

(16) 鋼・コンクリート合成板のねじりに関する基本的な載荷実験

LOADING TESTS ON THE TORSION OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE PANELS

山田昌郎* 清宮 理**

By Masao Yamada and Osamu Kiyomiya

Results of torsion tests on nine composite and three RC panel specimens are described. The composite panels consisted of RC panels (250mm thick) and steel plates (5.8mm thick). The steel plates were connected on a side of RC with studs. While initial torsional rigidities of the composites were 1.57 times as large as those of the RC, torsional cracking moments of the composites were no more than those of the RC. Average crack widths of the composites were larger than those of the RC at the same twist. Torsional rigidities of panels rapidly decreased after cracking. Steel bars yielded and then concrete crushed in all the specimens. However, yielding of steel plates and studs was not observed. Yield moments depended on the reinforcement ratios of steel bars.

1. まえがき

鋼・コンクリート合成構造を用いた港湾構造物は、地盤の不等沈下や不陸などによってねじりを受ける場合がある。こうした構造物の変形と耐力を予測するために、合成板要素のねじり特性を把握する必要がある。RC（鉄筋コンクリート）板要素のねじり特性については、既往の研究によってかなり明らかにされている^{1, 2)}。これに対して、合成板要素のねじり特性については、これまでほとんど研究例がない。

一般に板要素にねじりモーメントを与えると、板の両面には互いに逆向きのせん断ひずみが生じ、これによるせん断応力が内力ねじりモーメントを形成して外力と釣り合う。図-1に示すようなオープンサンドイッチ板要素では、片側だけに鋼板が配置されるため、部材厚中心面に関してせん断剛性が非対称である。この非対称性が、ねじり剛性、ひび割れ発生ねじりモーメント、ひび割れ幅、鉄筋降伏ねじりモーメント、最大ねじりモーメント等の特性にどのような影響を及ぼすのか、これまで明らかにされていない。

そこで、オープンサンドイッチ板要素とRC板要素を対象に、両者の基本的な特性を実験的に比較したので、以下に報告する。

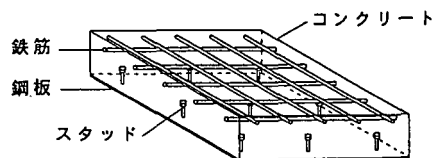


図-1 オープンサンドイッチ板要素

* 工修 運輸省 港湾技術研究所 構造部 構造強度研究室

** 工博 運輸省 港湾技術研究所 構造部 構造強度研究室長

2. 実験方法

2. 1 供試体の構造

表-1のように、鉄筋の径と間隔が異なる9体のオープンサンドイッチ供試体と、鉄筋の間隔が異なる3体のRC供試体を製作した。図-2に供試体OS-22-200と供試体RC-19-200の構造を示す。

オープンサンドイッチ供試体では、公称厚さ6mmの鋼板を使用した。ずれ止めとしては、直径16mm長さ100mmの頭付きスタッドを、30cm間隔で鋼板に溶接した。鉄筋量、鋼板厚、ずれ止めの種類と間隔等は、合成版式防波堤ケーソン³⁾の設計例を参考にして設定した。

オープンサンドイッチ供試体の鉄筋は、鋼板にナットで定着した。RC供試体の鉄筋は、圧接によりリング状に加工した。コンクリート表面に最も近い鉄筋表面までのかぶり厚は、いずれの供試体でも2.5cmとした。

表-1 供試体の種類と主な実験結果

供試体名	鉄筋		実験結果		
	径	間隔 (mm)	T_{σ} (tfm)	T_y (tfm)	T_{max} (tfm)
OS-22-200	D22	200	5.0	14.3	15.6
OS-22-150	D22	150	5.3	17.1	17.8
OS-22-100	D22	100	4.8	21.7	22.3
OS-19-200	D19	200	3.8	11.1	15.5
OS-19-150	D19	150	5.8	13.2	16.9
OS-19-100	D19	100	5.7	18.8	20.4
OS-16-200	D16	200	4.8	8.7	13.1
OS-16-150	D16	150	5.6	9.4	15.4
OS-16-100	D16	100	6.4	14.4	19.6
RC-19-200	D19	200	5.5	10.8	13.5
RC-19-150	D19	150	4.8	13.6	15.4
RC-19-100	D19	100	4.8	17.5	18.4

OS : オープンサンドイッチ

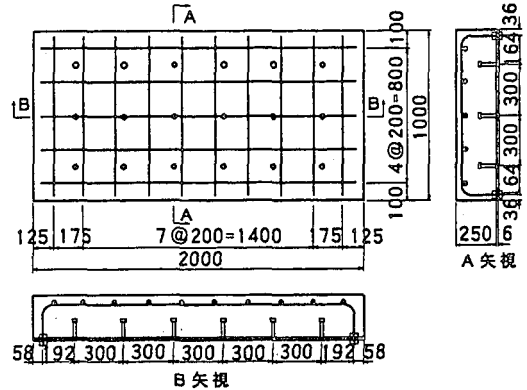
RC : 鉄筋コンクリート

T_{σ} : ひび割れ発生ねじりモーメント

T_y : 鉄筋降伏ねじりモーメント

T_{max} : 最大ねじりモーメント

供試体 OS-22-200



供試体 RC-19-200

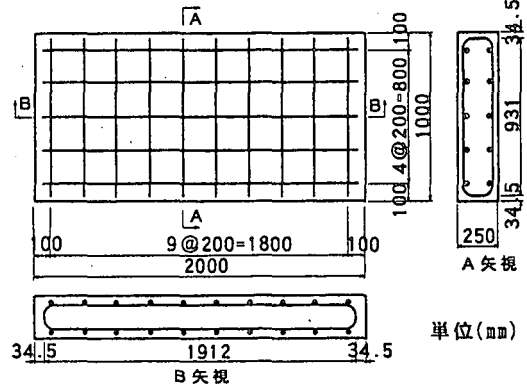


図-2 供試体の構造

2. 2 使用材料の性質

JISに基づく引張試験の結果、使用した鉄筋の降伏強度は、D16で36.0kgf/mm²、D19で36.6kgf/mm²、D22で38.8kgf/mm²、弾性係数はD16で 2.12×10^4 kgf/mm²、D19とD22で 2.08×10^4 kgf/mm²であった。使用した鋼板の実測厚さは5.80mm、降伏強度は32.6kgf/mm²、弾性係数は 2.11×10^4 kgf/mm²、ポアソン比は0.28であった。

コンクリートの水セメント比は60%、粗骨材の最大寸法は20mmとした。セメントとして、早強ポルトランドセメントを使用した。細骨材として、比重2.60、粗粒率2.65の砂を使用した。粗骨材として、比重2.70、実積率61.0の碎石を使用した。載荷実験は材齢87日から115日の間に行った。供試体と同一条件で養生した直径10cm高さ20cmの円柱管理供試体の強度試験の結果、圧縮強度は363kgf/cm²、引張強度は29.7kgf/cm²、弾性係数は 3.30×10^5 kgf/cm²、ポアソン比は0.20であった。

2. 3 載荷方法

図-3に載荷装置の概要を示す。供試体にP C鋼棒で取り付けけた鋼製載荷治具を介して、供試体の対角位置の2点で支持し、他の対角位置2点で下向きに静的載荷した。

載荷には押し引き両用油圧ジャッキを使用した。供試体と載荷治具の重量によるねじりモーメントの影響を除去するため、重量の士に相当する荷重を各ジャッキで上向きに載荷した状態を初期状態とした。

図-3の正面図で、ジャッキと支点的距離は1.6mとした。供試体長手方向に x 軸を考え、荷重に1.6mを乗じた値を x 軸まわりのねじりモーメントとした。

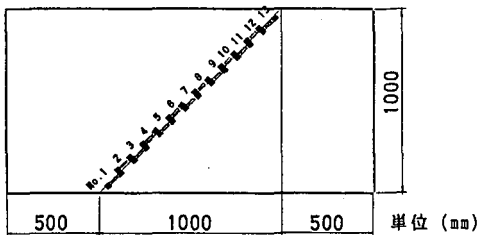
荷重増分0.5tfごとに計測データを取得し、1tfごとにひび割れ状況を観察して記録した。ジャッキの引張力が3tf, 6tf, 12tfに達した時点で除荷・再載荷を行った。荷重が最大値に達したあと、載荷計測を終了した。

2. 4 計測器の配置

変位計を図-4に示す位置に設置した。DISP-1とDISP-3の変位の差から $x = -500\text{mm}$ の位置での回転角を求め、DISP-8とDISP-10の変位の差から $x = 500\text{mm}$ の位置での回転角を求め、これらの回転角の差から、ねじれ率（単位長さあたりの回転角の変化量）を求めた。

ひずみは基本的に $x = 0$ の断面で計測した。 $x = 0$ の断面に x 方向または y 方向の鉄筋が無い場合には、その断面に最も近い鉄筋にひずみゲージを設置した。断面におけるゲージの位置を図-5に示す。

π ゲージ（ひび割れ幅計測用）は図-6に示す位置に設置した。



— π ゲージ（標点距離 100mm）

図-6 π ゲージ設置位置

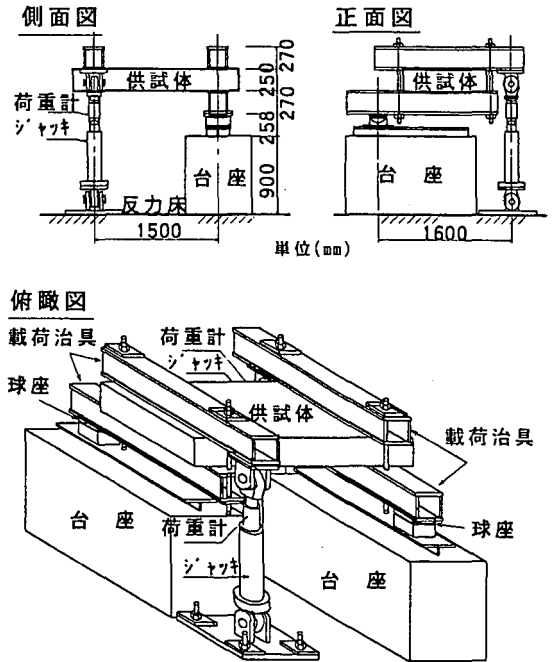


図-3 載荷装置の概要

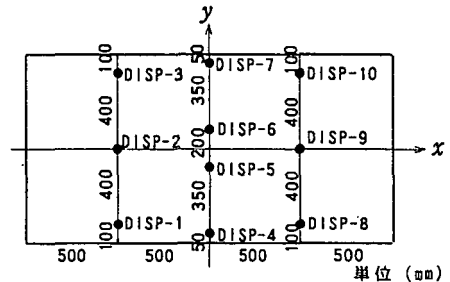
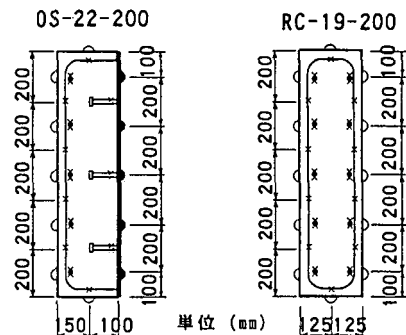


図-4 変位計設置位置



- × 鉄筋・スタッドひずみゲージ
- コンクリートひずみゲージ（3軸）
- 鋼板ひずみゲージ（3軸）

図-5 ひずみゲージ設置位置

3. 実験結果と考察

3. 1 初期剛性とひび割れの発生

供試体OS-22-200と供試体RC-19-150の载荷初期段階でのねじりモーメントとねじれ率の関係を図-7に示す。両者の関係を直線で近似して、その勾配を初期ねじり剛性と定義する。オープンサンドイッチ供試体9体の初期ねじり剛性の平均値は116($\text{tfm}^2/\text{度}$)、RC供試体3体の平均値は74($\text{tfm}^2/\text{度}$)であった。すなわち厚さ250mmのコンクリート板の片側に、厚さ5.8mmの鋼板を合成することにより、初期ねじり剛性が1.57倍になった。

このようにオープンサンドイッチ供試体では、RC供試体と比較して初期ねじり剛性が高かった。しかし、表-1に示すように、ひび割れ発生ねじりモーメントには差が見られなかった。これは、定性的には以下のように説明可能である。

図-8に示すように、オープンサンドイッチでは、せん断剛性の非対称性により、コンクリート表面のせん断ひずみが鋼板のせん断ひずみより大きい。一方RCでは両面のせん断ひずみがほぼ同一である。一般にねじれ率は板厚方向のせん断ひずみの変化率に等しい。したがって同一のねじれ率でのコンクリート表面のひずみは、オープンサンドイッチの方がRCよりも大きい。すなわちオープンサンドイッチでは、ねじりモーメントに対するねじれ率はRCより小さいが、ねじれ率に対するコンクリート表面ひずみがRCより大きい。この結果、ひび割れ発生ねじりモーメントがRCとほとんど変わらない。

図-9に、オープンサンドイッチ供試体とRC供試体の上下両面のせん断ひずみの比の一例を示す。RCでは両面のひずみの大きさがほぼ等しかった。一方オープンサンドイッチでは、コンクリート表面のひずみの、鋼板表面のひずみに対する比が、ねじりモーメントの増大とともに増大した。

3. 2 ひび割れ幅

鉄筋間隔の異なる2体のオープンサンドイッチ供試体の、終局時の上面のひび割れパターンを図-10に示す。ひび割れとx軸のなす角度は、ほぼ45度であった。終局時にはコンクリートに圧壊が生じた。鉄筋間隔が小さい方が、ひび割れ本数が多く、ひび割れ間隔が小さかった。

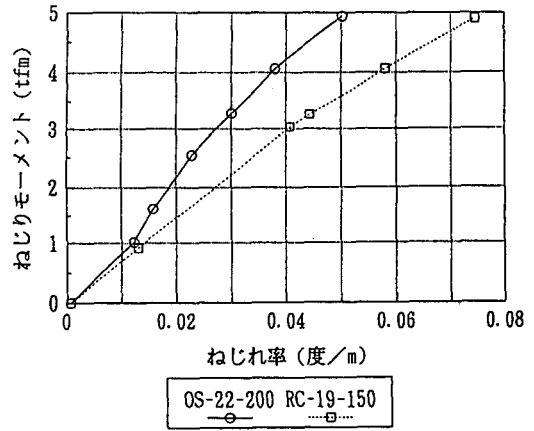


図-7 初期段階でのねじりモーメントとねじれ率

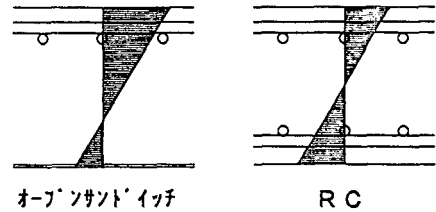


図-8 面内せん断ひずみの分布

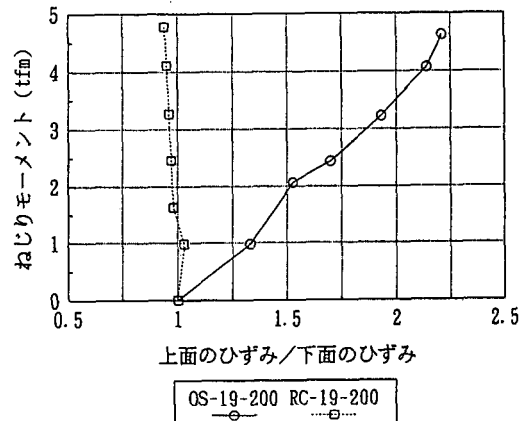


図-9 供試体上下面でのせん断ひずみの比

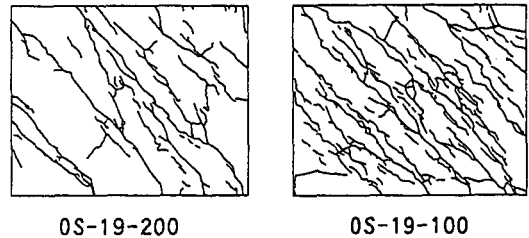


図-10 終局時のひび割れパターン

鉄筋間隔の異なる各3体のオープンサンドイッチ供試体とRC供試体について、発生したひび割れの幅の平均値と、ねじれ率の関係を図-11に示す。

オープンサンドイッチ供試体、RC供試体ともに、鉄筋間隔が小さい程、同一ねじれ率における平均ひび割れ幅が小さく、ひび割れ分散性が良好であった。また、鉄筋の径と間隔が同一であれば、オープンサンドイッチの方が、RC供試体よりも、平均ひび割れ幅が大きい。これは図-8に示したように、同一ねじれ率でのコンクリート表面のひずみは、オープンサンドイッチの方がRCよりも大きいためである。

3. 3 鋼材の降伏と最大ねじりモーメント

いずれの供試体でも鉄筋は降伏したが、鋼板とスタッドは降伏しなかった。鋼板のせん断ひずみ(角ひずみの $\pm$)の最大値は 940×10^{-6} 、スタッドのひずみの最大値は 970×10^{-6} であった。また目視観察した限りでは、鋼板とコンクリートのずれや剥離は生じていなかった。

供試体OS-19-200と供試体RC-19-200の、終局時までのねじりモーメントとねじれ率の関係を、図-12に示す。なお、図では除荷・再載荷の過程は省略した。ひび割れ発生後、ねじり剛性は急減した。鉄筋降伏時の割線ねじり剛性は、オープンサンドイッチ供試体9体の平均値で $12.5(\text{tfm}^2/\text{度})$ (初期ねじり剛性の11%)、RC供試体3体の平均値で $9.3(\text{tfm}^2/\text{度})$ (初期ねじり剛性の13%)であった。

鉄筋降伏時のねじりモーメントは、両供試体でほぼ同一であった。最大ねじりモーメントはオープンサンドイッチ供試体の方が大きく、終局時のねじれ率はほぼ同一であった。

図-13は、全供試体について、鋼材断面積比と降伏ねじりモーメントの関係を示したものである。鋼材断面積比は、図-14のように定義した。オープンサンドイッチ供試体は、RC供試体よりも鋼材断面積比が大きいが、降伏ねじりモーメントはRC供試体と同程度であった。

図-15に鉄筋比と降伏ねじりモーメントの関係、図-16に鉄筋比と最大ねじりモーメントの関係を示す。図-15から、オープンサンドイッチ供試体の降伏ねじりモーメントは、コンクリート側の鉄筋比に支配され、同一鉄筋比のRC供試体の降伏ねじりモ

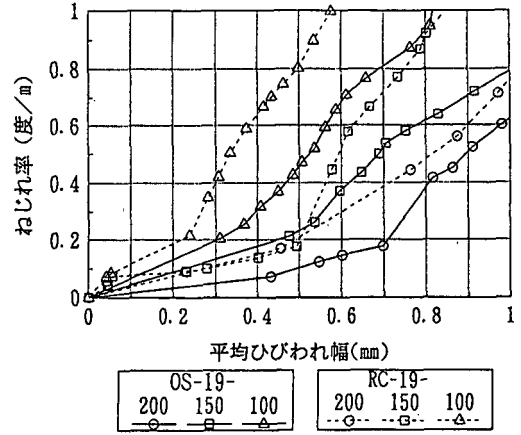


図-11 ねじれ率と平均ひび割れ幅の関係

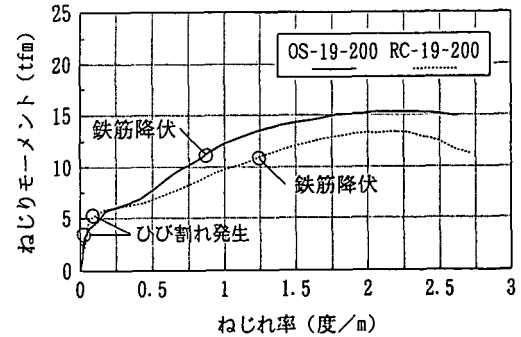


図-12 ねじりモーメントとねじれ率の関係

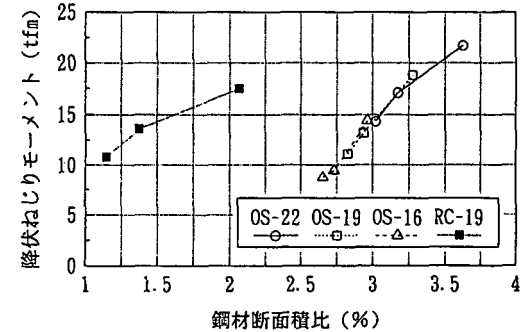


図-13 鋼材断面積比と降伏ねじりモーメント

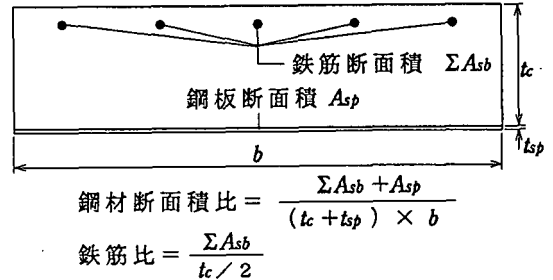


図-14 鋼材断面積比と鉄筋比の定義

ーメントと同程度であった。また、鉄筋径の影響は無かった。一方、図-16から、鉄筋比が同じでも、鉄筋径が小さい方が最大ねじりモーメントが大きかった。これは鉄筋径が小さい方が、前述したようにひび割れ分散性が優れていることと関係している可能性がある。また、鉄筋比と鉄筋径が同一のオープンサンドイッチとRCでは、オープンサンドイッチの方が、最大ねじりモーメントが10～15%大きかった。

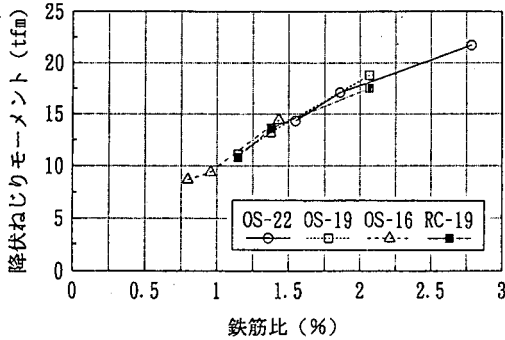


図-15 鉄筋比と降伏ねじりモーメントの関係

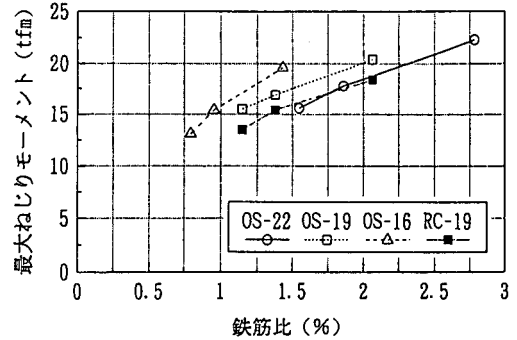


図-16 鉄筋比と最大ねじりモーメントの関係

4. まとめ

港湾用ケーソンに用いられる鋼・コンクリート合成オープンサンドイッチ板部材の供試体と、RC供試体のねじり載荷実験を行った結果、以下の結論を得た。

(1) 初期剛性とひび割れの発生について

オープンサンドイッチ供試体の初期ねじり剛性は、RC供試体の1.57倍であった。しかし、オープンサンドイッチ供試体では、せん断剛性の非対称性のため、コンクリート表面のせん断ひずみが大きくなり、ひび割れ発生ねじりモーメントはRC供試体と同程度であった。

(2) ひび割れ幅について

鉄筋間隔が小さい程、同一ねじれ率における平均ひび割れ幅が小さく、ひび割れ分散性が良好であった。また、オープンサンドイッチ供試体の方が、RC供試体よりも同一ねじれ率における平均ひび割れ幅が大きかった。

(3) 鋼材の降伏と最大ねじりモーメントについて

ひび割れ発生後、ねじり剛性が急減し、鉄筋降伏時の割線剛性は初期剛性の11～13%であった。いずれの供試体でも鉄筋が降伏したあと、終局時にはコンクリートに圧壊が生じた。オープンサンドイッチ供試体の鋼板とスタッドは降伏しなかった。オープンサンドイッチ供試体の鉄筋降伏ねじりモーメントは、コンクリート側の鉄筋比に支配され、同一鉄筋比のRC供試体の降伏ねじりモーメントと同程度であった。また、鉄筋径の影響は無かった。最大ねじりモーメントについては、同一鉄筋比では鉄筋径が小さい方が大きく、同一鉄筋比、同一鉄筋径では、オープンサンドイッチ供試体の方が、RC供試体よりも10～15%大きかった。

5. あとがき

今回報告した実験結果について、修正圧縮場理論⁴⁾を応用した数値シミュレーションとの比較を今後行う予定である。また今回の報告からは除外したが、サンドイッチ板供試体についても実験を行った。これらの解析および実験結果については、別途報告することとしたい。

参考文献

- 1) 土木学会：平成3年版コンクリート標準示方書〔設計編〕、pp.69-79、1991.9
- 2) Peter Marti and Keith Kong : Response of Reinforced Concrete Slab Elements to Torsion, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.113, No.5, pp.976-993, May, 1987
- 3) 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、1991.3
- 4) Frank J. Vecchio and Michael P. Collins : The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, March-April 1986, pp.219-231