

# 論文 [2170] 鋼・コンクリート合成ケーソンのフーチング部の力学特性

山田昌郎\*1・清宮 理\*2

## 1. はじめに

港湾・海洋構造物では、鉄筋コンクリート製のケーソンが従来より広く用いられている。近年沖合人工島の護岸等の建設において、軟弱な海底地盤対策や急速施工のために、鋼・コンクリート合成ケーソンが用いられるようになってきた。合成ケーソンの概略構造を図-1に示す。周囲の外壁とフーチング部は、鋼板と鉄筋コンクリートとをずれ止めにより合成した合成部材により製作し、内部は鋼部材により製作する。図-2に、合成ケーソンを用いた護岸の断面図を示す。

合成ケーソンは、部材の高強度を生かしてフーチングを従来の鉄筋コンクリートケーソンに比べて大きく張り出すことができる。このためケーソン本体の重量が軽くなり、ケーソン底面に生じる地盤反力を小さくすることができる。フーチング部の設計は片持梁として行われ、曲げモーメント・せん断力・水平ずれ力が照査される。また、フーチング部から底版・外壁へ伝達される曲げモーメントとせん断力の検討が行われる。

本研究の主な目的は、フーチング部のせん断補強鋼材として鋼板を使用することによる補強効果を調べることである。そこで、せん断補強鋼材として異形鉄筋を用いたフーチングと、鋼板を用いたフーチングの実規模の試験体を用いて、曲げせん断載荷試験を行った。また、曲げモーメントとせん断力の底版・外壁への伝達、および形鋼によるずれ止めの効果についても若干の検討を加えた。

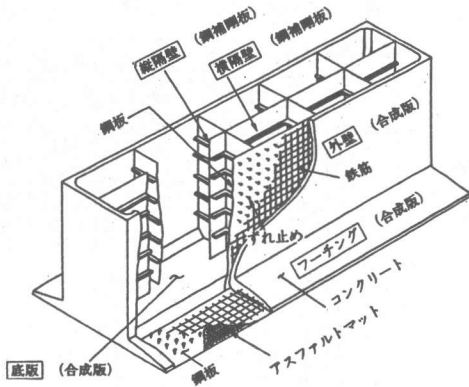


図-1 合成ケーソン概略構造

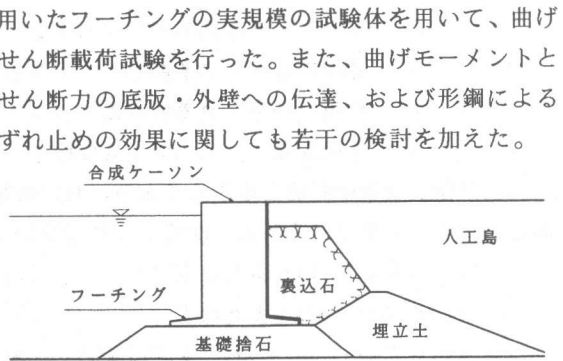


図-2 合成ケーソンによる護岸

## 2. フーチング部の設計法[1]

合成ケーソンの設計法に関して、1991年にマニュアル[1]が作成されている。以下に[1]で述べられているフーチング部の設計法を要約する。

### 2.1 設計断面力

まず設計に用いる断面力に関しては、下記のように定められている。

- (1) フーチングの断面力は、外壁前面を支承とする片持梁として計算する。
- (2) フーチング基部における、水平ずれ力及びせん断力に対する照査は、外壁前面よりフーチング基部の版厚の1/2離れた部材断面に対して行うことができる。

\*1 運輸省港湾技術研究所 構造部構造強度研究室、工修（正会員）

\*2 運輸省港湾技術研究所 構造部構造強度研究室長、工博（正会員）

(3) テーパー付きのフーチングの場合、設計に用いる水平ずれ力及びせん断力は、テーパーを考慮して次式により補正することができる。

$$Sd = S - \frac{M}{h_0} \cdot \frac{\Delta h}{L_F} \quad (1)$$

ここに、 $Sd$ ：照査断面の設計に用いるせん断力 (tf)

$S$ ：照査断面の片持梁としてのせん断力(tf)

$M$ ：照査断面の曲げモーメント (tf・m)

$h_0$ ：フーチング基部高さ (m)

$L_F$ ：フーチング張り出し長 (m)

$\Delta h$ ：フーチング先端における版厚減少量 (m)

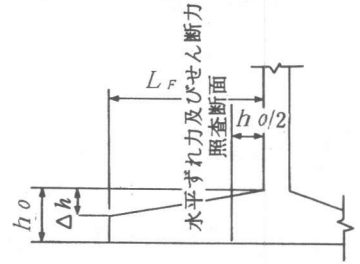


図-3 フーチングの照査断面

## 2.2 フーチング断面力の底版・外壁への伝達

フーチング曲げモーメントが底版および外壁に及ぼす影響については、以下の手順で考慮する。

(1) フーチング曲げモーメントの外壁および底版への分配を次式により計算する。なお、底版に1：3程度のハンチが付いている場合は、分配計算に用いる底版厚さ $d_B$ として図-4に示すハンチ部での平均厚さ $d_B'$ を用いるものとする。

$$M_w = \frac{d_w^3}{d_w^3 + d_B^3} \cdot M_F \quad (2)$$

$$M_B = \frac{d_B^3}{d_w^3 + d_B^3} \cdot M_F \quad (3)$$

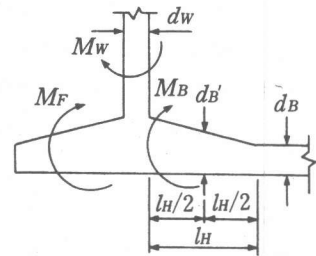


図-4 フーチング伝達力

ここに、 $M_F$ ：フーチング基部の曲げモーメント

$M_w$ ：外壁に分配される曲げモーメント

$M_B$ ：底版に分配される曲げモーメント

$d_w$ ：外壁版厚  $d_B$ ：底版版厚

(2) 外壁、底版の断面力を求める箇所における版の曲げモーメント及びせん断力を次式により計算する。

$$M_x = K_{mx} \cdot M_w \text{ (または } M_B) \quad (4)$$

$$M_y = K_{my} \cdot M_w \text{ (または } M_B) \quad (5)$$

$$S_x = K_{sx} \cdot \frac{1}{L_{sp}} \cdot M_w \text{ (または } M_B) \quad (6)$$

$$S_y = K_{sy} \cdot \frac{1}{L_{sp}} \cdot M_w \text{ (または } M_B) \quad (7)$$

ここに、 $L_{sp}$ ：縦隔壁間隔

$M_x, M_y$ ：図-5に示す $x$ 方向、 $y$ 方向の曲げモーメント

$S_x, S_y$ ：図-5に示す $x$ 方向、 $y$ 方向のせん断力

$K_{mx}, K_{my}$ ：表-1に示す $x$ 方向、 $y$ 方向の曲げモーメント係数

$K_{sx}, K_{sy}$ ：表-1に示す $x$ 方向、 $y$ 方向のせん断力係数

表-1 フーチング伝達力 係数表

係数	座標	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$K_{mx}$	I	0.93	0.62	0.36	0.16	0.05	-0.01	-0.02	-0.03	-0.03
	II	0.99	0.60	0.28	0.10	0.02	-0.01	-0.03	-0.03	-0.03
	III	1.09	0.35	0.06	-0.03	-0.05	-0.05	-0.04	-0.03	-0.02
$K_{my}$	I	0.20	0.20	0.19	0.16	0.12	0.09	0.06	0.03	0.01
	II	0.21	0.17	0.13	0.08	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00
	III	0.16	-0.24	-0.37	-0.33	-0.24	-0.16	-0.10	-0.06	-0.03
$K_{sx}$	I	2.03	1.97	1.68	1.22	0.80	-0.45	-0.28	-0.10	-0.00
	II	3.11	2.75	1.89	1.10	0.55	-0.25	-0.07	-0.02	-0.03
	III	7.56	4.40	1.62	-0.28	-0.30	-0.40	-0.35	-0.25	-0.12
$K_{sy}$	I	0.06	0.08	0.14	0.13	0.10	0.10	0.09	0.05	0.00
	II	0.28	0.70	1.12	1.10	0.80	0.55	0.32	0.17	0.10
	III	0.66	-3.60	-3.44	-2.40	-1.40	-0.70	-0.40	-0.22	-0.17

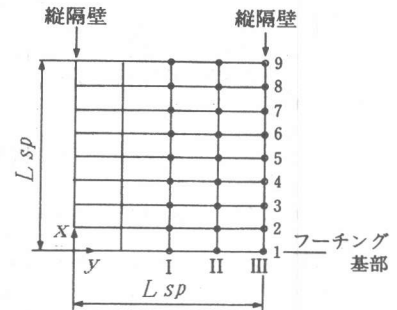


図-5 係数表示点

## 2.3 設計断面耐力

曲げモーメントに対しては、鋼板を片側の鉄筋とする複鉄筋断面として、鋼板の板厚、鋼種及び鉄筋径等の断面構造を決定する。せん断力については、フーチングの張り出しが在来のRCケーソンを超える場合には、フーチング及びフーチング近傍の底版・外壁について照査を行う。せん断応力度は、RC部材と同様に計算する。その結果が、斜め引張鉄筋の計算をしない場合の許容せん断応力度を超過する場合は、RC部材と同様の方法で斜め引張鉄筋の計算を行う。

### 3. 実験方法

#### 3.1 試験体

4種類の試験体を使用する。HF1とHF2は、フーチング部の実規模の試験体である。一方HB1とHB2は、フーチング部と外壁・底版の接合部を有する縮尺1/2の試験体である。なおHB1とHB2とは、外壁・隔壁を共有して、一体化して製作されている。

各試験体のフーチング部の構造形式を図-6に示す。HF試験体の張り出し長は3.0m、基部での版厚は1.0m、先端での版厚は0.5m、幅は0.5mである。HB試験体のフーチングの張り出し長は1.5m、基部での版厚は0.5m、先端での版厚は0.25mである。フーチング部のテーパの勾配は1:6である。HB試験体の形状・寸法の概要を図-7に示す。外壁の版厚は0.2m、底版の版厚は0.4mである。

HF1とHB1では、せん断補強鋼材として鉄筋を使用しているのに対し、HF2とHB2では鋼板を使用している。HF1、HB1のせん断補強鉄筋には、ずれ止めとしての機能も期待している。HF2、HB2では、ずれ止めとして山形鋼を使用している。試験体に使用するコンクリートの設計基準強度は $240\text{kgf/cm}^2$ である。鋼板の材質はSS400、鉄筋の材質は、SD295AとSD345である。

#### 3.2 荷重試験の状況

HF1とHF2の荷重の状況を図-8に示す。フーチング基部のコンクリートブロックを反力床にPC鋼棒で固定する。フーチング部先端から50cmの位置に、容量100tfの油圧ジャッキ1台で静的に荷重する。

HB1とHB2の荷重の状況を図-9に示す。底版が反力壁と平行になるように、試験体を反力床にPC鋼棒で固定する。フーチング部先端から15cmの位置に、油圧ジャッキ3台により線荷重を静的に荷重する。

計測項目は、荷重荷重、荷重点の変位、鋼材とコンクリートのひずみ、ひびわれ幅、鋼板とコンクリートのずれ変位である。

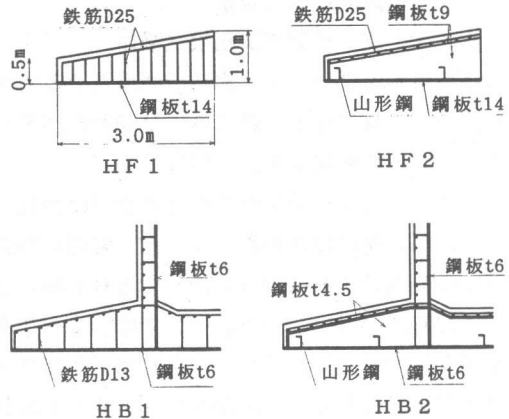


図-6 フーチング部の構造形式

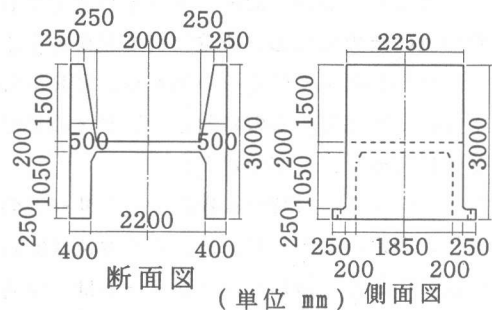


図-7 HB試験体形状・寸法

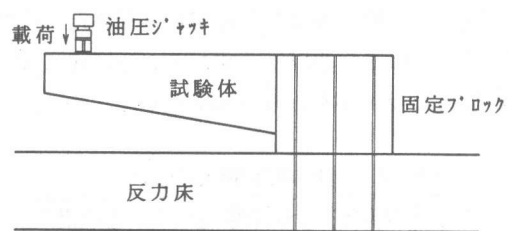


図-8 HF試験体の荷重状況

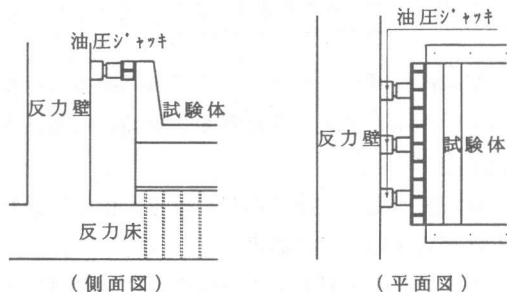


図-9 HB試験体の荷重状況

#### 4. 載荷試験結果と考察

##### 4.1 フーチング実規模試験体

載荷荷重とフーチング先端の載荷点での変位の関係を図-10に示す。終局時のひびわれパターンと、ひずみの測定値を図-11に示す。

HF1ではフーチング中央に斜めひびわれが生じ、基部に曲げひびわれが生じた。終局時の引張鋼板の最大ひずみは $1321 \times 10^{-6}$ であり、降伏ひずみに達していない。一方HF2では、2~3本の曲げひびわれがフーチングに生じた。基部で引張鋼板が降伏しており、圧縮側コンクリートのひずみも $-2339 \times 10^{-6}$ と、圧壊ひずみに近い値となっている。さらに載荷を続ければコンクリートが圧壊したと思われるが、油圧ジャッキや載荷フレームの容量の限界のため、荷重97tfで載荷を中止した。ひびわれ状況とひずみの値から、HF1の破壊がせん断破壊であるのに対し、HF2の破壊は曲げ破壊であることがわかる。

図-12に荷重40tf時の鋼板とコンクリートのずれ変位の測定結果を示す。最大ずれ変位は0.71mmと比較的小さく、鋼板とコンクリートは力学的にほぼ一体化されている。HF1とHF2の差は小さく、形鋼によるずれ止めが、鉄筋によるずれ止めと同様に機能していることがわかる。

表-2に最大荷重の測定値から求めたフーチング基部での最大曲げモーメント、及び式(1)により補正した最大せん断力の値を示す。

表-2 HF試験体最大断面力

試験体	最大荷重 (tf)	最大曲げモーメント (tf・m)	補正した最大せん断力 (tf)
HF1	59.0	147.5	39.3
HF2	97.0	242.6	64.7

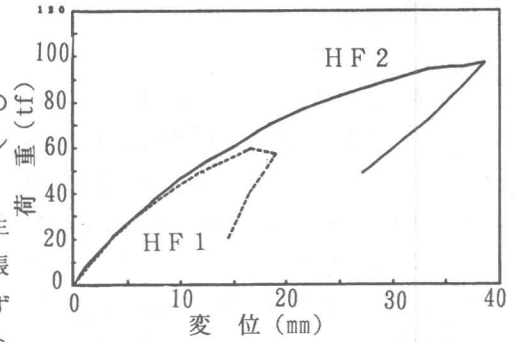


図-10 HF試験体の荷重変位曲線

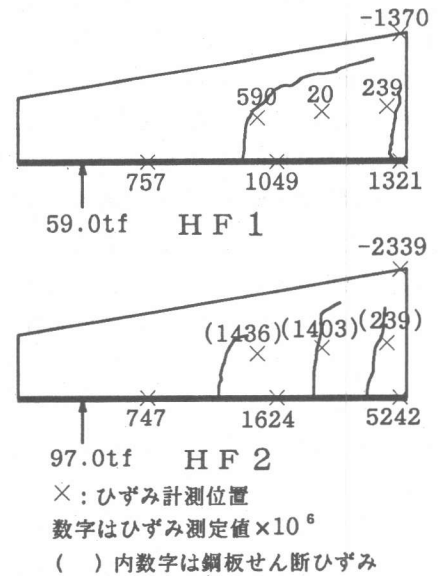


図-11 終局時のひびわれとひずみの状況

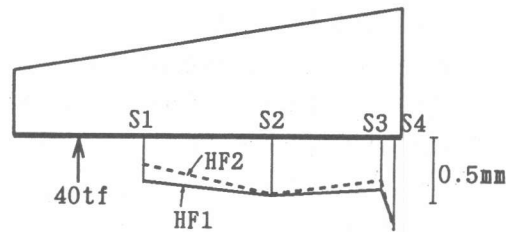


図-12 載荷荷重40tfの時の水平ずれ変位

次に曲げ降伏モーメントとせん断耐力の計算値を求める。計算に用いる特性値及び部材係数の値と計算結果を表-3に示す。断面の有効高さは、コンクリート圧縮縁から鋼材重心位置までの距離とする。

せん断耐力は、在来のRCはりと同様に計算するという考え方で、RC示方書[2]に示されている算定式を用いて求める。

まずHF1、HF2ともに次式によりコンクリートが受け持つせん断耐力  $V_c$  を求める。

$$V_c = \beta d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vc} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b \quad (8)$$

ここで、

$$f_{vcd} = 0.9 \sqrt[3]{f'cd} \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

$$\beta d = \sqrt[3]{1000/d} \cdot (d:\text{cm}) \quad (\text{ただし } \beta d \leq 1.5)$$

$$\beta p = \sqrt[3]{1000Pw} \quad (\text{ただし } \beta p \leq 1.5)$$

$$Pw = As / (bw \cdot d)$$

$As$ : 引張側鋼材の断面積

$bw$ : 腹部の幅,  $d$ : 有効高さ,  $\gamma b$ : 部材係数

$\beta n$ : 軸力の影響を考慮する係数

次に HF 1 ではせん断補強鉄筋の受け持つせん断耐力  $Vsb$  を次式により求める。

$$Vsb = [Aw \cdot f_{wyd} \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha) / Ss] \cdot z / \gamma b \quad (9)$$

ここで

$Aw$ : 区間  $Ss$  におけるせん断補強鉄筋の総断面積

$f_{wyd}$ : せん断補強鉄筋の設計降伏強度

$\alpha$ : せん断補強鉄筋が部材軸となす角度

$Ss$ : せん断補強鉄筋の配置間隔

$z$ : 圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離で、一般に  $d/1.15$  としてよい。

HF 2 については、累加型構造の鉄骨鉄筋コンクリートとみなして、T型のせん断補強鋼板が受け持つせん断耐力  $Vsp$  を次式により求める。

$$Vsp = f_{vyd} \cdot ZW \cdot tw / \gamma b \quad (10)$$

ここで、 $f_{vyd}$ : 鋼材の設計せん断降伏強度で、一般

に設計引張降伏強度を  $\sqrt{3}$  で除した値

$ZW$ : 鉄骨の腹部高さ  $tw$ : 鉄骨の腹部厚さ

表-3 から、HF 1 については、せん断補強鉄筋の効果を無視してせん断耐力を計算すると、実験結果 (表-2 の補正せん断力) と近い値になる。在来の RC フーチングと同様に、鉄筋によるせん断補強効果は小さいと考えられる。フーチング基部に曲げひびわれが生じることにより、トラス機構的なせん断耐荷機構が形成されなかったと考えられる。一方、HF 2 については、鋼板によるせん断補強効果によって、破壊形態がせん断破壊から曲げ破壊に移行したと考えられる。

#### 4.2 フーチング・外壁・底版接合部試験体

載荷荷重とフーチング先端の載荷点での変位の関係を図-13に示す。終局時のひびわれパターンと、ひずみの測定値を図-14に示す。フーチング部のみならず背後の底版にもひびわれが生じていた。終局限界状態は底版のせん断破壊により生じた。

引張鋼板の最大ひずみは、HB 1 では  $713 \times 10^{-6}$  であり、HB 2 では  $975 \times 10^{-6}$  であり、いずれも降伏

表-3 HF 試験体断面耐力の計算

		HF 1	HF 2	
コンクリート圧縮強度*		363	390	
コンクリート弾性係数*		287000	284000	
引張鋼板降伏点*		3310		
引張鋼板弾性係数*		2170000		
圧縮鉄筋降伏点*		3800		
圧縮鉄筋弾性係数*		2140000		
曲げ耐力	検討断面高さ	100cm	100cm	
	有効高さ(cm)	99.3	72.2	
	中立軸高さ(cm)	32.8	36.4	
	降伏曲げモーメント $M_y$ (tf·m)	198	238	
せん断耐力	コンクリート	$f_{vcd}$ *	6.42	6.58
		$\beta d$	1.02	1.10
		$As$ (cm <sup>2</sup> )	69.5	159
		$bw$ (cm)	50	50
		$Pw$	0.0153	0.0450
		$\beta p$	1.15	1.50
		$\beta n$	1	1
		$\gamma b$	1	1
	$Vc$ (tf)	34.4	36.6	
	鉄筋	$Aw$ (cm <sup>2</sup> )	5.067	
		$f_{wyd}$ *	3800	
		$\alpha$	90°	
		$Ss$ (cm)	25	
$z$ (cm)		79.1		
$\gamma b$		1		
$Vsb$ (tf)	60.9			
鋼板	$f_{vyd}$ *		1400	
	$ZW$ (cm)		75.7	
	$tw$ (cm)		0.9	
	$\gamma b$		1	
	$Vsp$ (tf)		95.3	

(\*: 単位 [kgf/cm<sup>2</sup>])

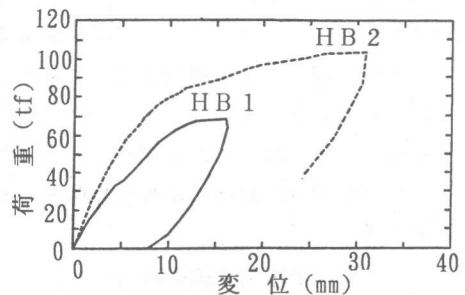
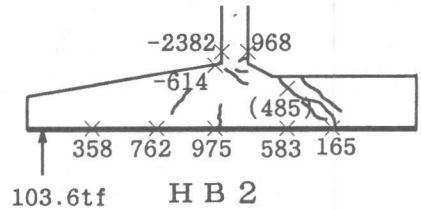
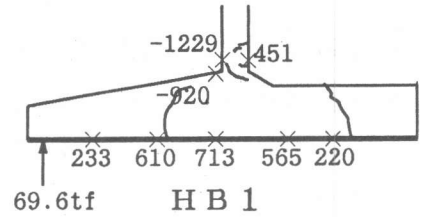


図-13 HB 試験体の荷重変位曲線

ひずみに達していない。この測定値からも破壊形態はせん断破壊であると考えられる。

表-4に最大荷重の測定値から求めたフーチング基部での最大曲げモーメント、式(1)により補正したフーチング部の最大せん断力、及び式(2),(3)から求めた底版・外壁の最大曲げモーメントを示す。また前項と同様に曲げ降伏モーメントとせん断耐力の計算値を求めた結果を表-5に示す。

表-4と表-5から、HB1とHB2はフーチング部のせん断耐力の計算値よりも小さい荷重で破壊している。フーチング伝達力係数表(表-1)から、せん断力係数 $K_{st}$ は最大値で7.56となっており、試験体の縦隔壁間隔 $L_{sp}$ が1.85mと小さかったことから、式(6)より底版では最大353tfのせん断力が作用したことになる。このせん断力によって底版にせん断破壊が生じたと考えられる。



×: ひずみ計測位置  
 数字はひずみ測定値×10<sup>6</sup>  
 ( )内数字は鋼板せん断ひずみ

図-14 終局時のひびわれとひずみの状況

表-4 HB試験体最大断面力

試験体	最大荷重 (tf)	最大曲げモーメント (tf・m)	補正した最大せん断力 (tf)	底版に伝達される曲げモーメント (tf・m)	外壁に伝達される曲げモーメント (tf・m)
HB1	69.6	93.9	44.1	86.3	7.6
HB2	103.6	139.8	65.6	128.5	11.3

表-5 HB試験体断面耐力の計算結果

試験体	フーチング				底版				外壁		
	$M_y$ (tf・m)	$V_c$ (tf)	$V_{sb}$ (tf)	$V_{sp}$ (tf)	$M_y$ (tf・m)	$V_c$ (tf)	$V_{sb}$ (tf)	$V_{sp}$ (tf)	$M_y$ (tf・m)	$V_c$ (tf)	$V_{sb}$ (tf)
HB1	148	85.5	63.2	0	117	80.7	55.1	0	55	60.3	18.1
HB2	170	86.7	0	94.3	130	81.7	0	79.6	55	59.9	18.1

## 5. 結論

- ①フーチング部のせん断補強鋼材として鉄筋を使用した場合、基部での曲げひびわれ発生によりいわゆるトラス機構が形成されず、鋼とコンクリートとのせん断耐力を累加できない。このため曲げ破壊に到る前にせん断破壊を生じる可能性があるので注意が必要である。せん断補強用に鋼板を使用するとある程度効果がみられ、耐力の上昇と曲げ破壊への移行が生じる。
- ②フーチング部から底版・外壁へ曲げモーメントとせん断力が伝達される。接合部試験では底版部のせん断破壊が先行した。このため設計においてはフーチングから底版へ伝達するせん断力の照査が必要である。
- ③載荷中鋼板とコンクリートの相対的なずれ量は比較的小さく、形鋼によるずれ止めは鉄筋によるずれ止めと同様に鋼板とコンクリートの一体化に寄与する。

## 6. あとがき

合成ケーソンはフーチングを大きく張り出すことができ、経済的なケーソンの建設が可能である。今後地震時における繰り返し荷重、不等沈下の影響等を検討したい。

## 参考文献

- [1] (財)沿岸開発技術研究センター: 合成版式ケーソン設計マニュアル、1991年3月
- [2] 土木学会: 平成3年版・コンクリート標準示方書〔設計編〕、1991年9月