

柱はり接合部の変形を考慮した鋼構造平面骨組の地震応答解析

高松 隆夫*・松尾 彰**・橋本 智和***

(平成11年9月30日受理)

Earthquake Response Analysis of Plane Framed Structures with Deformation of Beam-to-Column Connections

Takao TAKAMATSU, Akira MATSUO and Tomokazu HASHIMOTO

(Received Sep. 30, 1999)

Abstract

The governing equations for the plane framed structures considering deformation of joint panels based on principle of hybrid potential energy can be applied to the earthquake response analysis. The plane frames with four types of beam-to-column connections were selected as the analytical models. From the results of the response analysis, the following conclusions were obtained.

- 1) The deformation and energy absorption concentrate to the story with weak columns.
- 2) The maximum story deformation angles are related to the total absorbed energy.
- 3) In the case of the weak panel type, the absorbed energy of beams is transformed to the absorbed energy of beam-to-column connections.

Key words: 平面骨組, 柱はり接合部, 弱パネル, パネル耐力比, エネルギー吸収能力

Plane Frame, Beam-to-Column Connection, Weak Panel, Panel Strength Ratio,
Energy Absorption Capacity

1. 序 文

鋼構造骨組において, 柱はり接合部は地震時の主要なエネルギー吸収部位として位置付けられ, 柱はり接合部の変形を考慮できる平面骨組構造解析法を用いて, 地震応答解析結果が数多く報告されている^{1), 2), 3)}。筆者等も, ハイブリッド型ポテンシャルエネルギーの原理を適用して, 柱はり接合部の変形を考慮できる骨組解析法を提案し^{4), 5)}, 地震応答解析を行ってきた。本研究では, 地震時に特定の層が崩壊を起こす鋼構造平面骨組の地震応答解析を行い, 柱はり接合部の取扱いの違いによる, 層間変形角およびエネルギー吸収率への影響について検討する。

2. 解析骨組

2.1 骨組概要

採用した解析用骨組は, 「既存鉄骨造建築物の耐震診断および耐震改修指針・同解説(1996)」⁶⁾の適用例2に取り上げられている, 4層4スパンの純鉄骨ラーメン構造を参考にして設計する。骨組の軸組図を図1に示す。

ここに, 柱には冷間成形角形鋼管 (BCR295, $F=3.0\text{tf/cm}^2$) を, はりには H 形鋼 (SN400, $F=2.4\text{tf/cm}^2$) を使用する。

また今回, 特定層で柱の塑性化を先行させ, 層崩壊を意図的に起こすために柱断面を特定層のみ変えて設計した骨組を用いる。よって上に述べた適用例を type I, 第2層柱に塑性化を先行させる骨組モデルを type II, 第3層柱

* 広島工業大学工学部建設工学科

** 広島大学工学部第四類

*** 広島工業大学大学院工学研究科土木工学専攻

に塑性化を先行させるモデルを typeⅢとして扱う。

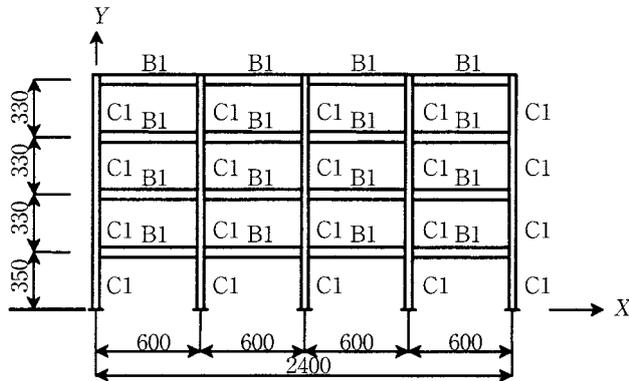


図1 軸組図

2.2 骨組の設計

以下の仮定に従って骨組の設計を行う。

- 1) まず、1次設計を行う。次に、層間変形角を1/200以下になることを確認する。
- 2) 鉄骨はりおよび柱はり接合部と床スラブとの合成効果は考慮しない。
- 3) 柱はり接合部は通しダイヤフラム形式の溶接接合組立とする。
- 4) 柱脚は固定支持とする。

2.2.1 全塑性曲げ耐力

柱およびはりの全塑性曲げモーメントは、塑性断面係数を設計基準強度 (F) に乗じることにより求められる。柱はり接合部の全塑性パネルモーメント ${}_pM_p$ は、文献4) に示すようにハイブリッド法ではパネルモーメントは、接合部まわりの各部材の材端モーメントと材端せん断力を用いて表されるので、次式を使用する。ここに、パネル周辺枠組の補強効果は無視されている。

$${}_pM_p = \frac{F \cdot V}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

ここに、

- V : 接合部パネル体積 ($V = 2 \cdot D_B \cdot D_C \cdot t$)
- D_B : はりフランジ中心間距離
- D_C : 柱フランジ中心間距離
- t : 接合部パネル板厚
- F : 柱の設計基準強度

解析で使用する柱、はり、および柱はり接合部の降伏軸力および全塑性曲げ耐力を表1に示す。

2.2.2 降伏耐力比

柱はり耐力比 R_{cb} には(2)式を使用する。パネル耐力比 R_p には、(3)式を用いる。

$$R_{cb} = \frac{{}_cM_p^Y + {}_cM_p^B}{{}_bM_p^Y + {}_bM_p^B} \quad (2)$$

$$R_p = \frac{{}_pM_p}{{}_pM_p} = \frac{{}_pM_p}{\min({}_cM_p^Y + {}_cM_p^B, {}_bM_p^Y + {}_bM_p^B)} \quad (3)$$

ここに、 ${}_cM_p^Y$ は上層の柱の全塑性モーメント、 ${}_cM_p^B$ は下層の柱の全塑性モーメント、 ${}_bM_p^Y$ は左側のはりの全塑性モーメント、 ${}_bM_p^B$ は右側のはりの全塑性モーメント、 ${}_pM_p$ は柱はり接合部の全塑性パネルモーメントである。

解析用骨組の柱はり耐力比を図2に示す。type I では最上層を除けば、はり降伏型節点である。type II では1・2層において、typeⅢでは2・3層において内柱の材端が降伏する節点となる。また、パネル耐力比を図3に示す。標準パネルモデルにおいて、type I では、内柱は、最上層を除けばパネル降伏型節点となり、外柱は、すべての層において部材端降伏型節点となる。typeⅡ・Ⅲも内柱については type I と同様であるが、外柱は、柱の塑性化を先行させる層ではパネル降伏型節点となる。

3. 地震応答解析

3.1 解析条件

動的解析における諸条件は以下の通りである。

- 1) 通しダイヤフラム形式柱はり接合部なので、柱板要素の局部変形は生じない。接合部パネルの軸縮みも無視する。また、はり、柱および柱はり接合部における板要素局部座屈は生じないとする。
- 2) 各節点の重量は、各階の全重量を床面積の割合で分配することにより定められる。なお、全重量は設計用地震時荷重を用いる。
- 3) 減衰行列には、一次減衰定数を、0.02とする剛性比例型行列を用いる。
- 4) 入力した地震波は、Kobe NS 波、継続時間：20秒、時間間隔：1/1000秒であり、地震波の最大速度を100kine に調整して入力する。
- 5) 柱はり接合部として次の4種類のモデルを採用する。
 - (1)接合部を剛な点とした慣用モデル
 - (2)接合部をパネルとし、パネルのせん断変形は生じないとした剛域モデル
 - (3)接合部をパネルとし、パネル板厚を各層の柱板厚と同一として、パネルのせん断変形を考慮した標準パネルモデル
 - (4)(3)と同様であるが、各パネル板厚をパネル耐力比を0.6として設計した弱パネルモデル

表1 各部材の断面、降伏軸力、全塑性耐力

(a) 柱材, はり材

(type I)

部材	断面	N_y (tf)	M_p (tf·m)
柱	1C1	□-400×400×16	717.6
	2C1	□-350×350×9	362.1
	3C1	□-400×400×12	547.5
	4C1	□-400×400×12	547.5
はり	23B1	H-606×201×12×20	366.0
	4RB1	H-600×200×11×17	366.0

(type II)

部材	断面	N_y (tf)	M_p (tf·m)
柱	1C1	□-400×400×16	717.6
	2C1	□-350×350×9	362.1
	3C1	□-400×400×12	547.5
	4C1	□-400×400×12	547.5
はり	23B1	H-606×201×12×20	366.0
	4RB1	H-600×200×11×17	366.0

(type III)

部材	断面	N_y (tf)	M_p (tf·m)
柱	1C1	□-400×400×16	717.6
	2C1	□-400×400×16	717.6
	3C1	□-350×350×9	362.1
	4C1	□-400×400×12	547.5
はり	23B1	H-606×201×12×20	366.0
	4RB1	H-600×200×11×17	366.0

3.2 復元力特性

柱, およびはりの復元力特性は, 完全弾塑性体モデルとし, 材端の塑性ヒンジ点における降伏条件式には, 曲げのみを考慮した式(4)を用いる。図4に示すように, 柱はり接合部の復元力特性は, Bi-linear型モデル ($\tau_y = F/\sqrt{3}$, $G_r = 1/30 \cdot G$)を用いる。

$$F(f) = \frac{M}{M_p} - 1 \quad (4)$$

ここに, M は曲げモーメントであり, M_p は全塑性モーメントである。

3.3 吸収エネルギー

各材端における塑性ヒンジの吸収エネルギー W は, 曲げモーメントと, それに対応する回転角増分との積を累加したものとして求められる。また, 各柱はり接合部における吸収エネルギーは, パネルモーメントとせん断変形角増分との積を累加したものとして求められる。

(b) 柱はり接合部

(type I)

層	D_B (cm)	D_C (cm)	t (cm)	${}_pM_p$ (tf·m)
1, 2	38.4	58.6	1.6	124.7
3, 4	38.8	58.3	1.2	94.0

(type II)

層	D_B (cm)	D_C (cm)	t (cm)	${}_pM_p$ (tf·m)
1	38.4	56.8	1.6	124.7
2	34.1	58.6	0.9	62.3
3	38.8	58.3	1.2	94.0
4	38.8	58.3	1.2	94.0

(type III)

層	D_B (cm)	D_C (cm)	t (cm)	${}_pM_p$ (tf·m)
1	38.4	58.6	1.6	124.7
2	38.4	58.6	1.6	124.7
3	34.1	58.3	0.9	62.0
4	38.8	58.3	1.2	94.0

4. 解析結果および考察

4.1 最大層間変形角

図5に各層の最大層間変形角を示す。type Iにおいては, 各モデルによる差異はあまり生じていない。慣用モデルの結果が他のモデルに比較して若干大きくなっている。第1層では, 弱パネルモデルが最も小さな値になっている。type II・IIIにおいては, 柱の断面を小さくした特定層の値が, 各モデルで大きな差異を生じている。特定層以外の値は, 各モデルによる差異はほとんど生じていない。type IIでは, 第2層に変形が集中している。剛域モデルと比較して, 他の3つのモデルの値は, ほぼ2倍になっている。type IIIでは, 第3層に変形が集中しているが, 特に慣用モデルの結果の値が他のモデルの値と比べて大きくなっている。弱パネルタイプの結果は, 他のモデルと比較して, 小さくなる傾向は窺えるけれども, type IIで示されるように, 弱パネルタイプが必ずしも変形を減少させるために効果的に作用するとは限らない。

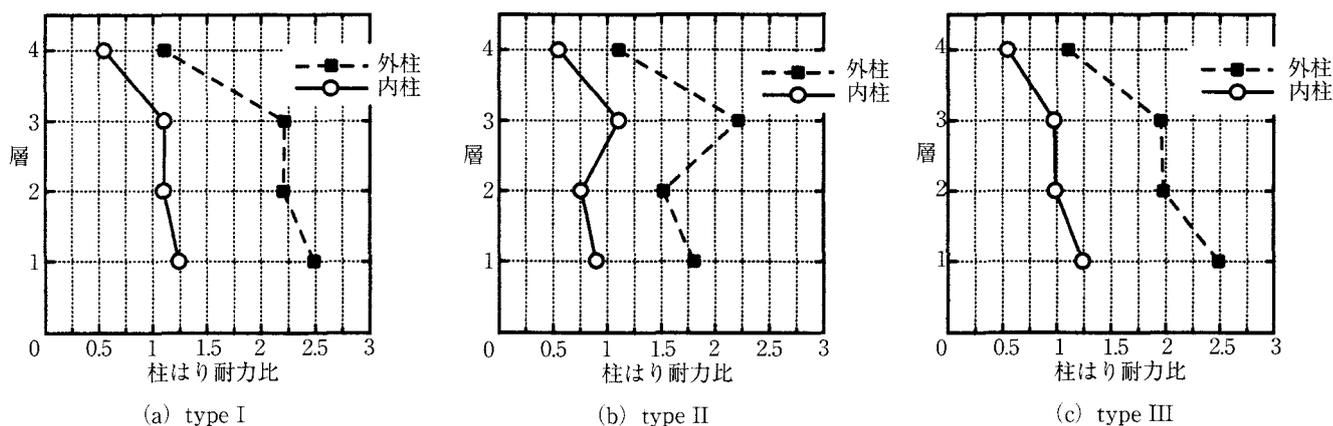


図2 柱はり耐力比

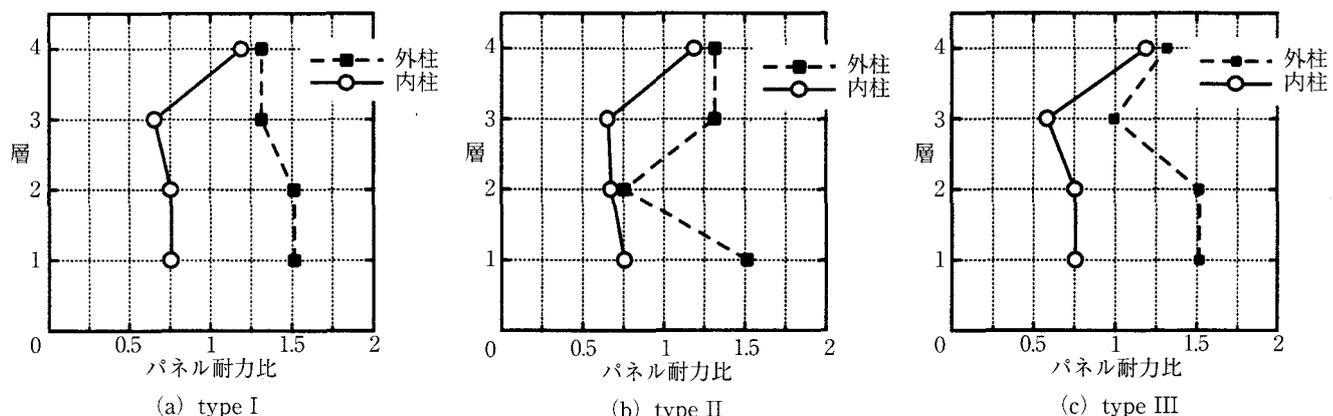


図3 パネル耐力比

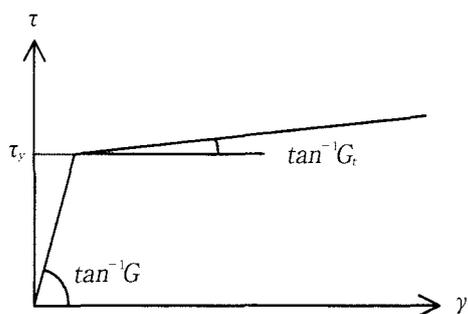


図4 せん断応力度・せん断ひずみ関係

4.2 エネルギー吸収率

図6に各層のエネルギー吸収率を、図7にエネルギー吸収量を示す。エネルギー吸収率は、各層における各部材が吸収した塑性ひずみエネルギーの総和の骨組全体で吸収した塑性ひずみエネルギーの総和に対する比率を表す。ここに、柱脚、柱頭、柱頭のパネルおよびはりを各層の構成部材とする。type Iにおいて、1層、2層のエネルギー吸収率が90%以上を占めており、3層、4層では、ほとんどの部材が弾性域か塑性化してもほとんど変形が進行していない状態であることが分かる。type II・IIIでは、特定層の

エネルギー吸収の集中によって、他の層のエネルギー吸収率が低くなっていることが分かる。すべての type において、標準パネルモデルのパネルのエネルギー吸収率が低いことが分かる。標準パネルモデルでは、1層部分のパネル厚が16mm と厚いためにパネル降伏をほとんど起こさず、慣用モデルや剛域モデルと同様に柱脚降伏になったものと思われる。弱パネルモデルにおいて、パネル耐力比を0.6としているために、柱のエネルギー吸収量よりも、はりのものをパネルが肩代わりしている。そのために、弱パネルタイプの層間変形角が他と比較して小さくなっていない。

図7において、横軸は3.3で述べた吸収エネルギー W の総和である。全エネルギー吸収量と層間変形角とに相関関係があることが分かる。すなわち全エネルギー吸収量が小さいモデルほど、層間変形角が小さくなる傾向がある。

5. 結論

3種類の解析骨組および4種類の柱はり接合部モデルを用いた鋼構造平面骨組の地震応答解析を行い、以下の結論を得た。

- 1) 特定層の柱に塑性化を先行させた場合、変形およびエ

柱はり接合部の変形を考慮した鋼構造平面骨組の地震応答解析

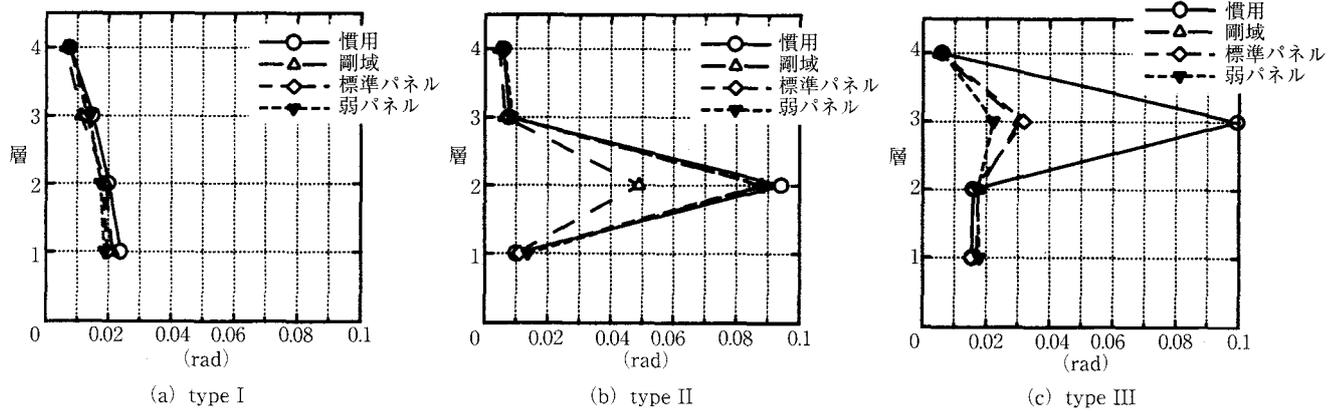


図5 最大層間変形角

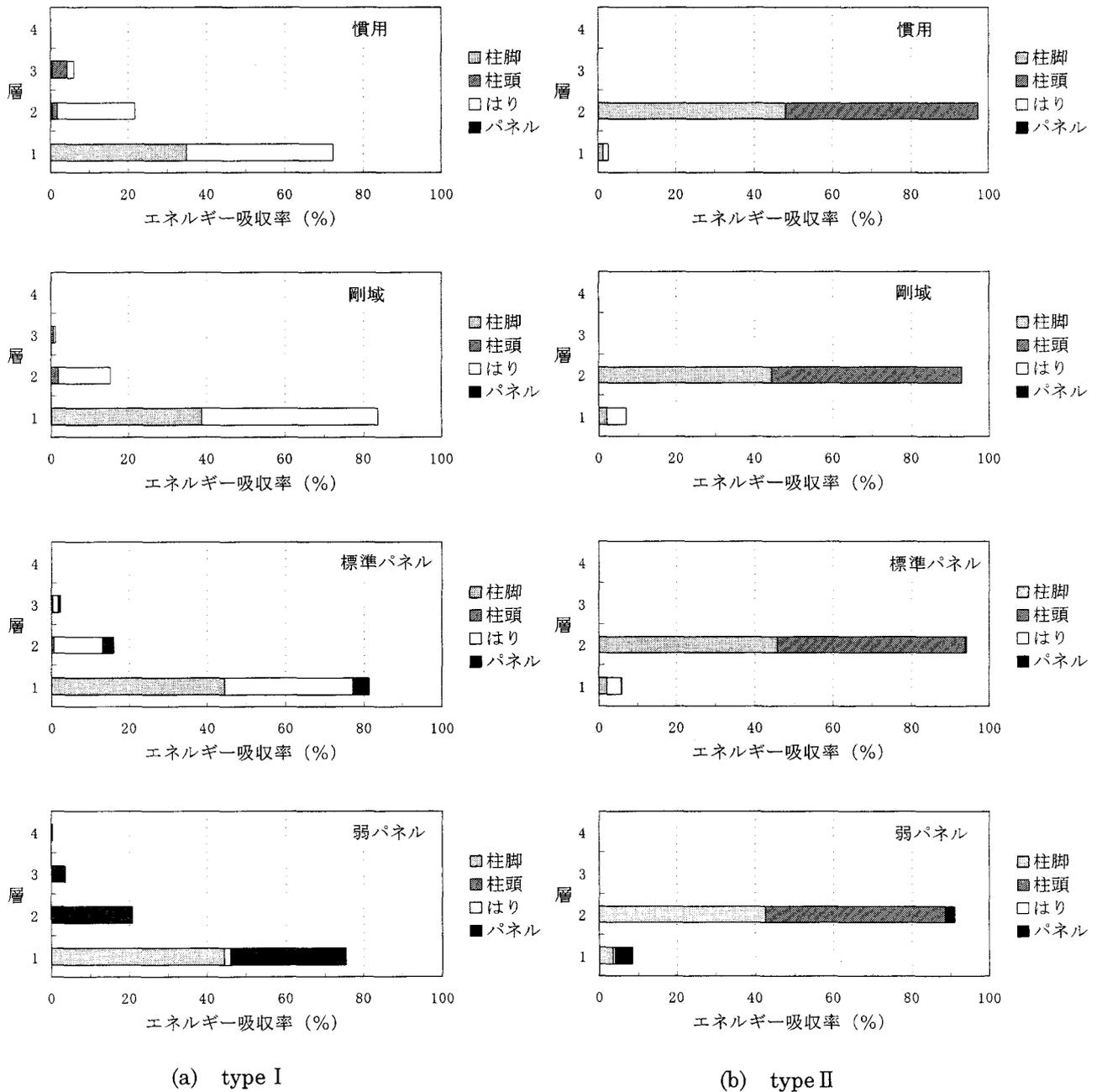
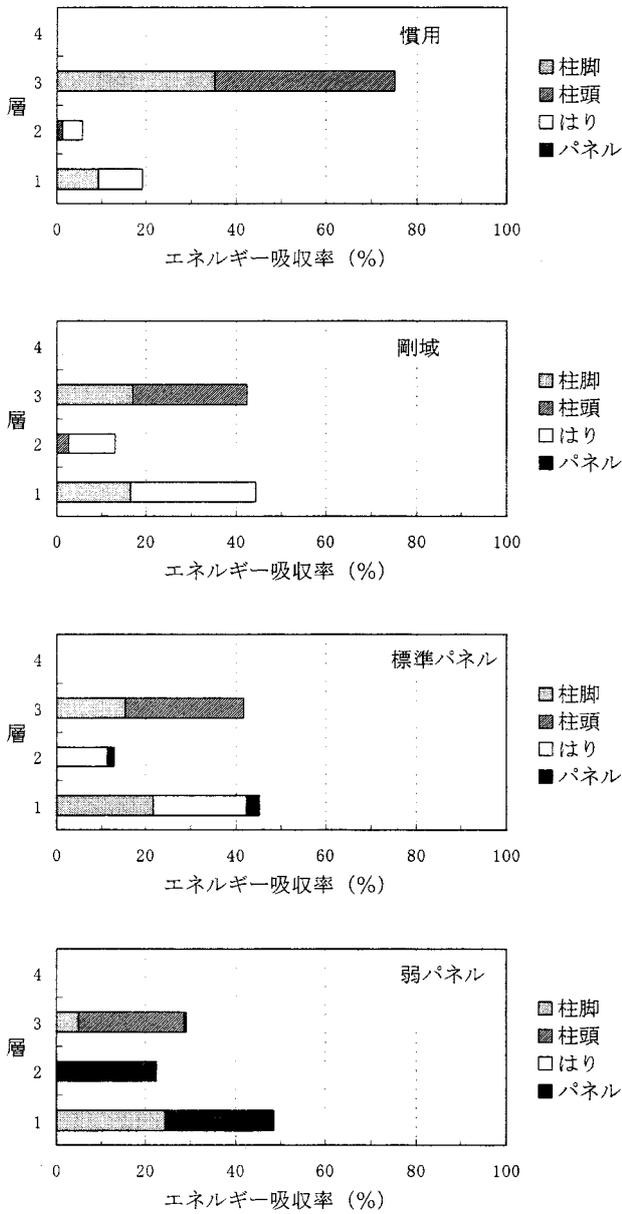


図6 エネルギー吸収率 (その1)



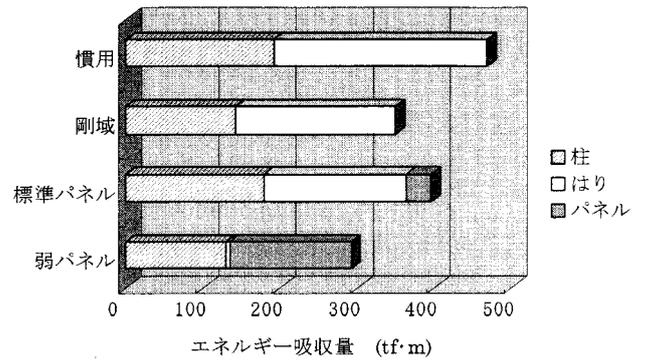
(c) type III

図6 エネルギー吸収率 (その2)

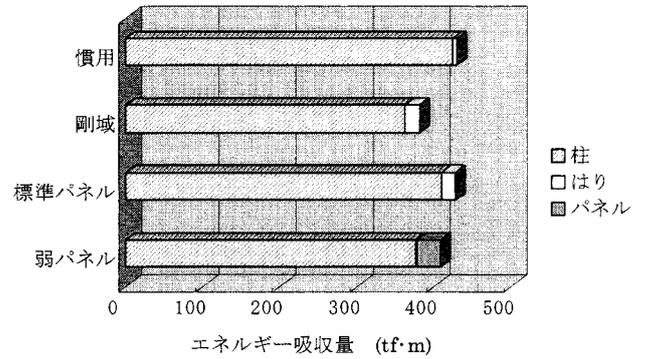
エネルギー吸収は、特定層に集中する。

- 2) パネル耐力比0.6の弱パネル型骨組では、はりのエネルギーをパネルのエネルギー吸収量が肩代わりしている。
- 3) 全エネルギー吸収量と最大層間変形角とは相関関係がある。

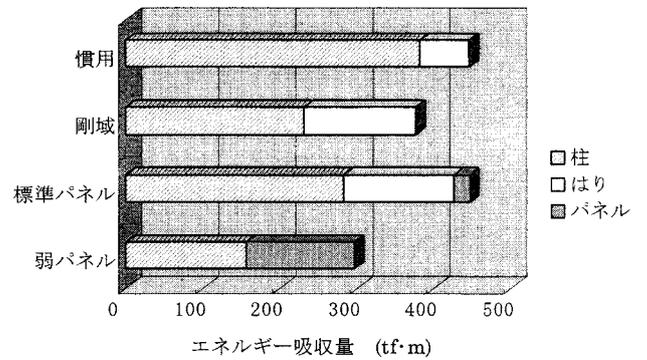
今後は、弱パネル型骨組の変形量と吸収エネルギーとの関係を今回解析した骨組とは異なる柱はり耐力比、パネル耐力比を有する骨組の地震応答解析によって明らかにしていく予定である。



(a) type I



(b) type II



(c) type III

図7 エネルギー吸収量

謝 辞

本研究は、文部省私立大学ハイテク・リサーチ・センター整備事業の一環として実施されたものである。ここに、記して深謝致します。

文 献

- 1) 井上一郎, 小川厚治, 多田元英, 柳原秀和: 角形鋼管柱ラーメン構造部材の塑性変形応答, 鋼構造年次論文報告集, 第2巻, pp. 9-16, 1994年11月。

- 2) 山田 哲, 秋山 宏, 水谷浩之: パネルの塑性変形を伴う鋼構造多層骨組の終局耐震性能, 日本建築学会構造系論文集, 第481号, pp. 137-144, 1996年3月.
- 3) 長谷川隆, 上遠野明夫, 加村久哉, 福田浩司, 染谷友秀, 濱崎義弘: 接合部パネルの変形を考慮した角形鋼管柱・H形鋼梁ラーメン構造の地震応答解析, 日本建築学会技術報告集, 第2号, pp. 43-48, 1998年3月.
- 4) 高松隆夫, 松尾 彰, 椋代仁朗, ラフィーク W. サリブ: 弱パネル型H形鋼柱・はり接合部を有する平面骨組の構造解析, 構造工学論文集, Vol. 37B, pp. 295-302, 1991年3月.
- 5) 高松隆夫, 松尾 彰, 椋代仁朗, ラフィーク W. サリブ: 柱はり接合部変形を考慮した平面骨組の構造解析, 構造工学論文集, Vol. 38B, pp. 521-530, 1992年3月.
- 6) 財団法人日本建築防災協会: 耐震改修促進法のための既存鉄骨造建築物の耐震診断および耐震改修指針・同解説, 1996年9月.