

## 第1層エネルギー集中型鉄骨耐震構法の提案

矢部 喜堂  
(技術研究所)

寺田 岳彦  
(技術研究所)

真瀬 伸治  
(技術本部)

宇野 寿郎  
(技術本部)

平間 敏彦  
(技術本部)

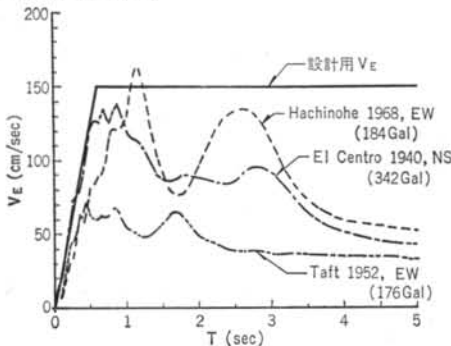
### § 1. はじめに

現在、広く普及している耐震設計法は、地震による建物への荷重効果を、慣性力として評価するものである。一方、地震による建物への影響をエネルギーとして評価し、地震エネルギー入力と構造物の吸収エネルギーを対比することによる、いわゆるエネルギー論的耐震設計法の可能性が示唆されている<sup>1)5)</sup>。

通常の耐震設計法に基づく多層建物の地震による各層の損傷分布は、多くの震害調査や地震応答解析の結果、主として各層の降伏せん断力係数分布に依存し、相対的に強度の弱い層に損傷が集中することが明らかにされている<sup>6)</sup>。したがって、大きな損傷を避けるためには、全層に相当の塑性変形能力を見込んだ耐震的配慮が必要である。

しかし、逆に損傷の部位を特定層に限定し、その部位に対してのみ特別な塑性変形能力を付加することによって他の層に対する耐震的配慮を軽減でき、むしろ構造全体の耐震性を増すとともに経済的な設計が可能と考えられる。

鋼素材は本来極めて靱性が高く、塑性変形能力が大きいため、大きなエネルギー吸収能力を持つことが知られており<sup>6)8)</sup>、この特性を十分に利用した特定層の設計が可能と考えられる。



図—1  $V_E-T$  関係

筆者らは、エネルギー論的耐震設計の観点に立って第1層に柔部材と剛部材から成る柔剛混合構造を配し、第1層の強度を第2層以上の強度に対して意図的に低くすることにより地震エネルギー入力の大部分を第1層に吸収させ、第2層以上へのエネルギー入力を大幅に低減させることのできる新しい鉄骨耐震構法を提案する。

本報は、エネルギー論的耐震設計法をレビューするとともに、本構法を実際の設計に適用するに当たって第1層の設計に必要なパラメータについて検討した後、多層鉄骨建物への本構法の適用性について試設計を行ない、現行設計法による場合と対比して本構法の有効性を検討したものである。

### § 2. エネルギー理論<sup>5)</sup>

#### 2.1 エネルギーの釣合い

エネルギー論では、地震時の建物のエネルギー釣合式は次式で表わされる。

$$W_e + W_h + W_p = E \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 $W_e$ は弾性振動エネルギーで、運動エネルギーと弾性ひずみエネルギーの和として定義される。 $W_h$ は減衰によって消費されるエネルギー、 $W_p$ は塑性ひずみエネルギーで、 $E$ は地震動によって建物に投入される総エネルギーを表わす。

#### 2.2 総エネルギー入力

多くの弾塑性応答解析の結果、地震によって建物に投入される総エネルギー入力 $E$ は建物の総質量 $M$ および1次固有周期 $T$ に依存し、各層の質量分布、剛性分布および復元力特性の形態によらない極めて安定した量であることが知られている。総エネルギー入力 $E$ を、次式により等価速度 $V_E$ に変換する。

$$V_E = \sqrt{2E/M} \quad \dots\dots(2)$$

多くの弾塑性応答解析の結果、 $V_E-T$  関係は図—1

に示すような Bi-linear 関係と見なすことができる。

地震動による建物への荷重効果を総エネルギー入力で基準化すれば、個々の地震波の周期特性による影響を排除できる。

### 2.3 骨組のエネルギー吸収能力

建物の耐震安全性を評価するためには、建物の部材および骨組のエネルギー吸収能力を定量的に評価する必要がある。

せん断型多層骨組の第  $i$  層が消費する累積塑性ひずみエネルギーを  $W_{pi}$  とし、骨組全体が消費する累積塑性ひずみエネルギーを  $W_p$  とすれば次式が成り立つ。

$$W_p = \sum_i W_{pi} \quad \dots\dots(3)$$

各層の復元力特性が完全弾塑性型であれば、 $W_{pi}$  は次式で表現できる (図-2 参照)。

$$W_{pi} = Q_{yi} \delta_{pi} = Q_{yi} \delta_{yi} \eta_i \quad \dots\dots(4)$$

ここに、 $Q_{yi}$ 、 $\delta_{pi}$ 、 $\delta_{yi}$  および  $\eta_i$  はそれぞれ第  $i$  層の降伏せん断力、累積塑性変形、降伏変形および累積塑性変形倍率である。

式(4)より、層の累積塑性変形倍率  $\eta_i$  は塑性ひずみエネルギーと比例関係にあり、損傷の指標となる。

極限地震下では、建物の吸収エネルギーはほとんど塑性ひずみエネルギー  $W_{pi}$  として吸収され、弾性振動エネルギー  $W_{ei}$  は相対的に小さい。

### 2.4 損傷集中則

多層骨組では、相対的に強度が弱い層に損傷が集中する。すなわち、各層の損傷分布 ( $\eta_i$ ) は専ら各層の降伏せん断力係数分布に依存する。各層の  $\eta_i$  が等しくなるような降伏せん断力係数分布を最適降伏せん断力係数分布と呼び、図-3 のような単一曲線で表わされる<sup>4)5)</sup>。

応答解析の結果、各層の降伏せん断力係数分布  $\alpha_i/\alpha_1$  の最適降伏せん断力係数分布  $\alpha_i$  に対する比が 1 より大きい層では損傷は生じにくく、1 より小さい層では損傷が集中する。図-4 のように、第 2 層以上の降伏せん断

力係数  $\alpha_i$  が次式を満足するようにすれば、損傷の大部分を第 1 層に集中させることができる。

$$\alpha_i \geq a \bar{\alpha}_i \alpha_1 \quad (i \geq 2, a > 1.0) \quad \dots\dots(5)$$

ちなみに、第 1 層に 95% 以上の損傷を集中させるのに必要な強度ギャップ係数  $a$  は、1.2~1.8 の範囲にあることが分かっている。

### 2.5 耐震安全性の判定

エネルギー論的耐震設計法では、骨組のエネルギー吸収能力が地震による総エネルギー入力を上回ることにより耐震安全性を評価する。

$$W_p \geq E \quad \dots\dots(6)$$

## § 3. 構法の提案

### 3.1 構法の概要

筆者らが提案する構法は、第 1 層と第 2 層以上に適切な強度ギャップをつけて地震エネルギー入力を第 1 層に集中させ、第 1 層の特定の鉄骨部材を塑性化させることにより地震エネルギー入力を累積塑性ひずみエネルギーとして吸収し、建造物の主要な部材である柱および梁は極限地震時においてもほぼ弾性に留めるように意図した耐震構法である。図-5 に、本構法の一例を示す。

本構法では、第 1 層に図-6 に示すような柔部材と剛部材から成る柔剛混合構造を配置する。

### 3.2 柔剛混合構造の機能

柔部材は、極限地震時においても弾性に留めて復元力を保持するための部材であり、本構法では主柱を柔部材としている。したがって、大きな弾性変形能力と支持能力を確保するために高張力鋼を使用する。また、予想される地震時の大きな変形に対して、 $P-D$  効果による復元力特性の劣化を防止するために所要の剛性を付加し、1 方向への塑性化の集中を減少させるとともに変形を低

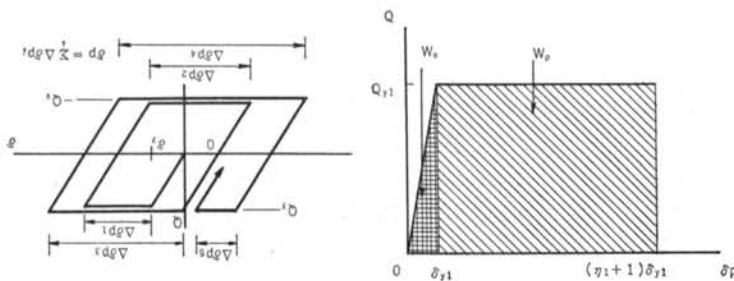


図-2 完全弾塑性型の累積塑性ひずみエネルギー

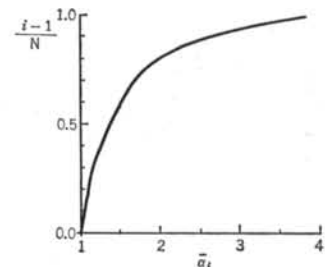
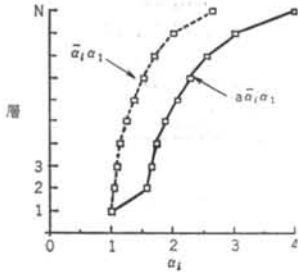


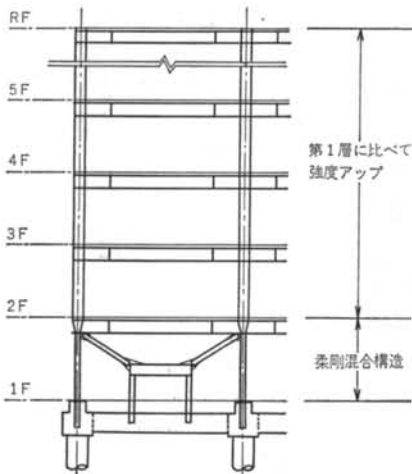
図-3 最適降伏せん断力係数分布

減させる効果を持たせる。

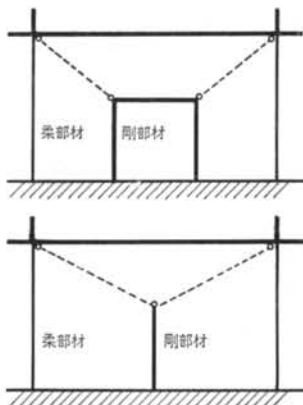
一方、剛部材は大部分の地震エネルギー入力を累積塑性ひずみエネルギーとして吸収する部材であり、塑性変形能力の大きい軟鋼を使用し、局部座屈が生じないように幅厚比を考慮して設計する必要がある。



図一四 第1層エネルギー集中型架構における降伏せん断力係数分布



図一五 第1層エネルギー集中型柔剛混合鉄骨架構の例



図一六 柔剛混合構造の例

## § 4. 柔部材と剛部材のパラメトリックスタディ

### 4.1 目的

ここでは、本構法を実際の建物に適用するに当たって、第1層の柔剛混合構造が所期の性能を最大限に発揮できるように柔部材と剛部材の設計条件について、応答解析により検討する。

### 4.2 解析手法

解析モデルは5層ラーメン構造を想定し、第1層を柔剛混合構造とする。地震エネルギー入力の大部分を第1層に吸収させるため、第2層以上の降伏せん断力係数は最適降伏せん断力係数分布の1.5倍とする。パラメータとしては、柔部材と剛部材の降伏変形比と降伏強度比を次のように選んだ。

$$r\delta_y/s\delta_y = 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20$$

$$rQ_y/sQ_y = 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5$$

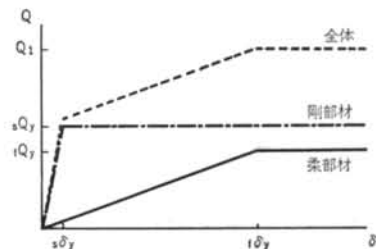
ここでは、剛部材の降伏変形  $s\delta_y$  と降伏強度  $sQ_y$  を一定とした。解析モデルとしての建物の固有周期は、1.0～1.4秒の範囲にある。

入力地震波としては、El Centro 1940, NS ( $t_0=40$ 秒), Taft 1952, EW ( $t_0=40$ 秒) および Hachinohe 1968, EW ( $t_0=30$ 秒) の3波を用いる。入力加速度は総エネルギー入力により基準化し、極限地震レベルとして総エネルギー入力の等価速度  $V_E=150$  cm/sec を与える。

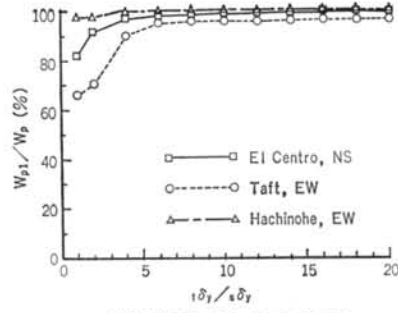
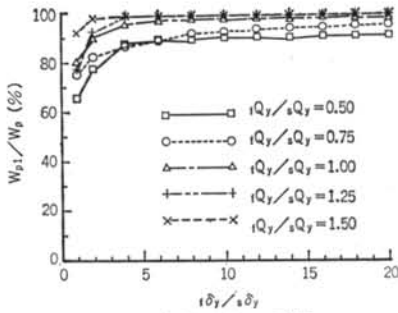
復元力特性は、図一7に示すような完全弾塑性型とする。また、減衰は無視する。

### 4.3 解析結果

図一8に、骨組全体の塑性ひずみエネルギーに対する第1層の塑性ひずみエネルギーの比率を示す。降伏変形比がほぼ8以上の場合、第1層の塑性ひずみエネルギーは降伏強度比および地震波の違いにかかわらず、骨組全体の塑性ひずみエネルギーの90%以上が集中していることが分かる。また、降伏強度比の大きい方が第1層への



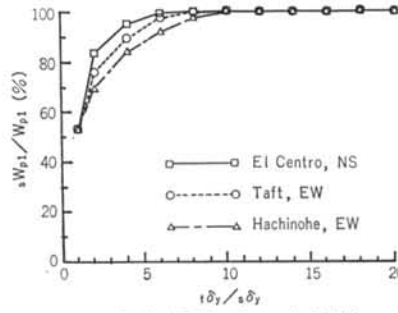
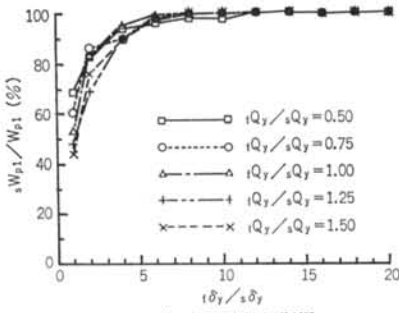
図一七 柔剛混合構造における復元力特性



(a) 強度比の影響

(b) 地震波の違いによる影響

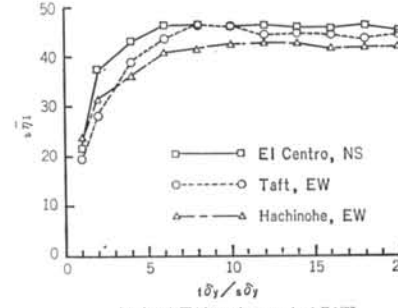
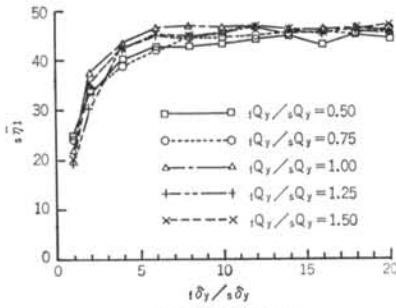
図-8 第1層の累積塑性ひずみエネルギー吸収率



(a) 強度比の影響

(b) 地震波の違いによる影響

図-9 剛部材の累積塑性ひずみエネルギー



(a) 強度比の影響

(b) 地震波の違いによる影響

図-10 剛部材の累積塑性変形倍率(平均値)



図-11 設計フロー

集中率は大きくなる。

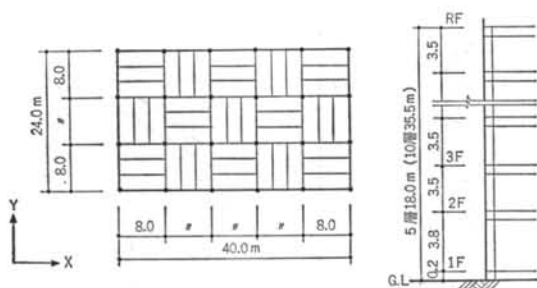
図-9に、第1層の吸収エネルギーのうち、剛部材の負担率を示す。降伏変形比が8以上では、降伏強度比、地震波の違いにかかわらず、剛部材が第1層の塑性ひずみエネルギーを100%吸収し、柔部材は、弾性範囲に留まっている。

図-10に、剛部材の累積塑性変形倍率(平均値)  $\bar{s}$  を示

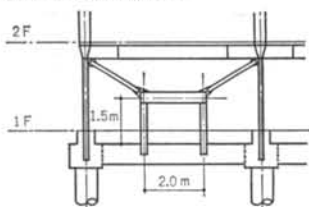
す。降伏変形比が8以上の場合、降伏強度比および地震波の違いによらず  $\bar{s}$  は一定となる。すなわち、この領域では総エネルギー入力  $V_E$  と  $\bar{s}$  は一義的な関係を持ち、 $V_E$  が設定できれば所要の  $\bar{s}$  が決定されることになる。

以上の結果より、柔部材と剛部材の組み合わせとして次式を満足するように選択すればよい。

$$\left. \begin{aligned} r\delta_y/s\delta_y &\geq 8.0 \\ rQ_y/sQ_y &\geq 1.0 \end{aligned} \right\} \dots\dots(7)$$



図一12 設計例の平面図、断面図



図一13 剛柔混合構造

モデル	$\frac{rQ_y}{sQ_y}$	$\frac{r\delta_y}{s\delta_y}$	剛部材 $\bar{n}$
5 層	0.78	9.07	45
10 層	0.68	8.15	35

$rQ_y, r\delta_y$ : 柔部材の降伏強度, 降伏変位  
 $sQ_y, s\delta_y$ : 剛部材の降伏強度, 降伏変位

表一1 剛柔部材の設計値

## § 5. 設計例の弾塑性応答解析

### 5.1 設計手順

本構法における設計フローの概略を、図一11に示す。以下に、主要な項目について若干の説明を加える。

#### (1) エネルギー入力の設定

ある地震動によって構造物に入るエネルギー入力  $E$  はその建物の全質量  $M$ , 1次固有周期  $T$  によって決まる。極限地震に対する設計用エネルギー入力の等価速度  $V_D$  は、地盤種別ごとに設定される<sup>5)</sup>。

#### (2) 第1層降伏せん断力係数の算定

極限地震時におけるエネルギー入力を第1層の剛部材で吸収するために必要な剛部材の降伏せん断力係数  $\alpha_1$  は、主として剛部材の一方荷時の塑性変形能力  $s\eta^*$  および建物の1次固有周期  $T$  によって決まる。

極限地震に対して柔部材が弾性に留まるように柔部材と剛部材の降伏強度比  $q$  が設定されれば、第1層降伏せん断力係数は次式で与えられる。

$$\alpha_{d1} = (1+q)\alpha \quad \dots\dots(8)$$

#### (3) 第1層の設計

剛部材は、所要の塑性変形能力  $s\eta^*$  が発揮できるように、局部座屈を生じない適切な幅厚比をもつ断面とし、

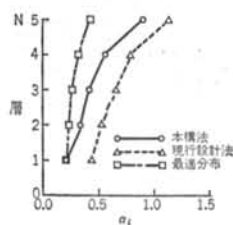
柔部材は剛部材との降伏強度比、降伏変形比、 $P-I$  効果を考慮して設計する。

#### (4) 第2層以上の設計

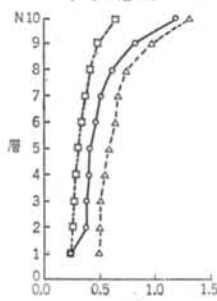
第1層でエネルギー入力を集中的に吸収させるために、第2層以上の降伏せん断力係数分布は最適分布の1.2~1.8倍程度として、第1層と第2層との間に強度ギャップをつける<sup>4)</sup>。

#### (5) 応答解析

設計された骨組に対して El Centro, Taft 等の標準的な地震波を用いて、地盤種別に応じた設計用エネルギー入力を得られるように加速度レベルを調整して弾塑性応答解析を行ない、第1層の剛部材の累積塑性変形倍率、最大層間変形角等をチェックする。



(a) 5層モデル



(b) 10層モデル

図一14 降伏せん断力係数分布

### 5.2 設計例

図一12に、設計例として5層および10層建物の平面図と断面図を示す。これらの設計例では、第1層に図一13に示す柔部材と剛部材を配置し、第2層以上は通常のラーメン構造とした。柔部材、剛部材の主要な設計値を表一1に示す。剛部材の設置数は、X, Y各方向ともに5層建物の場合4箇所、10層建物の場合6箇所とした。

設計用エネルギー入力の等価速度  $V_D$  は 150 cm/sec とし、剛部材はこのエネルギー入力のほとんどを塑性ひずみエネルギーとして吸収し得るように普通鋼を用いて設計した。また、柔部材は高張力鋼を用い、 $P-I$  効果や全体座屈等を考慮して十分な変形追随性を確保するように設計した。

第2層以上は、各層降伏せん断力係数  $\alpha_i$  が図一14における最適分布のほぼ1.5倍となるように設計した。なお、現行設計法では地盤種別を第2種、 $C_0=0.2$  とした。

### 5.3 解析方法

表一2に解析諸元を示す。層剛性は、接合部を剛域として骨組解析により求め、等価せん断剛性として評価した。降伏変位は、各部材の全塑性モーメントから節点振り分け法により求めた降伏層せん断力と層剛性から算出した。

(a) 5層モデル

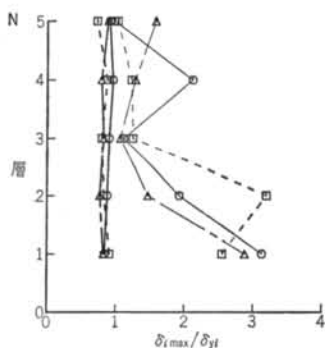
層	重量 (t)	層剛性 (t/cm)	降伏変形 (cm)
5	687.0	105.8 (154.5)	5.94 (5.09)
4	548.5	112.6 (199.6)	6.24 (4.96)
3	552.6	124.7 (255.8)	6.05 (4.64)
2	558.8	126.8 (312.8)	6.41 (3.95)
1	565.1	柔 27.7 剛 320.8 (524.7)	柔 9.89 剛 1.09 (2.45)

(注) ( )は現行設計法による設計値

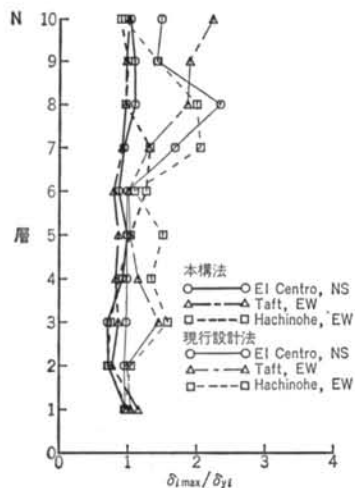
(b) 10層モデル

層	重量 (t)	層剛性 (t/cm)	降伏変形 (cm)
10	691.1	169.1 (197.6)	4.91 (4.62)
9	554.8	203.2 (262.0)	5.10 (4.41)
8	558.9	235.3 (345.3)	4.77 (3.92)
7	562.6	273.7 (447.6)	4.46 (3.56)
6	579.2	345.0 (547.6)	4.01 (3.50)
5	579.2	410.9 (603.8)	3.57 (3.45)
4	585.0	466.5 (661.0)	3.61 (3.40)
3	586.3	484.6 (796.4)	3.76 (3.02)
2	586.3	464.9 (969.7)	4.37 (2.77)
1	594.3	柔 65.5 剛 779.0 (1373.8)	柔 8.88 剛 1.09 (2.09)

表一 解析諸元

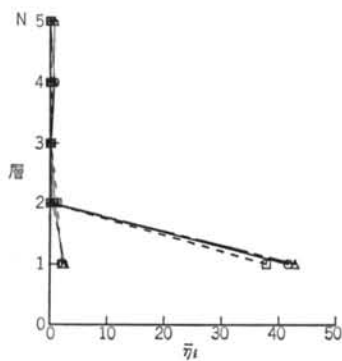


(a) 5層モデル

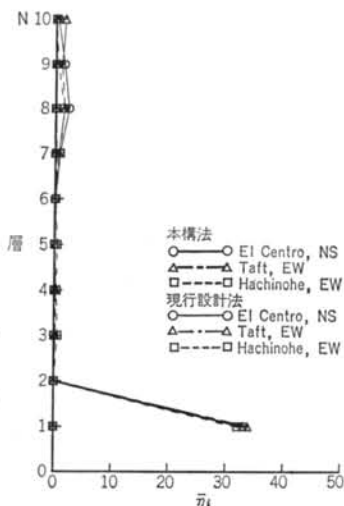


(b) 10層モデル

図一七 各層の塑性率

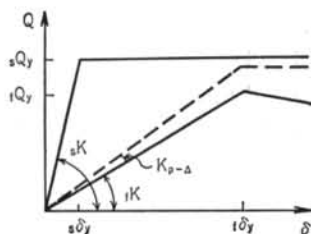


(a) 5層モデル



(b) 10層モデル

図一八 各層の累積塑性変形倍率



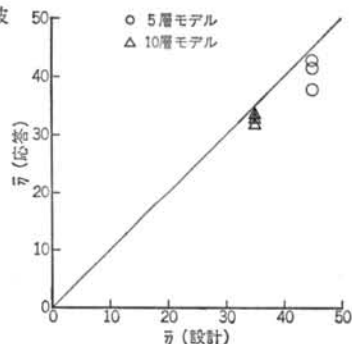
図一五 解析モデル 図一六 柔剛部材の復元力特性

モデル	本構法	現行設計法
5層	1.39 sec	0.99 sec
10層	1.58 sec	1.26 sec

表一三 1次固有周期 T

地震波	時間刻み Δt	継続時間
El Centro 1940, NS	0.0050 sec	40 sec
Taft 1952, EW	0.0050 sec	40 sec
八戸 1968, EW	0.0033 sec	30 sec

表一四 入力地震波

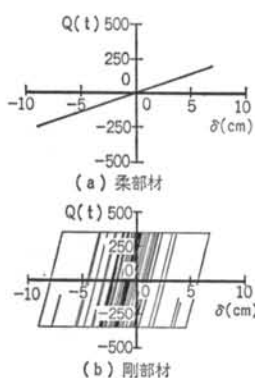


図一九 剛部材の δ̄i の設計予測値と応答解析値の対応

解析モデルは、図一五に示す多質点せん断型振動系とした。復元力特性は完全弾塑性型を用い、ひずみ硬化は無視した。図一六に柔部材、剛部材の復元力特性を示す。柔部材には  $P-\Delta$  効果により見かけ上低下する剛性  $K_{P-\Delta}$  を付加している。数値解析手法はNewmark- $\beta$  法を用い、無減衰とした。解析モデルの1次固有周期を表一三に示す。表一四に、入力地震波の時間刻みと継続時間を示す。入力加速度は、総エネルギー入力等の価速度が  $V_E=150$  cm/sec となるように設定した。

## 5.4 解析結果

図一七に、各層の塑性率 ( $\delta_{i \max} / \delta_{yi}$ ) を示す。現行設計法では塑性化する層



図—20 柔剛部材の履歴（5層，El Centro）  
 がばらつき，地震波による影響も大きい，本構法では全層ほぼ弾性範囲内にある。

図—18に，各層の累積塑性変形倍率  $\eta_t = (\eta^+ + \eta^-)/2$  を示す。エネルギー入力のほとんどを，第1層で集中的に吸収していることが分かる。

図—19に，剛部材の  $\bar{q}$  について設計予測値と応答解析との対応を示す。§ 4.の結果に基づく剛部材の  $\bar{q}$  の設計予測値と応答解析値とが良く対応し，地震波によるばらつきも小さい。

図—20に，柔部材，剛部材の各々の履歴を5層モデルのEl Centro地震波の場合について示した。柔部材が弾性を維持することにより，剛部材は変形の片寄りが少な

い理想的なエネルギー吸収が期待できることが分かる。

## § 6. 結論

本報では，第1層の強度を第2層以上の強度に対し相対的に低くし，また第1層に柔部材と剛部材で構成された柔剛混合構造を配した第1層エネルギー集中型鉄骨耐震構法を提案した。

パラメトリックスタディの結果，第1層の柔剛混合構造において所期の性能を満たすべき柔部材と剛部材の設計条件が明かになった。この条件は，現存の鋼素材によって十分実現可能な範囲にある。

また，本構法を5層および10層の鉄骨建物に適用して極限地震レベルにおける地震応答解析を行なった結果，第1層にエネルギーを集中させ，第2層以上を弾性に留めること，ならびに剛部材のエネルギー吸収量を定量的に把握した設計が可能であることが確認できた。

なお，本研究は住友金属工業株式会社との共同研究によるものである。

本研究に当たっては，東京大学助教授秋山 宏博士のご指導をいただきました。末尾ながら，深甚なる謝意を表します。

## <参考文献>

- 1) G.W. Housner: "Limit Design of Structures to Resist Earthquakes" Proc. of 1st WCEE, 1956
- 2) 加藤勉，秋山宏: "強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷" 日本建築学会論文報告集 第235号 (1975年)
- 3) 加藤勉，秋山宏: "地震時における鋼構造剪断型多層骨組の損傷分布則" 日本建築学会論文報告集 第270号 (1978年)
- 4) 秋山宏: "エネルギー集中型多層骨組における  $D_s$  値" 日本建築学会論文報告集 第341号 (1984年)
- 5) 秋山宏: "建築物の耐震極限設計" 東京大学出版会 (1980年)
- 6) B.Kato: "Local Buckling of Steel Circular Tubes in Plastic Region" Proc. of Inter. Colloquium on Stability of Structures under Static and Dynamic Loads, ASCE, 1977
- 7) 鈴木敏郎，小河利行，加藤征宏，栗本照彦: "軸圧縮を受ける高張力鋼管の強度性状に関する研究" 日本建築学会論文報告集 第321号 (1982年)
- 8) B.Kato, H. Akiyama & Y. Yamanouchi: "Predictable Properties of Material under Incremental Cycle Loading" IABSE Symposium, 1973

