

半剛接鋼骨組の柱梁仕口の強度と剛性が骨組の動的応答に与える影響

正会員 ○ 藤田芳治¹, 同 山成 實²,同 小川厚治³, 同 黒羽啓明⁴

1. 序 現在の耐震設計の柱梁接合部は剛接合であることが前提とされている。しかし、実設計の骨組で完全剛接合を実現する事は難しく、接合部が変形あるいは降伏する一種の半剛接鋼骨組となる。これらの接合部変形の本質は接合部パネルのせん断変形及び柱梁仕口の回転変形(柱梁仕口の局部変形)である。ラーメン骨組における接合部パネルの耐震性能に関する動的解析は長谷川ら^[1]、河野ら^[2]により報告されているものの、柱梁仕口についてはほとんど報告されていない。

接合部変形をエネルギー吸収要素とした半剛接鋼骨組の動的挙動を調べるために地震応答解析方法及び接合部強度比を変化させた地震応答解析結果については既に文献[3]で述べた。そこでは接合部強度のみを変化させ、剛性の変化による応答性状の違いに関しては述べていない。

半剛接鋼骨組の柱梁仕口は欧米で一般的に認知されているピン接合に近い、弱くて柔らかい仕口のものから、日本の耐震規定で示される完全剛接合に近い、強くて硬い仕口のものまで、種々の降伏耐力と剛性の組合せを持ち、これらの組合せによる地震応答性状の違いについては未だ研究されていない。

本研究では特に柱梁仕口に着目し、仕口降伏耐力、仕口の弾性剛性及び2次剛性を変化させ、仕口が早期に降伏する骨組での応答性状に及ぼす影響について検討し、考察を加える。

2. 解析方法

2.1 半剛接鋼骨組の解析モデル 本研究で用いる解析モデルは図1に示す均等多層多スパン骨組の梁材反曲点位置で取り出した5層骨組である。接合部変形は図中に示す接合部パネルのせん断変形及び局部変形バネの回転変形で表す。各層の重量($W=25\text{ton}$)、階高($H=350\text{cm}$)及びスパン長($L=700\text{cm}$)は全層にわたり一定とする。層番号*i*は上層部から数える。

2.2 部材の復元力特性 全ての部材の復元力特性はbi-linear型であるとし、梁材及び局部変形バネは図2(a)に示すモデル、柱材及び接合部パネルは図2(b)に示す加藤・秋山モデル^[4]の履歴特性を持つものとする。柱材、梁材及び接合部パネルの硬化係数はそれぞれ $c=0.02$ 。

$\tau_B=0.02$, $\tau_P=0.05$ を用いる。このとき、図2(a)の連成系である局部変形バネを持つ梁材はtri-linear型の復元力特性を示す。

2.3 部材の降伏耐力及び弾性剛性 柱材の降伏耐力は最下層の柱材の全塑性モーメントを基準値とし、適正強度分布^[5]に従って求める。さらに柱材、梁材及び接合部パネルが同時に降伏するようそれぞれの降伏耐力を一致させる。ただし、最上層と最下層については梁材、接合部パネル及び仕口の早期降伏による骨組倒壊を防ぐためそれぞれの降伏耐力に30%の割増しを施した。ベースシア係数 C_B は、全層にわたり塑性層間変形角 $1/50$ が生じたときの損傷エネルギーと重力効果によるエネルギーとの和が設計用速度スペクトルを 150kine とした地動入力エネルギーに等しくなるとして求めた。本解析で用いる重力効果を考慮した5層骨組のベースシア係数は $C_B=0.4455$ である。

各部材の剛性の算定に当たっては、便宜上、柱材を正方角形鋼管(降伏応力度 $\sigma_{vc}=3.0\text{tf/cm}^2$)、梁材をH形鋼(降伏応力度 $\sigma_{vb}=2.4\text{tf/cm}^2$)とし、各層において板厚の

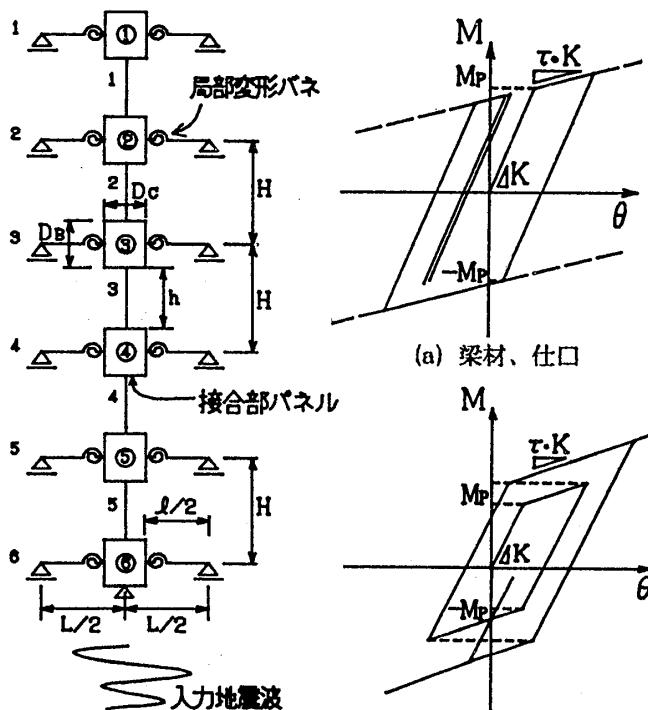


図1 解析モデル

図2 部材の復元力特性

1 熊本大学大学院生, 2 同助手・工修, 3 同助教授・工博, 4 同教授・工博

みが変化するものとして断面を仮定して行うとし、柱材及び梁材の降伏耐力は全塑性モーメントとする。

2.4 仕口梁強度比及び仕口梁剛性比の定義

半剛接鋼骨組の接合部は接合形式により種々の降伏耐力と弾性剛性の組合せを持つ。本研究ではこれらの半剛接鋼骨組を解析するに当たり、仕口の降伏耐力及び弾性剛性の算定においては梁材の降伏耐力、弾性剛性に対する比を用い、それぞれ仕口梁強度比(R_{PL})及び仕口梁剛性比(k_{LB})として次式で定義する。

仕口梁強度比

$$R_{PL} = M_{PG}/M_{PB} \quad \dots \dots (1)$$

仕口梁剛性比

$$k_{LB} = K_L/K_B \quad \dots \dots (2)$$

ここで、 M_{PB} 、 K_B 及び M_{PG} 、 K_L はそれぞれ梁材、仕口の降伏耐力と弾性剛性である。

2.5 解析条件 本研究で解析に用いる半剛接鋼骨組の柱梁仕口は弱くて柔らかいものから強くて硬いものまで、広義の半剛接接合部を意味している。これらの接合部を持つ仕口崩壊型骨組を実現するために、2.4節の(1)、(2)式で定義した仕口梁強度比 R_{PL} 及び仕口梁剛性比 k_{LB} のパラメータに加え、仕口の2次剛性に仕口の弾性剛性の3%及び梁材の弾性剛性の3%の2種類を用いて地震応答性状

を調べる。解析では R_{PL} は0.5～1.3、 k_{LB} は10～1000の範囲で変化する。なお、仕口の2次剛性を変化させたのは、仕口の2次剛性を仕口の弾性剛性の3%のみとした場合、仕口の弾性剛性が ∞ に近づくにつれ2次剛性も ∞ になり復元力特性を剛塑性とするような仕口を実現できなくなるためであり、仕口の2次剛性を梁材の弾性剛性の3%との2種類とすることで、より広範囲な接合部を実現し、解析対象としている。解析骨組例を図示すると図3(a)、図3(b)のようになる。

骨組の減衰定数は全てReyleigh型で1次、2次共に3.0%とした。また、入力地震波はスペクトル強度を150kine(第2種地盤相当)に増幅したEL CENTRO(1940) N-S成分(最大加速度967.0gal)とし、解析には初期の30秒間を用いた。数値計算はNewmark β 法によった。

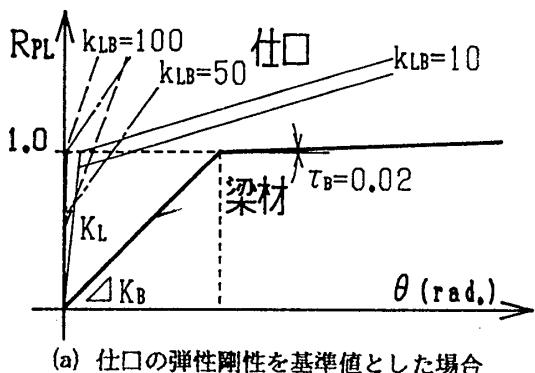
解析に用いる全ての骨組の1次固有周期を表1に示す。

k_{LB} が大きくなるに従って固有周期は若干短くなるものの概ね一定と見なせる。

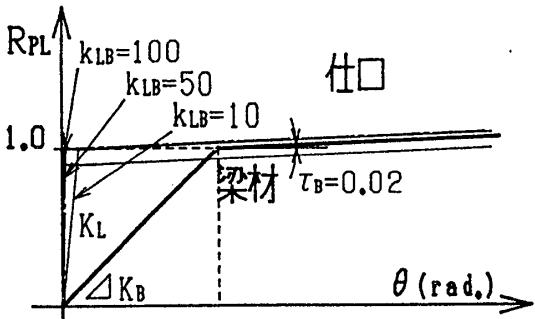
2.6 解析例(時刻歴吸収エネルギー) 図4に仕口崩壊型骨組の一例ではあるが時刻歴吸収エネルギーを示す。この骨組は $R_{PL}=0.8$ 、 $k_{LB}=50$ 、仕口の2次剛性は仕口の弾性剛性の3%である。縦軸はある時刻における各部材の累積吸収エネルギー、横軸は時刻である。仕口が早期に降伏することにより仕口にエネルギーが集中する様子が窺われ、この例では仕口で大半のエネルギー吸収がなされていることを示している。本研究では、仕口降伏の後やがて梁材も降伏するような骨組設計を模索するものである。

表1 解析骨組の1次固有周期

k_{LB}	10	50	100	500	1000
T(s)	1.044	0.9423	0.9289	0.9181	0.9167



(a) 仕口の弾性剛性を基準値とした場合



(b) 梁材の弾性剛性を基準値とした場合

図3 仕口の2次剛性の評価

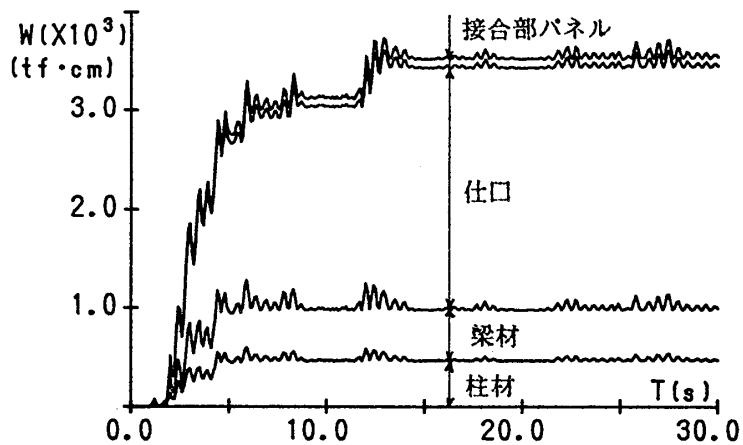


図4 エネルギー応答の一例

3. 解析結果 地震応答解析結果は最大層間変形角の平均値、各層の最大層間変形角応答分布、仕口のエネルギー吸収率を用いて評価する。図の横軸は仕口梁強度比 R_{PL} であり、仕口の2次剛性の種類でまとめてある。ただし、各層の最大層間変形角応答分布については $R_{PL}=0.5\sim1.0$ の範囲でまとめてある。

3.1 仕口の2次剛性が仕口の弾性剛性に対して3%の場合

仕口の2次剛性が梁の2次剛性より比較的高く、仕口の降伏後も耐力が上昇するこれらの骨組では、 R_{PL} が小さくなるにつれ図5に示す最大層間変形角の平均値は小さくなる

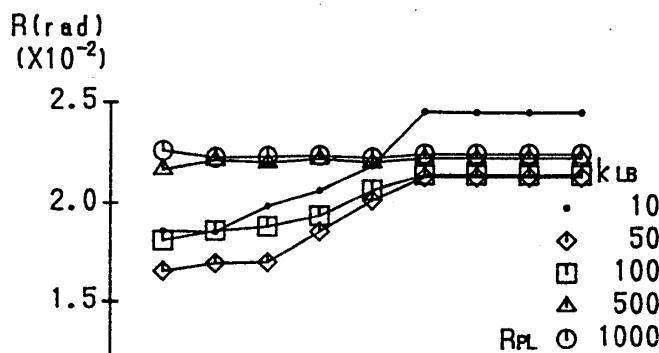


図5 仕口の強度比が応答値に与える効果 I

ものの、図6(a)～図6(e)に示す各層の最大層間変形角応答分布を見る限りでは特定層への損傷集中は見られない。図7に示す仕口のエネルギー吸収率は k_{LB} が大きくなるに従って小さくなり、 R_{PL} による変化率も小さくなる。これは、 k_{LB} に比例して仕口の2次剛性が大きくなることにより仕口の降伏後も耐力が上昇しつづけ、仕口降伏後、梁材の降伏に至る R_{PL} の範囲が広がるためである。各部材の塑性率(最大塑性変形量/弾性変形量)から、 $k_{LB}=10$ では $R_{PL}=0.9\sim1.0$ 、 $k_{LB}=50$ では $R_{PL}=0.6\sim1.0$ 、 $k_{LB}=100$ 以上では解析に用いた $R_{PL}=1.0$ 以下の全ての骨組において仕口と梁材が共に降伏することが分かり、それが弱い仕口へのエネルギー集中を緩和させる一つの要因であることが分かった。ただし、 k_{LB} が極端に大きくなり仕口が剛接合($k_{LB}=\infty$)の状態に近づいた場合、 R_{PL} が変化しても最大層間変形角の平均値は概ね一定の値を示す。また、仕口は降伏後も弾性状態とほとんど変わらず、降伏後のエネルギー吸収はほとんど見込めない。なお、 k_{LB} が大きくなるに従って、また、 R_{PL} が小さくなるに従って仕口の弾性変形量が小さくなり仕口の塑性率は大きな値を示すが、梁の弾性変形量で評価するとその約1.5倍以下である。

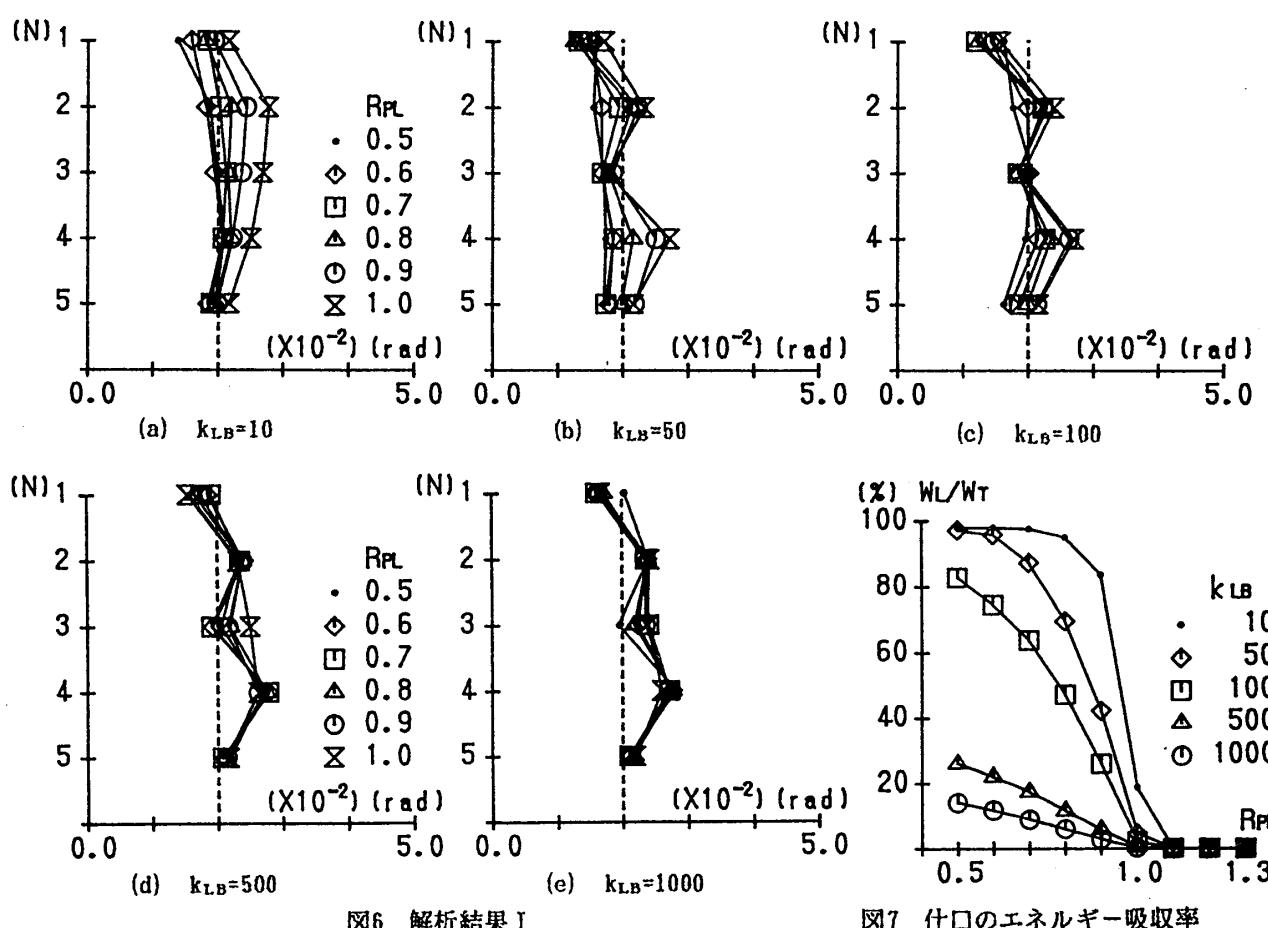


図6 解析結果 I

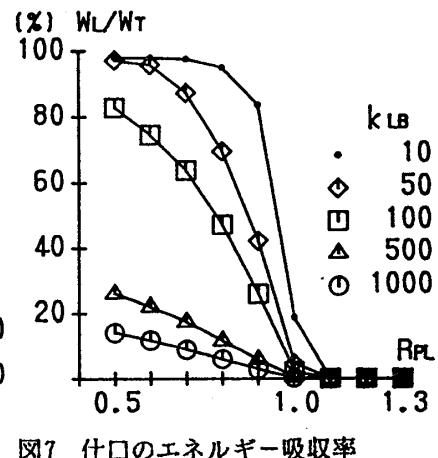


図7 仕口のエネルギー吸収率

3.2 仕口の2次剛性が梁材の弾性剛性に対して3%の場合
3.1節で述べた仕口に比べ、仕口の2次剛性が比較的低く、仕口降伏後の耐力上昇による梁材の降伏がほとんど見込めない骨組でも、 R_{PL} が小さくなるに従って、最大層間変形角の平均値及び各層の最大層間変形角応答分布は3.1節で述べた骨組と同様の傾向を示すものの、 k_{LB} =10を除いて k_{LB} の変化による最大層間変形角の平均値の差はほとんど見られない(図8、図9(a)～図9(e)参照)。図10に示す仕口のエネルギー吸収率に関しては、 R_{PL} =1.0、即ち仕口と梁材の降伏耐力が一致しなければ仕口以外の降伏が起こらないため、 k_{LB} の値に関わらず仕口にエネルギーが集中する傾向を示す。

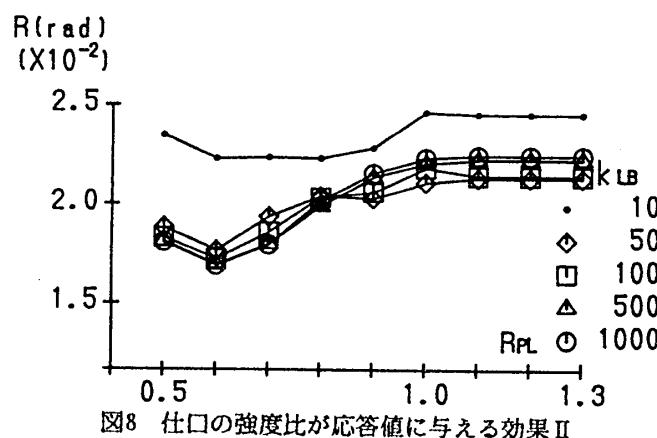


図8 仕口の強度比が応答値に与える効果Ⅱ

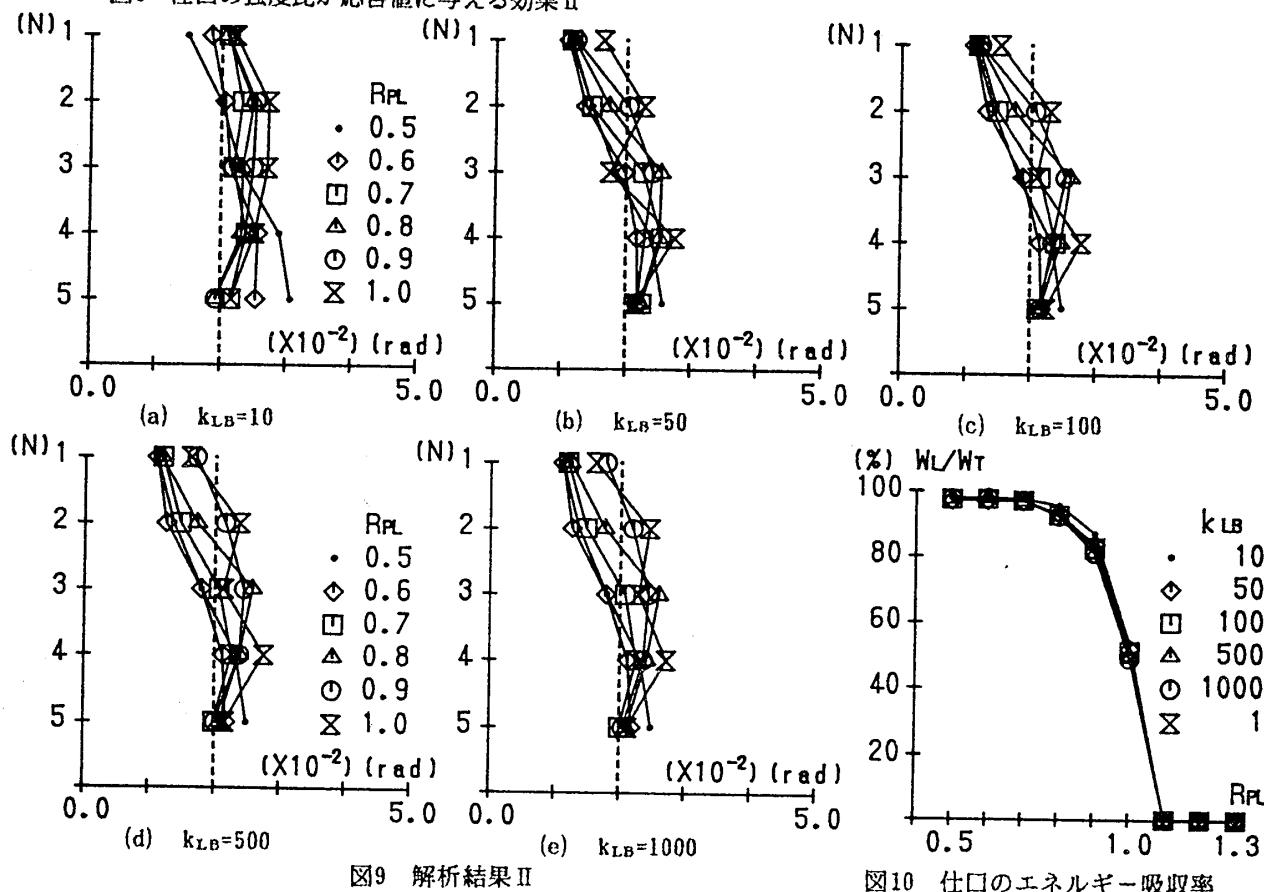


図9 解析結果Ⅱ

4. 結語 本研究では限られた解析数ではあるが、仕口強度、仕口の初期剛性及び2次剛性が仕口崩壊型骨組の地震応答性状に及ぼす影響について調べた結果、以下のことが分かった。

- 1) 仕口崩壊型骨組は仕口梁剛性比をある程度大きくすれば、仕口梁強度比を小さくすることにより各層の最大変位応答量は小さくなり、梁崩壊型に近い応答性状を示すようになる。
- 2) 仕口崩壊型骨組で仕口降伏後、仕口の耐力上昇により梁材が降伏するように仕口の降伏耐力、初期剛性及び2次剛性を選ぶと、仕口にエネルギーを集中させる事なく、骨組構成部材全体でバランスの良いエネルギー吸収ができる。

【参考文献】 [1] T. Basegawa & H. Yamanouchi : The effect of weak beam-to-column joint panels on seismic performance of steel building structures, Earthquake Engineering, Tenth World Conference, 1992 Balkema, Rotterdam [2] 河野昭雄、牧野聰：パネル崩壊型鋼構造骨組における剛性分布と地震時損傷分布、日本建築学会中国・九州支部研究報告、第6号、昭和59年3月、pp.357～360 [3] 山成實、小川厚治、黒羽啓明、藤田芳治：半剛接鋼骨組の地震応答に関する研究(その1 解析方法)、(その2 パラメトリックスタディ結果と考察)、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)、1992年8月、pp.1387-1390 [4] Ben Kato and Hiroshi Akiyama : Theoretical Prediction of the Load-Deflection Relationship of Steel Members and Frames , IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads , 1973 , pp.23～28 [5] 小川厚治：鋼構造骨組構成部材の適正強度分布に関する研究(その1 動的崩壊機構特性とエネルギー吸収能力)、日本建築学会論文報告集、第323号、昭和58年1月、pp. 13-22

図10 仕口のエネルギー吸収率