さを確保する必要がある。

$$\text{定着長さ } L_d = a_i \cdot \sigma_y / (\phi \cdot \tau_{bu})$$

$$\tau_{bu} = (\tau_{c0} + \tau_{st}) \times 1.22$$

$$\tau_{c0} = (0.307bi + 0.427) \cdot \sqrt{F_c}$$

$$\tau_{st} = 24.9 (A_{st} / sNd_b) \cdot \sqrt{F_c} \leq 0.87 \cdot \sqrt{F_c}$$

ここで、 $\phi$ : 曲げ補強筋の周長、 $\tau_{bu}$ : 曲げ補強筋の付着強度、 $bi = b / nd_b - 1$ 、 $b = B_{j2}$ 、 $n$ : 主筋本数、 $d_b$ : 主筋径、 $a_i$ : 曲げ補強筋の断面積、 $A_{st}$ : 一組の横補強筋の全断面積、 $s$ : 横補強筋間隔、 $\sigma_y$ : 曲げ補強筋の降伏強度、スターラップ状の横補強筋がない場合には、

$$\tau_{bu} = \tau_{c0} \times 1.22$$

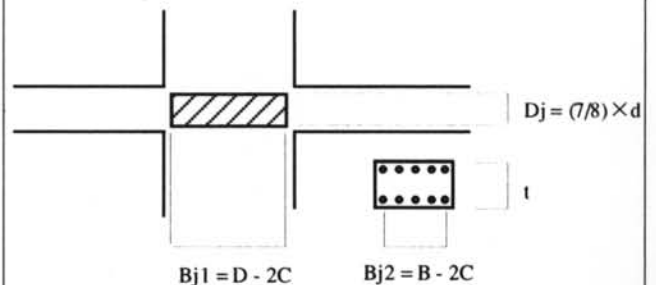


図-12 フラットプレートの耐力算定断面

### 3.3 中間免震層

中間免震層は図-11に示したように3階床下に設け、高減衰積層ゴムと滑り支承を併用した免震デバイスを図-13のように配置した。免震デバイスは基本性能、ばらつき、耐久性等に関し指定建築材料としての認定品を使う必要がある。

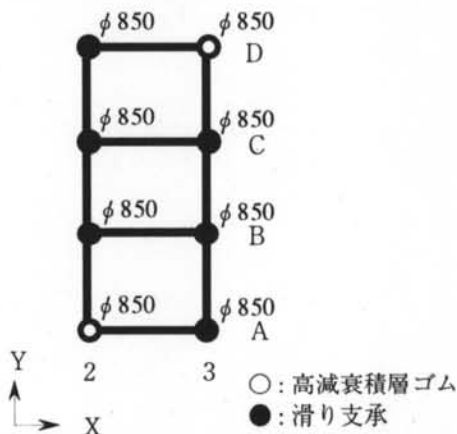


図-13 免震デバイスの配置(単位:mm)

免震デバイスの振動諸元は以下である。

#### (1) 高減衰積層ゴム

- 径 850mm、ゴム 6mm、40段
- ゴム弾性  $G = 0.4 \text{ N/mm}^2$
- 形状係数  $S1 = D / 4t = 35.4$
- $S2 = D / nt = 3.54$
- バネ定数  $K = 9.28 \text{ kN/cm / 台}$
- 種類 プリヂストーン KL401 タイプ

#### (2) 滑り支承(図-14を参照)

- 摩擦係数  $\mu = 0.1$ (四フッ化エチレン樹脂)
- 積層ゴム(弾性  $G = 0.4 \text{ N/mm}^2$ )
- 径 850mm、6mm、10段( $S1 = 35.4$ 、 $S2 = 14.2$ )
- バネ定数  $K = 37.1 \text{ kN/cm / 台}$

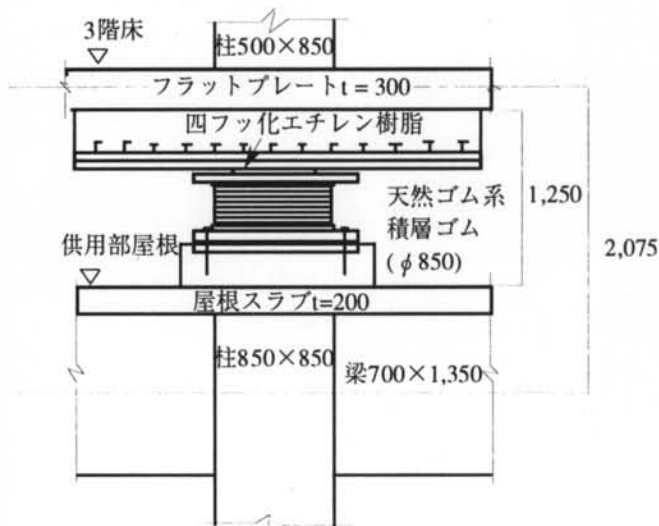


図-14 滑り支承(単位:mm)

(1)式の質量比は  $m/M = 0.68$  であり、滑り支承の摩擦係数で決まる耐力を層せん断力係数に換算すると7.7%となり、地震力を絶縁すると思われる。

### 3.4 動的解析モデルと地震入力

動的解析は部材の復元力特性を材端非線形バネとして与えたフレームモデルとし、1階柱脚を完全固定として建物のY方向に対して解析した。動的解析の仮定は以下である。

- (1) 質点の支配面積の重量を質点重量とし、回転慣性は無視した
- (2) 部材の復元力は材端バネに関し、 $M_c$ と $M_y$ を折点とするTri-Linear武田モデルとして与え、配筋から決まる耐力がフェイスの値であると考え、節点モーメントに換算し、復元力スケルトンの第二剛性比は0.4、第三剛性比は0.01とした
- (3) フラットプレートの復元力は原点指向性を示すが解析結果に示すように $M_y$ を越える領域に至る応答はなかったため、ここでは原点指向性の影響は無視した
- (4) スラブは面内のせん断剛性を線材置換(弾性)して解析した
- (5) 建物の粘性減衰は固有一次モードに対して $h = 3\%$ の瞬間剛性比例型とした
- (6) 地震入力は建築センター波(BCJレベル2、最大加速度355.7gal、継続時間120秒)とした

動的解析の結果を比較する「全層がラーメン構造」の建物モデルとは、3階以上の階高が2.73mであり、梁が $B \times D = 50 \times 73 \text{ cm}$ (4階以上)、 $B \times D = 65 \times 85 \text{ cm}$ (3階)、 $B \times D = 85 \times 135 \text{ cm}$ (2階)、柱は同じであり、スラブ厚が21cmの中間免震層がない建物である。

### 3.5 解析結果

#### (1) 固有値解析結果

初期剛性による固有値を求め、全層がラーメン構造のモデルと比較した固有周期を表-5に、中間層免震構造の刺激関数( $\beta_u$ )を図-15に示す。

解析モデル	固有周期	刺激係数
中間層免震構造	$T_1 = 2.31$ 秒	$\beta_1 = 1.097$
	$T_2 = 0.50$ 秒	$\beta_2 = 0.124$
	$T_3 = 0.24$ 秒	$\beta_3 = 0.072$
全層がラーメン構造	$T_1 = 0.60$ 秒	$\beta_1 = 1.404$
	$T_2 = 0.23$ 秒	$\beta_2 = 0.705$
	$T_3 = 0.15$ 秒	$\beta_3 = 0.474$

表-5 固有周期の比較

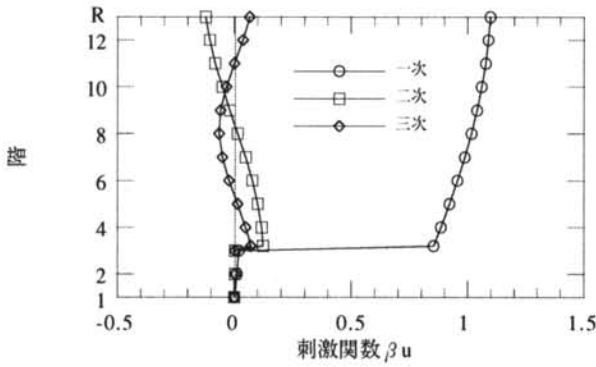


図-15 中間層免震構造の刺激関数

(2) 地震応答解析結果

建築センター波に対する地震応答解析結果を、「全層がラーメン構造」の建物(図中: ラーメン構造)と比較して、図-16から図-21に示す。(1)式で求める質量比が $m/M=0.68$ であり、免震層の位置としては若干高いとも考えられるが、免震効果は十分得られている。フラットプレート構造部分については降伏に至る部材はなく、材端塑性率は最大で0.56(5階)であった。1~2階のラーメン構造部分については、材端塑性率が大きくなる部分があるものの、解析した建築センター波に対しては塑性率が0.8を越えるものはなかった。中間免震層の応答は以下であり、高減衰積層ゴムと滑り支承で合わせて地震エネルギー入力の79%を消費しており、フラットプレート構造部分に対しては絶縁に近い履歴減衰効果を発揮した。

- 層間変形  $\delta = 40.9 \text{ cm}$
- 高減衰積層ゴムのせん断変形  $\gamma = 171\%$
- 軸応力度  $\sigma = 7.7 \text{ N/mm}^2 = \sigma_{cr} / 5.3$
- 高減衰積層ゴムの消費エネルギー/地震エネルギー入力 = 0.34
- 滑り支承の消費エネルギー/地震エネルギー入力 = 0.45

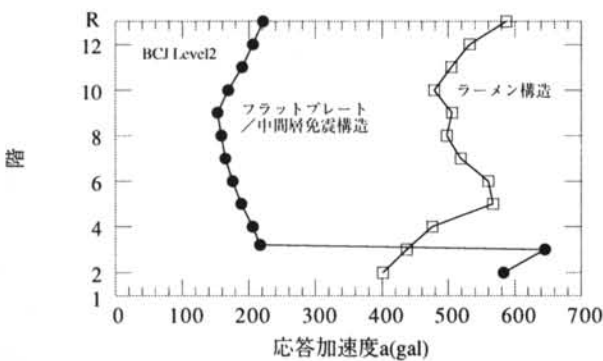


図-16 応答加速度

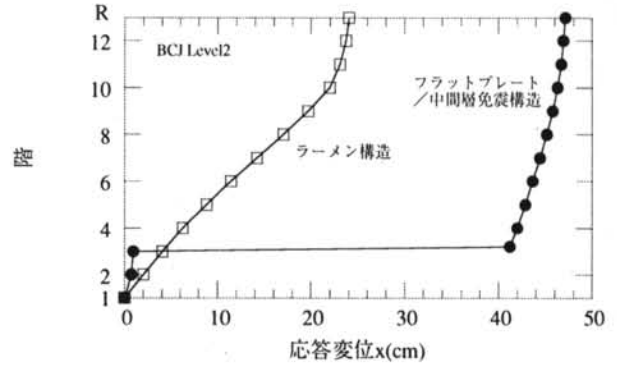


図-17 応答変位

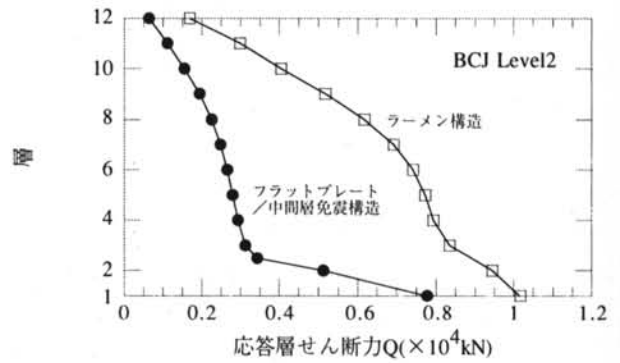


図-18 応答層せん断力

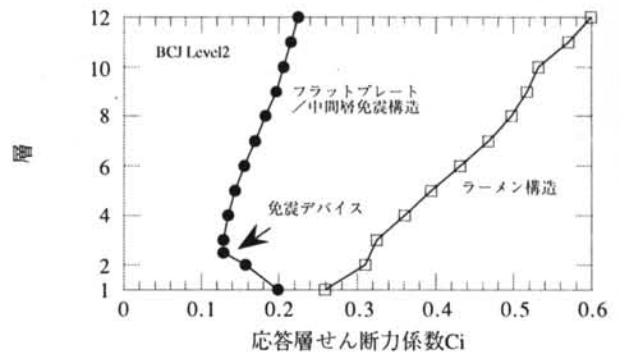


図-19 応答層せん断力係数

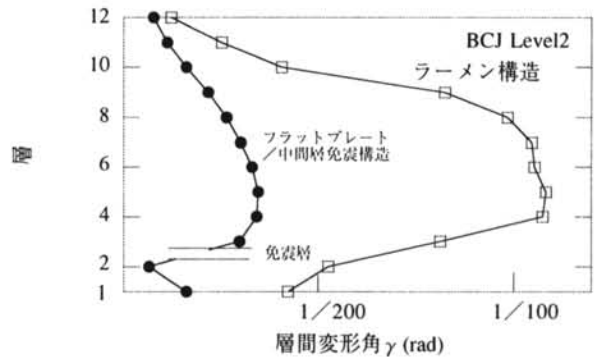
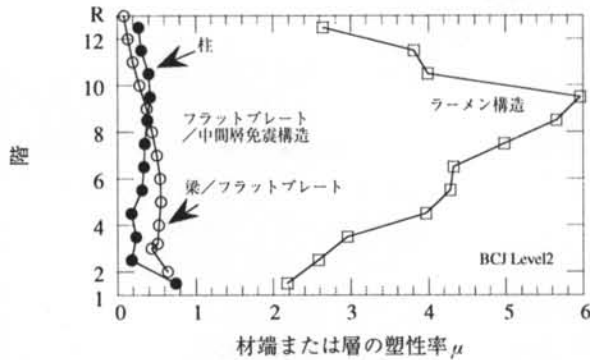


図-20 応答層間変形角





図一 21 材端または層の塑性率

### 3.6 建物コストの比較

RC系建物の耐震費用(地震力に対処する費用)は、梁と柱の鉄筋量の増加の影響が大きいと言われている。免震構造にすると、地震力が低減することから、これら耐震費用が減少する一方で、基礎免震構造ではピット構築の費用などが増え、トータルでは建設工事費は高くなる場合もある。しかし、建物コストを考える上では建設工事費ばかりでなく、建物の使用期間に亘るコストを考える必要がある。

ここでは、フラットプレート/中間層免震構造と全層をラーメン構造とした場合に対して建物コストを比較する。フラットプレート/中間層免震構造では建物の寿命を100年と想定し $F_c = 36\text{N/mm}^2$ のコンクリートを使用する。検討の仮定は以下であり、建設工事費の比較を表一6に示す。

#### 建設工事費検討の仮定

- (1) 構造 RC構造+EVシャフトS造  
規模 B0-12F-PH1  
基礎 場所打ち鋼管コンクリート拡底杭
- (2) 材料単価  
コンクリート(強度補正、打設手間を含む)  
Fc36: 15,600円/m<sup>3</sup>  
Fc27: 14,300円/m<sup>3</sup>  
鉄筋(運送、組立手間を含む)  
SD390: 106,000円/tf  
SD345: 101,000円/tf  
SD295A: 89,000円/tf  
高減衰積層ゴム: 120万円/台  
滑り支承(摩擦係数0.1): 150万円/台
- (3) 躯体を除く仕上げや設備の工事費は同一とする

スパンにもよるが、一般的には長期荷重のみで設計された建物に対して、地震荷重を考慮したRC系建物の建設工事費は、柱梁断面が大きくなり躯体重量

科目	ラーメン構造	FP/中間層免震構造
共通仮設	0.051	0.051
躯体工事	0.274	0.263
仕上げ工事	0.303	0.303
設備工事	0.256	0.256
その他	0.013	0.013
諸経費	0.070	0.070
設計料	0.033	0.033
合計	(1.000)	0.989

(注)ラーメン構造の合計を基準とした、FP:フラットプレート  
表一6 建設工事費の比較

が増大することにより、いわゆる耐震費用の比率が大きくなると考えられる。本研究のモデル建物について、長期荷重のみと、地震荷重が加わった場合の比較はしていないが、ラーメン構造での耐震費用の建設工事費に占める割合は大凡5~10%の比率である。モデル建物であるフラットプレート/中間層免震構造のコンクリート量は、(56cm/延べm<sup>2</sup>)であり、「全層がラーメン構造」である場合の鉄筋が327tfであるのに対して、フラットプレート/中間層免震構造は311tfであり、設計ベースシャが75%に低減したことによりコンクリートボリュームが減じ、鉄筋量が減じたことに繋がっていると考えられる。また、中間層免震では基礎免震のようにピット構築が不要であり、それらのことから、設定した設計目標に対して「全層をラーメン構造」とした場合に比較して著しい建設工事費のアップなしにフラットプレート/中間層免震構造が実現できることは、有利な構造形式と考えられる。

一方、免震構造の場合には、建設工事費ばかりでなく地震修復費用などを含むライフサイクルコストを比較して、耐震性能の向上を評価する必要があることは当然である。耐力および剛性の高いラーメン構造が地震を受けると、躯体にひび割れが発生したり、仕上げ材などが剥離して使用性や復旧性に係わるコストが増え、中小地震を含め免震構造に比較してライフサイクルコストが高くなる要因と言われている<sup>9)</sup>。図一20に示したように任意階で変形が大きくなるラーメン構造は最悪の場合には建て替えを必要とする場合もあり得る。また、図一16に示したように中間免震層を設けたモデル建物のフラットプレート構造部分での応答加速度は、ラーメン構造の約1/3程度に低減し、地震後の被災額および資産価値まで含めると、わずかな地震被害に収まると考えられる。ラーメン構造に比較すると、免震構造の使用

性や復旧性を含む地震損傷コストは30%程度で済むと言われており<sup>9)</sup>、地震応答が低減するフラットプレート／中間層免震構造はライフサイクルコストの観点からも優位である。「住み続けることができる」という観点の都市居住を考える上では、それに適する構造形式があるのであり、フラットプレート／中間層免震構造は、地震被害を少なくし建物の物理的寿命を長くすることに繋がり、それらを評価したライフサイクルコストの面からも構造形式としての一つの選択肢と考えられる。

#### § 4 . おわりに

経済大国と言われながら豊かさが感じられない原因として、居住空間にゆとりがないことが挙げられている。わが国は第二次大戦後に都市の多くは廃墟と化し、量的不足を補うためにマスプロ効果の大きい構法により建物が建設された。それらは住み方の多様化には馴染みにくいものであり、間取りなどの変更は難しい建物である。また、住み続け難いから建て替えるという生産システムも今後は取りにくいことは、環境問題などからも明白である。さらに、今後は熟年夫婦だけのエンブティネスターと呼ばれる家族構成が増え、住み続けながら趣味などを生かしてライフスタイルに合わせた住み替えの志向が増えるとも言われている。

フラットプレート構造はこのような住要求に合うと考えられるものの、耐震性が問題となるわが国では、塑性履歴に伴うエネルギー消費が小さいことから、ラーメン構造と比較すると耐震性を確保し難い構造と考えられてきた。

本報告では、都市居住型建物を対象として、中間層免震構造と組み合わせたフラットプレート構造の耐震性を検討した。検討結果の要約は以下である。

- (1) 構造形式の変わる部分を中間免震層とすることで、地震力を絶縁することができ、中間免震層より上層の地震応答が著しく低減する部位をフラットプレート構造とすることが容易となる。
- (2) 地震力が低減することから、フラットプレート構造部分はスパンや階高を大きくできる。
- (3) フラットプレートの厚さを30cmとしたモデル建物について、フラットプレートに塑性化は発生せず、中間免震層のせん断力係数は0.13、ベースシャ係数は0.20であった。
- (4) 中間層免震と組み合わせたことによる地震応答の低減に係わらず、ベースシャ係数で0.15程度を想定した剛性と耐力を確保する設計をしておけば、免震効果が発揮されて、パンチング脆性破壊の発生が懸念されるフラットプレート構造についても、弾性設計が可能となる。
- (5) 中間免震層は、それより低層部となる層に高次モードが発生しないような位置に設置されていれば良く、解析したモデル建物のようにフラットプレート構造と中間層免震構造を組み合わせる構造システムは今後の都市居住を実現する一つの架構システムと考えられる。
- (6) 耐震性能の違いをそのままとして、フラットプレート／中間層免震構造の建設工事費はラーメン構造とほぼ同等である。さらに「住み続けることができる」というライフサイクルコストという観点を考えても、フラットプレート／中間層免震構造は推奨できる一つの構造形式である。

#### <参考文献>

- 1) 手塚武仁：損傷集中型制震構造の地震応答特性，清水建設研究報告 Vol.73，2001年4月，pp.67～76
- 2) NIKKEI ARCHITECTURE 1998.11.30より
- 3) 手塚武仁，松下吉男，加藤勉：プレキャストワッフルスラブとプレキャスト柱の接合部の耐力と応力伝達機構，日本建築学会構造系論文集第471号，1995年5月，pp.111～118
- 4) 藤井栄，森田司郎：異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究，日本建築学会論文報告集第324号，1983年2月，pp.45～53
- 5) 手塚武仁，平島新一：長寿命構造の総耐震コスト評価，日本建築学会技術報告集第10号，2000年6月，pp.67～70