

論文

[2001] 鋼・コンクリートハイブリッド構造のL形接合部の力学特性

正会員 ○ 横田 弘 (運輸省港湾技術研究所構造部)

正会員 清宮 理 (運輸省港湾技術研究所構造部)

1. はじめに

鋼材とコンクリートとを合成したハイブリッド構造は、両材料のそれぞれの長所を生かし、短所を補い合う構造様式として種々の構造物へ採用されている。防波堤ケーソンや沈埋トンネルなどの港湾構造物は、従来鉄筋コンクリート構造で建造が行われてきたが、これらの構造物へもハイブリッド構造の採用が進められている。港湾構造物に採用が検討されているハイブリッド構造の形態として図-1に示すような2種類の構造が考えられる。すなわち、鋼板を部材の片縁のみに設けたオープンサンドイッチ構造と鋼板を部材の面縁に設けたサンドイッチ構造である。

これらのハイブリッド構造の採用にあたっては、部材の力学特性や耐久性などを十分に把握して、海洋環境を反映した設計手法を整備していく必要がある。ハイブリッド構造要素の静的荷重下および繰返し荷重下での基本的な力学特性^{1,2)}は既に明らかにされている。これらの検討に引き続き、実構造物に存在する部材の接合部の力学特性を把握し、設計手法を検討する必要がある。本論文では、ハイブリッド構造での部材の接合部³⁾の内、L形接合部(隅角部)の力学特性を把握するために載荷試験を行ったので、その結果を述べる。

2. 載荷試験の方法

(1) 試験体の構造

試験体は、オープンサンドイッチ構造およびサンドイッチ構造の接合部をモデル化して、図-2に示すL形接合構造(隅角部)とした。試験体は、オープンサンドイッチ構造(L0)が2種類とサンドイッチ構造(LS)が3種類の合計5種類、総数10体である。基本断面寸法はすべての試験体とも同一で、過去に行ったはりの載荷試験¹⁾を参考にして、幅25cm、高さ25cm、部材長さ87.5cmとした。鋼板は板厚6mmのものを使用した。載荷点となる試験体端部には、板厚32mmの鋼板を配置するとともに、長スタッド(D16、長さ250mm)を用いて補強した。

L0試験体では、上縁より50mmの位置に直径19mmの異形鉄筋2本を配筋した。この鉄筋は、接合部では曲げ半径20cmで加工して配置した。また、定着を完全にするため、端部の鋼板に補強を施して溶接した。接合部の補強筋には、直径16mmの異形鉄筋を用いた。さらに、せん断補強として、直径16mmの異形鉄筋をスターラップ状に加工し、25cm間隔に鋼板に溶接して用いた。鋼板とコンクリートとの合成には辺長50mm、肉厚6mmの山形鋼を25cm間隔ですみ肉溶接して用いた。

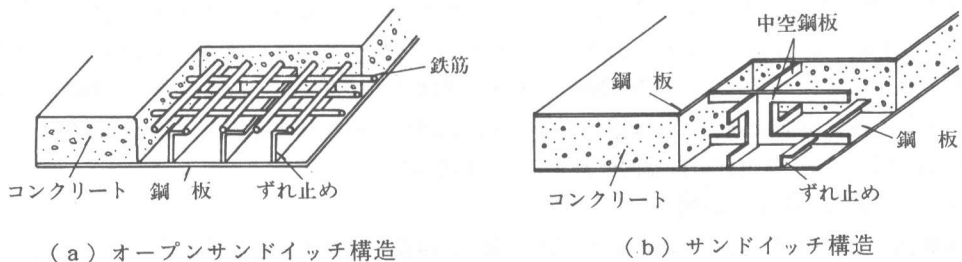


図-1 ハイブリッド構造の概要

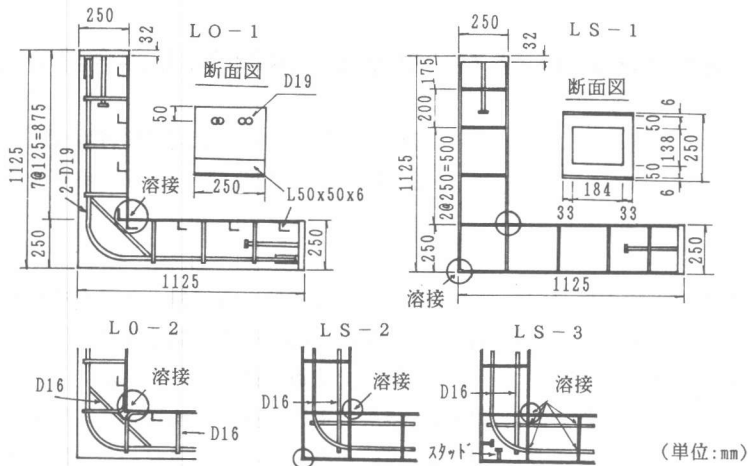


図-2 試験体の構造および鋼材配置

表-1 鋼材の機械的性質

種類	降伏強度 kgf/mm ²	引張強度 kgf/mm ²	弾性係数 kgf/mm ²	伸び %
鋼板	31.3	43.5	2.04x10 ⁴	28.5
鉄筋D16	45.3	65.2	1.91x10 ⁴	17.4
鉄筋D19	43.9	63.9	—	19.4
スタッド	39.8*	51.1	—	32.2

*)スタッドは0.2%耐力

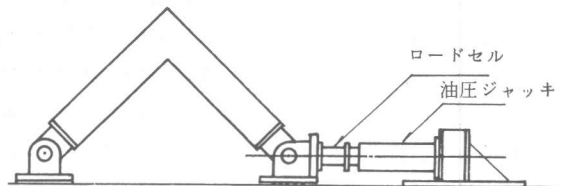


図-3 荷荷の状況(正曲げ時)

LS試験体では、板厚6mmの鋼板をL0試験体でのせん断補強鉄筋と有効せん断抵抗面積が等しくなるように加工し、鋼板にすみ肉溶接して、ずれ止めとせん断補強に用いた。

(2) 接合部の構造

今回の検討では、L形接合部の基本的な力学特性を調べることを目的としているので、ハンチは設けず、簡易な補強を施したものを試験の対象とした。各試験体での接合部の鋼材配置の詳細を図-2に示している。オープンサンドイッチ構造では、L0-1が基本タイプで、L0-2はL0-1に加えて、隅角部にスターラップを溶接した構造である。一方、サンドイッチ構造では、LS-1が基本タイプで、LS-2はLS-1に加えて、隅角部を鉄筋(SD16)で補強した構造、LS-3はLS-2に加えて、隅角部にスタッド(直径16mm、長さ70mm)を設けた構造である。

(3) 使用材料

試験体製作に使用したコンクリートの材料は、セメントが普通ポルトランドセメント、骨材が最大寸法20mmの碎石および砕砂である。コンクリートの配合は、水・セメント比が0.44、細骨材率が0.41である。コンクリート打設時のスランプ値は8cmであった。荷荷試験時に測定したコンクリートの圧縮強度は353~375kgf/cm²、引張強度は27.5~32.9kgf/cm²、曲げ強度は37.2~50.7kgf/cm²であった。各鋼材の機械的性質を表-1に示す。

(4) 荷荷方法および計測

試験体への荷荷は、図-3に示すように、試験体端部に設けた荷荷治具を介して、油圧ジャッキと鋼棒により荷荷した。その際、接合部に負もしくは正の曲げが作用するようにした。負曲げ

は試験体の内縁に引張応力が、正曲げは試験体の外縁に引張応力がそれぞれ発生する曲げである。載荷は、鉄筋降伏時の載荷点の変位量を基に繰返し行った。鉄筋降伏時の変位量の10倍を超えても耐荷力の低下が認められない場合は、その時点で載荷を中止した。

試験時の計測は、試験体載荷点での変位量、鉄筋、コンクリートおよび鋼材に生じるひずみ量およびコンクリートのひびわれ性状に関して行った。試験体の変位は変位計で、鋼材のひずみ量は測定長3または5mmの、コンクリートのひずみ量は測定長30mmの電気抵抗線式ひずみゲージで測定した。

3. 接合部の力学特性

(1) 破壊の形態と終局荷重

各試験体での試験結果の概要を表-2に示す。また、図-4に試験終了時のひびわれ発生状況を示す。以下で特記するものを除き、いずれの試験体でも鋼板の座屈や局部変形、コンクリートの圧壊などは認められなかった。図-5にLS-2での荷重と載荷点の変位との関係を示す。

①負曲げ時

L0-1：接合部のずれ止め先端より水平方向に初期ひびわれが発生し、荷重 1.2tfで発生した主鉄筋沿いのひびわれがこれに連結して終局に至った。この際、接合部のずれ止めとコンクリートとの剝離が顕著になったが、鋼材は降伏に至らなかった。

L0-2：接合部から鉛直方向に初期ひびわれが発生し、補強鉄筋が降伏した。その後、接合部のスターラップが降伏した時点で主鉄筋沿いにひびわれが発生し、以後荷重の増加は小さくなった。L0-1と比較しても、このスターラップが鋼板の定着にある程度有効であったことが認められた。

表-2 試験結果の一覧

種類	曲げ方向	ひびわれ荷重(tf)	降伏荷重(tf)	降伏位置	最大荷重(tf)
L0-1	負	0.35	—*)	—	1.19
	正	1.85	4.09	主鉄筋	8.40
L0-2	負	0.80	2.51	補強筋	3.83
	正	1.60	4.31	主鉄筋	7.82
LS-1	負	…**)	3.37	中空鋼板	6.44
	正	…	9.23	鋼板	10.80
LS-2	負	…	4.70	中空鋼板	6.96
	正	…	7.69	円弧筋	14.01
LS-3	負	…	5.14	中空鋼板	6.71
	正	…	7.45	円弧筋	13.86

*)降伏せず ***)ひびわれ時期不詳

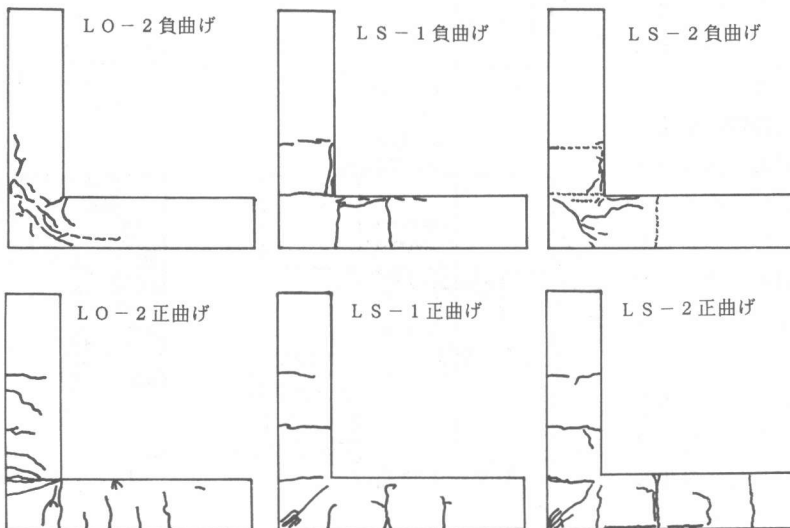


図-4 終局時のひびわれ発生状況

LS-1：接合部の中空鋼板が降伏し、荷重4 tf程度で荷重-変位曲線の勾配が小さくなった。荷重6 tf程度でこの中空鋼板とコンクリートとが剝離した後、荷重の上昇勾配は緩やかになり、明確な破壊は生じなかった。接合部周辺の鋼板とコンクリートとの間の剝離が顕著に認められた。コンクリートにはひびわれがほとんど発生しなかった。

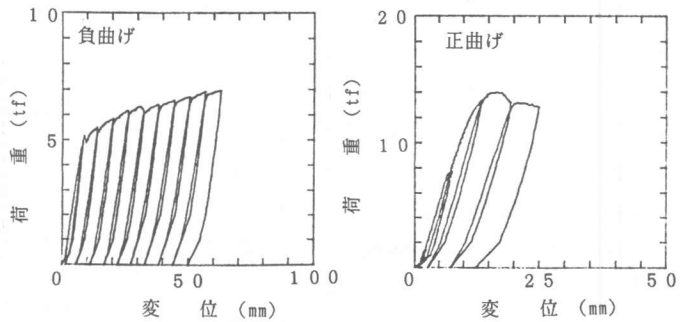


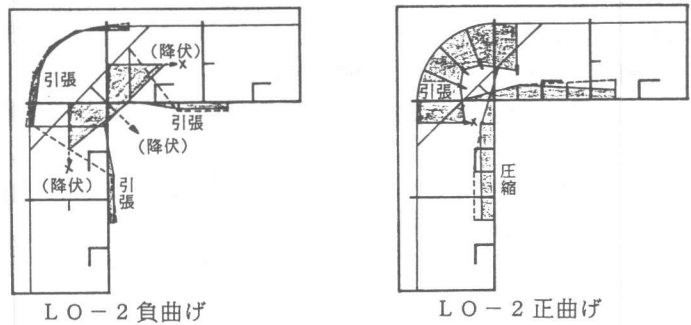
図-5 荷重と載荷点の変位との関係 (LS-2)

LS-2およびLS-3：接合部の中空鋼板が降伏した後、接合部のコンクリートに水平方向のひびわれが生じた。これ以後、荷重-変位曲線の勾配がほとんど水平に近くなり、明確な破壊に至らなかった。接合部周辺の鋼板とコンクリートとの剝離が認められた。補強筋の存在で、接合部内のコンクリートにかなり大きなひびわれが発生した。

②正曲げ時

L0-1：主鉄筋が降伏した後、荷重5.40tfで接合部上縁より鉛直方向にひびわれが発生した。荷重6.7tf程度で荷重-変位曲線の勾配が減少し、明確な破壊に至らなかった。コンクリートの曲げひびわれが顕著であった。

L0-2：主鉄筋が降伏した後、荷重5.90tfで接合部内にひびわれが発生したが、L0-1のような荷重の低下はなかった。荷重6~7tfで荷重-変位曲線の勾配が小さくなった。最終状態は、L0-1とほぼ同様であった。



LS-1：引張鋼板が降伏した後、最大荷重10.8tfで接合部のコンクリートに鉛直方向にひびわれが発生して荷重が低下した。以後、荷重-変位曲線が負勾配に転じ、L形の頂点付近のコンクリートに圧壊が認められ終局に至った。ひびわれの発生は非常に少なかった。

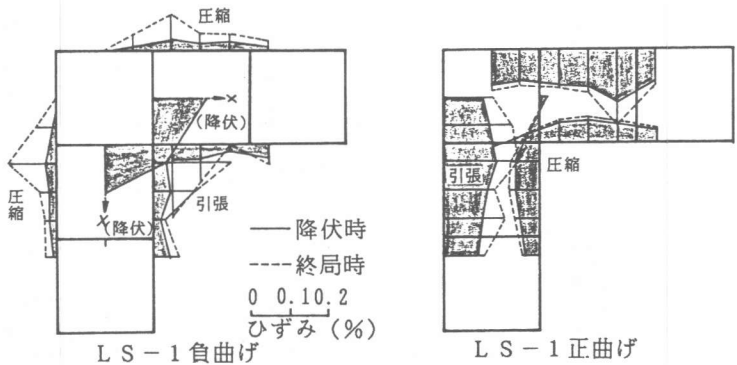


図-6 鋼材のひずみ分布 (L0-2およびLS-1)

LS-2およびLS-3：接合

部に鉛直方向のひびわれが発生すると同時に、円弧形の補強鉄筋が降伏した。その後も荷重はほぼ同じ勾配で増加していくが、14tf程度で頭打ちとなり、その後負勾配になった。終局時の状態は、LS-1とほぼ同様であった。

(2) 補強鋼材のひずみ

図-6にLS-1およびL0-2での鋼材降伏時および終局時付近での鋼材のひずみ分布を示す。他の試験体でもそれぞれ同様のひずみ分布が得られた。L0-2では、負曲げ時には、接合部のせん断補強筋および斜め補強筋のみに大きな引張ひずみが発生した。また、接合部近傍の鋼板のひずみは剝離現象に伴い、大きな圧縮ひずみが発生した。正曲げ時は、接合部内の主鉄筋に大きなひずみが発生した。鋼板の圧縮ひずみ量は、ほぼ等しい値を示した。

LS試験体では、負曲げ時には、接合部の中空鋼板が早い時期から降伏に達する大きなひずみを示し、引張鋼板にも接合部近傍で大きなひずみ量が得られなかった。また、補強鉄筋には大きなひずみが発生しなかった。圧縮側の鋼板には大きなひずみが発生しなかった。一方、正曲げ時には、引張側の鋼板およびに、補強鉄筋の円弧部で大きなひずみが認められた。また、鋼板の圧縮ひずみは、接合部近傍を除き、ほぼ同程度の値を示した。同様に、引張側の鋼板に生じた引張りひずみもほとんど一定値を示し、引張ストラットの形成が行われていたことを示した。しかし、中空鋼板のひずみは小さかった。

4. 接合部の設計法

ハイブリッド構造の接合部の設計法については、これまであまり検討されておらず、オープンサンドイッチ構造に関しての報告⁴⁾がなされているにすぎない。この成果と今回の試験結果を基に、接合部の設計法および補強方法に関する考察を行う。

ハイブリッド構造物の接合部に関しては、2種類の設計法が考えられる。一つは、接合部を剛域とみなせるように補強し、既往の曲げ耐力の設計式を適用して、部材の設計を行う方法である。他方は、接合部自体の耐力を評価し、部材と接合部を一体化して設計する方法である。今回は、前者の考え方を基に考察を行った。つまり、剛域の確保に必要な鋼材量の算定方法を検討するものである。

(1) 負曲げを受ける場合

L0-1では、鋼板には引張応力が発生するにもかかわらず、鋼板を無視した場合の終局荷重の計算値が1.00tfとなり、試験結果と良く一致した。同様の仮定の下で、L0-2での終局荷重の試験結果は計算値の約4倍になった。しかし、両者とも鋼板が完全合成されていると考えて求めた終局荷重の計算値18.4tfに比べて試験結果はかなり小さく、鋼板が有効に働いていない結果となった。このことから、引張側の鋼板の定着を確実にする必要があり、L0-2のような補強をかなり密に行わなければならないと言える。この場合の計算法については以下で述べる。LS試験体では、鋼板が完全合成であると仮定して得られた計算値13.5tfに比べて、半分程度の値しか試験では示さなかつ

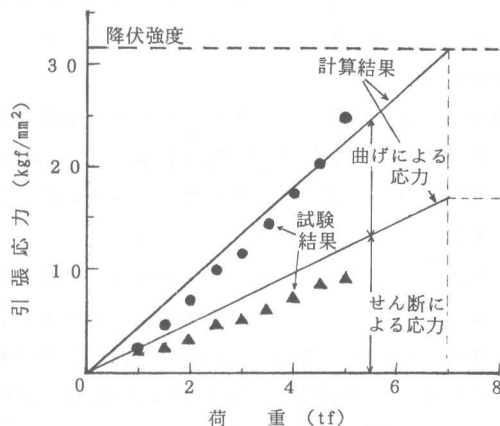


図-7 中空鋼板に生じるひずみ

た。これは、接合部の破壊が中空鋼板に支配されたためである。

図-7にLS-1試験体の接合部での中空鋼板に発生する応力の計算結果および試験結果を示す。ここで、計算結果は曲げモーメントによって発生する引張応力と接合面でのせん断力によって発生する引張応力の和とした。すなわち、接合部の中空鋼板が曲げとせん断によって引き抜かれる現象を、それぞれの応力の和として考えた。曲げモーメントによる引張応力は、平面保持の仮定の下で、圧縮鋼板とコンクリートの引張強度を無視して求めた。また、せん断力による引張応力は、トラス理論によって求めた。曲げによる応力の試験結果は、接合部近傍の引張鋼板の実測ひずみに鋼材の弾性係数を乗じて求めたものである。その結果、中空鋼板が降伏応力に達する荷重は約7tfとなり、試験結果と良く一致した。また、曲げによる応力とせん断による応力（合応力から曲げ分を減じたもの）のそれぞれに関しても、試験結果と計算結果とが良く一致した。接合部では、曲げ終局耐力に見合う接合部のせん断補強（鋼板の定着）をする必要があり、この計算法で設計ができることがわかった。

(2) 正曲げを受ける場合

L0試験体では、前述のように、引張側の鉄筋が降伏して終局に至ったため、終局曲げ荷重の計算値7.13tfと試験値とは良い一致を示した。この場合には、圧縮側の鋼板がほとんど耐荷力に寄与しない結果となったが、定着を確実にすることが耐荷力の上昇につながると思われる。LS試験体でも同様に、引張側鋼板の降伏で終局に至ったにもかかわらず、計算値15.3tfに比べて試験値は2～3割程度小さな値を示した。

5. まとめ

ハイブリッド構造のL形接合部を対象とした静的載荷試験の結果、以下のことが得られた。

- ① 負曲げを受ける場合には、接合部のずれ止めあるいはせん断補強鉄筋の降伏で終局に至った。終局耐力は、これらの鋼材に発生する曲げ引張応力とせん断引張応力との和で算定できた。
- ② 正曲げを受ける場合には、引張側の鉄筋あるいは鋼板が降伏して終局に達した。この場合、通常の鉄筋コンクリートの曲げ解析で終局荷重を算定することができた。

今回の試験では、L形接合部の基本的力学特性を把握し、設計の考え方を整理した。この結果に基づき補強を施した接合構造の載荷試験を実施して、より正確な設計の考え方を検討することになっている。なお、本研究は、特別研究「ハイブリッド海洋構造物の設計等に関する研究」の一環として実施されたものである。

参考文献

- 1)横田 弘, 清宮 理: 鋼-コンクリート合成はりのせん断補強鉄筋が終局耐力に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集 9-2, 1987年, pp 531-536
- 2)横田 弘, 清宮 理: 鋼・コンクリート合成ばりの疲労特性, コンクリート工学年次論文報告集11-2, 1989年, pp 57-62
- 3)清宮 理, 横田 弘: 鋼・コンクリート合成構造の接合部の力学特性, 第2回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, 1989年, pp 75-80
- 4)Rungrojsaratis V and Ueda T: DESIGN METHOD FOR CORNER CONNECTION BETWEEN SANDWICH AND OPEN-SANDWICH COMPOSITE MEMBERS SUBJECTED TO BENDING MOMENT, 土木学会論文集 No 402/V-10, 1989年2月, pp 169-177