

## (9) ハイブリッドケーソンへの限界状態設計法の適用

### APPLICATION OF LIMIT STATE DESIGN METHOD TO HYBRID CAISSON FOR PORT STRUCTURES

辻岡和男\*, 山本修司\*\*, 横田 弘\*\*\*, 北澤壮介\*\*\*\*, 堀内 博\*\*\*\*\*

Kazuo Tsujioka, Shuji Yamamoto, Hiroshi Yokota, Sousuke Kitazawa, Hiroshi Horiuchi

- \* 工修 (財) 沿岸開発技術研究センター 調査部 (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16)
- \*\* 工博 運輸省港湾技術研究所 計画設計基準部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)
- \*\*\* 工博 運輸省港湾技術研究所 構造部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)
- \*\*\*\* 工修 (財) 沿岸開発技術研究センター 調査部 (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16)
- \*\*\*\*\* 工修 日本鋼管(株) 鉄構建設部 (〒230-8611 横浜市鶴見区末広町2-1)

A steel-concrete hybrid caisson becomes popular in port and harbour construction. The Technical Standard for Port and Harbour Facilities in Japan was revised in April 1999, which included the application of the limit state design to the hybrid caisson. For establishing its design method conforming to the Technical Standard, details of the limit state design method particularly for the hybrid caisson have to be developed. This paper presents the outline of the limit state design for the hybrid caisson. Design examples of hybrid caissons for a breakwater and a seawall are also described. The design output by the developed method is discussed in comparison with that by the ordinary allowable stress design method.

*Key Words; Hybrid Caisson, Composite structure, limit state design method*

#### 1 はじめに

防波堤・岸壁・護岸等への重力式ケーソンの部材には、通常鉄筋コンクリートが用いられる。ハイブリッドケーソンは、この重力式ケーソンの部材に鋼とコンクリートの合成構造ならびに鋼構造を取り入れたものである。

港湾地域に建造されるこれらの構造物は「港湾の施設の技術上の基準・同解説」(以後、港湾基準と略記)に準拠して設計がなされる。港湾基準が平成11年4月に改訂・施行され、そこでは、

- ・ コンクリート部材の設計法が許容応力度設計法から限界状態設計法に移行した。
- ・ ハイブリッドケーソンの規定が追加されるとともに、限界状態設計法に従うものとされた。

こうした状況をふまえ、ハイブリッドケーソンの限界状態設計法に関する具体的な手法を開発することとした<sup>1)</sup>。本論文ではその考え方を紹介するとともに、限界状態設計法(終局・使用)による岸壁の試設計結果と許容応力度設計法による結果との比較、ならびに防波堤の試設計結果(疲労限界状態)について示すものである。

#### 2 ハイブリッドケーソンの構造特性

前述のように、ハイブリッドケーソンは合成構造(SRC構造・合成版構造)や鋼構造を取り入れた構造物である。

図-1に示すように、フーチングならびに底版にはSRC構造が、外壁には合成版構造が、隔壁には鋼隔壁あるいは鋼製トラスが用いられることが一般的である。

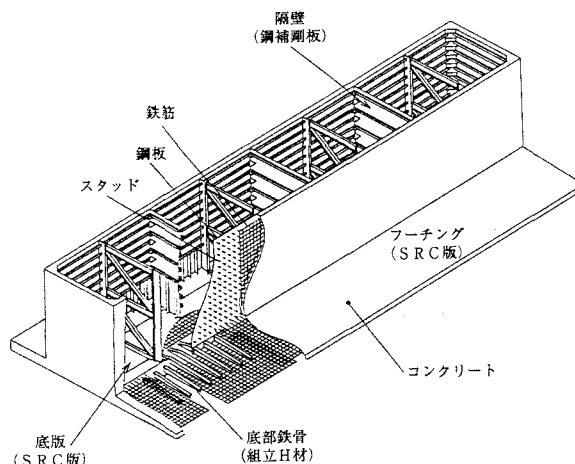


図-1 ハイブリッドケーソンの概略構造

ハイブリッドケーソンの構造特性は以下のとおりである。

#### 大きな曲げ耐力：

一般に、合成構造は同一断面では鉄筋コンクリート部材に比べ耐力が大きい。そのため、特にフーチングに合成構造を用いることにより、フーチングを長くすることができ、過去の実績では、約6mである。これにより、接地圧の低減を図ることができる。

ただし、フーチング基部に発生する曲げモーメントが大きくなることから、底版ならびに外壁への曲げモーメント伝達を考慮した設計とする必要がある。

#### 小さな版厚：

同じ版厚のもとでは、合成構造は鉄筋コンクリート構造よりも耐力が大きい。したがって、ハイブリッドケーソンでは、所定の強度を発揮するための版厚を、RCケーソンと比べて小さくすることができる。

#### 軽量性：

隔壁に鉄筋コンクリートではなく鋼隔壁を用いていること、ならびに外壁の版厚が小さくてすむことから、ケーソンの軽量化が図れる。特に浮遊曳航して据付地点まで運搬する港湾構造物では、喫水低減の観点から軽量化は大きなメリットとなる。

### 3 限界状態設計法適用のポイント

ハイブリッドケーソンには、合成構造（合成版、SRC構造）ならびに鋼構造が用いられるので、鉄筋コンクリートに比べて下記が限界状態設計法を適用するにあたってのポイントとなる。

#### 合成版構造における鋼板の扱い：

鋼板が圧縮となる場合、座屈による耐力低下が生じるのでこれを評価する必要がある。

#### 鋼板とコンクリートとのずれ止めの評価：

合成版構造のずれ止めには、一般にスタッドが用いられる。スタッドは、鋼板の剥離防止（座屈止め）の役割も果たすので具体的に評価する必要がある。

#### SRC構造の評価：

鋼材の腹板がせん断力を負担できるので、その寄与を考慮する必要がある。

#### 鋼隔壁の評価：

我が国では鋼構造物には許容応力度設計法が適用されることが多い。ハイブリッドケーソンに対しては、他部材との接合や設計の一貫性から鋼隔壁に限界状態設計法を適用することとした。したがって、鋼構造に対し他の基準も調査しながら限界状態設計法の手法を導入する必要がある。

### 4 既存基準類の適用

#### 4. 1 照査体系ならびに照査フォーム

基本的には、港湾基準に示されたプレキャストコンクリート部材の照査体系に準じ、限界状態として、終局限界状態、使用限界状態、疲労限界状態の3種類のものを考慮する。

コンクリート構造物に対する限界状態設計法は、コンクリート標準示方書<sup>3)</sup>に詳しく体系化され、既に適用実績も豊富である。したがって、ハイブリッドケーソンの設計も、この照査フォームに従うこととした。以下に終局限界状態のものを例として示す。

終局限界状態における照査フォーム：

$$\gamma_i \cdot S_d / R_d \leq 1$$

$\gamma_i$ ：構造物係数

$S_d$ ：設計断面力

$R_d$ ：設計断面耐力

#### 4. 2 限界状態設計法における各種安全係数

限界状態における各種安全係数（材料係数 $\gamma_m$ 、部材係数 $\gamma_b$ 、荷重係数 $\gamma_p$ 、構造物係数 $\gamma_i$ 、構造解析係数 $\gamma_s$ ）の値は、港湾構造物独自のものとなるので、基本的には港湾基準に従った。

ただし、合成構造や鋼構造に対する安全係数は港湾基準で設定されていないため、港湾基準と整合するように既存基準類<sup>3) 4) 5) 6)</sup>に基づいて設定した。

### 5 ハイブリッドケーソンの限界状態設計法

ハイブリッドケーソンに特徴的なものについて記述する。

#### 5. 1 終局限界状態に対する設計

##### (1) 合成版部材

##### a) 曲げモーメントに対する安全性の検討

各種安全係数を考慮しながら、設計曲げモーメントと設計曲げ耐力を比較する。曲げ耐力 $M_{dd}$ の算出にあたっては、鋼板を断面積が等価な鉄筋に置換する。そのうえで、通常の鉄筋コンクリート部材に準じて曲げ耐力を算出する。

ただし、鋼板に圧縮力が作用する場合には、スタッドが適切な間隔で配置されていないと、鋼板が座屈する可能性がある。したがって、鋼板の座屈による耐力低減を考慮して、合成版の曲げ耐力計算に用いる鋼板板厚を便宜的に低減することとした。

$$t_{eq} = (t_r')^2 / b \cdot (E_s / f_{yd}')^{1/2}$$

ここに、 $t_{eq}$ ：圧縮鋼板の等価厚さ

$t_r'$ ：圧縮鋼板の厚さ

$b$ ：部材軸方向に配置された補剛材の間隔（スタッド間隔）

$E_s$ ：圧縮鋼板のヤング係数

$f_{yd}'$ ：圧縮鋼板の設計圧縮降伏強度  
( $= f_{yk} / \gamma_s$ )

$f_{yk}$ ：鋼材の圧縮降伏強度の特性値

$\gamma_s$ ：材料係数

##### b) スタッドのせん断伝達耐力の検討

各種安全係数を考慮しながら、スタッド1本あたりに作用する設計ずれ力と設計せん断伝達耐力を比較する<sup>6)</sup>。

##### (2) SRC部材

##### a) 曲げモーメントに対する安全性の検討

各種安全係数を考慮しながら、設計曲げモーメントと設計曲げ耐力を比較する。鉄道構造物等設計標準・同解説鋼とコンクリートの複合構造物<sup>5)</sup>を参考にして、鉄骨端部がコンクリート内に十分に定着されていることを前提に、鉄骨を鉄筋に換算して、鉄筋コンクリート部材と同様な方式で曲げ耐力  $M_{bd}$  を算出することとした。(RC方式)

#### b) セン断力に対する安全性の検討

各種安全係数を考慮しながら、設計せん断力と設計せん断耐力を比較する。ここで、設計せん断耐力の算定にあたっては、コンクリート部材の寄与分、せん断補強筋の寄与分に加えて、鉄骨部分の寄与分も考慮する。

### (3) 隔壁

鉄道構造物等設計標準・同解説鋼・合成構造物<sup>4)</sup>の基準耐荷力曲線を基本的に採用した。

ただし、港湾構造物であることを考慮して下記とした。

- 鋼板の幅厚比の制限などの細部については、道路橋示方書<sup>7)</sup>の規定に準拠した。
- 各種安全係数を、港湾基準のものと整合させた。

### 5. 2 使用限界状態に対する設計

過度のひび割れの発生に対する安全性を検討する。

$$w/w_a \leq 1$$

ここに、 $w$  : コンクリートに生じるひび割れ幅

$w_a$  : コンクリートの許容ひび割れ幅

#### (1) 合成版部 :

鋼板を鉄筋に換算し、通常の鉄筋コンクリート部材に準じてひび割れ照査を行う。

#### (2) SRC部 :

鉄骨を鉄筋に換算し、通常の鉄筋コンクリート部材に準じてひび割れ照査を行う方法と、コンクリート標準示方書に従い鋼材の引張応力度に上限値を設ける方法のいずれかとする事とした。

### 5. 3 疲労限界状態に対する設計

防波堤に対して適用する。波高-周期の頻度分布を元に、ケーソン部材に作用する応力度とその頻度を算出する。それを元に、下記の照査フォームに当てはめて安全性の検討を行うこととした<sup>8)</sup>。

$$\gamma_i \cdot \Delta \sigma_{rd} / (f_{rd} / \gamma_b) \leq 1$$

ここに、 $\gamma_i$  : 構造物係数 (= 1.0)

$\gamma_b$  : 部材係数 (= 1.0)

$\Delta \sigma_{rd}$  : 設計変動応力範囲

$f_{rd}$  : 設計変動応力範囲に対する等価繰返し回数に対応した設計疲労強度

なお、S-N 曲線は下記のものを採用した。

コンクリート : コンクリート標準示方書 設計編

鉄筋 : コンクリート標準示方書 設計編

スタッド付き鋼板 : 鉄道構造物等設計標準 鋼・合成構造物 疲労設計曲線-強度等級E  
板継ぎ鋼板 : 鉄道構造物等設計標準 鋼・合成構造物 疲労設計曲線-強度等級D

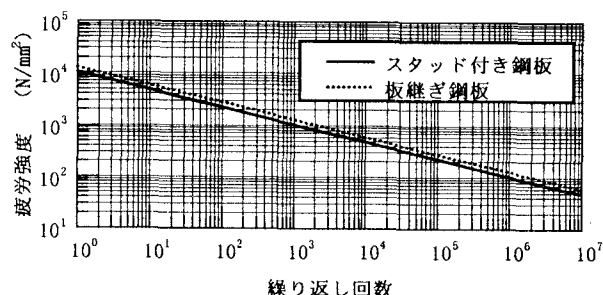


図-2 鋼板に対する S-N 曲線

### 6 岸壁の試設計 (終局限界状態ならびに使用限界状態)

#### 6. 1 検討条件

図-3 に示す岸壁を検討対象とした。検討条件を、表-1 ならびに表-2 に示す。

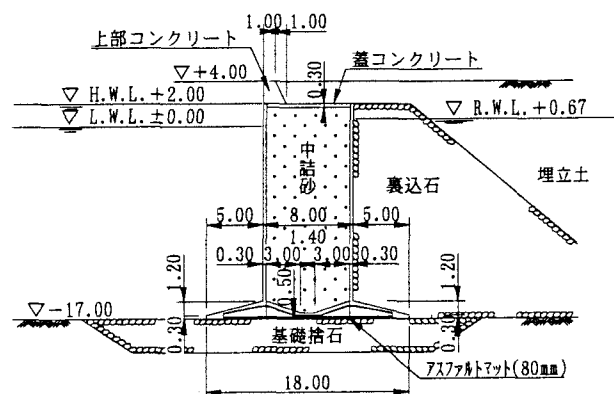


図-3 岸壁用ハイブリッドケーソン

表-1 岸壁の検討条件一覧

| 上載荷重 |                        | 単位体積重量    |                        |
|------|------------------------|-----------|------------------------|
| 常時   | 10.0 kN/m <sup>2</sup> | 鉄筋コンクリート  | 24.0 kN/m <sup>3</sup> |
| 地震時  | 5.0 kN/m <sup>2</sup>  | 無筋コンクリート  | 23.0 kN/m <sup>3</sup> |
| 設計震度 |                        | 鋼材        | 77.0 kN/m <sup>3</sup> |
| 水平震度 | $K_h = 0.20$           | アスファルトマット | 22.6 kN/m <sup>3</sup> |
|      |                        | 中詰砂(飽和)   | 20.0 kN/m <sup>3</sup> |
|      |                        | 海水        | 10.1 kN/m <sup>3</sup> |

表-2 材料強度の特性値

| 鋼板、型钢                                 |         | SS400, SM400                 | SM490                 |
|---------------------------------------|---------|------------------------------|-----------------------|
| 強度の特性値                                | 引張、圧縮強度 | 235 N/mm <sup>2</sup>        | 315 N/mm <sup>2</sup> |
|                                       | せん断強度   | 135 N/mm <sup>2</sup>        | 180 N/mm <sup>2</sup> |
| 鉄筋(SD345)                             |         | コンクリート                       |                       |
| $f_{yk} = 345 \text{ N/mm}^2$ (SD345) |         | $f_{ck} = 24 \text{ N/mm}^2$ |                       |

## 6. 2 試設計ならびに許容応力度設計法との比較

代表的な構造要素として、フーチングSRC部、外壁部、鋼隔壁部について試設計の結果ならびに得られた知見を記述する。底版SRC部については結果を省略するが、フーチングSRC部と同様の傾向であった。

### (1) フーチングSRC部 (表-3 参照)

- 限界状態設計法のもとでは、許容応力度設計法による場合よりも、鉄筋や鉄骨の必要鋼材量は少なくなる。
- 断面は、終局限界状態にて決定されている。

### (2) 外壁部 (表-4 参照)

- 限界状態設計法のもとでは、許容応力度設計法による場合と同程度の必要鋼材量（鉄筋ならびに鋼板）となる。
- ただし、使用限界状態の照査（ひび割れ照査）まで考慮すれば、小さめの鉄筋をより細かなピッチで配置するのがよい。

### (3) 鋼隔壁部

限界状態設計法と許容応力度設計法とで、ほぼ同じ鋼板厚み、補剛材の大きさ・間隔となった。今後、限界状態設計法に、鋼部材の塑性域まで考慮した耐力評価式を導入できれば、より合理的な設計断面とすることが可能である。

## 7 防波堤の試設計 (疲労限界状態)

### 7. 1 検討条件

図-4に示す防波堤ケーソンを対象に検討した。

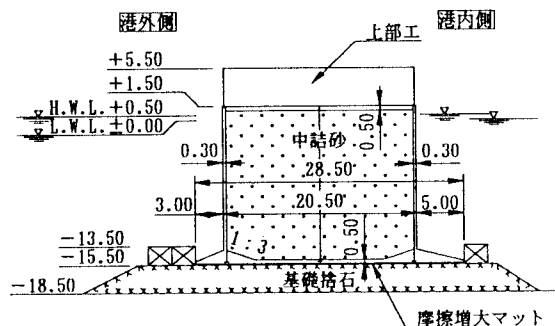


図-4 防波堤用ハイブリッドケーソン

波浪条件は以下のとおり。なお、単位体積重量ならびに材料強度の特性値は、6岸壁の試設計のものと同じである。

|      |         | 終局限界     | 使用限界    |
|------|---------|----------|---------|
| 最大波高 | Hmax    | 14.5 m   | 7.30 m  |
| 周期   | T       | 13.5 sec | 8.5 sec |
| 入射角  | $\beta$ | 0 deg    | 0 deg   |
| 海底勾配 | i       | 1/50     | 1/50    |

疲労限界状態照査のための波高-周期頻度分布を表-5に示す。これは、設計耐用年数を50年とし、波浪観測の結果より求めたものである。

### 7. 2 疲労限界状態の照査

港内側フーチング基部に着目する（断面 図-5 参照）。終局限界状態・使用限界状態での設計を実施した後、疲労限界状態の照査を実施した。ここでは、防波堤特有のものとして、疲労限界状態での考え方ならびに照査結果を示す。

#### (1) 永久荷重時の各部応力度算出

S-N曲線によつては、永久荷重による応力度により疲労強度が変化するので、永久荷重時の応力度を算出した。

#### (2) 変動応力範囲

別途計算済みの使用限界状態での部材応力度をもとに、部材の変動応力範囲を算出した（押波時の応力度 - 引波時の応力度）。ついで、表-5の各波高に対する部材応力度を、使用限界状態の最大波高との波高比例により算出した。ここで、使用限界状態の変動応力範囲をベースにしたのは、使用限界状態における荷重係数 $\gamma_f$ が疲労限界状態のものと一致することから、構造解析の際の荷重の組み合わせが使用限界状態と疲労限界状態とで一致し、計算の便宜が図れるからである。

#### (3) 等価繰返し数

設計変動応力範囲 $\Delta\sigma_{rd}$ として使用限界状態での応力範囲を採用し、疲労限以上の変動応力範囲を対象に、等価繰返し数を算出した（表-6）。算出方法については、各構造要素のS-N曲線を元に、コンクリート標準示方書の手法で算出した。ちなみに、板継ぎ鋼板の場合 $N = \sum n_i \cdot (\Delta\sigma_{ri} / \Delta\sigma_{rd})^3$ となる。

なお、疲労限としては、2,000,000回の繰返し数に対応する応力範囲を採用した。ちなみに、疲労限はコンクリートに対して3.96 N/mm<sup>2</sup>、鉄筋に対して129 N/mm<sup>2</sup>、鉄骨（板継ぎ鋼板）に対して102 N/mm<sup>2</sup>となった。

#### (4) 疲労限界状態の照査

##### a) コンクリート

設計変動応力範囲  $\Delta\sigma_{rd} = 3.0 \text{ N/mm}^2$

設計疲労強度  $f_{rd}$ （等価繰返し数 267907 回に対応するもの）

$$f_{rd} = k_1 \cdot f_d (1 - \sigma_p / f_d) (1 - \log N / k) \\ = 0.85 \times 18.5 \times (1 - 5.9 / 18.5) \times (1 - (\log 267907) / 10) \\ = 4.90 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{ここに、} f_d = f'_{ck} / \gamma_c = 24 / 1.3 = 18.5 \text{ N/mm}^2$$

疲労限界状態の照査

$$\gamma_i \cdot \Delta\sigma_{rd} / (f_{rd} / \gamma_b) \\ = 1.0 \times 3.0 / (4.90 / 1.0) = 0.61 \leq 1.0 \text{ OK}$$

##### b) 鉄筋ならびに鉄骨（板継ぎ鋼板）

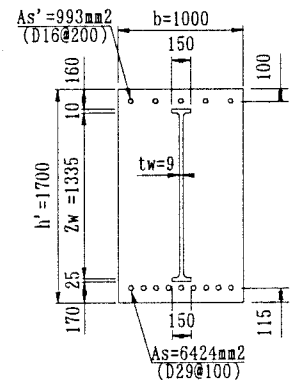


図-5 フーチング断面構成

表-3 岸壁フーチングSRC部の限界状態設計法による設計結果 および 許容応力度法による設計結果との比較

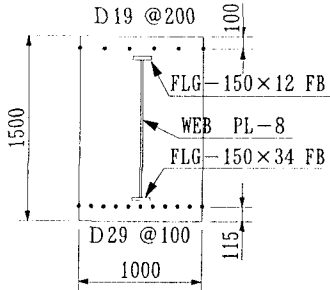
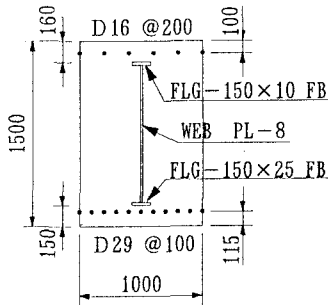
|                         |               | 許容応力度法                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 限界状態設計法                                                                            |       |       |                      |     |                      |                  |     |                      |                         |      |                      |                       |     |                       |                                                                                                                                                                                                            |
|-------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|----------------------|-----|----------------------|------------------|-----|----------------------|-------------------------|------|----------------------|-----------------------|-----|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 作用<br>断面力               | 終局限界<br>(地震時) | $p_1=396.3(264.2) \text{ kN/m}^2$<br>$M=4420(2947) \text{ kN}\cdot\text{m/m}$ ( )内は常時換算値                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $1.0D_0+1.0 \Delta R'+1.0W'$<br>$M=4420 \text{ (kN}\cdot\text{m/m)}$               |       |       |                      |     |                      |                  |     |                      |                         |      |                      |                       |     |                       |                                                                                                                                                                                                            |
|                         | 使用限界<br>(常時)  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | $M=1876.3 \text{ KN}\cdot\text{m/m}$                                               |       |       |                      |     |                      |                  |     |                      |                         |      |                      |                       |     |                       |                                                                                                                                                                                                            |
| 断面構成                    |               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |  |       |       |                      |     |                      |                  |     |                      |                         |      |                      |                       |     |                       |                                                                                                                                                                                                            |
| 断面<br>照査                | 正曲げ           | 設計曲げモーメント $M=2947 \text{ kN}\cdot\text{m/m}$ <table border="1" data-bbox="329 748 813 893"><thead><tr><th></th><th>発生応力度</th><th>許容応力度</th></tr></thead><tbody><tr><td>コンクリート応力度 <math>\sigma_c</math></td><td>8.2</td><td><math>9.0 \text{ N/mm}^2</math></td></tr><tr><td>鉄筋応力度 <math>\sigma_s</math></td><td>192</td><td><math>195 \text{ N/mm}^2</math></td></tr><tr><td>鉄骨フランジ応力度 <math>\sigma_{sf}</math></td><td>1789</td><td><math>185 \text{ N/mm}^2</math></td></tr><tr><td>コンクリートせん断応力度 <math>\tau_c</math></td><td>0.3</td><td><math>0.45 \text{ N/mm}^2</math></td></tr></tbody></table> <p>(注): せん断補強鉄筋なし</p> |                                                                                    | 発生応力度 | 許容応力度 | コンクリート応力度 $\sigma_c$ | 8.2 | $9.0 \text{ N/mm}^2$ | 鉄筋応力度 $\sigma_s$ | 192 | $195 \text{ N/mm}^2$ | 鉄骨フランジ応力度 $\sigma_{sf}$ | 1789 | $185 \text{ N/mm}^2$ | コンクリートせん断応力度 $\tau_c$ | 0.3 | $0.45 \text{ N/mm}^2$ | ・終局限界状態<br>曲げ    : $\gamma_f \cdot M_d / M_{ud} = 1.0 \times 4420 / 5154 = 0.858 \leq 1.0$<br><br>・使用限界(常時) $M=1876.3 \text{ kN}\cdot\text{m/m}$<br>ひび割れ幅 $w = 0.32 \text{ mm} < 0.35 \text{ mm} = 0.035c$ |
|                         | 発生応力度         | 許容応力度                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                    |       |       |                      |     |                      |                  |     |                      |                         |      |                      |                       |     |                       |                                                                                                                                                                                                            |
| コンクリート応力度 $\sigma_c$    | 8.2           | $9.0 \text{ N/mm}^2$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                    |       |       |                      |     |                      |                  |     |                      |                         |      |                      |                       |     |                       |                                                                                                                                                                                                            |
| 鉄筋応力度 $\sigma_s$        | 192           | $195 \text{ N/mm}^2$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                    |       |       |                      |     |                      |                  |     |                      |                         |      |                      |                       |     |                       |                                                                                                                                                                                                            |
| 鉄骨フランジ応力度 $\sigma_{sf}$ | 1789          | $185 \text{ N/mm}^2$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                    |       |       |                      |     |                      |                  |     |                      |                         |      |                      |                       |     |                       |                                                                                                                                                                                                            |
| コンクリートせん断応力度 $\tau_c$   | 0.3           | $0.45 \text{ N/mm}^2$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                    |       |       |                      |     |                      |                  |     |                      |                         |      |                      |                       |     |                       |                                                                                                                                                                                                            |
| 備考                      |               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                    |       |       |                      |     |                      |                  |     |                      |                         |      |                      |                       |     |                       |                                                                                                                                                                                                            |

表-4 岸壁外壁部の限界状態設計法による設計結果 および 許容応力度法による設計結果との比較

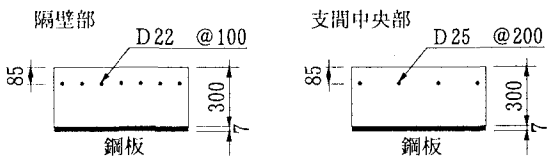
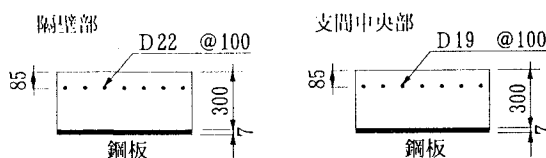
|           |           |                                                                                                                                                                                                                                       | 許容応力度法                                                                                                                                                                  | 限界状態設計法                                                                                   |
|-----------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 作用<br>断面力 | 終局限界      | 常時                                                                                                                                                                                                                                    | 隔壁部<br>M=173.6 kN・m/m                                                                                                                                                   | 支間中央部<br>M=-88.4 kN・m/m                                                                   |
|           |           | 地震時                                                                                                                                                                                                                                   | 隔壁部<br>M=167.6(111.7) kN・m/m                                                                                                                                            | 支間中央部<br>M=-85.4(-56.9) kN・m/m                                                            |
|           | 使用限界      | 常時                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                         | 支間中央部<br>M=-80.2 kN・m/m                                                                   |
| 断面構成      |           |                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                      |       |
| 断面<br>照査  | 隔壁部       | 正曲げ 判定<br>・曲げ :コンクリート応力度 $\sigma_c = 7.1 < \sigma_{ca} = 9.0\text{N/mm}^2$<br>: 引張鋼応力度 $\sigma_s = 103 < \sigma_{sa}=140\text{ N/mm}^2$<br>: 圧縮鋼応力度 $\sigma_{sf} = 47 < \sigma_{sa}=195\text{ N/mm}^2$<br>正曲げモーメント(常時) M=173.6 kN・m/m | ・終局限界状態<br>正曲げ(常時) : $\gamma_f \cdot M_d / M_{ud} = 1.1 \times 181.6 / 411 = 0.486 \leq 1.0$                                                                            |                                                                                           |
|           | 支間<br>中央部 | 負曲げ 判定<br>・曲げ :コンクリート応力度 $\sigma_c = 3.0 < \sigma_{ca} = 9.0\text{N/mm}^2$<br>: 引張鋼応力度 $\sigma_s = 162 < \sigma_{sa}=195\text{ N/mm}^2$<br>: 圧縮鋼応力度 $\sigma_{sf} = 49 < \sigma_{sa}=140\text{ N/mm}^2$<br>負曲げモーメント(常時) M=-88.4 kN・m/m | ・終局限界状態<br>負曲げ(常時) : $\gamma_f \cdot M_d / M_{ud} = 1.1 \times 88.8 / 120 = 0.814 \leq 1.0$<br>・使用限界(常時) M=-80.2 kN・m/m<br>水平筋D19@100<br>ひび割れ幅w= 0.22mm < 0.25mm=0.035c |                                                                                           |
| 備考        |           |                                                                                                                                                                                                                                       | ・作用断面力にはフーチングの伝達力を考慮                                                                                                                                                    | ・作用断面力にはフーチングの伝達力を考慮<br>・負曲げ時の鋼板換算板厚 $t_{eq}=t^2/b \cdot (E_s/f_{yd})^{0.5}=4.9\text{mm}$ |

表-5 波高-周期 頻度分布

| 波高               | 波数<br>(千回) |
|------------------|------------|
| 0.0～1.0(0.5m)    | 280525     |
| 1.0～2.0(1.5m)    | 50605      |
| 2.0～3.0(2.5m)    | 14218      |
| 3.0～4.0(3.5m)    | 4585       |
| 4.0～5.0(4.5m)    | 1597.2     |
| 5.0～6.0(5.5m)    | 593.8      |
| 6.0～7.0(6.5m)    | 229.2      |
| 7.0～8.0(7.5m)    | 88.2       |
| 8.0～9.0(8.5m)    | 34.2       |
| 9.0～10.0(9.5m)   | 12.7       |
| 10.0～11.0(10.5m) | 5.1        |
| 11.0～12.0(11.5m) | 2.0        |
| 12.0～13.0(12.5m) | 0.7        |
| 13.0～14.0(13.5m) | 0.2        |

(\*)：波高は個別波の波高。

表-6 防波堤港内側フーチング基部の疲労限界状態設計照査結果

| 波高<br>H (m)                | 波数<br>(千回) | 等価繰返し数(千回) |         |         | 変動応力範囲<br>(押波時-引波時) (N/mm <sup>2</sup> ) |       |        |
|----------------------------|------------|------------|---------|---------|------------------------------------------|-------|--------|
|                            |            | コンクリート     | 鉄筋      | 鉄骨      | コンクリート                                   | 鉄筋    | 鉄骨     |
|                            |            | 圧縮         | 引張      | 引張フランジ  | 圧縮                                       | 引張    | 引張フランジ |
| (使用限界)<br>7.3              |            |            |         |         | 3.0                                      | 56.3  | 53.5   |
| 0.5                        | 280525     | 681.699    | 0       | 92.793  | 0.2                                      | 3.9   | 3.7    |
| 1.5                        | 50605      | 290.601    | 0.097   | 439.856 | 0.6                                      | 11.6  | 11.0   |
| 2.5                        | 14218      | 192.941    | 1.898   | 569.024 | 1.0                                      | 19.3  | 18.3   |
| 3.5                        | 4585       | 147.031    | 10.042  | 508.250 | 1.4                                      | 27.0  | 25.7   |
| 4.5                        | 1597.2     | 121.050    | 28.305  | 374.835 | 1.8                                      | 34.7  | 33.0   |
| 5.5                        | 593.8      | 131.839    | 55.905  | 253.801 | 2.3                                      | 42.4  | 40.3   |
| 6.5                        | 229.2      | 120.255    | 86.688  | 161.426 | 2.7                                      | 50.1  | 47.6   |
| 7.5                        | 88.2       | 109.355    | 109.807 | 95.829  | 3.1                                      | 57.8  | 55.0   |
| 8.5                        | 34.2       | 100.203    | 122.270 | 54.004  | 3.5                                      | 65.6  | 62.3   |
| 9.5                        | 12.7       | 87.931     | 114.490 | 27.962  | 3.9                                      | 73.3  | 69.6   |
| 10.5                       | 5.1        | 83.443     | 105.692 | 15.205  | 4.3                                      | 81.0  | 77.0   |
| 11.5                       | 2.0        | 77.327     | 88.340  | 7.824   | 4.7                                      | 88.7  | 84.3   |
| 12.5                       | 0.7        | 63.956     | 61.873  | 3.513   | 5.1                                      | 96.4  | 91.6   |
| 13.5                       | 0.2        | 43.181     | 33.539  | 1.263   | 5.5                                      | 104.1 | 98.9   |
| 疲労限を考慮<br>した等価繰<br>返し数(千回) |            | 267.907    | 0       | 0       | 疲労限<br>3.96                              | 129   | 102    |

(注)： 部は、疲労限以下のため回数加算対象外。

表-6 において、いずれのブロックにおける変動応力範囲も疲労限より小さいので、疲労に対して安全と判断された。

以上に示した照査結果によれば、通常諸元の断面であれば疲労限界状態はあまり問題にならないと考えられる。

## 8 おわりに

ハイブリッドケーソンは重力式ケーソンに鋼とコンクリートの合成構造及び鋼構造を取り入れたものである。

港湾基準が改定になり、ハイブリッドケーソンの規定が追加され、限界状態設計法に従うこととされた。本論文では、既存の基準類を元に合成構造や鋼構造に対して限界状態設計法を具体的に適用するにあたっての考え方を示した。さらに、岸壁を対象にした終局・使用限界状態での設計結果が、従来の許容応力度法での設計結果とどの程度違うのかについて言及した。構造物の各部位によって多少の違いはあるものの、概ねほぼ同等の設計結果となった。防波堤に対しては、それに特有の限界状態として疲労限界状態を考慮した。この結果、通常諸元の断面であれば、疲労限界状態はあまり問題にならないものと判断された。

本論文に示した限界状態設計法の検討にあたっては、早稲田大学 清宮 理教授を委員長とするハイブリッドケーソン技術検討委員会（沿岸開発技術研究センター）の指導・助言をいただいた。清宮教授をはじめ関係各位に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 沿岸開発技術研究センター：ハイブリッドケーソン設計マニュアル，1999
- 2) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1999
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編，1996
- 4) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物，1992
- 5) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼とコンクリートの複合構造物，1998
- 6) 土木学会：鋼構造物設計指針，1997
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1996
- 8) 長尾 毅：限界状態設計法の鉄筋コンクリート構造物への適用に関する研究，港湾技術研究所報告，第33巻，第4号，1994.12