

報告 プレキャストケーソンの接合部の載荷試験

清宮 理*¹・藤澤孝夫*²・佐藤正一*³・藤井 敦*⁴

要旨: 港湾用ケーソンのプレキャスト製作のために、T-U 継手と箱型継手の 2 種類の継手を提案した。これらの継手の強度・変形性能および疲労特性を載荷試験により確認した。試験の結果、継手の種類によって強度、変形性能および破壊性状に相違が認められた。疲労試験では、鉄筋の一部が溶接された継手の場合でもコンクリート標準示方書で示される設計疲労強度を上回る結果を得た。

キーワード: プレキャスト部材, ケーソン, 接合部, 静的試験, 疲労試験, 溶接, 省力化

1. はじめに

厳しい波浪条件の下に、鉄筋コンクリート製のケーソンを用いて防波堤や岸壁の建設が進められている。港湾用ケーソンの製作では、鉄筋の配筋作業、型枠組立解体、コンクリート打設などの連続作業が繰り返されているが、近年港湾工事に従事する熟練労働者の高齢化や若年労働者の不足などのために、これらの作業にも省力化が求められている。運輸省港湾局では港湾用ケーソン製作の省力化として、配筋作業の省力化[1]や合成版式ケーソンのプレハブ化による省力化[2,3]の開発を行っている。

ここで述べるプレキャストケーソンは、ケーソンの外壁を従来と同様に鉄筋コンクリートで製作し、プレキャスト部材の隔壁をケーソン内部に格子状に建込む工法である。この工法ではケーソンの外壁やパネル間同士の接合部の設計と施工方法が重要な検討課題となる。そこで今回選定した接合部の構造形式が、波浪による設計外力作用時に十分な強度・変形性能を保有し、予期しない破壊性状をしないかなどを検討するために、接合部の模型を製作して静的載荷試験と疲労試験を行った。

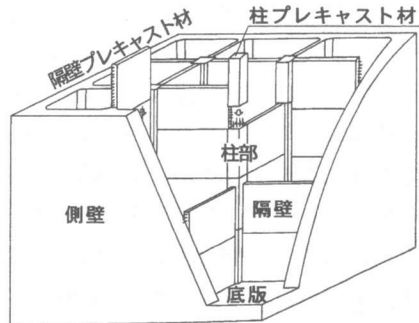


図-1 プレキャストケーソンの概略

2. プレキャストケーソンの構造の概略

プレキャスト部材の組立は、図-1に示すようにあらかじめ底板と側壁を鉄筋コンクリートで製作する。その後鋼製の柱部をケーソン底板部に垂直に建込み、ケーソンの上方からクレーンでプレキャスト部材の隔壁と柱を順次差し込んでいく。側壁および柱部と隔壁の接合部には、高強度の無収縮モルタルを充填し構造上一体化を図る。

*1 元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）

*2 元運輸省港湾技術研究所 構造部 構造強度研究室 研究官（正会員）

*3 運輸省第一港湾建設局 新潟調査設計事務所長

*4 運輸省第一港湾建設局 新潟調査設計事務所 建設専門官

3. 接合部の構造と検討課題

接合部の構造形式として T-U 継手と箱形継手の 2 種類を今回提案した。T-U 継手の構造形式を 図-2 に示す。プレキャスト部材端部に T 型鋼を取り付け、側壁にスタッドジベルで固定した U 型鋼内に T 型鋼を挿入して接合する方法である。側壁の内側には、ベースプレート(鋼板)に U 型鋼とフランジを溶接した接合部材(工場加工)を取り付ける。この接合部材の鋼板の裏側には、スタッドジベルと補強筋が入っており隔壁に生じる引張力に抵抗できる構造になっている。また T 型鋼と隔壁鉄筋の接続方法は、重ね合わせ隅肉溶接とする。T 型鋼を U 型鋼に挿入した後、この接合箇所を高強度無収縮モルタルを充填する。

箱形継手の構造形式を 図-3 に示す。プレキャスト部材から隔壁鉄筋を直に出し、この鉄筋を側壁に取り付けた鋼製の箱に挿入し接合する方法である。側壁の内側のハンチ部に箱を配置する。箱の底部および側部には抜け出しおよび箱の開き防止のためのスタッドジベルを配置する。また側壁と隔壁の接合は、プレキャスト部材の端部から張り出した鉄筋と充填材との付着力のみで期待している。

ケーソンの隔壁には、施工時に中詰土圧や水圧により曲げが作用し、完成時には土圧・水圧および波圧により軸引張が作用する。このため接合部では引張・曲げおよびせん断の検討が重要となる。さらに波が繰返し作用することから接合部の疲労破壊も懸念される。特に T-U 継手では鋼材と鉄筋を溶接しているため、鉄筋の疲労強度の低下[4,5]に配慮する必要がある。また接合部は空間が狭く鋼材が密に配置されているため、充填するモルタルは高強度で無収縮の充填性の良いものを選定する必要がある。

4. 載荷試験

4. 1 試験体の構造と使用材料

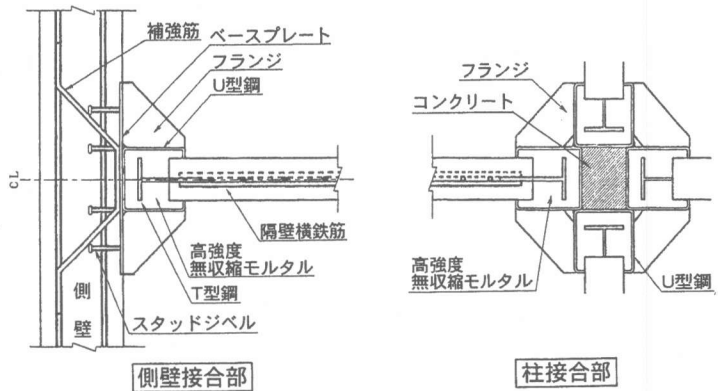


図-2 T-U継手の構造

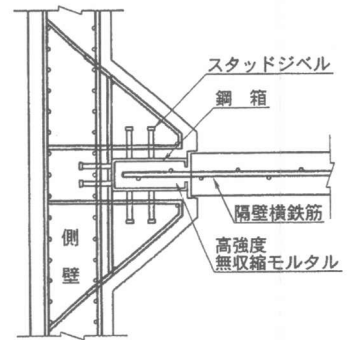


図-3 箱形継手の構造

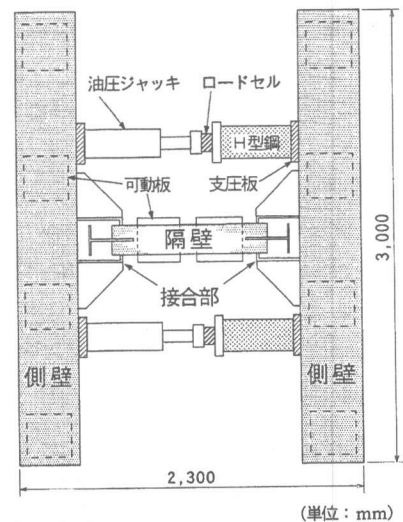


図-4 引張試験の概要

接合部の実物大試験体を製作し、引張、曲げ、せん断および疲労試験を行った。なお各種試験で継手のない一体型の試験体（従来型）も製作して接合部試験体と比較を行った。試験個数は静的載荷試験で9体、動的繰返し試験で12体である。図-4に示す引張試験はH型をしており、試験体寸法は長さ2.3m、幅3m、高さ0.6mで、接合部を隔壁の両端に設けた。図-5に示す曲げおよびせん断試験用はT型で、試験体寸法は引張試験とほぼ同じ大きさとした。疲労試験用の寸法は、長さ1.8m、幅0.4m、高さ1.29mで試験体の幅が曲げおよびせん断試験体より小さく

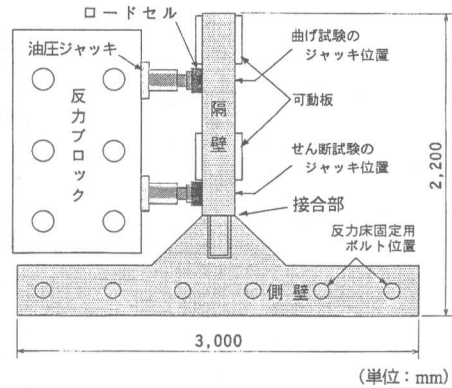


図-5 曲げおよびせん断試験の概要

表-1 コンクリートの配合

区分	セメント	W/C (%)	s/a (%)	単位数 (kg/m ³)				混和剤 (kg/m ³)
				W	C	S	G	A E 減水剤
引張試験	普通	56.3	46.4	156	278	858	1033	4.170
曲げ、せん断試験	普通	57.0	44.7	157	275	827	1061	0.550

した。使用した鋼材の材質はSS400、鉄筋はSD345とした。試験体本体のコンクリートは普通ポルトランドセメント ($\sigma_{ck} = 23.5 \text{ N/mm}^2$) を、接合部の充填材は高強度無収縮モルタル ($\sigma_{ck} = 44.1 \text{ N/mm}^2$) を用いた。コンクリートの配合を表-1に、載荷試験時のコンクリート強度を表-2に示す。

表-2 コンクリートの強度試験結果

	普通コンクリート			高強度無収縮モルタル		
	引張試験	曲げ、せん断試験	疲労試験	引張試験	曲げ、せん断試験	疲労試験
試験材令(日)	52	51	89	32	45	77
圧縮強度(N/mm ²)	27.5	24.2	24.1	64.8	50.5	59.3
引張強度(N/mm ²)	2.21	2.00	2.07	3.11	3.96	4.45
曲げ強度(N/mm ²)	4.86	—	5.08	—	—	—
静的弾性係数(N/mm ²)	2.29×10^4	2.11×10^4	2.16×10^4	2.37×10^4	2.00×10^4	2.72×10^4
ポアソン比	0.15	0.71	0.41	0.24	0.15	0.14
長さ変化率(%)(35日)	—	—	—	—	0.09	—

4.2 試験方法と計測項目

引張試験の概要を図-4に示す。試験体を可動板の上に設置し、隔壁に相当する梁部の間に油圧ジャッキ2台を設置して、接合部に引張荷重を作用させた。図-5に示すように曲げおよびせん断試験は、隔壁部のみを可動板の上に設置し梁部を反力床に完全固定した。

載荷は単調増加で行い、初期ひび割れ発生荷重時と鋼材の降伏した時点で一旦徐荷して再度載荷を継続した（引張試験は単調増加のみ）。図-6に示すように疲労試験は、隔壁部の鉄筋端部に繰返し荷重を与えた。繰返し載荷荷重は鉄筋降伏応力の約0.75～0.25の間で、最大200万回まで繰返し載荷を行った。

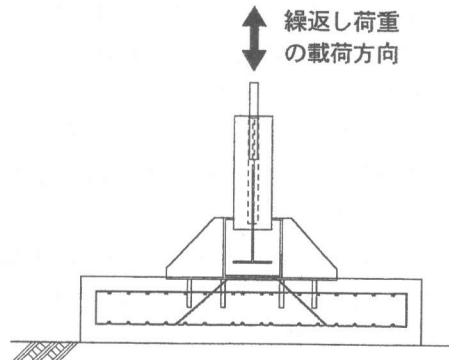


図-6 疲労試験の概要

計測項目は、油圧ジャッキの載荷荷重、試験体変位、鉄筋・コンクリート表面と鋼板のひずみおよびひび割れ幅とした。計測点数は試験体によって異なるが約30点程度とした。

5. 試験結果

5. 1 静的荷重試験の結果

図-7 に T-U 継手の引張試験の最終ひび割れ状況を示す。初期ひび割れは、T 型鋼と充填モルタルの境界部に荷重約 40kN で発生した。その後、T 型鋼や U 型鋼沿いにひび割れが進展し付着切れが生じた。隔壁部では充填モルタルと隔壁の境界部(隅各部)で付着切れが生じた後、T 型鋼の端部付近にひび割れが発生し、鉄筋降伏後は隔壁中央部に 1 本入り終局に至った。また側壁部ではコンクリートと接合部鋼板の境界部から付着切れが生じた後、約 245kN でスタッドジベル沿いにひび割れが入った。鉄筋降伏後はこのひび割れが進展するのみで、終局時にはフランジ下端よりせん断ひび割れが入り荷重荷重が低下した。試験体の終局時は、充填モルタルと鋼材部で付着切れが生じたが充填モルタルの圧壊なども無かった。

曲げ試験では、どの試験体も隔壁と接合部の境界部(隅各部)に初期ひび割れが発生し、その後ハンチ内にひび割れが進行した。最終破壊は隔壁と接合部の圧縮側の境界部付近で隔壁コンクリートが圧壊した。せん断試験では、T-U 継手と従来型は隔壁コンクリートが圧壊した。ただし箱型継手は引張側の隔壁と接合部の境界部が大きく開き、箱型内の充填モルタルが破壊した。なお各試験において、T-U 継手と箱型継手の初期ひび割れは従来型より低い荷重段階で発生した。

図-8 に引張試験の荷重荷重と試験体の変位の関係を示す。継手部のある試験体は従来型より初期剛性が低いのが、かなりのじん性があることが分かった。ひび割れ状況からも分かるように、T-U 継手は充填モルタルと T 型鋼で付着切れが生じて、充填モルタルが圧壊しなかったためにじん性が大きくなったと思われる。これに対し箱型継手は、T-U 継手と同様な初期剛性を示したが、最大荷重後に箱型内の鉄筋沿いにひび割れが進展した。このひび割れにより鉄筋とコンクリートの付着切れが急激に生じ破壊したと考えられる。

5. 2 試験値と計算値の比較

表-3 に隔壁における各試験の試験値と計算値の比較を示す。計算値はコンクリート標準示

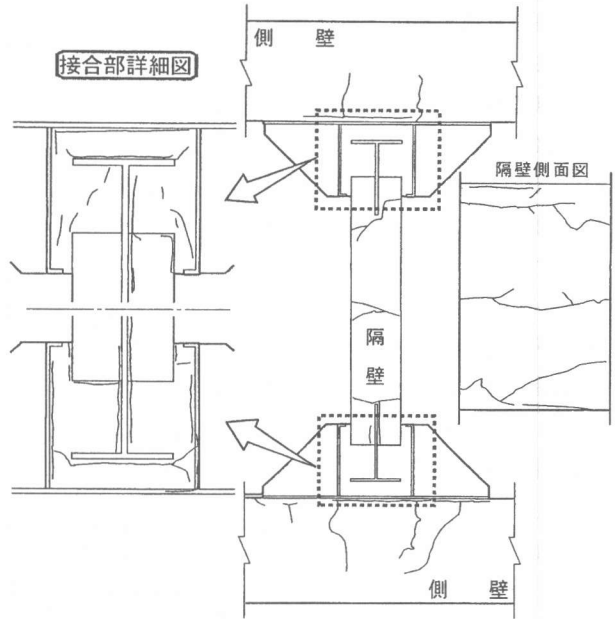


図-7 引張試験の最終ひび割れ状況

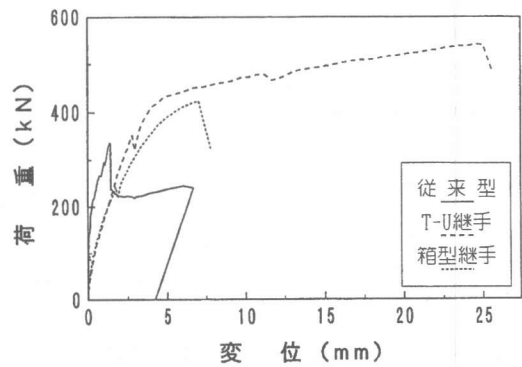


図-8 引張試験の荷重-変位の関係

方書[5]に示される方法で求めた。ここでコンクリートと鋼材の特性値として材料試験から得られた値を用い、材料係数などの安全係数を1.0とした。

引張試験では、T-U継手が従来型・箱型継手よりも最大荷重が大きかった。鋼材降伏時の荷重では、T-U継手のみ計算値より上回った。曲げ試験の鋼材降伏荷重は、両継手とも試験値が15～17%計算値より下回った。せん断試験では箱型継手が試験値より下回った。

5.3 疲労試験結果

図-9に試験結果と示方書[5]で示される鉄筋の設計疲労強度を示す。試験体数は十分ではないが、従来型とT-U継手の疲労強度線は設計疲労強度線とほぼ並行で上側に位置した。また繰返し回数が200万回以下の範囲の疲労強度低下は、T-U継手は溶接が行われているにもかかわらず従来型より10%程度の低下率であった。

ひび割れおよび鉄筋の最終破断位置は、従来型の場合、隔壁とハンチの境界に初期ひび割れが発生し、その後ハンチ中央にひび割れが入った。鉄筋破断位置は、隔壁とハンチの境界から5～10cm離れた隔壁部(5体中4体)であった。T-U継手の最終ひび割れ状況を図-10に示す。初期ひび割れは隔壁と充填材の境界より発生しT型鋼に沿って進行した。その後隔壁部に埋込まれているT型鋼端部にひび割れが発生し、隔壁部を貫通した。鉄筋破断位置は全ての試験体共通で、T型鋼端部であった。この位置での破断は、T型鋼と鉄筋の境界であることと溶接点の端部であることから、応力の急変と溶接影響とが原因と考えられる。

表-3 各載荷試験の試験値と計算値の比較

(単位: kN)

	継手の種類	試験値			計算値		
		ひびわれ発生荷重	鋼材降伏時の荷重	最大荷重	ひびわれ発生荷重	鋼材降伏時の荷重	終局時の荷重
引張試験	従来型(継手なし)	122	※1	337	235	472	(472)
	T-U継手	51	441	542			
	箱型継手	39	441	427			
曲げ試験	従来型(継手なし)	13.5	51.5	60.8	17.2	50.2	47.8
	T-U継手	7.4	42.9	47.0			
	箱型継手	6.1	41.7	51.0			
せん断試験	従来型(継手なし)	51.0	298	313	—	—	262
	T-U継手	19.6	252	262			
	箱型継手	21.6	※2	213			

※1…側壁コンクリートの破壊のため降伏点に至らなかった
 ※2…充填モルタルの破壊のため降伏点に至らなかった

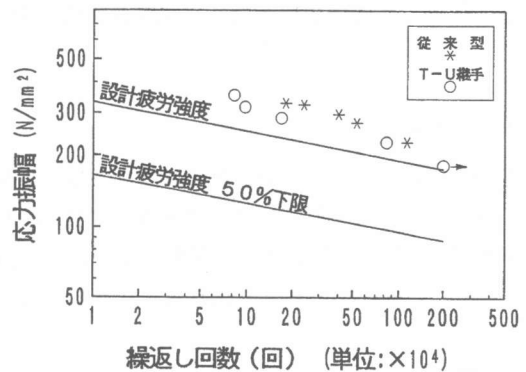


図-9 疲労試験の試験結果

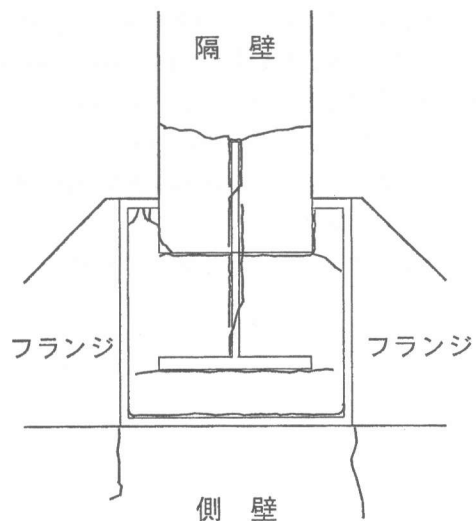


図-10 疲労試験体の最終ひび割れ状況

6. 結 論

プレキャストケーソンの接合部の静的載荷試験および疲労試験より以下の主要な結論を得た。

- ① 静的な各試験において、T-U 継手および箱型継手の初期ひび割れは従来型よりも低い荷重段階で発生した。
- ② T-U 継手の引張試験では、鋼材沿いにひび割れが進展し付着切れが生じるが、充填モルタルの圧壊はなかった。箱型継手は、最大荷重付近で箱型内の鉄筋沿いにひび割れが進展し、コンクリートとの付着切れが急激に生じた。
- ③ 引張試験で、継手のある試験体は従来型より初期剛性は低いが、最大荷重やじん性は従来型よりも大きいことが分かった。
- ④ 曲げおよびせん断試験で最大荷重は従来型より小さく、初期剛性は従来型より低下する傾向があった。
- ⑤ T-U 継手の疲労強度は示方書の設計疲労強度以上であった。また 200 万回以下の範囲では、従来型の 10%程度の疲労低下率であった。
- ⑥ T-U 継手の鉄筋破断位置は、T 型鋼と鉄筋の溶接部で応力の急変と溶接影響が原因と考えられた。

7. あとがき

試験の結果、どちらの接合形式も設計強度（許容応力度法でケーソンの構造設計を行った）以上であったが、破壊形状やじん性の面で T-U 継手の方が優れていた。このため酒田港のケーソン（試験堤）製作では T-U 継手を採用した。しかし箱型継手は T-U 継手より構造的に簡単で施工性が良いため、現在構造細目の見直しを行っている。

参考文献

- [1] 清宮理、藤澤孝夫：ウエルドメッシュ筋（溶接鉄筋網）の力学的性状、コンクリート工学協会、コンクリート工学年次論文集、Vol.17, No.2, pp.17-22、1995
- [2] 清宮理、藤澤孝夫ほか：合成版パネルを用いた港湾用ケーソンの接合部載荷試験、構造工学論文集、Vol.40A, pp.1389-1400、1993,6
- [3] 清宮理、藤澤孝夫：港湾用ケーソンの省力化技術の現状、テクノオーシャン'96、PROCEEDING II、pp.181-186、1996,10
- [4] 清宮理、藤澤孝夫：溶接鉄筋の強度特性と波浪に対する疲労設計、構造工学論文集、Vol.43A, 1997,3(投稿中)
- [5] 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.35-36 および pp. 52-72