

論文 港湾用ケーソンのバットレス部に関する載荷試験

川崎 進*1・山田昌郎*2・清宮 理*3

要旨: 防波堤ケーソンのバットレス（扶壁）付きフーチングの模型供試体に、集中荷重あるいは等分布荷重を載荷して、耐力、ひび割れ状況、ひずみの分布等を調べた。この際バットレスの形状（高さとし張り出し長さの比）を3通りに変化させた。いずれの形状でも等分布荷重の方が集中荷重よりも、ひずみが均等に分布し、ひび割れ発生が少なく、耐力が高かった。バットレスでは、RCバットレスよりも4～7割大きな耐力が得られた。コンクリート標準示方書のディープビームのせん断耐力算定式に補正係数を用いて、等分布荷重を受けるバットレスのせん断耐力を求める方法を提案した。

キーワード: バットレス、せん断耐力、ディープビーム、分布荷重

1. まえがき

波浪が比較的静穏で、基礎地盤が軟弱な場合、ケーソンのフーチングを長く張り出して地盤反力を減少させることができる。ただし、フーチングを長く張り出すと、地盤反力によりフーチングに作用する曲げモーメントとせん断力も大きくなる。この補強のため何らかの構造的な工夫が必要であり、その方法の一つにバットレス（buttress、扶壁）の設置がある（図-1）。

港湾用ケーソンのバットレスは、フーチングとの接辺を載荷面と考え、側壁との接辺を固定端と考えると、分布荷重を受ける変断面片持ち部材と見なすことができる。このため従来、バットレスとフーチングを一体として逆T型断面の梁とみなし、平面保持の仮定に基づき設計荷重作用下でのフーチングの鉄筋応力とバットレスの圧縮縁のコンクリート応力を計算し、許容応力度以下であることを確認する設計方法が採られている。しかし、バットレスの張り出し長さとし高さの比は通常1前後であり、これを梁と見なして平面保持を仮定することは合理性に乏しい。

本研究では、バットレスの耐力を合理的かつ簡易に算定するために、コンクリート標準示方書[1]に規定されるコーベルの検討方法の準用を考える。同示方書ではコーベルのせん断耐力 V_{da} を、ディープビームの設計せん断耐力算定式(1)によって算定してよいと規定している。

$$V_{da} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot f_{da} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b \tag{1}$$

*1 (株) 名村造船所 鉄構事業部 (運輸省港湾技術研究所受託研修生) (正会員)

*2 運輸省港湾技術研究所 構造部主任研究官、工修 (正会員)

*3 早稲田大学理工学部土木工学科教授、工博 (正会員)

元 運輸省港湾技術研究所 構造部構造強度研究室長、

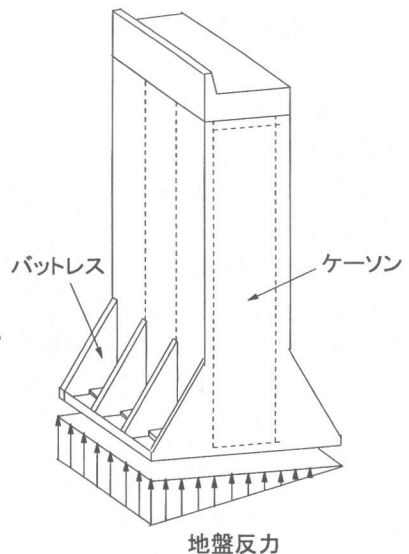


図-1 ケーソンの概要

ただし、 $\beta_d = \sqrt[4]{1/d}$ (d :有効高さ[m]) ただし、 $\beta_d > 1.5$ となる場合は1.5とする。

$\beta_p = \sqrt[3]{100 p_w}$ ただし、 $\beta_p > 1.5$ となる場合は1.5とする。

p_w : 引張鉄筋比 (= $A_s/(b_w \cdot d)$)、 A_s : 引張鉄筋断面積、 b_w : 腹部の幅

$\beta_a = 5/(1+(a_v/d)^2)$ a_v : 荷重作用点から支承前面(コーベルでは柱前面)までの距離

$f_{cd} = 0.19\sqrt{f_{cd}}$ (N/mm^2) f_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度(N/mm^2)

γ_b : 部材係数 (=1.3)

式(1)は、二羽[2]の提案式を基に、安全側に単純化した式であり、二羽式に含まれる支圧板の長さの影響が、式(1)には直接的には含まれていない[3]。二羽式は、ディープビームのウェブ部分における圧縮応力の広がり大きさを数値解析的に把握することにより導かれている。数値解析の対象は、集中荷重を受け、支点で水平方向の変位が拘束されないディープビームであり、バットレスの荷重作用状況および支持条件と異なっている。分布荷重を受けるバットレスでは、集中荷重を受ける場合よりも圧縮応力の広がりが大きくなると考えられる。

本研究では、荷重分布状況ならびにバットレス形状の違いが、バットレス面内の圧縮応力の広がり大きさと大きさ、ならびに耐力にどのように影響するのか、載荷試験によって調べた。そして、平面保持を仮定する梁の曲げ理論、および式(1)の適用性を検討した。また、バットレスの構造に関して、RC構造と鋼コンクリート合成構造の耐力を試験的に比較した。

2. 試験方法

供試体の諸元を表-1、

表-1 供試体の緒元

形状を図-2に示す。固定用ブロック(ケーソンの側壁に対応)の両側に、張り出し長さ150cmのバットレス付きフーチングを持つ供試体を4体製作した。フーチングの寸法は

供試体名	バットレス高さ(cm)	バットレス部鋼材	フーチング部鋼材	荷重ケース
RC-100-1	100	鉄筋D6@100mm2段	鉄筋D32@100mm	集中荷重
RC-100-2	100			分布荷重
RC-150-1	150			集中荷重
RC-150-2	150			分布荷重
RC-200-1	200	鉄筋D6@100mm1段	鋼板(14mm)	集中荷重
RC-200-2	200			分布荷重
OS-150-1	150	鉄筋D6@100mm1段	鋼板(14mm)	集中荷重
OS-150-2	150	鋼板(3mm)	鋼板(3mm)	分布荷重

一定(25cm×50cm×150cm)とした。

バットレスの寸法は、高さを100cm、

150cm、200cmと3通りに変化させ、

厚さ(10cm)と長さ(150cm)は一

定とした。供試体の寸法は基本的には、実物として張り出し長さ6mのバットレス付きフーチングを想定し、その1/4縮小模型として定めた。

バットレスには、D6鉄筋を直交2方向に配筋した。鉄筋の間隔を10cmとした。鉄筋の表面までのかぶりを20mmとした。フーチングには、主鉄

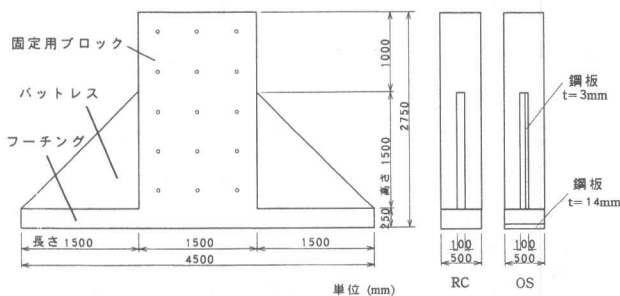


図-2 供試体の形状

筋としてD32を10cm間隔で配筋し、スターラップとしてD6を10cm間隔で配筋した。今回の試験では、バットレス部分で破壊を生じさせるため、バットレスの破壊前にフーチングの鉄筋が降伏しないようにフーチングの主鉄筋量を多くした。

また鋼板による補強効果を調べる

ために、フーチン

グとバットレス
(高さ150cm)に
オープンサンドイ

ッチ形式の鋼コンクリート合成版を用いた供試体を製作した。合成版供試体のバットレスでは、片側にRCと同様のD6鉄筋を配筋し、片側に厚さ3mmの鋼板を配置した。鋼板に頭付きスタッド(φ6×30)を10cm間隔で溶植し、鋼板とコンクリートを力学的に合成した。合成版供試体のフーチングでは、引張側の鋼材断面積を等しくするため、引張側に厚さ14mmの鋼板を、頭付きスタッド(φ19×100、10cm間隔に配置)で合成した。RCとOSで、補強量は同一に定めた。表-2に鋼材の引張試験結果、表-3にコンクリートの配合を示す。セメントとして、早強ポルトランドセメントを使用した。表-4にコンクリートの試験結果を示す。

図-3に荷重状況を示す。固定用ブロック部分をPC鋼棒により反力床に固定し、油圧ジャッキを用いてフーチング部分に荷重した。それぞれの供試体において、片側のバットレス付きフーチングを集中荷重に使用し、他方を等分布荷重に使用し、荷重の分布状況の違いが耐力に及ぼす影響について調べた。集中荷重には直径30cmの加圧板の付いたジャッキを使用し、加圧板を供試体のフーチング中央部に直接接触させて荷重した。等分布荷重はトーナメント方式の荷重治具を用いた。

測定項目は、荷重荷重、フーチング部分の変位、フーチング部分の主鉄筋または鋼板のひずみ、バットレス部分の鉄筋のひずみ、コンクリートの斜め方向(鉄筋と45度の角度をなす方向)のひずみ、およびひび割れ幅とした。

3. 試験結果

各供試体の耐力(最大荷重)を表-5に示す。バットレス高さに比例して耐力が大きくなる傾向が見られた。バットレス高さが同一の供試体では、等分布荷重を荷重した方が集中荷重の場合

表-2 鋼材の引張試験結果

種類	弾性係数 Es(N/mm ²)	降伏強度 fy(N/mm ²)	引張強度 fu(N/mm ²)
鋼板 3mm	2.12×10 ⁵	382.2	420.4
鋼板 14mm	2.09×10 ⁵	290.1	453.7
鉄筋 D6	1.95×10 ⁵	365.5	520.4
鉄筋 D10	2.11×10 ⁵	339.1	525.3
鉄筋 D32	1.86×10 ⁵	365.5	590.0

表-3 コンクリートの配合

呼び強度 (N/mm ²)	スランプ (cm)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	水セメ ント比 (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
18	12	10	57.0	177	311	820	962	3.11

表-4 コンクリートの試験結果

弾性係数 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
29200	43.7	2.86

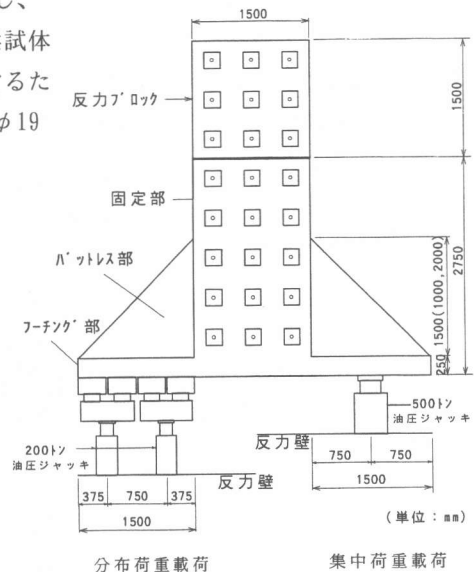


図-3 荷重状況

よりも、RCで30~50%、合成版式で6%耐力が大きかった。合成版式バットレスでは、RCバットレスよりも4~7割大きな耐力が得られた。

図-4に荷重変位曲線の一例を示す。破壊直前まで曲線の勾配の変化は小さい。いずれの供試体でも、フーチング部の主鉄筋または鋼板は降伏せず、バットレス部にコンクリートの破壊が生じた。図-5に終局時のひび割れ状況を示す。RC-150-1では、荷重0.3MNでフーチングに曲げひび割れが生じるとともに、バットレス部に斜めひび割れが発生した。荷重0.9MNの時点では、4本の斜めひび割れが確認された。荷重1.37MNでひび割れがバットレス圧縮縁に達し、1.42MNでコンクリートの圧壊が生じるとともに、固定部との境界に沿ってせん断破壊が生じた。

RC-150-2では、荷重0.4MNでバットレス部に斜めひび割れが発生し、1.1MNで2本目の斜めひび割れが生じた。その後破壊直前まで新たな斜めひび割れの発生はほとんどなく、RC-150-1に比較してひび割れが少なかった。荷重1.84MNでRC-150-1と同様にバットレス圧縮縁に圧壊が生じ、固定部との境界にせん断破壊が生じた。このとき同時に多くの斜めひび割れが生じた。

他のRC供試体についても、破壊形態はほぼ同様であった。

合成版式のOS-150-1では、荷重2.38MNで載荷断面のバットレスに圧壊が生じたあと、2.41MNで載荷断面にせん断破壊が生じた。このとき同時に鋼板に座屈が生じた。OS-150-2では、荷重2.31tfでバットレス圧縮縁の鋼板に座屈が生じ、2.56MNでコンクリートの圧壊が生じた。このように合成版式供試体では、集中荷重と等分布荷重で破壊形態に相違が見られた。

バットレス部の直交2方向

の鉄筋ひずみゲージと、斜め方向のコンクリートひずみゲージの計測値から、主ひずみの大きさと方向を求めた。図-6に得られた主圧縮ひずみの一例を示す。図にはRC-200について、最大荷重の90%の荷重が作用したときの状況を示した。集中荷重載荷では載荷断面と固定端の間の領域にひずみが生じ、載荷断面より外側にはひずみはほとんど生じなかった。一方、等分布荷重載荷

表-5 供試体の耐力

供試体名	実験(MN)
RC-100-1	0.98
RC-100-2	1.47
RC-150-1	1.42
RC-150-2	1.84
RC-200-1	2.04
RC-200-2	2.76
OS-150-1	2.41
OS-150-2	2.56

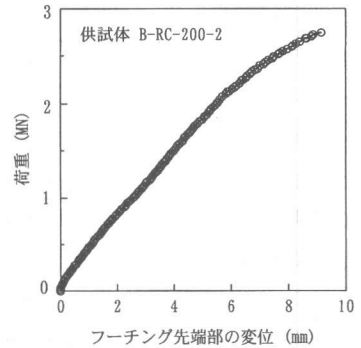


図-4 荷重変位曲線の一例

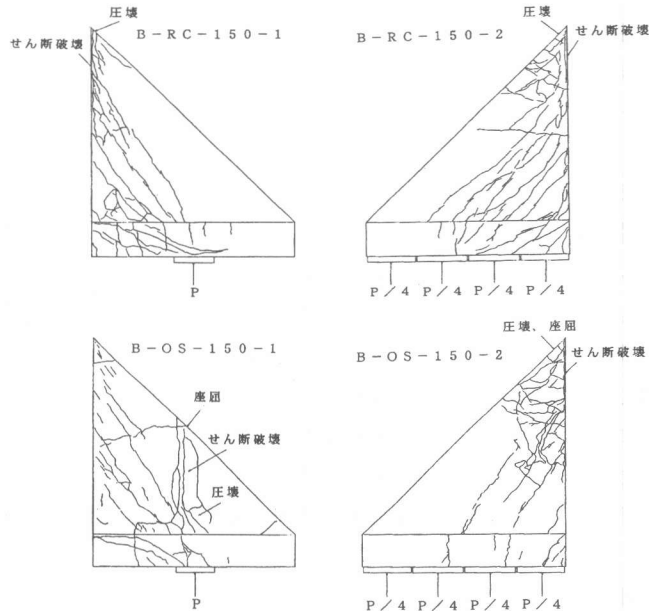


図-5 終局時のひび割れ状況

では、バットレス全域にひずみが生じていた。等分布荷重では斜辺に平行な方向に均等に圧縮ひずみの流れが生じていたのに対し、集中荷重ではバットレスとフーチングの境界およびバットレスと固定部の境界付近で圧縮ひずみの分布幅がやや狭くなっていた。

4. 考察

4. 1 梁の曲げ理論による計算と試験結果の比較

バットレスの耐力を照査する場合、フーチングとバットレスを一体として逆T形の梁としてとり扱っている。これにならい、RC供試体のフーチング基部断面の曲げモーメント-曲率関係を、平面保持の仮定に基づいて計算した。荷重とフーチング部の鉄筋のひずみの関係を図-7に示す。

鉄筋のひずみについては、バットレス高さが100cmのRC-100では試験値と計算値が比較的一致しているが、高さ150cmと200cmの供試体では、ひずみの試験値が計算値を大きく上回っている。コンクリート圧壊荷重の計算値を表-6に示す。計算値は試験値の1.9~3.5倍の値となった。梁の曲げ理論は、断面寸法が梁の長さと比較して十分小さく、せん断ひずみが無視できることを前提としている。バットレスではせん断ひずみの影響が大きく、梁の理論で計算されるひずみよりもコンクリートのひずみが大きくなる。バットレスについて、梁の理論で計算したコンクリート圧壊荷重は著しく危険側であることがわかった。

4. 2 示方書のディーブビームのせん断耐力算定式による計算値と試験値の比較

式(1)によって各供試体のせん断耐力を計算した。計算に用いた数値と計算結果を、試験結果と合わせて表-7に示す。等分布荷重については、すべての荷重がスパン中央に集中して作用するものと置き換えた。したがって集中荷重と等分布荷重の計算値が同一となっている。

集中荷重の場合、耐力の試験値と計算値の比は1.27~1.38であった。まえがきで述べたように式(1)は二羽式を安全側に簡単化したものであるため、式(1)による計算値と既往のディーブビームの試験結果との比は平均1.25程度であることが報告されている[3]。したがって今回の試験での集中荷重の場合の試験値と計算値の比は、既往のディーブビームの試験の場合よりやや大きい、過大な値ではない。

一方、等分布荷重の場合、耐力の試験値と計算値の比は1.65~2.06であり、計算値はやや過度

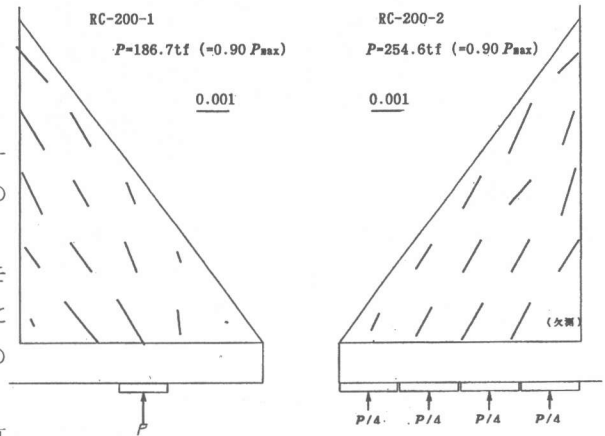


図-6 主圧縮ひずみと大きさ

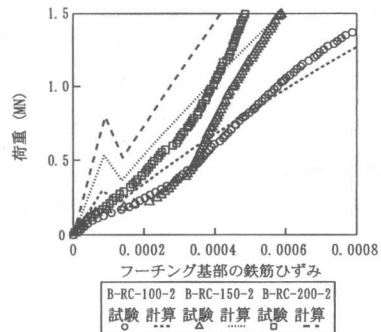


図-7 フーチングの鉄筋ひずみと荷重の関係

表-6 コンクリートの圧壊荷重

供試体シリーズ	コンクリート圧壊荷重(MN)
RC-100	2.82
RC-150	4.96
RC-200	7.18

に安全側の値となっている。これは、式(1)では支圧板の長さの影響が省略されているため、試験結果で明らかに見られた圧縮ひずみの分布幅の相違を評価できないためと考えられる。したがって等分布荷重を受けるバットレスのせん断耐力を式(1)で求める場合、式(2)に示すように補正係数 $\beta_r (=1.3$ 程度)を用いることを提案する。

表-7 式(1)によるせん断耐力の計算

供試体 シリーズ	d (m)	β_d	β_p	β_a	V_{dd} (MN)	実験結果(MN) ()内は V_{dd} との比	
						集中荷重	等分布荷重
B-RC-100	1.125	0.971	1.5	3.46	0.712	0.98(1.38)	1.47(2.06)
B-RC-150	1.625	0.886	1.5	4.12	1.118	1.42(1.27)	1.84(1.65)
B-RC-200	2.125	0.828	1.5	4.45	1.474	2.04(1.38)	2.76(1.87)
B-OS-150	1.757	0.869	1.49	4.23	1.466	2.41(1.64)	2.56(1.75)

注) 計算に用いた数値 RC $A_s = 79.42\text{cm}^2$ (D32×10本), $b_w = 10\text{cm}$, $a_v = 75\text{cm}$,
 $f_{cd} = 43.7\text{N/mm}^2$ (圧縮強度試験値), $\gamma_b = 1.0$
 OS $A_s = 70.0\text{cm}^2$ (=1.4cm×50cm), $b_w = 12.18\text{cm}$, $a_v = 75\text{cm}$,
 $f_{cd} = 43.7\text{N/mm}^2$ (圧縮強度試験値), $\gamma_b = 1.0$

果で明らかに見られた圧縮ひずみの分布幅の相違を評価できないためと考えられる。したがって等分布荷重を受けるバットレスのせん断耐力を式(1)で求める場合、式(2)に示すように補正係数 $\beta_r (=1.3$ 程度)を用いることを提案する。

$$V_{dd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot \beta_r \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b \quad (2)$$

ただし、 $\beta_a = 5 / (1 + (a_v/d)^2)$ a_v : バットレス張り出し長さの1/2

5. まとめ

港湾用ケーソンのバットレスの力学特性を、模型載荷試験により調べた。荷重分布状況とバットレス形状を要因として、RC6ケース、合成構造2ケースの載荷試験を行った。その結果、以下のような結論を得た。

- (1) 試験供試体の終局耐力は、バットレス高さに比例して大きくなる傾向が見られた。バットレス高さが同一の供試体では、等分布荷重を載荷した方が集中荷重の場合よりも、RCで30~50%、合成版式で6%耐力が大きかった。合成版式バットレスでは、RCバットレスよりも4~7割大きな耐力が得られた。
- (2) 集中荷重の方が分布荷重よりも同一荷重時のひび割れ発生数が多かった。また、終局時にバットレス圧縮縁でコンクリートが圧壊してからせん断破壊が生じる破壊形態についても、基本的には各RC供試体に共通していた。合成版式供試体では、鋼板の座屈とコンクリートの圧壊およびせん断破壊が生じ、集中荷重と等分布荷重で破壊形態に相違が見られた。
- (3) フーチングとバットレスを一体として逆T形の梁として扱い、平面保持の仮定に基づいて計算したコンクリート圧壊荷重は、著しく危険側であることがわかった。
- (4) 耐力の試験値と示方書のディープビームのせん断耐力算定式による計算値の比は、集中荷重で1.27~1.38、等分布荷重で1.65~2.06であった。示方書の式に補正係数 $\beta_r (=1.3$ 程度)を用いて、等分布荷重を受けるバットレスのせん断耐力を求める方法を提案した。

参考文献

- [1] 土木学会：コンクリート標準示方書[平成8年制定]設計編、pp.163-166、1996.3
- [2] 二羽淳一郎：FEM解析に基づくディープビームのせん断耐力算定式、第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集、pp.119-126、1983.10
- [3] 土木学会：コンクリートライブラリー第61号、コンクリート標準示方書(昭和61年制定)改訂資料、pp.179-181、1986.10