

## I - 13

## 最小重量設計法による鋼構造部材の耐荷力関連規程の比較

|        |     |      |
|--------|-----|------|
| 室蘭工業大学 | 正員  | 杉本博之 |
| 東京都立大学 | 正員  | 野上邦栄 |
| 室蘭工業大学 | 学生員 | 池田準  |

## 1. まえがき

土木学会鋼構造委員会の鋼構造終局強度研究小委員会においては、現在、鋼構造物および鋼構造部材の設計法の見直し作業が進められている。その中では、国内および国外の関連の規程の比較も研究されている。鋼構造部材の耐荷力関連規程の比較は、従来、公式自身の比較あるいは同一断面に対する各耐荷力関連規程の評価の比較により行なっていた。一方、それらの耐荷力関連規程が、実際にどのような断面を生み、それらの間にどのような差があるかについての比較検討も重要ではないかと考えられる。ただ、一般の設計法によって生み出される断面寸法には無限の組み合わせがあり、それらの客観的な比較および評価はなかなか難しい。しかし、最適設計法を用いて設計すると、同一の設計条件下で、種々の制約条件を満足する設計の内、あらかじめ定めた価値基準（目的関数）を最小にする断面を得ることができ、客観的な評価および比較が可能になると考えられる。

そこで本研究においては、国内に関しては、道路橋示方書（JSHB）、国鉄建造物設計標準（JR）、吊橋主塔設計要領（HSBA）、米国に関しては、AISC/ASD、AISC/PDおよびAISC/LRFDの耐荷力関連規程を用い、作用曲げモーメント、作用軸力、有効座屈長および降伏応力度の種々の組み合わせの下で、正方形箱形断面の断面寸法を最小重量設計法で求め、それらの断面寸法、断面積等を比較検討した。

さらに、各耐荷力関連規程に従って得られた設計を、他の耐荷力関連規程に代入し、最小板厚制限、最大細長比制限、最大幅厚比制限、安定照査式制限、強度照査式制限の内、どの条件を満足しどの条件を満足しないかについても整理し、各規程の特徴についても考察を加えることを試みた。

## 2. 正方形箱形断面柱の最小重量設計

右図の断面を対象にする、本研究の最適化問題は、次のように定式化される。

$$\text{目的関数} : A = 4bt + 4t^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

制約条件 :

$$\left. \begin{array}{ll} \cdot \text{最小板厚制限} & ; \quad g_1 \leq 0 \\ \cdot \text{最大細長比制限} & ; \quad g_2 \leq 0 \\ \cdot \text{最大幅厚比制限} & ; \quad g_3 \leq 0 \\ \cdot \text{安定照査式制限} & ; \quad g_4 \leq 0 \\ \cdot \text{強度照査式制限} & ; \quad g_5 \leq 0 \end{array} \right\} \quad (2)$$

設計変数 :  $b, t$

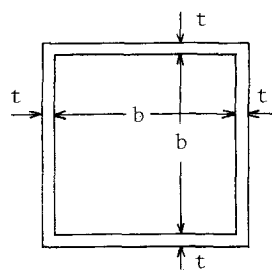


図-1 正方形箱形断面

これらの内、最小板厚制限、最大細長比制限、最大幅厚比制限、安定照査式制限、強度照査式制限の詳細については、次節で説明する。

## 3. 各設計規程類における耐荷力関連規程

本研究で用いた、各設計規程類における耐荷力関連規程を示すと以下になる。

---

Comparative Study of the Specifications for the Design of Steel Members by Optimization Method  
by Hiroyuki SUGIMOTO, Kuniei NOGAMI and Jun IKEDA

### 3-1 JSHB

$$\left. \begin{aligned}
 &\text{最小板厚制限 ; } g_1 = -t/0.8 + 1.0 \leq 0 \\
 &\text{最大細長比制限 ; } g_2 = (\ell/r)/120 - 1.0 \leq 0 \\
 &\text{最大幅厚比制限 ; } g_3 = (b/t)/(2754/\sqrt{\sigma_y}) - 1.0 \leq 0 \\
 &\text{安定照査式制限 ; } g_4 = \frac{\sigma_c}{\sigma_{ca}} + \frac{C_m \sigma_b}{\sigma_{ba}(1 - \sigma_c/\sigma_{ea})} - 1.0 \leq 0 \\
 &\text{強度照査式制限 ; } g_5 = \frac{\sigma_c}{\sigma_{cal}} + \frac{\sigma_b}{(1 - \sigma_c/\sigma_{ea})/\sigma_{cal}} - 1.0 \leq 0
 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

### 3-2 JR

$$\left. \begin{aligned}
 &\text{最小板厚制限 ; } g_1 = -t/0.9 + 1.0 \leq 0 \\
 &\text{最大細長比制限 ; } g_2 = (\ell/r)/100 - 1.0 \leq 0 \\
 &\text{最大幅厚比制限 ; } g_3 = (b/t)/(1929/\sqrt{\sigma_y}) - 1.0 \leq 0 \\
 &\text{安定照査式制限 ; } g_4 = \frac{P}{P_{ca}} + \frac{C_m M}{M_a} - 1.0 \leq 0 \\
 &\text{強度照査式制限 ; } g_5 = \frac{P}{P_{y/s}} + \frac{M}{M_{y/s}} - 1.0 \leq 0
 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

### 3-3 HSB A

$$\left. \begin{aligned}
 &\text{最小板厚制限 ; } g_1 = -t/0.8 + 1.0 \leq 0 \\
 &\text{最大細長比制限 ; } g_2 = -1 \quad (\text{制限なし}) \\
 &\text{最大幅厚比制限 ; } g_3 = (b/t)/(2754/\sqrt{\sigma_y}) - 1.0 \leq 0 \\
 &\text{安定照査式制限 ; } g_4 = \frac{\sigma_c}{\sigma_{ca}} + \frac{C_m \sigma_b}{\sigma_{ba}(1 - \sigma_c/\sigma_{ea})} - 1.0 \leq 0 \\
 &\text{強度照査式制限 ; } g_5 = \frac{\sigma_c}{\sigma_{cal}} + \frac{\sigma_b}{\sigma_{cal}} - 1.0 \leq 0
 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

### 3-4 AISC/ASD

$$\left. \begin{aligned}
 &\text{最小板厚制限 ; } g_1 = -t/0.8 + 1.0 \leq 0 \\
 &\text{最大細長比制限 ; } g_2 = (\ell/r)/200 - 1.0 \leq 0 \\
 &\text{最大幅厚比制限 ; } g_3 = (b/t)/(2121/\sqrt{\sigma_y}) - 1.0 \leq 0 \\
 &\text{安定照査式制限 ; } g_4 = \frac{\sigma_c}{\sigma_{caa}} + \frac{C_m \sigma_b}{\sigma_{ba}(1 - \sigma_c/\sigma_{ea})} - 1.0 \leq 0 \quad \frac{\sigma_c}{\sigma_{caa}} \geq 0.15 \\
 &\quad \quad \quad g_4 = \frac{\sigma_c}{\sigma_{caa}} + \frac{\sigma_b}{\sigma_{ba}} - 1.0 \leq 0 \quad \frac{\sigma_c}{\sigma_{caa}} < 0.15 \\
 &\text{強度照査式制限 ; } g_5 = \frac{\sigma_c}{0.6 \sigma_y} + \frac{\sigma_b}{\sigma_{ba}} - 1.0 \leq 0 \quad \frac{\sigma_c}{\sigma_{caa}} \geq 0.15 \\
 &\quad \quad \quad g_5 = \frac{\sigma_c}{\sigma_{caa}} + \frac{\sigma_b}{\sigma_{ba}} - 1.0 \leq 0 \quad \frac{\sigma_c}{\sigma_{caa}} < 0.15
 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

### 3-5 AISC/PD

$$\left. \begin{aligned}
 &\text{最小板厚制限 ; } g_1 = -t/0.8 + 1.0 \leq 0 \\
 &\text{最大細長比制限 ; } g_2 = (\ell/r)/200 - 1.0 \leq 0 \\
 &\text{最大幅厚比制限 ; } g_3 = (b/t)/(1593/\sqrt{\sigma_y}) - 1.0 \leq 0 \\
 &\text{安定照査式制限 ; } g_4 = \frac{P}{P_u} + \frac{C_m M}{M_m(1 - P/P_e)} - 1.0 \leq 0 \\
 &\text{強度照査式制限 ; } g_5 = \frac{P}{P_y} + \frac{M}{1.18 M_p} - 1.0 \leq 0 \quad \text{および} \\
 &\quad \quad \quad g_5 = \frac{M}{M_p} - 1.0 \leq 0
 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

### 3-6 AISC/LRFD

$$\left. \begin{aligned}
 &\text{最小板厚制限 ; } g_1 = -t/0.8 + 1.0 \leq 0 \\
 &\text{最大細長比制限 ; } g_2 = (\ell/r)/200 - 1.0 \leq 0
 \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned}
 &\text{最大幅厚比制限； } g_3 = (b/t) / (2121 / \sqrt{\sigma_y}) - 1, 0 \leq 0 \\
 &\text{安定照査式制限； } g_4 = \frac{P}{\phi_c P_u} + \frac{8 M_b}{9 \phi_b M_u} - 1, 0 \leq 0 \quad \frac{P}{\phi_c P_u} \geq 0.2 \\
 &\quad \quad \quad g_4 = \frac{P}{2 \phi_c P_u} + \frac{M_b}{\phi_b M_u} - 1, 0 \leq 0 \quad \frac{P}{\phi_c P_u} < 0.2 \\
 &\text{強度照査式制限； } g_5 = \frac{M}{M_p} - 1, 0 \leq 0
 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ここで、 $\ell$ は有効座屈長、 $C_m$ は換算曲げモーメント係数、 $P$ は作用軸力、 $M$ は作用曲げモーメント、 $M_b$ はAISC/LRFDにおける設計曲げモーメント、 $\sigma_c$ は作用軸圧縮応力度、 $\sigma_b$ は作用曲げ圧縮応力度、 $\sigma_y$ は降伏応力度、 $\sigma_{ca}$ は許容軸圧縮応力度、 $\sigma_{ba}$ は許容曲げ圧縮応力度、 $\sigma_{ea}$ は許容オイラー応力度、 $\sigma_{ca1}$ は局部座屈に対する許容応力度、 $P_y$ は降伏荷重、 $M_y$ は降伏モーメント、 $s$ は安全率、 $\sigma_{ca1}$ はAISC/ASDにおける許容軸圧縮応力度、 $P_u$ は終局荷重、 $M_m$ は最大曲げモーメント、 $P_e$ は許容オイラー荷重、 $M_p$ は全塑性モーメント、 $M_u$ は終局曲げモーメント、 $\phi_c$ は柱の抵抗係数、 $\phi_b$ は梁の抵抗係数である。

これらの記号の詳細は、各規程<sup>1) 2) 3) 4) 5)</sup>を参照されたい。

#### 4. 計算結果および考察

式(3)～(8)の関係式を、式(2)の各制約条件に代入して、各規程における最適設計を求めた。考慮した設計条件を表-1に示した。作用モーメントと作用軸力が共に0のケースを除く136ケースについて、各規程に従って最適設計を行なった。それらの結果の一部を、図-2～15に整理して示した。

図-2、3は、許容応力度設計群、および終局強度設計法群それぞれにおいて、最適設計における制約条件の値の平均値を示したものである。ある制約条件がアクティブであれば、その値は0であるし、全然効いていなければ、最小板厚制限以外-1になる性格の値であるので、平均値が小さいということは、その制約条件が設計を支配するということであるし、マイナス側に大きいということは、その制約条件があまり効かないことを意味するものである。

表-1 設計条件

| 断面形状  | $\ell$<br>(m) | M<br>(tf·m) | P<br>(tf) | $\sigma_y$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|-------|---------------|-------------|-----------|--------------------------------------|
| 正方形箱形 | 2.5           | 0           | 0         | 3200                                 |
|       | 5.0           | 50          | 50        |                                      |
|       | 7.5           | 100         | 100       |                                      |
|       | 10.0          | 200         | 200       |                                      |
|       | 10.0          | 400         | 400       |                                      |

図-2より、許容応力度設計法群においては、安定照査式制限がかなり効いており、次に強度照査式制限、さらにJRとAISC/ASDにおいて最大板厚比制限が効いているのが分かる。終局強度設計法群においては、図-3より、安定照

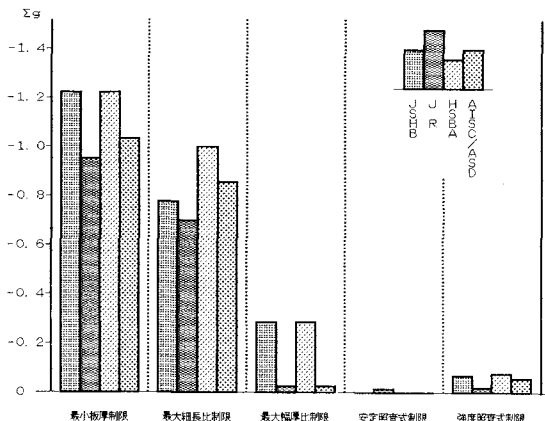


図-2 許容応力度設計法のΣgの比較

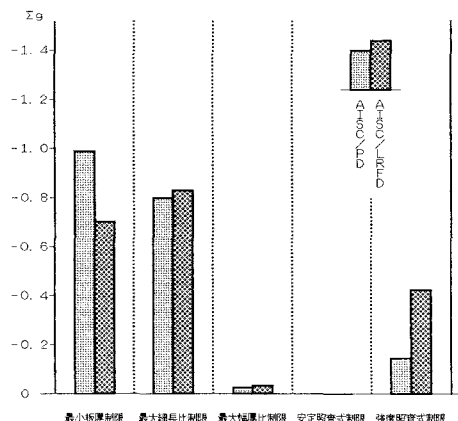


図-3 終局強度設計法のΣgの比較

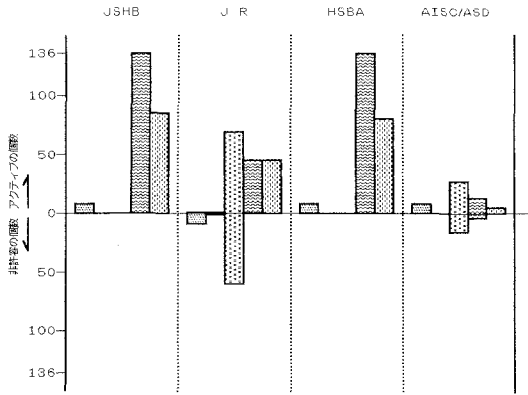


図-4 JSHBによる最適解の各規程による照査

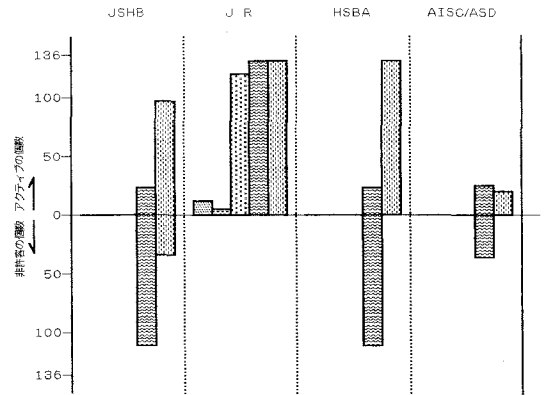


図-5 JRによる最適解の各規程による照査

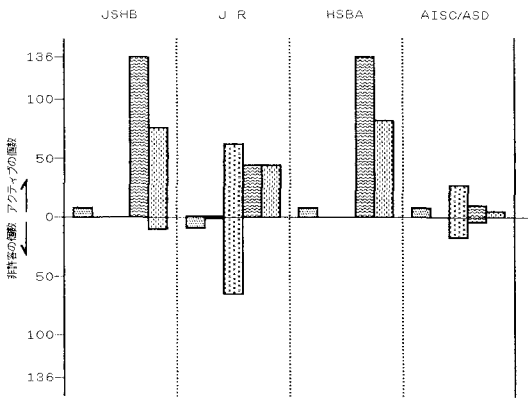


図-6 HSBAによる最適解の各規程による照査

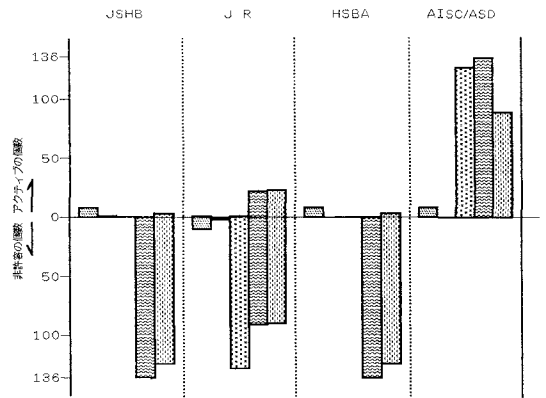


図-7 AISC/ASDによる最適解の各規程による照査

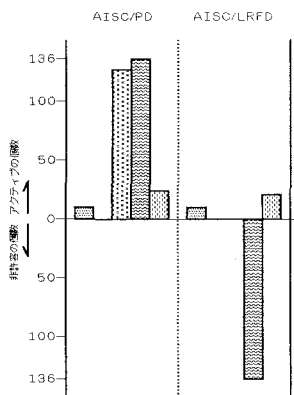


図-8 AISC/PD による最適解の各規程による照査

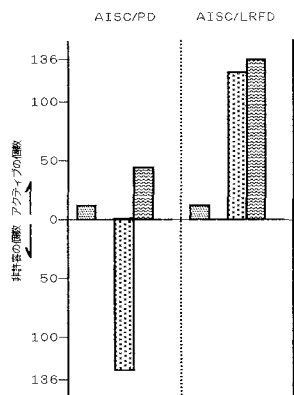


図-9 AISC/LRFD による最適解の各規程による照査

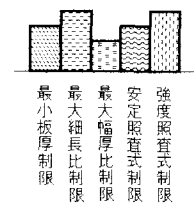


図-10 制約条件と模様

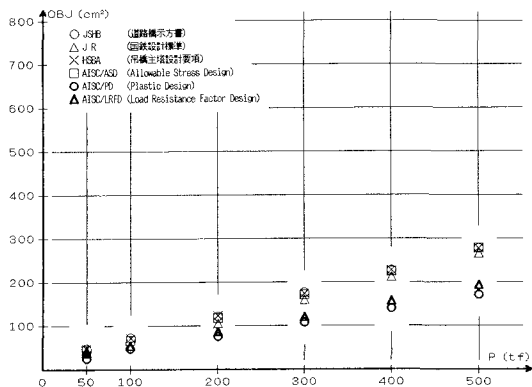


図-11 目的関数と作用荷重の関係  
( $\ell = 5\text{ m}$ 、 $M = 0\text{ tfm}$ )

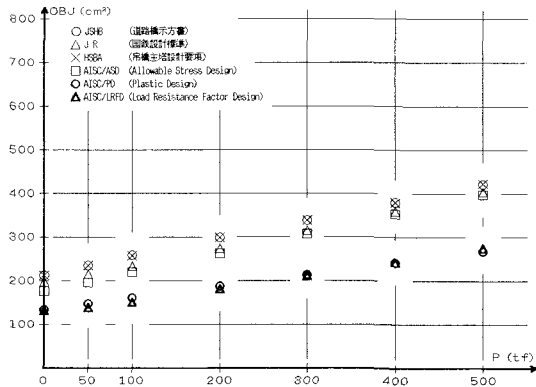


図-12 目的関数と作用荷重の関係  
( $\ell = 5\text{ m}$ 、 $M = 50\text{ tfm}$ )

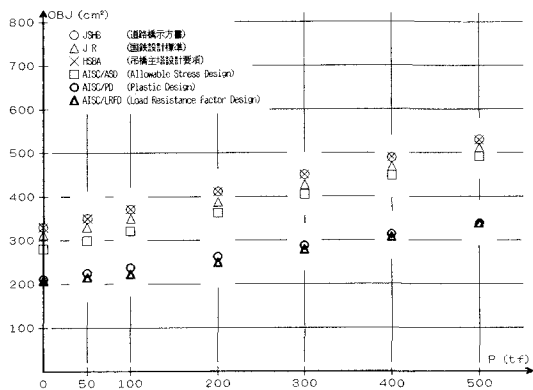


図-13 目的関数と作用荷重の関係  
( $\ell = 5\text{ m}$ 、 $M = 100\text{ tfm}$ )

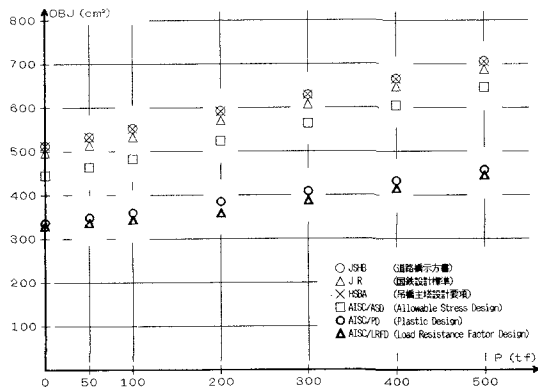


図-14 目的関数と作用荷重の関係  
( $\ell = 5\text{ m}$ 、 $M = 200\text{ tfm}$ )

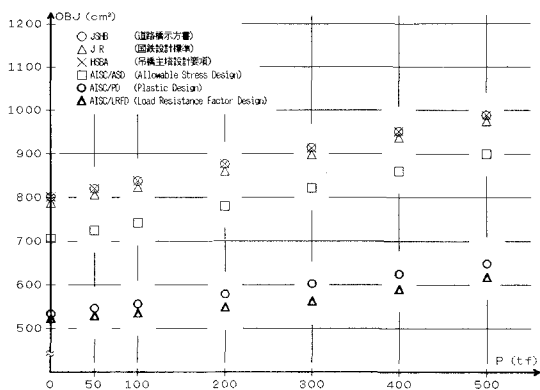


図-15 目的関数と作用荷重の関係  
( $\ell = 5\text{ m}$ 、 $M = 400\text{ tfm}$ )

表-2 HSBAによる最適解がJSHBの強度照査式  
制限を満足しなかった設計条件

|    | 設計条件          |             |           | JSHB  | HSBA    |
|----|---------------|-------------|-----------|-------|---------|
|    | $\ell$<br>(m) | M<br>(tf·m) | P<br>(tf) | $g_s$ | $g_s^*$ |
| 1  | 7.5           | 50          | 50        | 0.019 | 0.001   |
| 2  | 7.5           | 100         | 100       | 0.018 | 0.003   |
| 3  | 7.5           | 200         | 100       | 0.012 | 0.004   |
| 4  | 7.5           | 200         | 200       | 0.015 | 0.003   |
| 5  | 10.0          | 50          | 50        | 0.027 | 0.000   |
| 6  | 10.0          | 100         | 50        | 0.013 | -0.001  |
| 7  | 10.0          | 100         | 100       | 0.024 | 0.001   |
| 8  | 10.0          | 200         | 100       | 0.013 | 0.001   |
| 9  | 10.0          | 200         | 200       | 0.020 | 0.001   |
| 10 | 10.0          | 400         | 300       | 0.015 | 0.002   |

査式制限と最大板厚比制限が効いている。

図-4～7は、許容応力度設計法群において各規程に従って得られた最適設計を、他の規程で検討した結果、136ケースの内それぞれの制約条件式に対してアクティブになったケースと満足しないケースの数を示したものである。図-10に、これらの各制約条件と模様 の関係を示してある。

これらは図-2の内容を含むものであるが、各規程間の差をより明確にするものと考えられる。例えば、図-4は、JSHBによる最適設計を他の規程で検討したものであるが、JSHBに従う136の設計条件に対応する最適設計の内、60ケースにおいてJRの最大幅厚比制限を満足しないことを意味している。

上記以外には、JSHBとHSBAが非常に似た規程であること、JRに従う最適設計は、その大半がJSHBあるいはHSBAの安定照査式制限を満足しないこと、さらにAISC/ASDが比較的緩い規程であることなどが得られる。

JSHBとHSBAは非常に似た規程であるが、図-4に示すようにJSHBに従う最適設計はHSBAの条件をすべて満足するのに対して、図-6に示すようにHSBAに従う最適設計の内10ケースにおいて、JSHBの強度照査式制限を満足しないケースがあった。これは、JSHBが微小変位理論による解析に基づいているのに対し、HSBAが有限変位理論による解析に基づき、そのために強度照査式制限自身は後者の方が緩和されていることによると考えられる。参考までに、JSHBにおいて満足しなかった10の設計条件を表-2に示した。左が設計条件であり、JSHBの欄は、JSHBの安定照査式制限に代入した結果である。

上と同様のことを、終局強度設計法群で検討した結果が図-8および図-9である。AISC/PDに従う最適設計がAISC/LRFDの安定照査式制限を満足しなく、逆にAISC/LRFDに従う最適設計はAISC/PDの最大幅厚比制限を満足しないというように両方の規程の設計思想が顕著に表われている。

図-11～14は、有効座屈長が5mの場合の、各設計曲げモーメントにおける目的関数の値と設計荷重との関係を示した図である。許容応力度設計法群の中では、AISC/ASDが比較的緩い規程と考えられるのに対し、終局強度設計法群においては、AISC/LRFDの方が若干緩い規程であるということが言える。

これらの図において、終局強度設計法群による設計の方がかなり目的関数の値が少ないのは、許容応力度設計法群と安全率の取り方に差があるためであり、実際の構造物に应用する時にはこのような差は出てこないことを強調しておく。

## 5. あとがき

正方形箱形断面を有する柱・梁部材の最小重量設計において、許容応力度設計法群としてはJSHB、JR、HSBA、AISC/ASDの規程の条件を用い、終局強度設計法群としてはAISC/PDおよびAISC/LRFDの規程を用いて、各規程の特徴等を比較検討した。

まだ、基礎的な資料を提供するだけの段階ではあるが、今後、鋼構造部材の設計法を検討する上では、本研究のようなアプローチも必要と考えらる。そのために、これからH形断面を有する柱・梁部材の最小重量設計も行ない、同様な検討を加える予定である。また、本研究の範囲では許容応力度設計法と終局強度設計法との比較はできないが、そのために簡単な鋼造系に対して同様の研究を行ない、両設計法の比較検討も試みたいと考えている。さらに、現在改定作業が進められているJRの新しい規程、あるいはヨーロッパにおける規程等も考慮の対象に含める予定である。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編、1990年。
- 2) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説、1983年。
- 3) 本州四国連絡橋公団：吊橋主塔設計要領・同解説、1989年。
- 4) AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION: Specification for the Design, Fabrication and Erection of Structural Steel for Buildings, 1978.
- 5) AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION: Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings, 1986.