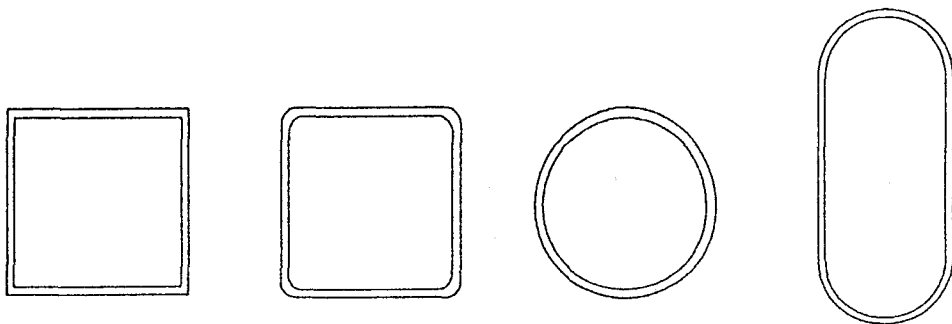


## 5 耐荷力、および変形性能の向上策・補強

### 5.1 断面形状の改良

薄肉構造部材の代表的な断面として、図5.1には、矩形断面、コーナー部に曲率を有する断面(R付き断面)、円形断面、および長円形断面を示す。ここで、同図(b)~(d)のような曲率を有する断面は、形状係数  $f (=M_P/M_Y, \text{shape factor}, M_P: \text{全塑性モーメント}, M_Y: \text{降伏モーメント})$  が大きく、梁として用いると、図5.2に示すように、全塑性モーメント  $M_P$  が等しい場合、矩形断面に比べると、降伏モーメント  $M_Y$  が小さくなる。すなわち、低い荷重で降伏が発生するが、その後、塑性変形による断面のエネルギー吸収率がよくなる。ただし、局部座屈が発生すると、曲率を有する断面では、断面形状が著しく変化し、強度が急激に低下するため、局部座屈が発生しないよう、厚肉断面にする必要がある。



(a) 正方形断面 (b) R付き断面 (c) 円形断面 (d) 長円形断面

図5.1 薄肉構造部材の代表的な断面形状

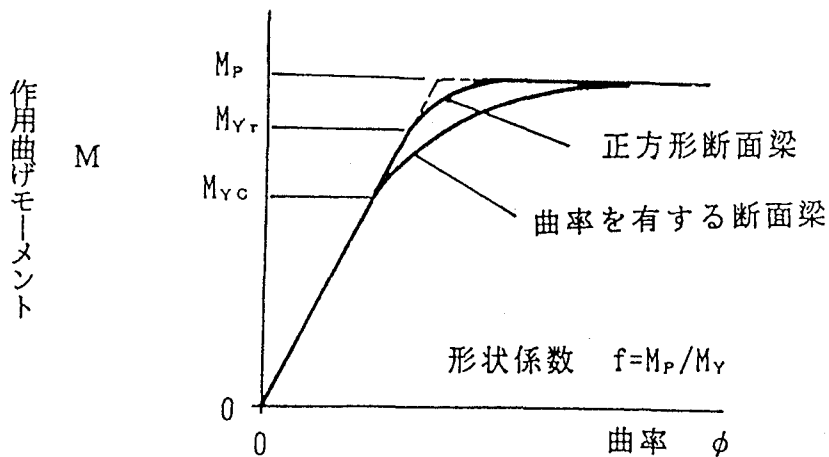
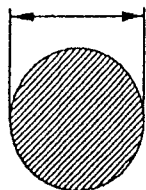


図5.2 形状係数の違いによる  $M-\phi$  曲線の相違

図5.3には、一例として、 $M_P$  を一定にした充実断面と中空断面との断面形状の相違を比較して示している。充実断面は、中空断面に比して、形状係数は1.3倍、降伏モーメント  $M_Y$  は0.77倍、断面積  $A$  は2.73倍になっている。充実断面の柱を用いると、軸方向圧縮力による圧縮応力が低下すること（図5.3の例では、約0.36倍となる）、および降伏モーメントが低くなることにより、大きな変形性能、およびエネルギー吸収効果が期待できる。

$$A=314\text{cm}^2, f=1.7$$

20 cm



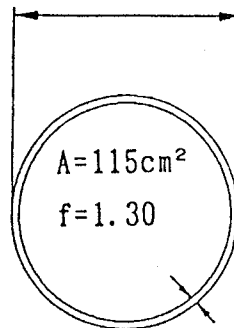
$$M_P=4.0 \times 10^5 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$$

$$(\sigma_v=2,400 \text{ kgf}/\text{cm}^2)$$

(a) 充実円形断面梁

$$(M_v=2.36 \times 10^5 \text{ kgf}\cdot\text{cm})$$

37.6 cm



$$A=115\text{cm}^2$$

$$f=1.30$$

1.0 cm

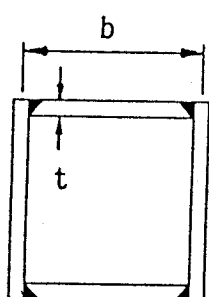
(b) 中空円形断面梁

$$(M_v=3.07 \times 10^5 \text{ kgf}\cdot\text{cm})$$

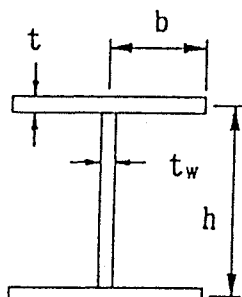
図5.3  $M_P$ を等しくした円形断面梁の断面形状の相違

## 5.2 断面の幅厚比の低減

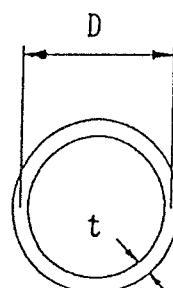
参考のため、図5.4には、代表的な断面を示す。変形性能の向上に効果的な幅厚比、および径厚比について述べる。同図(a)の箱形断面では板要素の幅厚比 $b/t$ 、同図(b)のI形断面では自由突出板の幅厚比 $b/t$ 、および腹板の幅厚比 $h/t_w$ 、同図(c)の円形断面では径厚比 $D/t$ 、また同図(d)の補剛断面では、補剛材間の板パネルの幅厚比 $b/t$ 、および補剛材の突出幅厚比 $h_r/t_r$ を小さくすることによって、断面の変形性能を向上できる。その適切な最大限界値は、断面に作用する応力状態、および材質によって異なる。なお、同図(d)の補剛断面では、補剛材の剛比 $\gamma$ （補剛材の曲げ剛度と板パネルの板曲げ剛度との比）も問題となる。それについては、5.3で述べる。



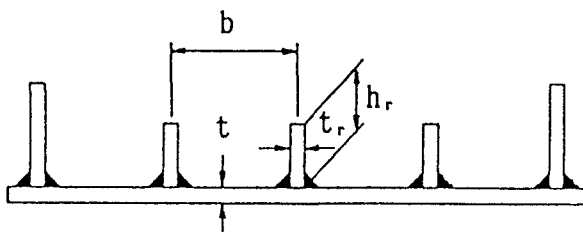
(a) 箱形断面



(b) I形断面



(c) 円形断面



(d) 補剛断面

図5.4 変形性能を期待する部材の断面

### 5.3 補剛材の配置の工夫、および剛度の増加

図5.5に示す補剛板の軸方向面内力に対する変形性能を向上させるためには、同図(b)に示すように、補剛材の剛比 $r$ を、弾性座屈理論から求まる必要最小剛比 $r^*$ の3~5倍程度にするのがよい<sup>1)</sup>。

しかしながら、補剛材の寸法を大きくすると断面強度が大きくなりすぎて、他の構造部材とのバランス上問題が生じることもある。そのような場合には、同図(c)に示すように、横方向補剛材を密に設けて、補剛板パネルのアスペクト比を小さくする。そして、補剛板の断面積を一定に保つよう、補剛材剛比のみを増加させるなどの工夫を行うのがよい<sup>2)</sup>。

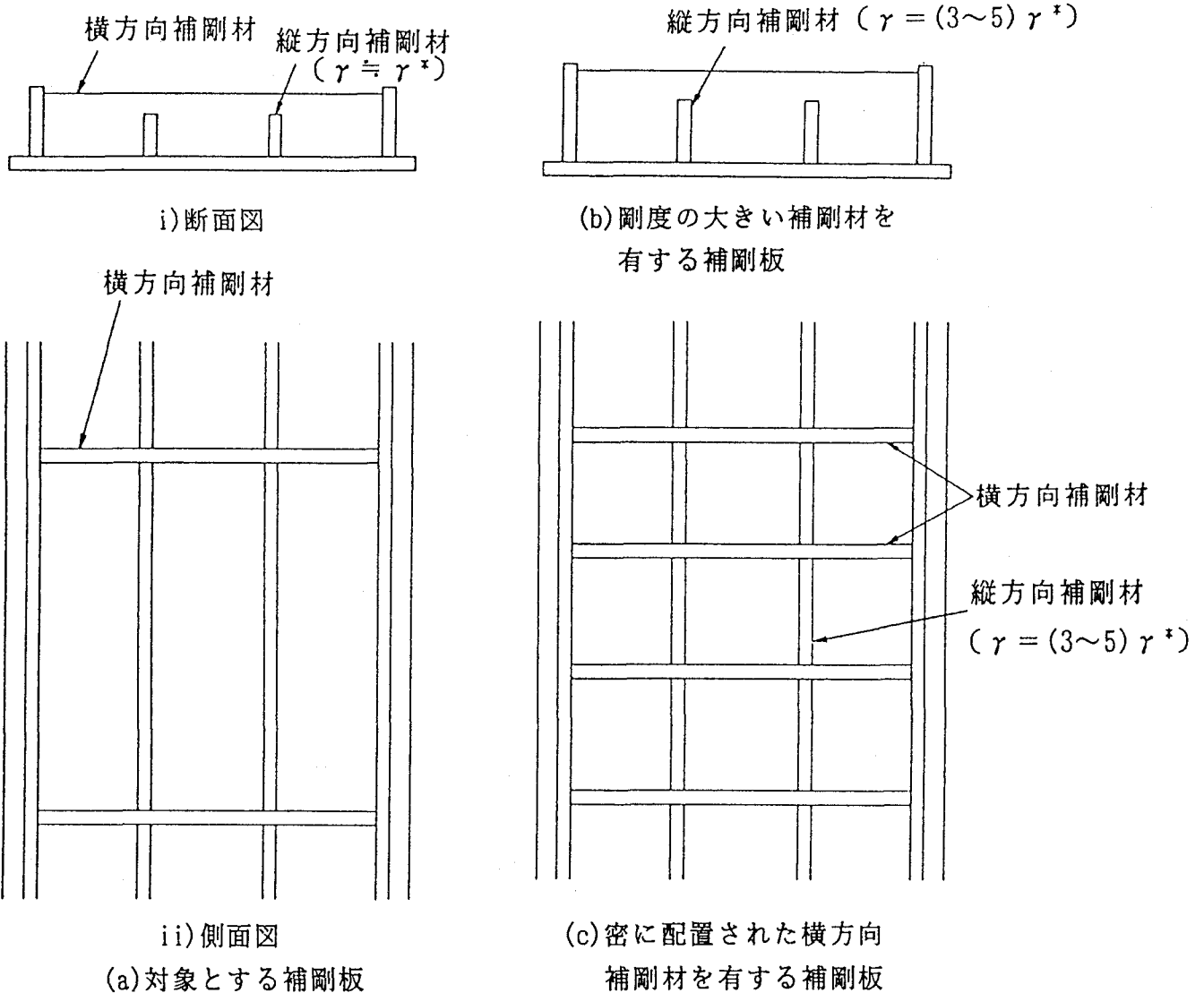


図5.5 変形性能を期待する補剛板の補剛材の配置法

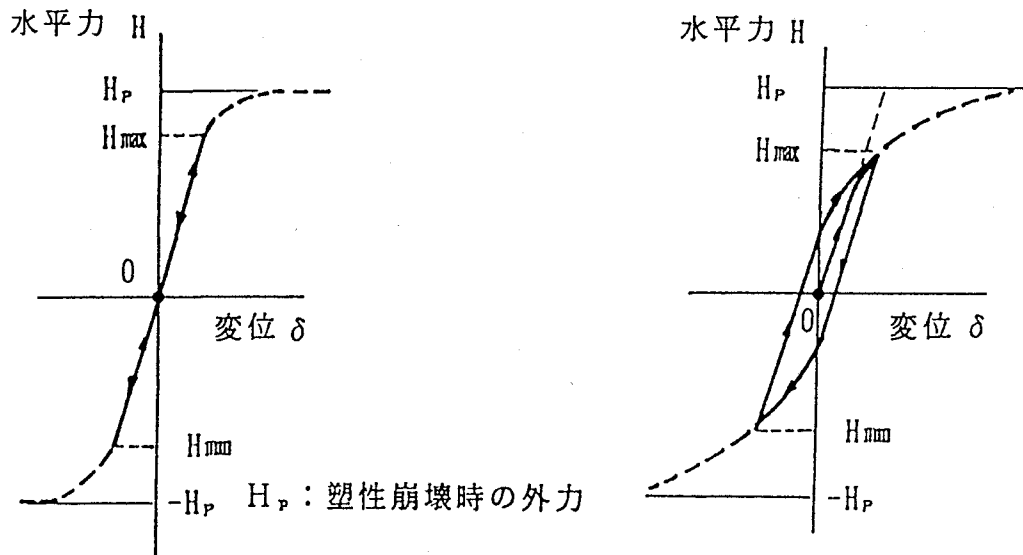
### 5.4 低降伏比鋼の使用

一般構造用鋼(SS)材も含め、降伏点の引張強度に対する比率(降伏比)の小さい低降伏

比鋼を用いると、図5.6(b)に示すように、低荷重状態で構造物が弾塑性挙動を呈し、図5.6(a)に示すような線形挙動を呈する構造物よりも、エネルギー吸収効果がよくなる。また、弾塑性領域では剛性が低下し免震構造ともなる。

以上の理由より、低降伏比鋼を用いると、大きな地震の場合には、作用地震力 $H_{max}$ を小さくできる。とくに、低降伏比鋼とした高張力鋼では、部材断面を小さくでき、空間の有効利用ができるなどの利点もあるので、SS材のような大きな降伏棚を有する高張力鋼の開発が進められている。

ただし、弾塑性挙動を許すと、大地震に対して、応答変位が大きくなることに留意して設計しなければならない。



(a)線形挙動する構造物

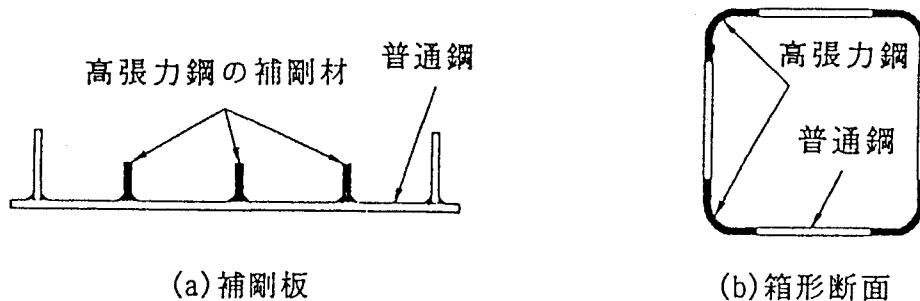
(b)低荷重から非線形挙動する構造物

図5.6 線形構造物と非線形構造物との相違

### 5.5 ハイブリッド構造の採用

普通鋼と高張力鋼とを同じ断面内、あるいは部材内に併用するハイブリッド構造を採用すると、低荷重状態から弾塑性挙動を示し、5.4で述べた低降伏比鋼を用いる場合と同様の効果が期待できる。

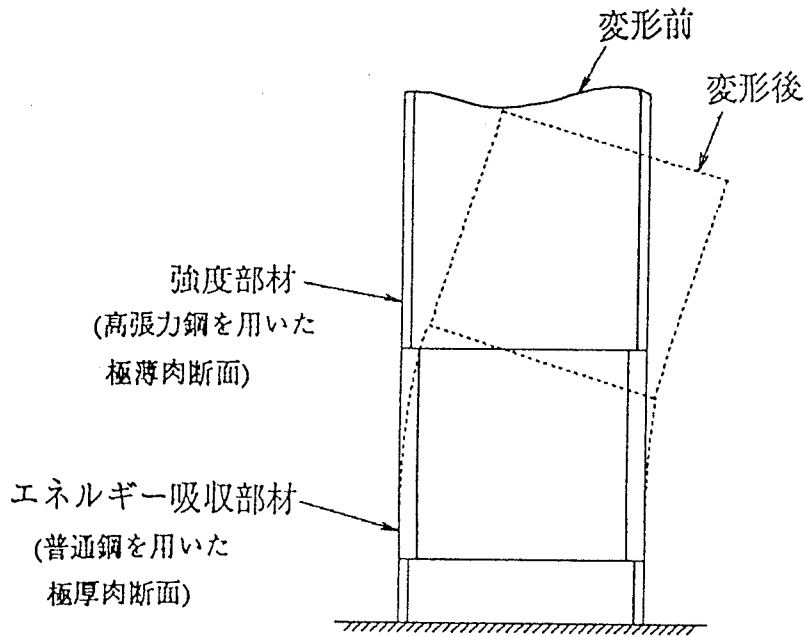
たとえば、図5.7(a)の補剛板では補剛材に高張力鋼<sup>3)</sup>を、図5.7(b)のコーナー部に曲率を有する箱形断面柱ではコーナー部に高張力鋼を、また図5.7(c)では部材の一部に強度が他の部分より低い、厚肉断面で変形性能のある普通鋼を用いる構造案を示している。



(a)補剛板

(b)箱形断面

図5.7 ハイブリッド構造の例(つづく)



(c) 柱の一部にダクティリティをもつ普通鋼を用いる部材を導入した例  
 図5.7 ハイブリット構造の例 (つづき)

### 5.6 合成構造の採用<sup>4)</sup>

図5.8は、長方形断面を有する合成柱供試体、コンクリート柱供試体、および鋼製柱供試体の圧縮荷重 $P$ と軸方向平均ひずみ $\bar{\epsilon}_x (=u/L)$ との関係を示したものである<sup>4)</sup>。ここに、 $P_{pc}$ は、累加極限荷重である。長方形断面の場合、合成柱としても、円形断面ほどの大きな強度増加は期待できない。しかし、軸方向変位が大きくなっても、圧縮荷重が低下せず、大きな変形性能が得られることがわかる。

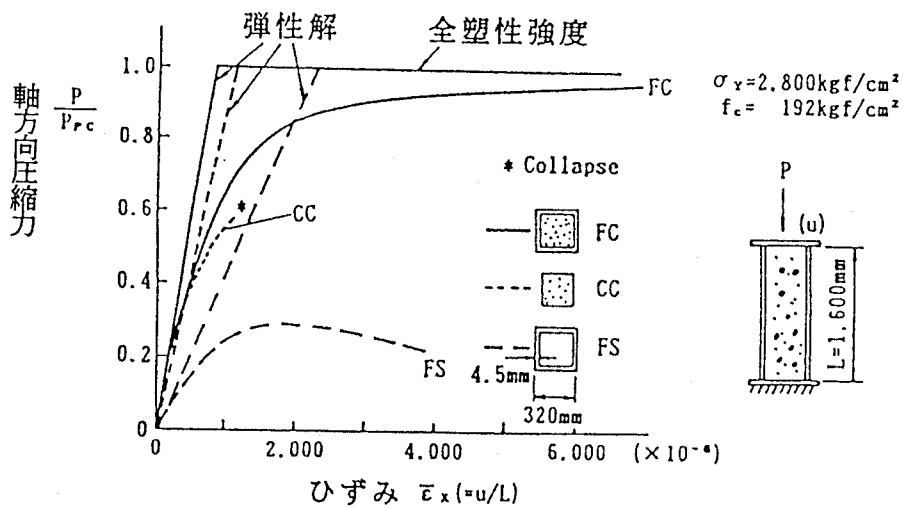


図5.8 作用圧縮荷重と平均軸方向ひずみとの関係<sup>4)</sup>

図5.8 作用圧縮荷重と平均軸方向ひずみとの関係<sup>4)</sup>

図5.9には、最大たわみと降伏たわみとの比  $\delta_{max}/\delta_y$  が1.61の荷荷条件のもとにおいて、正方形断面を有する鋼製梁、および合成梁供試体の繰り返しP- $\delta$ 曲線<sup>5)</sup>を示している。この図に示すように、鋼製梁にコンクリートを充填することによって、荷重の繰り返しによる耐荷力の劣化がなくなることがわかる。

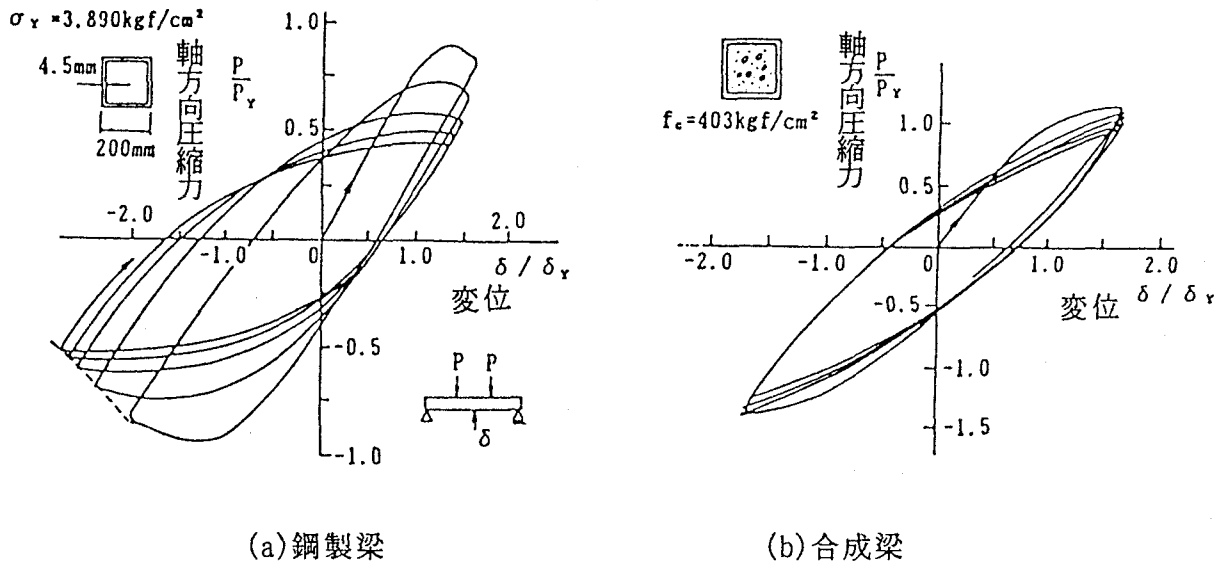


図5.9 正方形断面を有する鋼製梁、および合成梁供試体の繰り返しP- $\delta$ 曲線<sup>5)</sup>

図5.10には、一定の軸方向圧縮力を受ける円形、および正方形断面の合成梁・柱の曲げモーメントMと曲率 $\phi$ との関係を示している<sup>6)</sup>。この図より、曲げモーメントが作用する長方形断面の合成梁では、円形断面の場合と比較して、大きな変形性能が期待できないことがわかる。

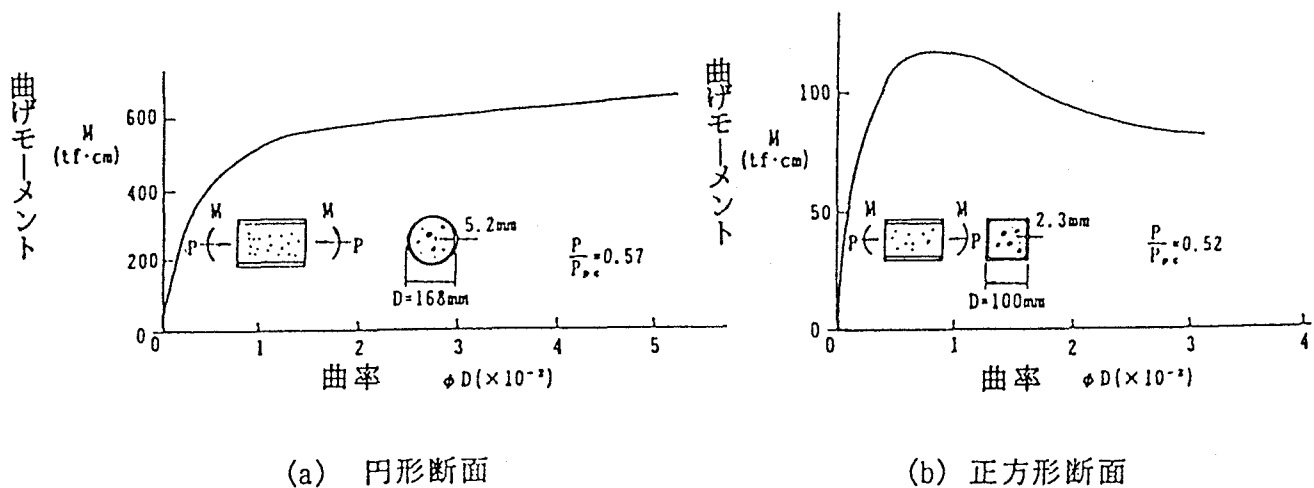


図5.10 合成梁・柱(短柱)供試体のM- $\phi$ 曲線<sup>6)</sup>

図5.11には、正方形断面を有する鉄筋コンクリート短柱、および合成短柱供試体の繰り返しせん断力 $Q$ と回転角 $R$ との関係を包絡した曲線が示されている<sup>7)</sup>。一定の軸方向圧縮力のもとで繰り返しせん断力を作用させた場合、合成柱の変形性能は、鉄筋コンクリート柱と比較して、かなり優れていることがわかる。

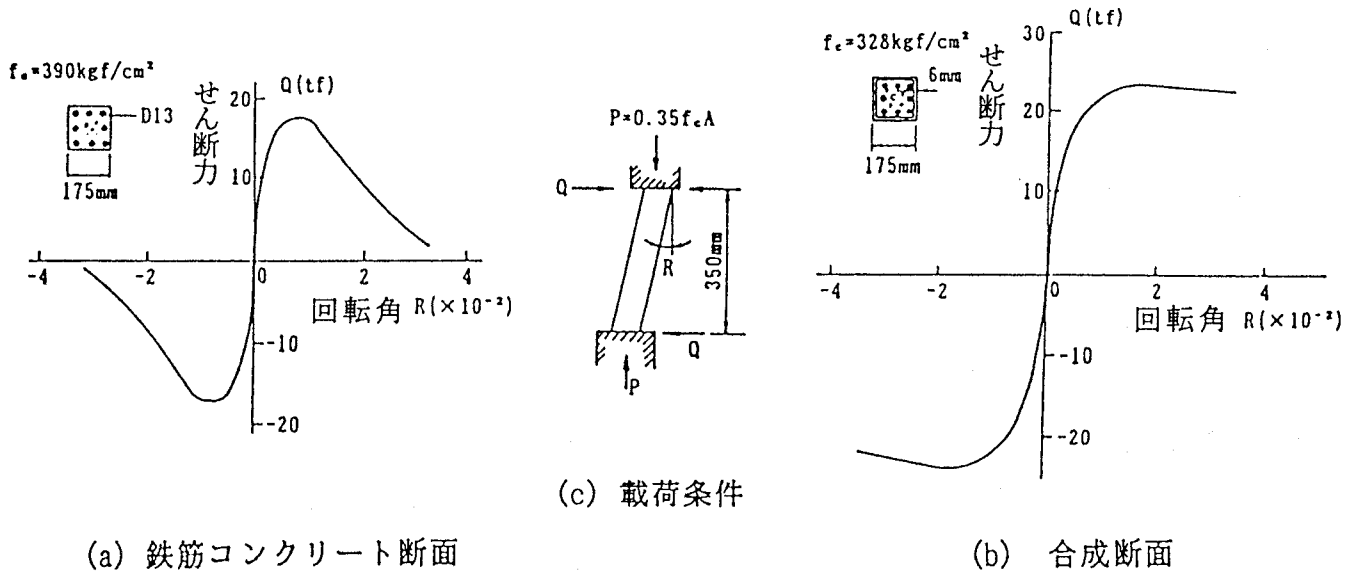


図5.11 正方形断面を有する鉄筋コンクリート、および合成断面のせん断力-回転角包絡曲線<sup>7)</sup>

### 5.7 耐荷力を上げずに変形性能のみを向上させる構造詳細

図5.12に示すように、補剛材を繋ぎ材で連結すると、補剛板としての全体座屈が発生しにくくなり、強度を上げることなく変形性能を向上させることができる<sup>8)</sup>。

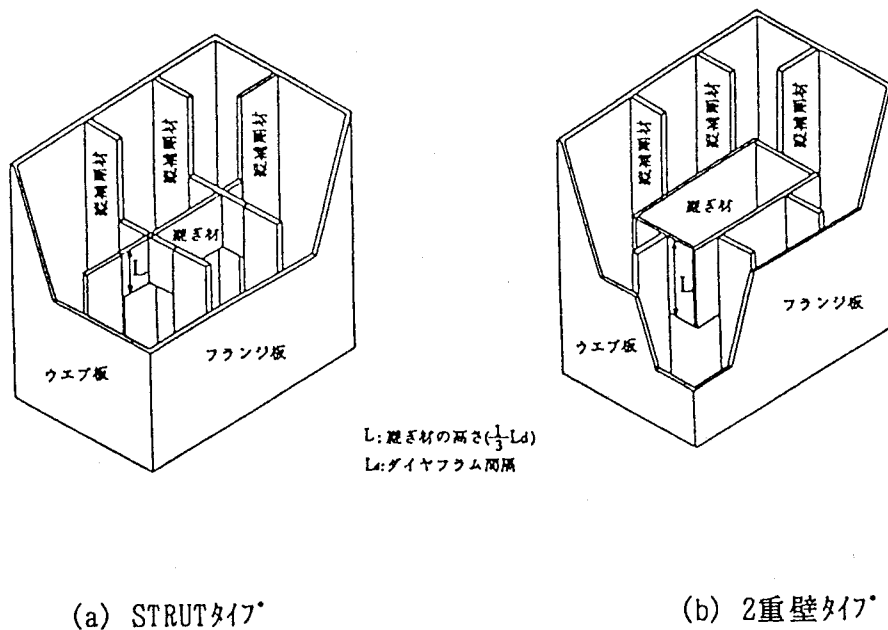


図5.12 縦補剛材の部分的接合<sup>8)</sup>

## 5.8 溶接法の工夫

まず、図5.13(a)に示すように、片面隅肉溶接では、溶接部に变形性能がない。そこで、变形性能を期待する部材の隅角部の溶接は、図5.13(b)、および(c)に示すように、完全溶け込溶接、あるいは両面隅肉溶接にするのがよい。

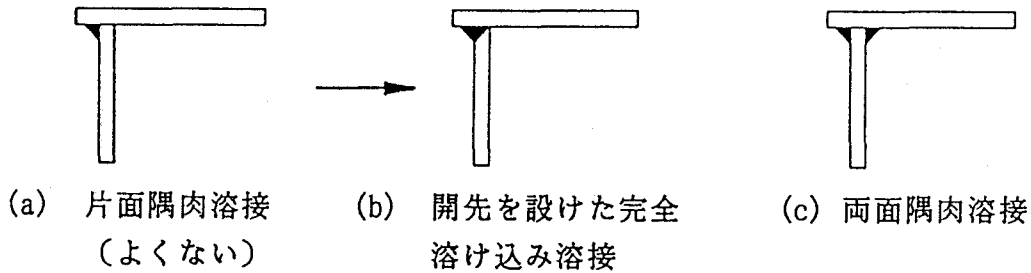


図5.13 隅角部の溶接

つぎに、隅角部では、せん断遅れなどに起因する応力集中が生じやすいので、図5.14に示すように、板パネルの中央に溶接部を設けるのも变形性能を向上させる上で効果的である<sup>9)</sup>。

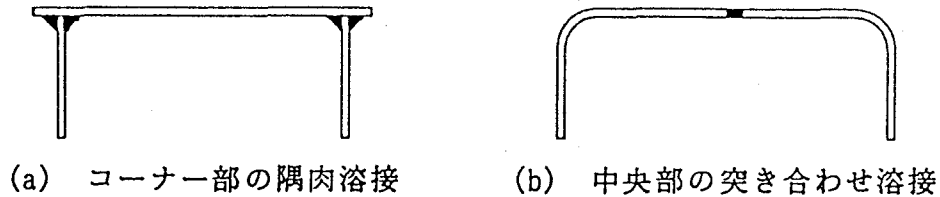


図5.14 溶接部の位置

また、図5.15(a)に示す橋脚基部では、大きな地震が長時間作用すると、断面が急変する断面A-Aで低サイクル疲労により破断することがある。そこで、図5.15(b)に例示するように、断面がなめらかに変化するような構造とするのがよい。

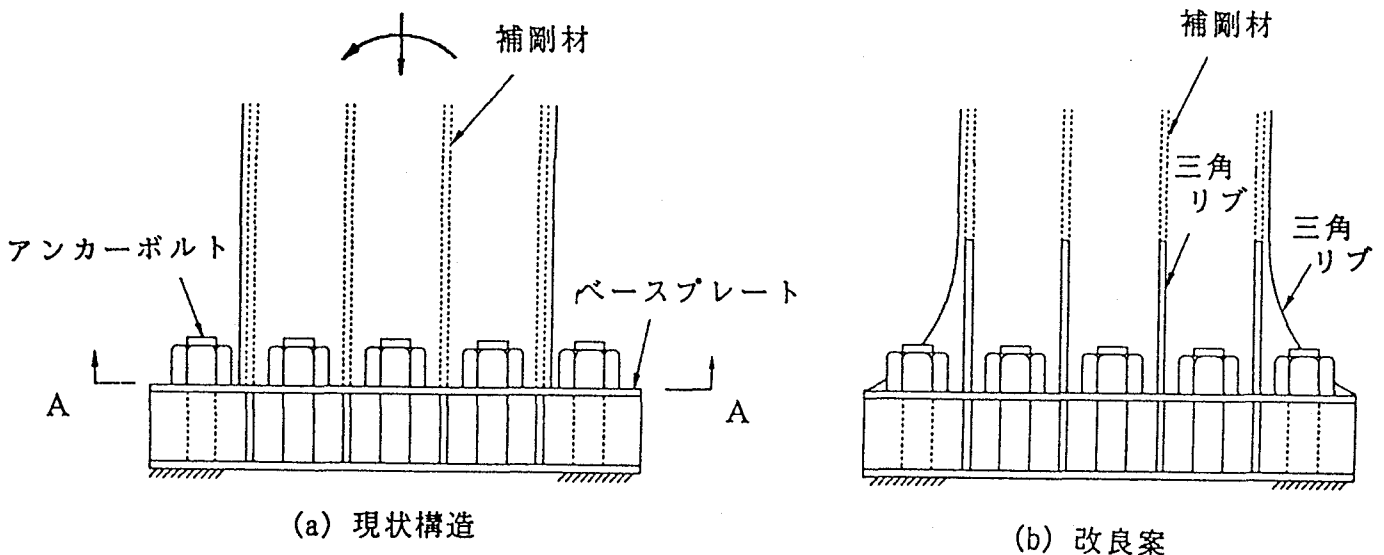


図5.15 鋼製橋脚基部の構造



さらに、図5.16の2本の柱部材の結合部のように、溶接線が集中する箇所では、図(c)に示すような多角形断面鋼棒を挿入して、溶接線を分散するのがよい<sup>10)</sup>。

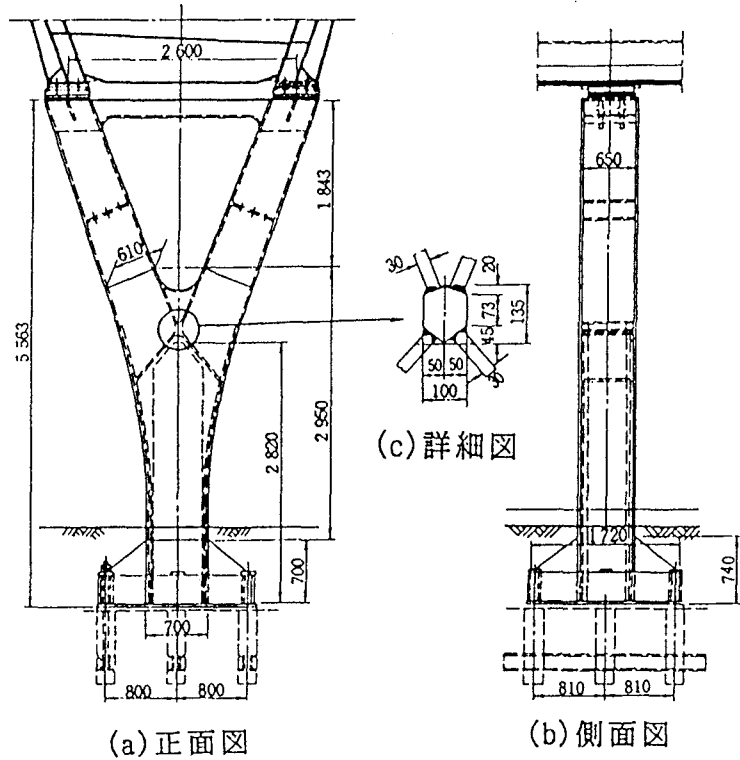


図5.16 西ドイツの鉄道橋のY形ラーメン橋脚 (単位: mm) <sup>10)</sup>

### 5.9 細長比の低減

図5.17に示すように、 $l/r$ を小さくすると、部材の柱としての座屈が起こりにくくなり、部材としての変形性能が向上し、構造物としてのエネルギー吸収率がよくなる。

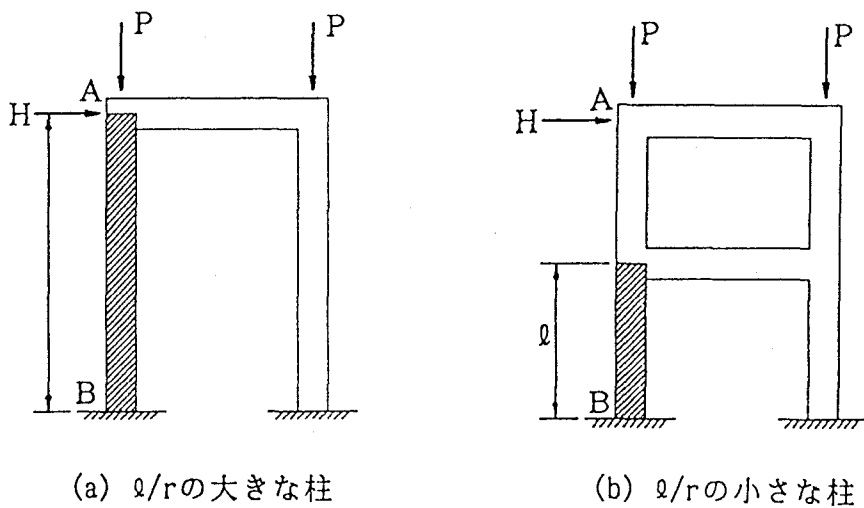
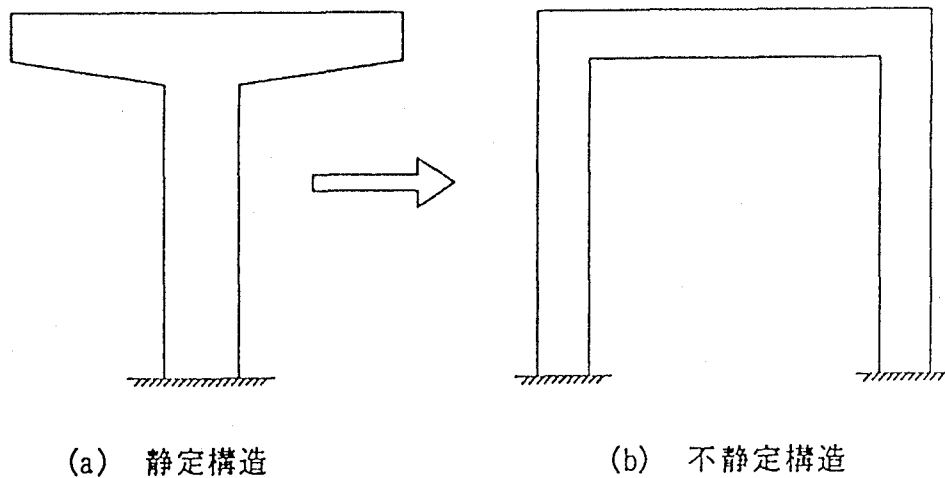


図5.17  $l/r$ の低減による変形性能の向上

ただし、温度応力に対する配慮は、別途、行っておく必要がある。

## 5. 10 不静定次数の増大

図5.18に示すように、静定構造では、1つの断面が終局状態に至ると、構造物全体も終局状態に至ってしまう。しかし、不静定構造にすると、1つの断面が終局状態に至っても、構造物は、終局状態とはならないため、エネルギー吸収量が大きくなり、変形性能が向上する。



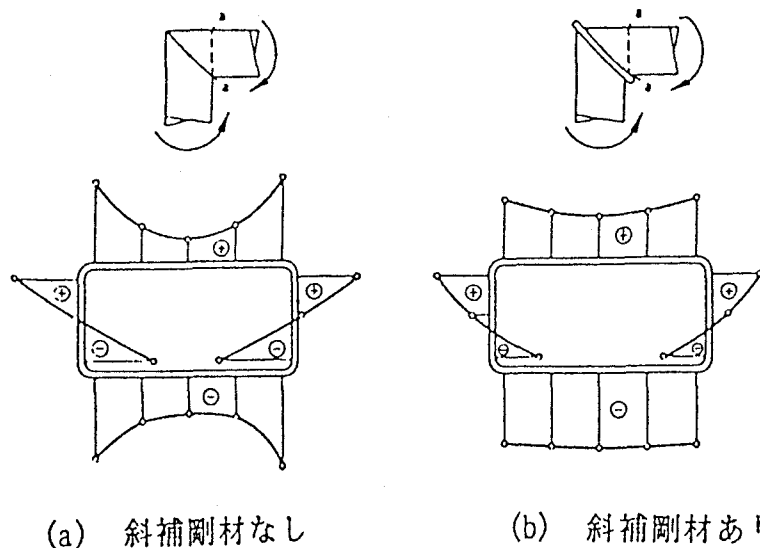
(a) 静定構造

(b) 不静定構造

図5.18 不静定次数の増大による変形性能の向上(橋脚の例)

## 5. 11 ラーメン隅角部

図5.19(a)に示すように、ラーメン隅角部では、せん断遅れ現象により応力集中が発生し、大きな地震荷重が作用すると、断面のコーナー部に応力集中を起こしやすくなる。しかし、図5.19(b)のように斜め補剛材を設けると、せん断遅れ現象が緩和され、隅角部の変形性能が向上するものと考えられる<sup>14)</sup>。隅角部の変形性能を向上させるためには、この例(実例は、図5.16に示した)も含めて種々の構造案が考えられる<sup>11)</sup>。



(a) 斜補剛材なし

(b) 斜補剛材あり

図5.19 ラーメン隅角部<sup>14)</sup>

### 5.12 作用軸方向圧縮力の低減

図5.20、および図5.21には、軸方向圧縮力 $N$ が全塑性軸力 $N_{ps}$ の0.137倍、および0.274倍の場合の繰り返し水平荷重と水平変位との関係を示している。軸方向圧縮力が大きくなると、繰り返しによる強度劣化が大きくなることがわかる<sup>12)</sup>。すなわち、軸方向圧縮力を小さくすると、変形性能が向上することを示している。

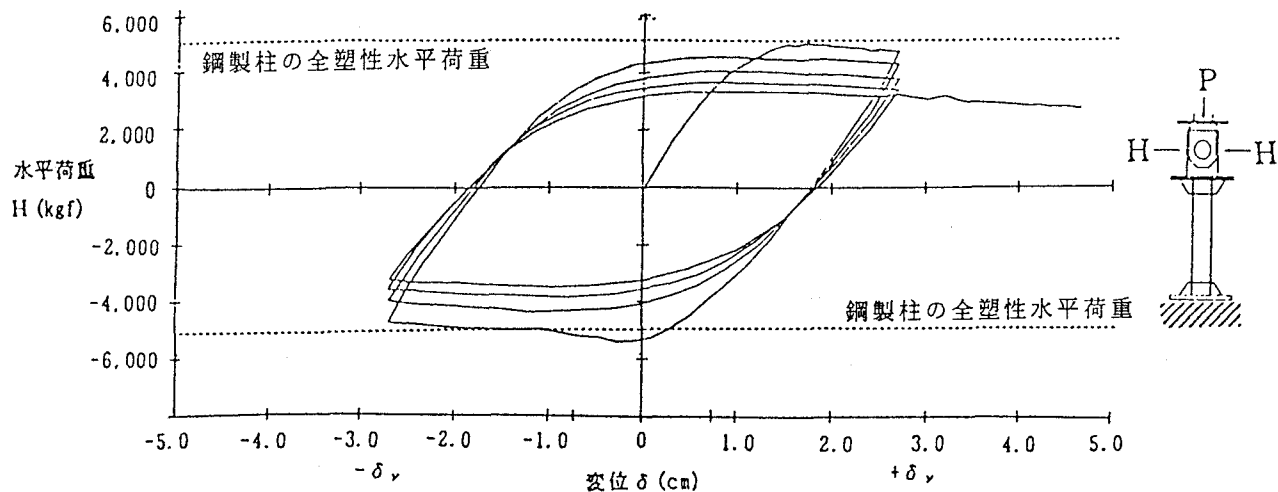


図5.20 実験供試体S-1-02の水平荷重—水平変位曲線 ( $N/N_{ps}=0.137$ )<sup>12)</sup>

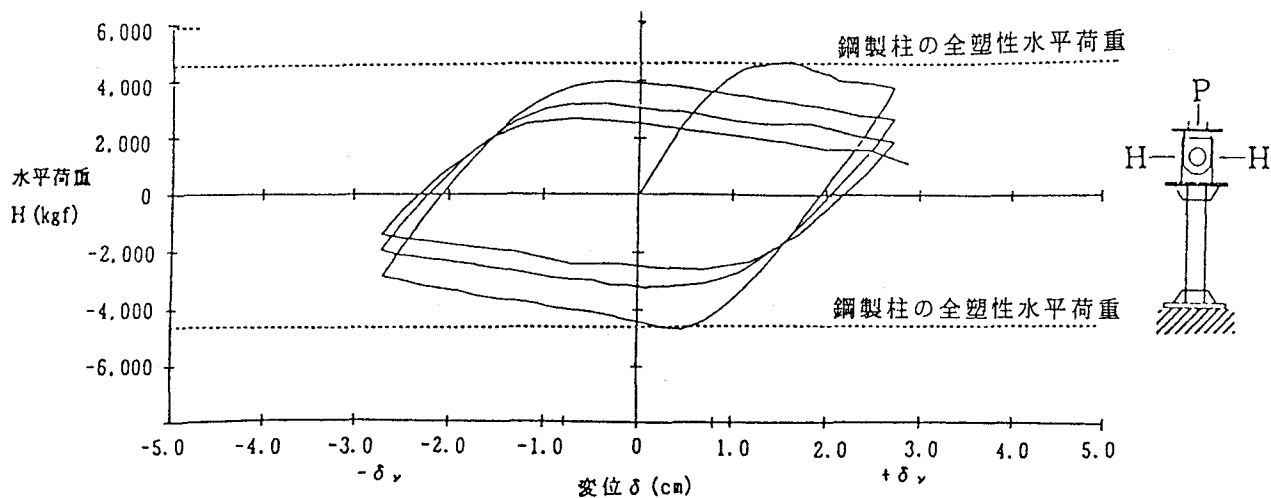


図5.21 実験供試体S-2-0の水平荷重—水平変位曲線 ( $N/N_{ps}=0.274$ )<sup>12)</sup>

### 5.13 損傷の補修方法

図5.22には、軸方向圧縮力 $N=0.137N_{ps}$ の供試体に道路橋示方書で想定する200gal程度の地震荷重をハイブリッド実験で作用させた後、繰り返し水平荷重と水平変位との関係を調

べ、その結果を示したのである<sup>13)</sup>。この供試体は、ハイブリッド実験によって基部の鋼板パネルに局部座屈が発生したが、崩壊には至らなかった。地震荷重を載荷しない場合の同様な水平荷重と水平変位の関係は、図5.20に示した。このように、両者の挙動に大きな差異が見られないことより、地震が作用しても崩壊しなければ、強度、および変形性能上あまり問題はないと考えられる。しかし、美観上からは、補修する必要がある。

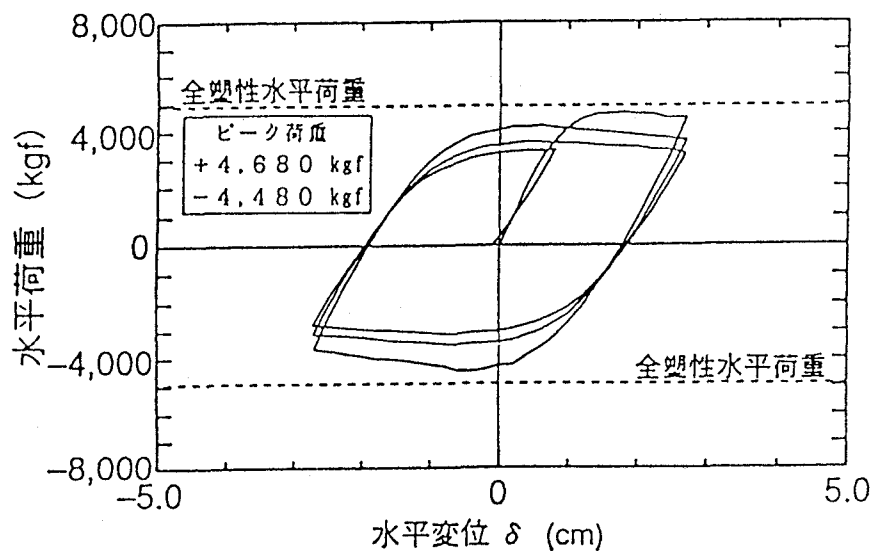


図5.22 実験供試体S-1-G3の水平荷重－水平変位曲線  
( $N/N_p = 0.137$ 、地震荷重載荷後)<sup>13)</sup>

図5.23、および図5.24には、合成柱に対する同様な曲線を示している<sup>12)</sup>。合成柱供試体R-1-G3も道路橋示方書で期待する地震荷重の1.7倍程度の地震荷重を作用させても崩壊しなかった。合成柱についても、鋼製柱と同様、地震が作用しても崩壊しなければ、強度、および変形性能上あまり問題はないと考えられる。

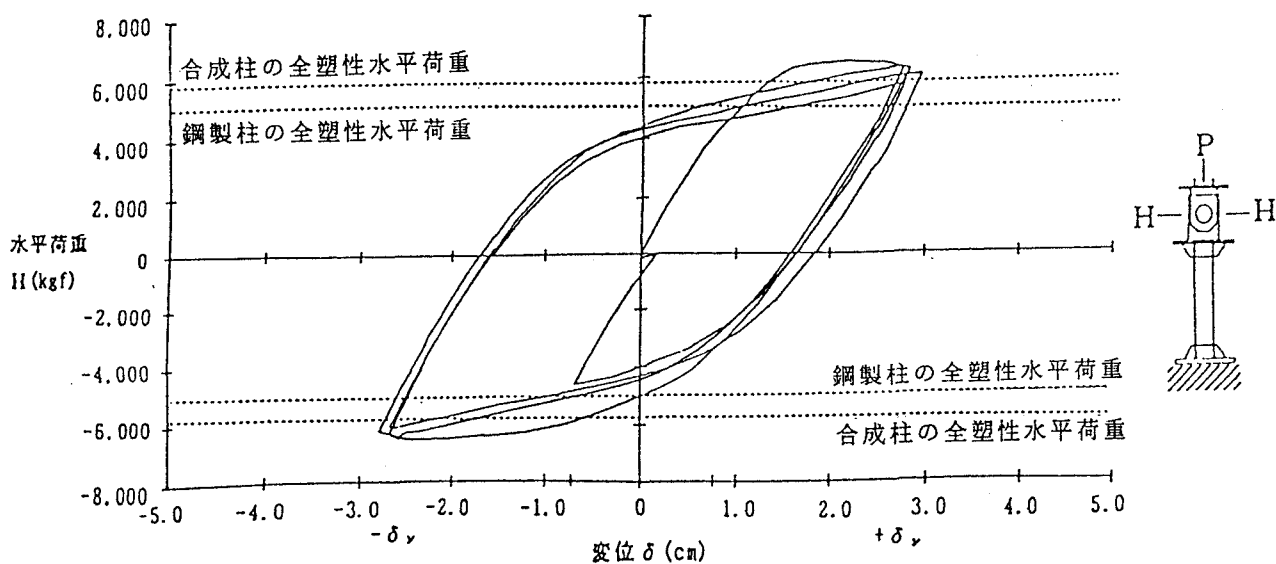


図5.23 合成柱供試体R-1-0の水平荷重－水平変位曲線<sup>12)</sup>  
( $N/N_p = 0.137$ 、地震荷重を作用させなかった場合)

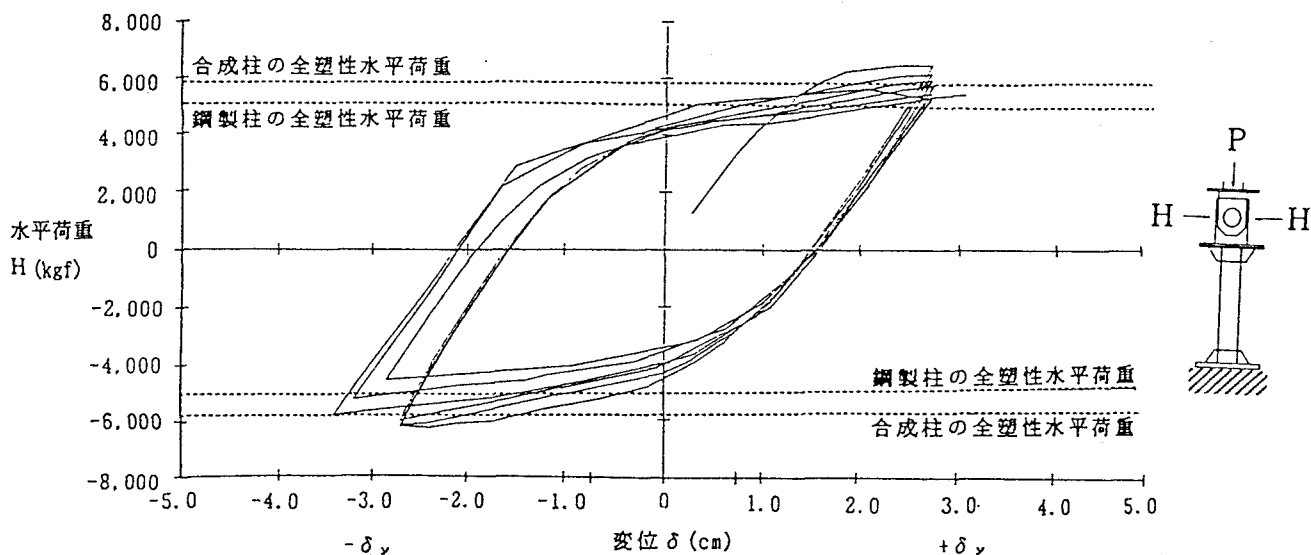
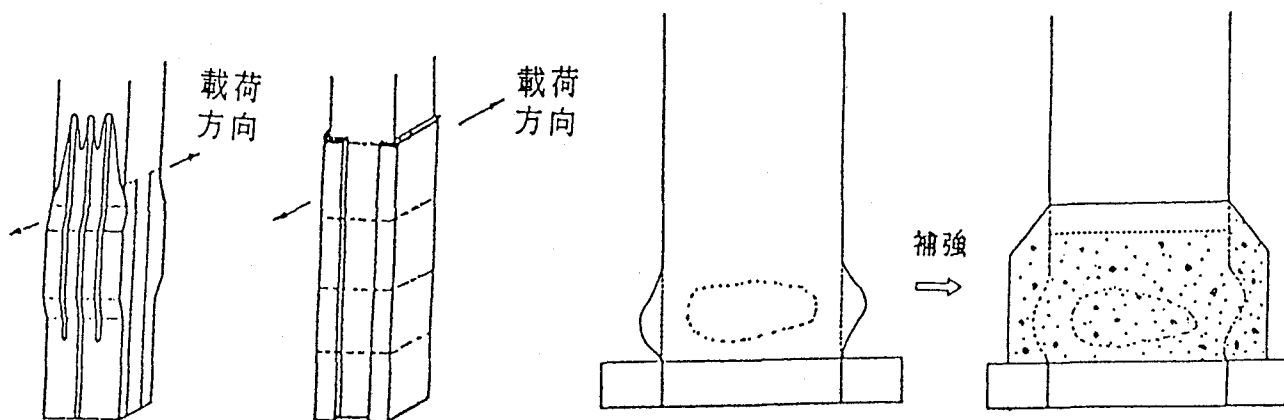


図5.24 合成柱供試体R-1-G3の水平荷重—水平変位曲線<sup>12)</sup>  
 (N/N<sub>p</sub> = 0.137、 $\gamma = 1.7$ 程度の地震荷重を作用させた場合)

図5.25、および図5.26には、補修法の例を示す。そのうち、図5.25(a)は、損傷部の残留座屈変形が大きい場合で、その上から補剛板で補強する方法<sup>15)</sup>である。また、図5.25(b)は、損傷部の残留座屈変形が小さい場合で、その上からカバープレートで覆う方法<sup>15)</sup>である。さらに、図5.26は、損傷部をそのままにして、合成構造とする方法である。これらの補修方法以外にも、種々の方法が考えられる。



(a)補修補剛板を(b)コンタクトプレートを用いる方法 (a)地震によって座屈した鋼製橋脚基部 (b)コンクリート充填と鋼板の巻立てによる補強

図5.25 補修方法の例<sup>15)</sup>

図5.26 充填構造とする補強方法の一例

## 参考文献

- 1) 宇佐美 勉・今井康彦・青木徹彦・伊藤義人：繰り返し荷重を受ける鋼圧縮部材の強度と変形能に関する実験的研究、構造工学論文集、土木学会、Vol. 37A, pp. 93～106, 1991年3月
- 2) 山田善一・家村浩和・伊津野和行・岡 重洋：鋼製箱型橋脚の部材横方向の補剛による変形性能の向上に関する実験、土木学会関西支部年次学術講演会概要集、I-17、平成5年5月
- 3) 宇佐美 勉・水谷慎吾・青木徹彦・伊藤義人・安波博道：補剛箱形断面鋼圧縮部材の繰り返し弾塑性挙動に関する実験的研究、構造工学論文集、土木学会、Vol. 38A, pp. 105～117, 1992年3月
- 4) 北田俊行：コンクリートを充てんした鋼製部材の極限強度とダクティリティー、第1回SGST拡大研究会論文集、名城大学、pp. 37～46、平成3年11月29日
- 5) 桜井孝昌・加藤賢治・宇野洋平・忠 和夫・草間晴幸：交番曲げを受けるコンクリート充填角形鋼管梁の耐荷力に関する実験的研究、構造工学論文集、土木学会、Vol. 34A, pp. 265～274, 1988年3月
- 6) 富井政英・崎野健治：充填コンクリート鋼管構造に関する研究の現状、その1. 部材の弾塑性性状、コンクリート工学、Vol. 13, No. 2, pp. 26～40、1975年2月
- 7) M. Tomii, K. Sakino and Y. Xiao: Ultimate Moment of Reinforced Concrete Short Columns Confined in Steel Tube, Proceedings of Pacific Conference on Earthquake Engineering, Vol. 2, New Zealand, pp. 11～22, August 1987
- 8) 太田雅夫・渡邊英一・古田 均・杉浦邦征・宇都宮智昭・南荘 淳：鋼箱型断面橋脚柱の効果的補剛法に関する実験的研究、土木学会関西支部年次学術講演会概要集、I-20, 平成5年5月
- 9) 渡邊英一・杉浦邦征：R付き箱型断面のダクティリティー、鋼構造のダクティリティー評価に関する調査研究、土木学会関西支部共同研究グループ最終報告書、pp. 67～77, 1991年6月
- 10) Ohlemutz, A. : Die neuen Eisenbahnbrücken über das Messegelände in Frankfurt, Stahlbau, 37 Jahrgang, Heft. 6, s. 177～183, Juni 1968
- 11) 高津秀俊・黄 元燮・西野滋博・西村宣男：平面ラーメン構造の終局強度解析のためのシアヒンジ解析、土木学会関西支部年次学術講演会概要集、I-82、平成5年5月
- 12) 中井 博・北田俊行・吉川 紀・中西克佳・尾山達巳：コンクリートを充填した長方形箱形断面柱の耐荷力と変形性能に関する実験的研究、構造工学論文集、土木学会、Vol. 39A, pp. 1347～1360, 1993年3月
- 13) 阪神高速道路公団保全施設部、(財)災害科学研究所：既設橋脚の耐震性向上手法の開発に関する調査研究業務、平成5年3月
- 14) Stahlbau Handbuch für Studium und Praxis, Stahlbau-Verlags-GmbH, Köln, S. 692, 1982
- 15) Macrae, G. A, K. Kawashima and K. Hasegawa : Repair and Retrofit of Steel Piers, U. S. -Japan Workshop on Seismic Retrofit of Bridges, Tukuba Science City, Japan, December 1990