

[2092] PC鋼材で鉛直接合したコンクリートブロックの 水平載荷試験

正会員 ○大橋清一（五洋建設技術研究所）

正会員 高木兼士（五洋建設技術研究所）

正会員 内藤英晴（五洋建設技術研究所）

正村伸尋（五洋建設技術研究所）

1. まえがき

近年、港湾構造物は大型化が進むとともに、港湾技術の活用が沖合の大水深域に展開される傾向にある。

筆者らは、大型ケーソンの構築技術として、あらかじめ分割製作された複数のケーソンを上下に積み重ねる方法を開発しており（本報文では、多段積みケーソンと称す）、この方法は接合部にプレストレスを導入して洋上で連結し、一体化を図るものである。

多段積みケーソンを構築するためには設計上、克服すべきいくつかの課題があるが、特に接合部の設計手法を確立することが重要となる。すなわち、水平荷重作用に対する接合部の滑動抵抗、部材に生じる応力、緊張材の応力および破壊性状等を把握しておく必要がある。

本研究は、このような接合部を有する多段積みケーソンの設計技術に関する基礎資料を得ることを目的として、PC鋼材で鉛直接合したコンクリートブロックの水平載荷試験を実施したものであり、以下に試験結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は、上段と下段のコンクリートブロックより構成されている。上段ブロックは、4種類（タイプA、B、C、D）あり、下段ブロックは1種類の共通のもので繰り返し試験に供している。上段ブロックタイプAと下段ブロックを接合した試験体の形状寸法を図-1に示す。他の上段ブロックにおいても、緊張材本数、配筋等は基本的には、タイプAと同じである。

試験因子は、上段ブロックの寸法（断面幅、高さ）、接合面のプレストレスおよび荷重の作用位置である。実験ケースを表-1に示す。

破壊試験の2ケースを除いた19ケースにおいては、接合ブロックの滑動抵抗、接合面の応力分布および緊張材の応力変化等の影響について検討している。なお、これらのケースにおいては、滑動抵抗を求めるにあたり、緊張材のせん断抵抗の影響を除くため、すべてアンボンド型式としている。

破壊試験は、A-UB、A-Bのアンボンド、ボンドの2ケースについて、耐力ならびに破壊性状の差異を検討している。なお、ブロックの接合面には、無処理の状態で厚さ5mmのモルタルを敷設

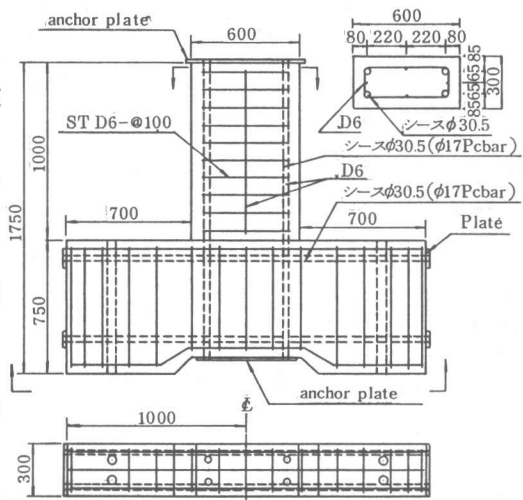


図-1 試験体（上段ブロックタイプA）

している。

上段ブロックと下段ブロックの連結用P C鋼棒は、 $\phi 17$ SBPR (95/110) であり、上段ブロックの主鉄筋およびスターラップはD6 (SD35) を用いている。コンクリートの圧縮強度 (σ_{28}) は366 kgf/cm² である。

2 載荷方法および測定項目

載荷装置を図-2に示す。載荷は油圧ジャッキ (容量30tf) を用いて、押方向水平載荷である。上段ブロックの緊張材定着部は、定着体の拘束による滑動抵抗の影響を抑えるためにローラー支承としている。載荷ピッチは、上段ブロックの滑動荷重等に応じて0.025 ~1.0 tf刻みで行っている。計測項目は、載荷荷重、上下段ブロックの変形量、緊張材引張力と鋼材のひずみの他に、接合面近傍での相対水平変位量、コンクリートひずみ、接合面の開口幅および非接触幅である。載荷荷重は、油圧ジャッキの先端に取付けたロードセル (滑動荷重等に応じて容量1 tf, 10tf, 30tfのものを使用) により計測を行っている。接合部の相対変位量は変位計より接続したペンレコーダで自動記録している。接合面の非接触幅は、断面幅に約10cm間隔で取付けた接合部表面の π 型ゲージおよび接合面近傍の埋込型ゲージ (上段ブロック中) より測定している。さらに、上段ブロック頭部にはローラー支承と定着用ナットとの間にセンターホール型ロードセルを取付けて、緊張材引張力もあわせて測定している。

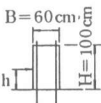
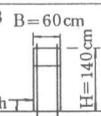
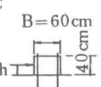
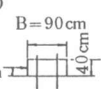
3. アンボンドP Cブロックの断面応力の解析方法

本試験体においては、載荷スパン (h) と上段ブロックの断面幅 (B) との比 h/B は、0.22 ~1.5 の範囲であり、 $h/B \geq 5$ の部材に用いられる通常のはり理論の適用が難しいと考えられる。そこで、破壊試験体を除くアンボンドP Cブロックの断面応力の解析には、本実験での載荷範囲 (滑動抵抗等) では、コンクリートおよび鋼材は弾性範囲内にあることより二次元弾性有限要素法 (以下FEMと称す) で行っている。

上段ブロックの解析モデルは、全要素数は196, 全節点数は225 の四角形要素を用いている。

解析手法は、下段ブロックを等価バネに置換し、水平荷重作用時にバネに引張力が生じた場合

表-1 実験ケース

上段ブロック の形状	ケース№	接合面の設計 プレスト レス σ_{ce} (kgf/cm ²)	荷重の作 用位置 h (cm)	備 考	
	A-1-M	0	45	U, M, Lは、荷 重の作用位置を 示す。	
	A-1-L		20		
	A-2-U		90		
	A-2-M	7.5	45		
	A-2-L		20		
	A-3-U	15.0	90	破壊試験 破壊試験 (Bond)	
	A-4-U	25.0			
	A-UB				
	A-B				
	B-1	0	20	タイプBは、タ イプAにタイプ Cを積重ねたも のである。	
	B-2	2.5			
	B-3	5.0			
	B-4	7.5			
	C-1	0	20		
	C-2	7.5			
	C-3	15.0			
	C-4	25.0			
	D-1	0	20		
	D-2	7.5			
	D-3	12.25			
	D-4	20.0			

※ ブロックの奥行幅は全て30cmである。

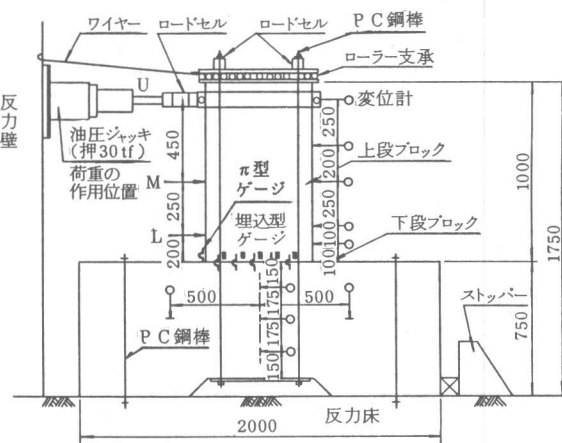


図-2 載荷装置

には、そのバネを切り離すことにより、バネ基盤に引張領域が無くなるまで繰り返すという方法である。

4. 実験結果および考察

4.1 滑動抵抗（摩擦係数）

図-3は、水平荷重～接合部の相対変位曲線より求めた滑動荷重（ P_{sl} ）と接合部の軸力（ N =自重+全緊張力）の関係を示す。図中には、水平荷重作用により全緊張力が導入時のものより増加するため、導入時の緊張力を用いた場合の他に、滑動時の緊張力を用いた場合も示している。また、導入時の緊張力を用いた場合に対し、一次近似式の95%信頼限界幅も示している。

滑動荷重と軸力は、ほぼ正比例の関係になり、直線近似できる。その勾配（静止摩擦係数； μ ）は、導入時の緊張力を用いた場合で0.66、滑動時の場合で0.63である。自重のみによるコンクリートどうしの実験結果〔1〕では $\mu=0.57\sim0.69$ であり、本実験のように緊張材でプレストレスが導入されているコンクリートブロックにおいても摩擦係数は自重のみによる場合と同様に扱うことができる。

図-3に示すデータのうち、導入時の緊張力を用いて得られた接合面でのプレストレス（ σ_{ce} ）と摩擦係数（ μ ）との関係を図-4に示す。

また、滑動時における接合面での接触状態が摩擦係数に及ぼす影響を調べるために、滑動時の非接触幅と摩擦係数との関係をプロットしたのが図-5である。なお、横軸には断面幅に対する滑動時の非接触幅との比（ η/B ）を採っている。

図-6は、摩擦係数（ μ ）と上段ブロック高さに対する荷重の作用位置との比（ h/H ）の関係である。図-4～6のいずれにおいても、摩擦係数は約0.66で一定であり、プレストレス（ $\sigma_{ce}=2.5\sim15\text{ kgf/cm}^2$ ）、滑動時の接触幅（ $\eta/B=0.1\sim0.6$ ）および荷重の作用位置（ $h/H=0.14\sim0.45$ ）による違いはほとんど見られない。

以上の結果から、PC鋼材を用いたコンクリートどおしの滑動に対する安定計算において設計に用いる摩擦係数としては、通常用いられるコンクリートどうしの摩擦係数の設計用値である0.5をそのまま用いてもよいと判断する。また、PC接合部材の滑動抵抗力は、接合部材の自重とプレストレスの総和である軸力にその摩擦係数を乗ずることにより算定できる。

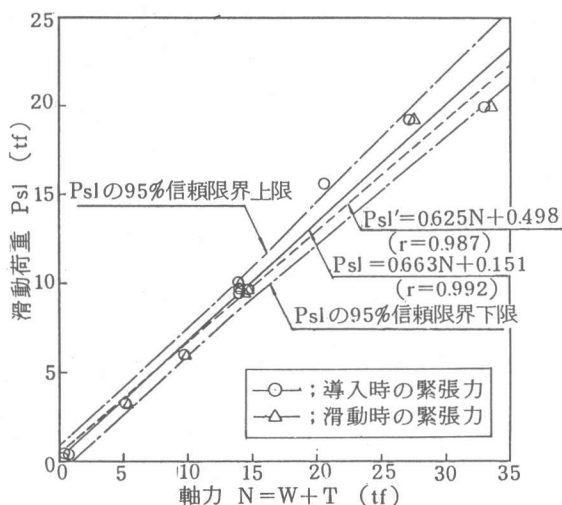


図-3 滑動荷重と軸力の関係

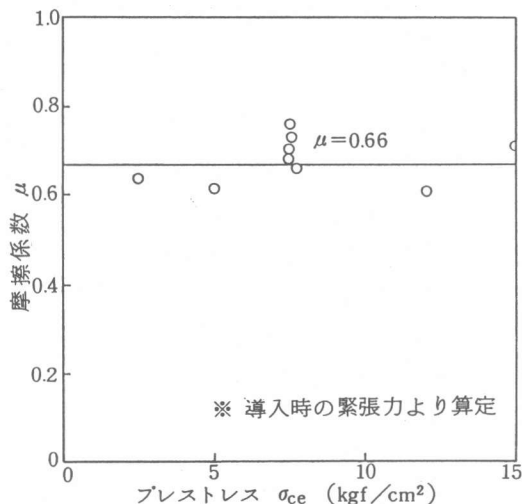


図-4 摩擦係数とプレストレスの関係

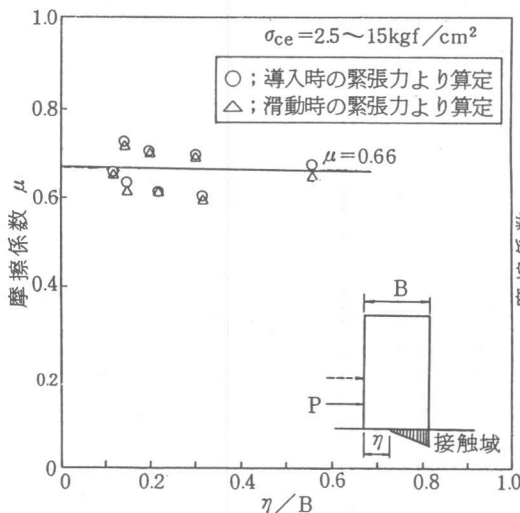


図-5 摩擦係数と接触幅の関係

4.2 滑動時における接触幅の推定

図-7は、非接触幅比 η/B と作用荷重を無次元化した $M/(\sigma_{ce}B^2 \cdot t)$ との関係を示したものである。ここで、 M は載荷モーメント ($=P \cdot h$)、 t は奥行幅である。FEM解析によると、 $\eta/B=0.7$ までの範囲においては、荷重の作用位置、断面幅およびプレストレスとは無関係に η/B と $M/(\sigma_{ce}B^2 \cdot t)$ はほぼ直線関係にあり、その関係を一次式近似すると、

$$\eta/B = 2.28 (M/(\sigma_{ce}B^2 \cdot t)) - 0.363 \quad \text{式(1)}$$

となる。式(1)を図中に実線で示す。△印、

○印はそれぞれケースA-2-UおよびA-2-Mについて実験より得られた各載荷モーメントと η/B の関係を示す。また、□印は、滑動の生じたケースについて得られた滑動モーメントと滑動時の非接触幅比との関係をプロットしたものである。

FEM解析結果を一次近似した値と各実験値とは概ね等しく、任意の載荷モーメントに対する η/B は、この一次近似式で求めることができる。したがって、滑動時の η/B は、一次近似式(1)に前節の手順で求まる滑動抵抗モーメント $M_{sl} (=P_{sl} h)$ を代入することにより算定される。

以下の節に述べる接合面のコンクリートひずみ分布および緊張力増加率については、この η/B との関係より考察する。

4.3 接合部のコンクリートひずみ分布

図-8は、ケースA-2-UおよびA-2-Mの場合の接合面コンクリートのひずみ分布である。図中のFEMによる計算値および埋込型ゲージによる実験値は、 η/B が約0.6の時のものを取り出して示している。

両ケースとも計算値は、実験値に比べ、 $x/B=0.85$ 付近までは30~40 μ 程度小さく、 x/B

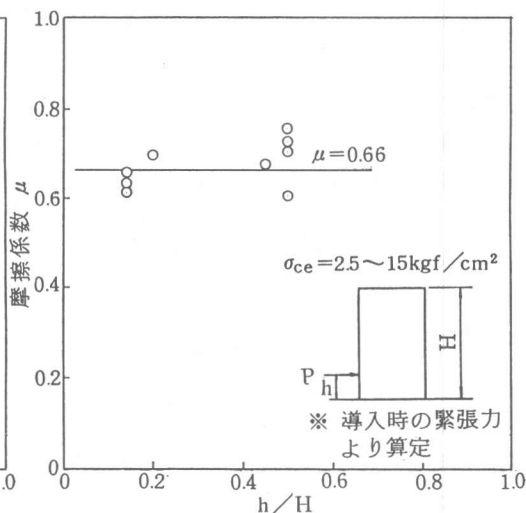


図-6 摩擦係数と荷重の作用位置の関係

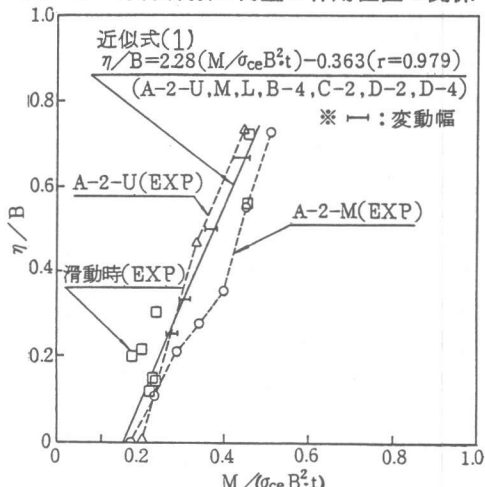


図-7 η/B と $M/(\sigma_{ce}B^2 \cdot t)$ の関係

がそれ以上になると、逆に $50\sim 80\mu$ 程度大きくなるが、計算値と実験値は概ね等しい。計算値では、 $x/B=0.85$ 付近より、ひずみがやや増加する傾向が見られるが、接合面のコンクリートひずみは、実験値および計算値ともに接触幅内において直線的に分布しているとみなせる。本実験での滑動時の η/B の最大が0.6であることを考え併せると上段ブロックが滑動するまでの接合面のコンクリートひずみは、接触幅内において直線的に分布していると考えることができる。

4.4 緊張力の変化量

図-9は、ケースA-2-Mの場合の水平荷重(P)と緊張力の増加量(ΔT)の関係である。水平荷重が増加するにつれて前趾側および後趾側の緊張力は、ひびわれ荷重(P_{cr})の付近まで、ほぼ直線的に減少または増加する。後趾側の緊張力においては、ひびわれ発生後、急激に増加する傾向にある。つまり、接合面の接触幅が後趾側緊張力の増加量に影響している。したがって、後趾側の緊張材については、設計上、水平載荷による緊張力の増加量を考慮して検討しなければならない。

図-10は、ケースA-2-UおよびA-2-Mの場合の後趾側緊張力の増加率($\Delta T_l / T_{li}$)と接合面の非接触幅比(η/B)の関係である。ここで、 T_{li} は導入時の緊張力である。

両者とも実験値とFEMによる計算値は、 η/B が0.5までの範囲において、比較的よく一致している。 η/B が0.5以上になると計算値は実験値に比べ大きくなり、 $\eta/B=0.7$ において後趾側緊張力の増加量は、実験値が6~8%に対して、計算値は16~19%で計算値の方が約10%増となる。

したがって、緊張力の増加率は $\eta/B=0.5$ までの範囲において、 η/B との関係よりFEM解析から求めることができる。

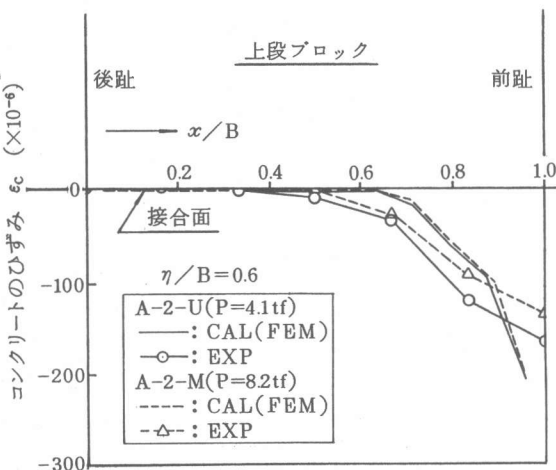


図-8 接合部のコンクリートひずみ分布

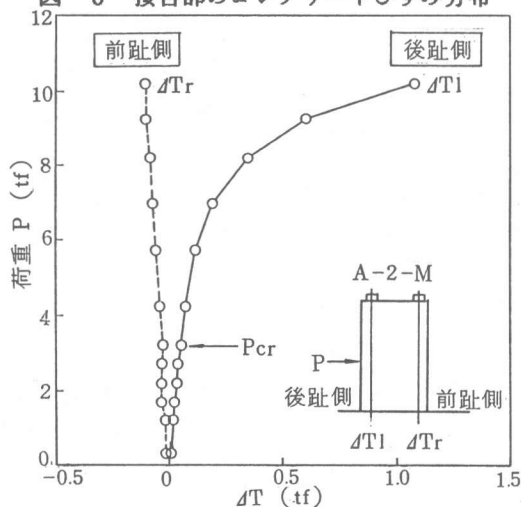


図-9 水平荷重と緊張力の増加量の関係

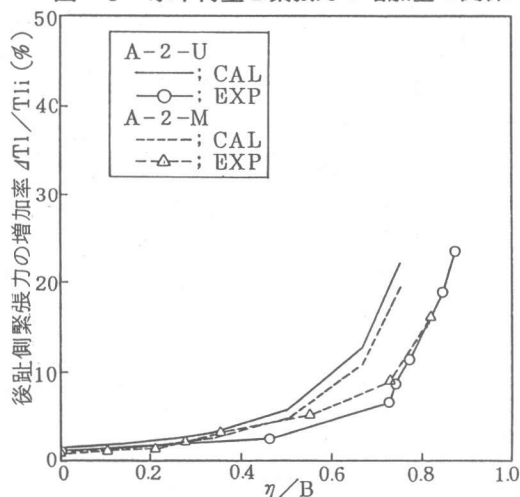


図-10 η/B と後趾側緊張力の増加率の関係

4.5 ひびわれおよび破壊性状

破壊試験体のひびわれはアンボンド、ボンドともにブロック間の接合部モルタル目地で発生している。ボンド試験体の破壊状況は、上段ブロックの前趾側のコンクリートの圧壊である。アンボンド試験体の場合

表-2 ひびわれ及び破壊荷重の試験結果

破壊試験体	実 験 値		計 算 値		〔ひびわれ荷重〕	
	ひびわれの目視荷重 (tf)	破壊荷重 (tf)	ひびわれ荷重 (tf)	破壊荷重 (tf)	計算値 実験値	計算値 実験値
アンボンド	4.05	/	5.0	/	1.23	/
ボンド	4.75	28.2	5.0	27.3	1.05	0.97

は、接合部目地モルタルが強度不足であったため、 $P=16.0\text{tf}$ より、前趾側目地モルタルの圧壊が始まり、 $P=27.0\text{tf}$ 時にPC鋼棒が降伏したため、試験を終了している。表-2にアンボンド、ボンド両試験体のひびわれおよび破壊荷重の試験結果を示す。ひびわれ荷重の計算値は、土木学会のひびわれ算定式を用い、モルタル目地とコンクリートブロックの間の付着が期待できないことを考慮して、コンクリートの曲げ引張強度を0として求めている。破壊荷重の計算値はコンクリート標準示方書（土木学会）〔2〕に示される方法で求めた。ひびわれ荷重の計算値と実験値との比はアンボンド試験体の場合には、1.23、ボンド試験体の場合には1.05である。アンボンド試験体のひびわれ荷重の実験値がボンド試験体の場合に比べて小さいのは、接合面の目地モルタルの強度不足により、上段ブロックの回転が早期に起こったためである。破壊荷重については、ボンド試験体の計算値は、実験値に対して0.97であり、両者はほぼ近い結果となっている。

5. まとめ

以上、多段積みケーソンの接合部の設計に関する基礎研究として、PC鋼材で鉛直接合したコンクリートブロックの水平載荷試験を行い、得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) プレストレス導入によるコンクリート接合構造において、プレストレス $0 \sim 15 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲ならば、摩擦係数の実験値は導入時の緊張力を用いた場合で0.66、滑動時の場合で0.63であった。これらの値は自重のみ ($\sigma_{ce}=0$) のコンクリートどうしの摩擦係数の実験値と等しい。
- (2) したがって、PC接合部材の滑動に対する安定計算において、設計に用いる摩擦係数は、通常用いられるコンクリートどうしの摩擦係数の設計用値0.5をそのまま用いてもよい。また、その滑動抵抗力は、接合部材の自重と全緊張力の総和である軸力に、摩擦係数（設計用値）を乗ずることにより算定できる。
- (3) 任意の載荷モーメント ($M=P \cdot h$) に対する接合面の非接触幅 (η) は、水平荷重 (P)、荷重の作用位置 (h)、断面幅 (B)、プレストレス量 (σ_{ce}) のそれぞれを無次元化した $M/(\sigma_{ce} B^2 \cdot t)$ と η/B を用いた一次近似式(1)より求めることができる。また、この η/B との関係より接合面のコンクリートひずみ分布および緊張力の増加率を求めることができる。
- (4) η/B が0.6までの範囲（本実験での滑動範囲）において、接合面のコンクリートひずみの計算値（FEM）と実験値は、概ね等しく、また、接触幅内において直線的に分布する。
- (5) 後趾側緊張材の設計においては、水平載荷による緊張材の増加量を考慮する必要がある。その際の緊張力の増加率は、 η/B が0.5までの範囲において、 η/B との関係よりFEM解析から求めることができる。
- (6) ボンド試験体の破壊は、上段ブロックの前趾側のコンクリートの圧壊である。また、破壊耐力の計算値と、実験値とはほぼ等しい結果となる。

参考文献

- (1) 広井 勇；小樽築港工事報文，北海道庁，1923年
- (2) コンクリート標準示方書〔設計編〕，土木学会，pp43～48