

地震力を受けるせん断型多層骨組の損傷分布に関する研究

兼光知巳
(技術研究所)
真瀬伸治
(技術研究所)
宇野寿郎
(技術本部)

矢部喜堂
(技術研究所)
寺田岳彦
(技術研究所)
平間敏彦
(原子力本部)

§ 1. はじめに

耐震設計では、構造物の地震入力エネルギーの吸収能力を把握する必要がある。このエネルギー吸収能力は、構造物が崩壊するまでに吸収した塑性ひずみエネルギーによって評価でき、崩壊するまでの累積塑性変形倍率によって表わすことができる。また、多層骨組が地震力を受けたときに吸収する塑性ひずみエネルギーの分布（損傷分布）、すなわち各層の累積塑性変形倍率は、層の降伏せん断力をその層より上部の全重量で除した、降伏せん断力係数の高さ方向の分布に依存することが知られている¹⁾²⁾。降伏せん断力係数分布と累積塑性変形倍率との関係を求めるためには、その基準状態、すなわち各層の累積塑性変形倍率が等しくなるときの降伏せん断力係数分布（最適降伏せん断力係数分布）を設定する必要がある。そして、各層の降伏せん断力係数の最適降伏せん断力係数分布からの隔たりと各層の累積塑性変形倍率との関係を把握すれば、多層骨組の損傷分布を予測することができる。最適降伏せん断力係数分布についてはこれまで種々提案されており^{3)~6)}、また現行設計では A_t 分布が用いられている。しかし、これらの場合には上層部付近に損傷が集中する傾向にある⁷⁾⁸⁾。

本報告では、まず15層以下のせん断型多層骨組について弾塑性応答解析を行ない、上層部付近においても損傷集中が生じないような最適降伏せん断力係数分布を求める。

また、降伏せん断力係数と損傷分布との関係を用いた構造の例として、文献9), 10)に示されている第1層エネルギー集中型構造の強度分布を考える。本構造は、第2層以上の強度を第1層のそれに比べ相対的に上げることによって、第1層に地震入力エネルギーの大部分を吸収させ、第2層以上はほぼ弾性範囲に留めるようにする構造である。そこで、ここで求めた最適降伏せん断力係数分布を用いて、第1層エネルギー集中型構造における第1層に所要のエネルギーを吸収させるための、第2層

以上の強度割増率を応答解析によって求める。

§ 2. 最適降伏せん断力係数分布

2.1 解析方法

解析モデルは、第2種地盤に建つせん断型多層骨組を想定し、せん断バネー質点系を用いた。解析では、質量分布 m_i 、剛性分布 k_i および第1層降伏せん断力係数 α_1 を一定とし、第2層以上の降伏変形 δ_{y_i} を変化させることによって、各層の累積塑性変形倍率が等しくなるような第2層以上の降伏せん断力係数分布を、数値解析によって試行錯誤的に求めた。ここで、各層の降伏せん断力係数は次式で定義される。

$$\alpha_i = \frac{k_i \delta_{y_i}}{\sum_{j=1}^N m_j g} \quad \dots \dots (1)$$

ここで、 i は層番号、 g は重力加速度を示す。

解析諸元を、以下に示す。

(1)層数 N は、3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 の7通りとした。

(2)各層の重量 W_i は、すべて 500t ($m_i = 0.510 \text{ t} \cdot \text{sec}^2/\text{cm}$) とした。

(3)剛性分布 k_i は直線分布とし、骨組頂部のバネ定数に対する基部のバネ定数の比 $\kappa^3)$ を

$$N=3, 5 \text{ のとき } \kappa=2.5$$

$$N=7, 9, \dots, 15 \text{ のとき } \kappa=4.0$$

とした。

(4)第1層降伏せん断力係数 α_1 および第1層降伏変形 δ_{y_1} は、次の3ケースとした。

$$\text{Case 1-1: } \alpha_1=0.2, \delta_{y_1}=5.0 \text{ cm}$$

$$\text{Case 1-2: } \alpha_1=0.2, \delta_{y_1}=1.0 \text{ cm}$$

$$\text{Case 1-3: } \alpha_1=0.5, \delta_{y_1}=5.0 \text{ cm}$$

(5)入力地震波は、E1 Centro 1949 NS (最大入力加速度 $a_{\max}=341.7 \text{ Gal}$, 繼続時間 $t_0=40 \text{ sec}$), Taft 1952

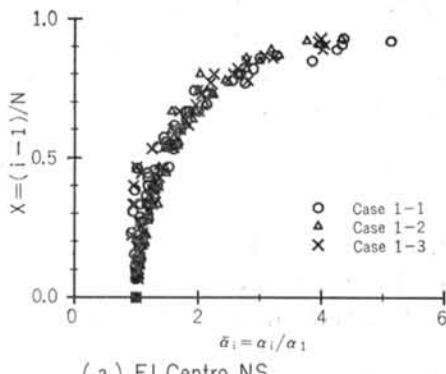
EW ($z_{\max}=175.9$ Gal, $t_0=40$ sec), Hachinohe 1968 EW ($z_{\max}=183.6$ Gal, $t_0=30$ sec), Tohoku Univ. 1F. 1978 EW ($z_{\max}=258.0$ Gal, $t_0=30$ sec), および White noise ($z_{\max}=100.0$ Gal, $t_0=20$ sec) を用いた。

(6) 入力レベルは、第2種地盤における極限地震レベルを想定し、総エネルギー入力の等価速度 $V_E=150$ cm/sec となるように入力加速度を拡幅した。拡幅率は(5)に示した入力地震波の順に、1.14~2.02, 2.27~4.43, 0.90~3.38, 0.90~1.78, 10.20~14.90 となった。

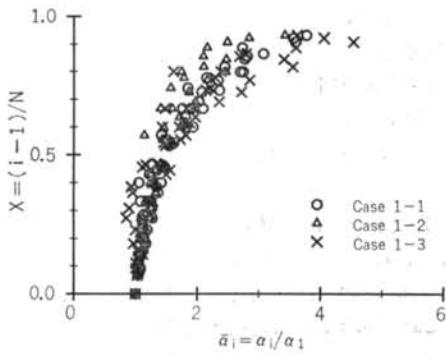
復元力特性は完全弾塑性型とし、減衰は無視した。1次固有周期 T_1 は層数によって異なり、Case 1-1~1-3 の各々において、1.41~2.96 sec, 0.63~1.32 sec, 0.89~1.87 sec となった。第2層以上の降伏変形は Case 1-1~1-3 の各々において、2.13~9.08 cm, 0.67~1.36 cm, 4.02~8.15 cm となった。数値解析は Newmark- β 法 ($\beta=1/4$) を用い、時間刻みは 1/200 sec とした。

2.2 解析結果

図-1(a), (b) には、各々 El Centro NS および



(a) El Centro NS



(b) Hachinohe EW

図-1 各パラメータが最適降伏せん断力係数分布に及ぼす影響

Hachinohe EW を用いた場合における第 i 層の無次元化高さ $X=(i-1)/N$ と最適降伏せん断力係数 $\bar{\alpha}_i=\alpha_i/\alpha_1$ との関係を示す。同図には、第1層降伏せん断力係数 α_1 および第1層降伏変形 δ_{y1} を変化させた Case 1-1~1-3 の場合について示す。 α_1 および降伏変形が最適降伏せん断力係数分布に及ぼす影響は入力地震波によってやや異なるが、大差はない。また、各ケースによって1次固有周期 T_1 が異なっていることから、 T_1 による影響も小さいといえる³⁾。

図-2 に、Case 1-1 について 2.1(5) に示した 5 つの入力地震波を用いた場合の無次元化高さ X と最適降伏せん断力係数との関係を示す。最適降伏せん断力係数分布は入力地震波によってややばらつきがあるものの、その影響は小さい。

以上のことより、最適降伏せん断力係数分布は第1層降伏せん断力係数、降伏変形、1次固有周期および入力地震波に関係なく、第 i 層の無次元化高さ X をパラメータとした式(2)の单一化曲線で表わすことができる(図-2 中の実線)。

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_i &= 1.0 + 1.289 X - 12.490 X^2 + 50.397 X^3 \\ &\quad - 74.552 X^4 + 40.836 X^5 \end{aligned} \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 $X=(i-1)/N$ である。

図-3 に、 A_i と式(2)の最適降伏せん断力係数 $\bar{\alpha}_i$ との

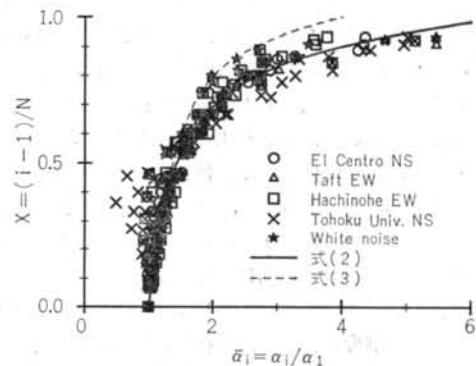


図-2 最適降伏せん断力係数分布の定式化

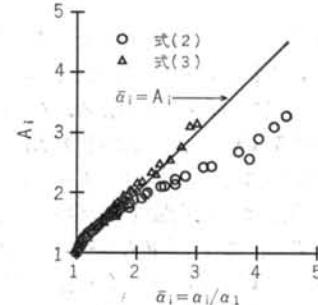


図-3 式(2)および式(3)の最適分布と A_i 分布との比較

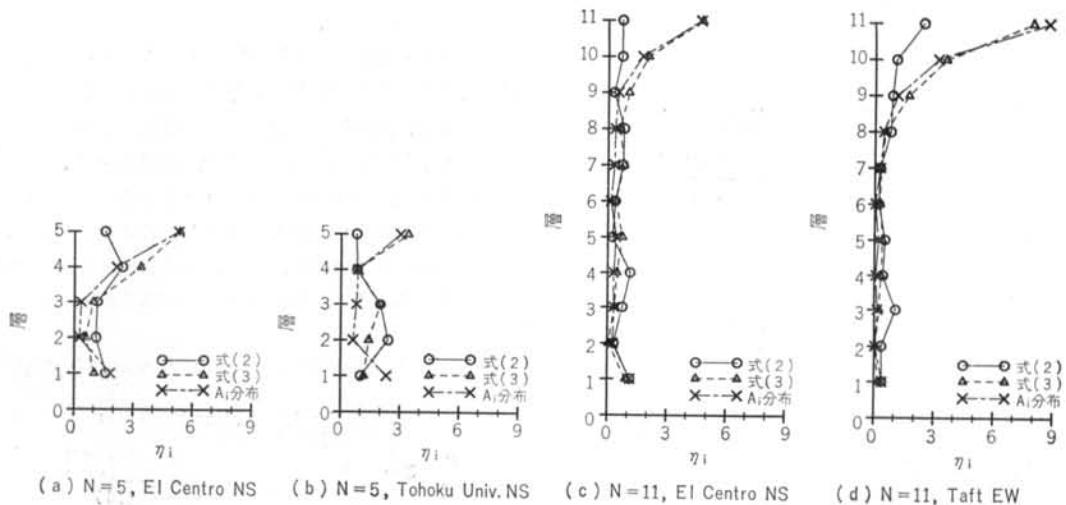


図-4 各最適分布による各層の累積塑性変形倍率

関係を示す。式(2)の最適分布は、 A_i 分布に比べて上層部の降伏せん断力係数が大きくなる。同図には A_i と文献 7) に示されている次式の最適分布との関係も示す。

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_i &= 1.0 + 1.593 X - 11.852 X^2 + 42.583 X^3 \\ &\quad - 59.483 X^4 + 30.159 X^5 \quad (X > 0.2) \\ &= 1.0 + 0.5 X \quad (X \leq 0.2) \end{aligned} \quad \cdots (3)$$

式(3)の最適分布は、 A_i 分布とほぼ同等になっている。

図-4(a)～(d)に、式(2)および式(3)の最適降伏せん断力係数分布、および A_i 分布を用いて応答解析を行なったときの各層の累積塑性変形倍率の例を示す。式(2)の最適分布を用いた場合、上層部においても損傷集中することなく、各層ほぼ等しい損傷を示すことが分かる。

§ 3. 第1層エネルギー集中型構造における強度割増係数

3.1 解析方法

解析モデルは5層ラーメン構造を想定し、せん断バネ一質点系を用いた。各層の重量はすべて 500 t、剛性分布は直線的に変化するものとした。

パラメータとして第1層降伏せん断力係数 α_1 、1次固有周期 T_1 および総エネルギー入力 V_E を考え、次のように設定した。

Case 2-1: $\alpha_1 = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$

$T_1 = 1.0 \text{ sec}$

$V_E = 150 \text{ cm/sec}$

Case 2-2: $\alpha_1 = 0.2$

$T_1 = 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 \text{ sec}$

$$V_E = 150 \text{ cm/sec}$$

$$\text{Case 2-3: } \alpha_1 = 0.2$$

$$T_1 = 1.0 \text{ sec}$$

$$V_E = 50, 100, 150, 200 \text{ cm/sec}$$

第2層以上の降伏せん断力係数は次式より定めた。

$$\alpha_i = a \bar{\alpha}_i \alpha_1 \quad (i \neq 1) \quad \cdots (4)$$

ここで、 $\bar{\alpha}_i$ は最適降伏せん断力係数分布を表わし、式(2)を用いた。 a は、最適降伏せん断力係数に対する第2層以上の降伏せん断力係数の割増率を表わし、強度割増係数と名付ける¹¹⁾。また、最適降伏せん断力係数分布が強度割増係数に与える影響を調べるために、Case 2-1について式(3)の最適降伏せん断力係数分布を用いて解析を行なった。強度割増係数は $a = 1.0 \sim 3.0$ (0.2 ピッチ) とした。各層の降伏変形は一定とした。入力地震波は、Case 2-1, 2-3 では El Centro 1949 NS, Case 2-2 では El Centro 1949 NS, Taft 1952 EW および Hachinohe 1968 EW を用いた。復元力特性は完全弾塑性型とし、減衰は無視した。数値解析は Newmark- β 法 ($\beta = 1/4$) を用い、時間刻みは 1/200 sec とした。

3.2 解析結果

3.2.1 各パラメータの影響

図-5(a)～(c)に、それぞれ第1層降伏せん断力係数 α_1 、1次固有周期 T_1 および総エネルギー入力 V_E をパラメータとして、第1層のエネルギー集中率 $P_W = W_{P1}/W_P$ (W_{Pi} は第 i 層が吸収する塑性ひずみエネルギー、 W_P は骨組全体が吸収する塑性ひずみエネルギー $W_P = \sum_{i=1}^N W_{Pi}$ である) と強度割増係数 a との関係の例を示す。また、図-5(d)に5つの入力地震波を用いた場合の P_W

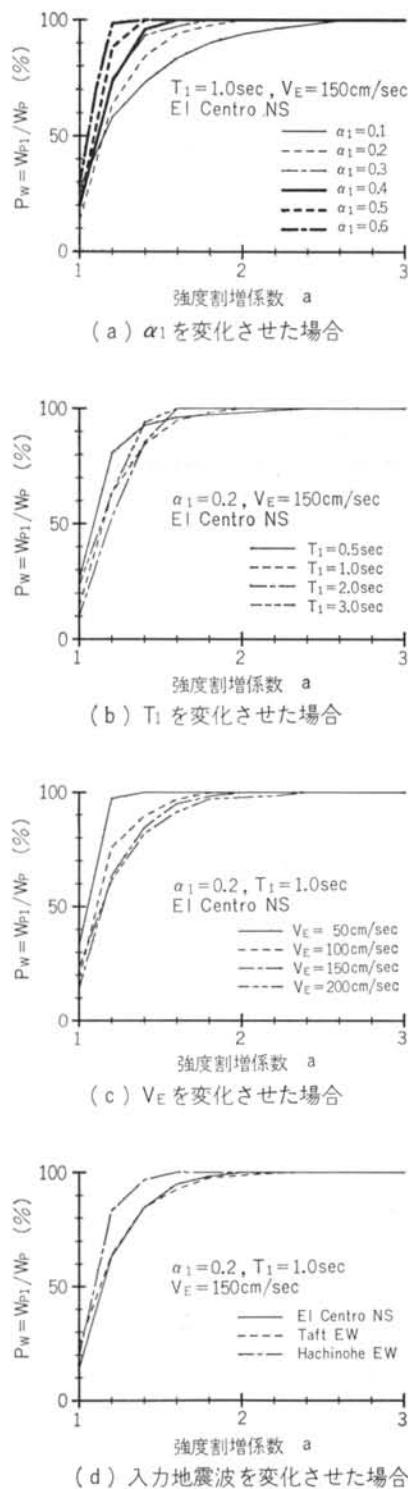


図-5 第1層のエネルギー集中率と強度割増係数との関係

と a との関係を示す。

図-6(a)～(c)に、第1層に所要のエネルギー集中率を与えるための強度割増係数 a と各パラメータとの関係を示す。なお、同図に示す強度割増係数は、図-5(a)～(d)に示すような P_w と a の関係より読み取った。

図-6(a)は、 $P_w = 95, 100\%$ となるための強度割増係数 a と第1層降伏せん断力係数 α_1 との関係を示したものである。 α_1 が小さいほど、大きな強度割増を必要とすることが分かる。特に、この傾向は $\alpha_1 \leq 0.3$ のとき顕著である。

図-6(b)は、 $P_w = 95\%$ となるための強度割増係数 a

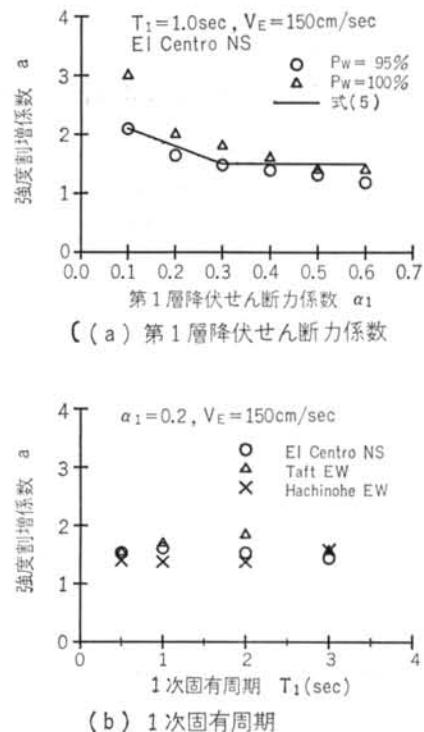


図-6 各パラメータが强度割増係数に与える影響

と1次固有周期 T_1 との関係を示したものである。同図には、3つの入力地震波を用いた場合について示す。 T_1 が強度割増係数に与える影響は小さいといえる。

図-6(c)は、 $P_w = 95\%$ となるための強度割増係数 a と総エネルギー入力 V_E との関係を示したものである。 $V_E = 50 \text{ cm/sec}$ の場合、必要な強度割増係数はやや小さいものの、 $V_E \geq 100 \text{ cm/sec}$ の範囲では V_E にかかわらず強度割増係数はほぼ一定である。

3.2.2 強度割増係数の定式化

3.2.1より、強度割増係数は第1層降伏せん断力係数 α_1 に大きく依存していることが分かる。また、総エネルギー入力 V_E によって必要な強度割増係数はやや変化するものの、第1層エネルギー集中型構造の性能が発揮される極限地震レベル $V_E \geq 100 \text{ cm/sec}$ の範囲では、その影響は小さい。したがって、強度割増係数は第1層降伏せん断力係数 α_1 のみに依存し、第1層に95%以上の地震入力エネルギーを吸収させるためには、次式以上の値にすればよい。

$$\left. \begin{array}{l} \alpha_1 \leq 0.3 \text{ のとき: } a = 2.4 - 3\alpha_1 \\ \alpha_1 > 0.3 \text{ のとき: } a = 1.5 \end{array} \right\} \quad \dots\dots(5)$$

式(5)の検証を行なうために、次の4ケースについて応答解釈を行なった。

Case 3-1: $N=5$

$$\alpha_1 = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$$

$$T_1 = 1.0 \text{ sec}$$

$$V_E = 150 \text{ cm/sec}$$

入力地震波；El Centro 1940 NS, Taft 1952 EW, Hachinohe 1968 NS, Tohoku Univ. F. 1978 NS, White noise

Case 3-2: $N=10$

$$\alpha_1 = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$$

$$T_1 = 2.0 \text{ sec}$$

$$V_E = 150 \text{ cm/sec}$$

入力地震波；El Centro 1940 NS, Taft 1952 EW, Hachinohe 1968 NS

Case 3-3: $N=5$

$$\alpha_1 = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$$

$$T_1 = 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 \text{ sec}$$

$$V_E = 150 \text{ cm/sec}$$

入力地震波；Hachinohe 1968 NS

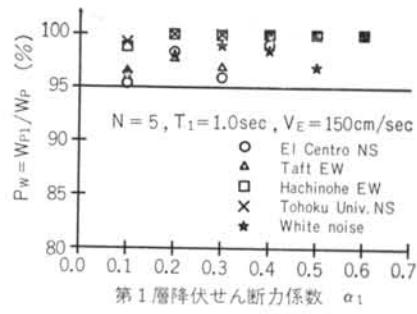
Case 3-4: $N=5$

$$\alpha_1 = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$$

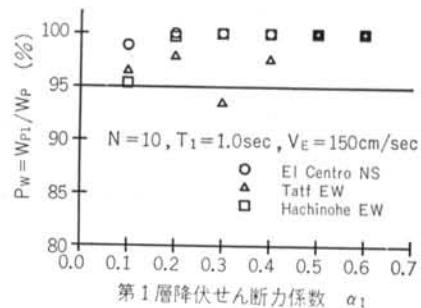
$$T_1 = 1.0 \text{ sec}$$

$$V_E = 50, 100, 150, 200 \text{ cm/sec}$$

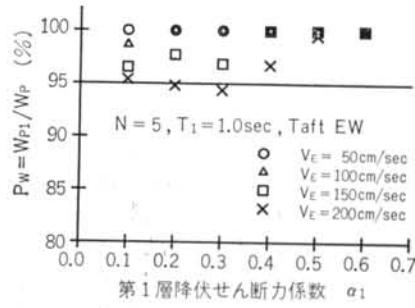
入力地震波；Taft 1952 EW



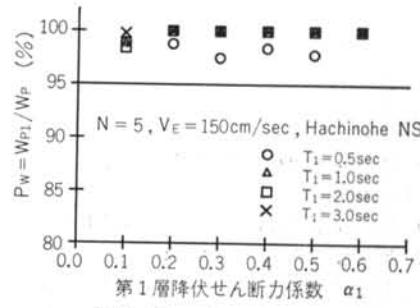
(a) Case 3-1



(b) Case 3-2



(c) Case 3-3



(d) Case 3-4

図-7 式(5)の強度割増係数を用いた場合の第1層のエネルギー集中率

強度割増係数は式(5)を用いた。その他の条件は3.1と同様である。

図-7(a)～(d)に、第1層のエネルギー集中率 P_w と第1層降伏せん断力係数 α_1 との関係を示す。どのケースもほぼ $P_w \geq 95\%$ となり、式(5)によって第1層エネルギー集中型構造における強度割増係数は評価できるといえる。

3.2.3 最適降伏せん断力係数分布による影響

図-8に、最適降伏せん断力係数分布として式(2)および式(3)を用いた場合における、 $P_w = 95\%$ となるために必要な強度割増係数 a と第1層降伏せん断力係数 α_1 との関係を示す。式(2)を用いた場合は、式(3)を用いた場合に比べ必要な強度割増係数は小さい。この傾向は、 α_1 が小さいほど顕著である。

図-9に、最適降伏せん断力係数分布として式(2)および式(3)を用いた場合における、 $P_w = 95\%$ となるために必要な強度割増係数分布を示す。式(2)を用いた場合は、式(3)を用いた場合に比べ上層部では降伏せん断力係数が大きくなるものの、下層部ではそれが小さくなる。通常、下層部の断面は上層部に比べ大きいので、最適降伏せん断力係数分布として式(2)を用いた方が有効であるといえる。

§ 4. 結論

本報では、15層以下の中高層建物について、各層の累積塑性変形倍率が等しくなるような降伏せん断力係数分布（最適降伏せん断力係数分布）を数値解析によって求めた。また、この最適降伏せん断力係数分布を用いて、第1層エネルギー集中型構造における所要のエネルギー集中率を与えるための第2層以上の強度割増率（強度割増係数）を求めた。その結果、以下のことが明らかになった。

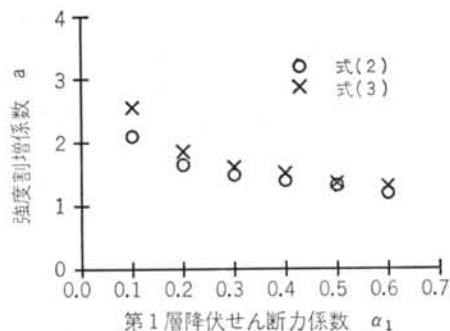


図-8 最適分布が強度割増係数に与える影響

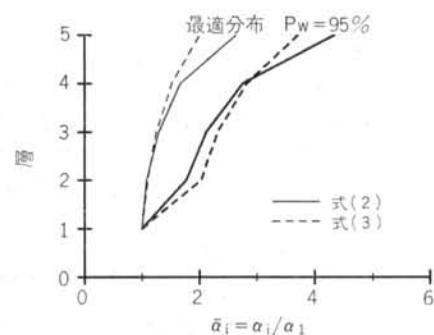


図-9 式(2)および式(3)を用いた場合の所要のエネルギー集中率を与える降伏せん断力係数分布

(1)上層部付近においても損傷集中が生じないような最適降伏せん断力係数分布は、第*i*層の無次元化高さ $X = (i-1)/N$ をパラメータとした式(2)の単一化曲線で表わされる。

(2)第1層エネルギー集中型構造において、第1層に95%以上の地震入力エネルギーを吸収させるために必要な強度割増係数は、第1層の降伏せん断力係数に依存し、式(5)以上の値にすればよい。

謝辞 本研究に当たって、東京大学助教授秋山宏博士に懇切なご指導を頂いた。末尾ながら、深甚なる謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 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（昭和50年9月）pp. 9～18
- 2) 加藤勉、秋山宏：“地震時における鋼構造せん断型多層骨組の損傷分布則” 同上 第270号（昭和53年）pp. 61～67
- 3) 加藤勉、秋山宏、大井謙一：“強震による損傷を一定にする最適降伏せん断力係数分布について—中低層鋼構造骨組を対象として—” 日本建築学会大会学術講演梗概集（昭和51年10月）pp. 647～648
- 4) 小堀鐸二、南井良一郎、河野充宏：“建築構造物の地震応答の適性化の一方法（統）” 京大防災研究所年報 第14号A（昭和46年4月）pp. 1～18
- 5) 松島豊：“ホワイトノイズを受ける多自由度系の最適せん断力係数分布” 日本建築学会論文報告集 第342号（昭和59年8月）

pp. 22~29

- 6) 志賀敏男, 柴田明徳, 渋谷純一, 益野英昌：“せん断型多質点系の保有水平耐力と損傷度の分布に関する研究” 日本建築学会東北支部研究報告集（昭和60年3月）pp. 291~294
- 7) 秋山宏：“建築物の耐震極限設計” 東京大学出版会（1987年9月）
- 8) 石丸辰治：“構造物の動的解析” 建築技術 No. 383 (1983年7月) pp. 167~178
- 9) 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（昭和59年7月）pp. 46~53
- 10) 秋山宏, 宇野寿郎, 矢部喜堂, 真瀬伸治, 平間敏彦, 寺田岳彦, 加藤征宏, 大竹章夫：“第1層エネルギー集中型柔剛混合鉄骨構造の基本特性” 同上 第402号（1989年8月）pp. 79~87
- 11) 平間敏彦, 宇野寿郎, 矢部喜堂, 真瀬伸治, 寺田岳彦, 兼光知巳, 加藤征宏, 大竹章夫：“第1層エネルギー集中型構造における強度ギャップに関する研究” 日本建築学会大会学術講演梗概集（1989年10月）pp. 1095~1096

