論文　孔あき鋼板リブをずれ止めに用いた合成はりの正負曲げ性状

岩波　光保[*1]・永田　淳[*2]・横田　弘[*3]

要旨：近年，港湾のケーソン式構造物に対する施工の省力化の要求が高まっている。これに対し，著者らは孔あき鋼板をずれ止めに用いた新形式のハイブリッドケーソンを提案した。本研究では，ケーソンを構成する孔あき鋼板リブを用いた合成版を対象としたはり試験体の正負曲げ載荷試験を行った。試験結果より，合成はりの耐荷力，剛性およびひび割れ性状を明らかにし，最適な設計手法を検討した。

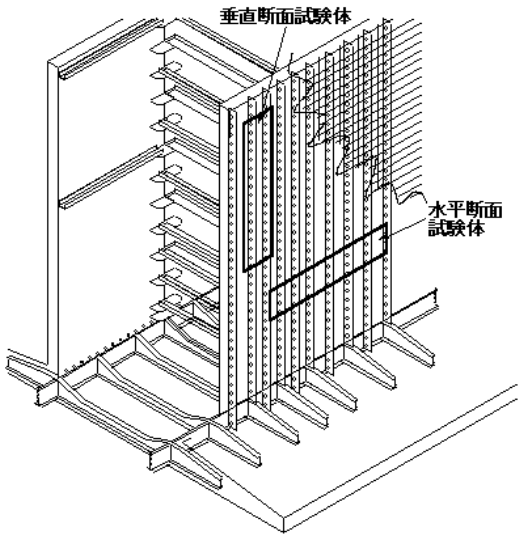
キーワード：ハイブリッドケーソン，孔あき鋼板リブ，耐荷力，剛性，ひび割れ幅

1. はじめに

近年，港湾のケーソン式構造物に，鋼板とコンクリートの合成部材を用いた合成版式ケーソン（ハイブリッドケーソン）が採用される事例が増えている。この場合，フーチングを長くでき，かつ，ケーソン幅を縮小できることから，経済的で合理的な構造が実現される。本構造においては，鋼板とコンクリートを確実に合成させることが重要であり，このために一般にスタッドがずれ止めとして用いられる。

これに対し，著者らは施工の省力化を図るため，道路橋の合成床版で実績のある孔あき鋼板リブ（以下，リブと呼ぶ）をずれ止めとして用いることを提案した[1)]。リブを用いることで，スタッドの場合と比較して，ずれ止めと鋼板の溶接が省力化されるほか，鋼板の座屈防止のための補剛材が不要となる。

しかし，ケーソンと道路橋床版では目標とする性能や作用する外力の種類および大きさが異なることから，道路橋床版の設計手法をケーソンにそのまま適用することはできない。特に，ケーソン壁の場合，必ずしも鋼板が引張側になる，いわゆる正曲げが発生するだけでなく，作用外力の条件によっては,鋼板が圧縮側となる，いわゆる負曲げが発生することもあり，このような荷重下における力学挙動を明らかにしておく必要がある。



図－１　ハイブリッドケーソンの構造概要

本稿では，リブを用いた合成部材の正負曲げ性状について，合成はりの載荷試験結果をもとに考察した。また，ケーソンの設計照査事項である耐荷力（終局限界状態），ひび割れ幅（使用限界状態）に着目し，ケーソン用合成部材としての合理的な設計手法を検討した。

2. 実験概要

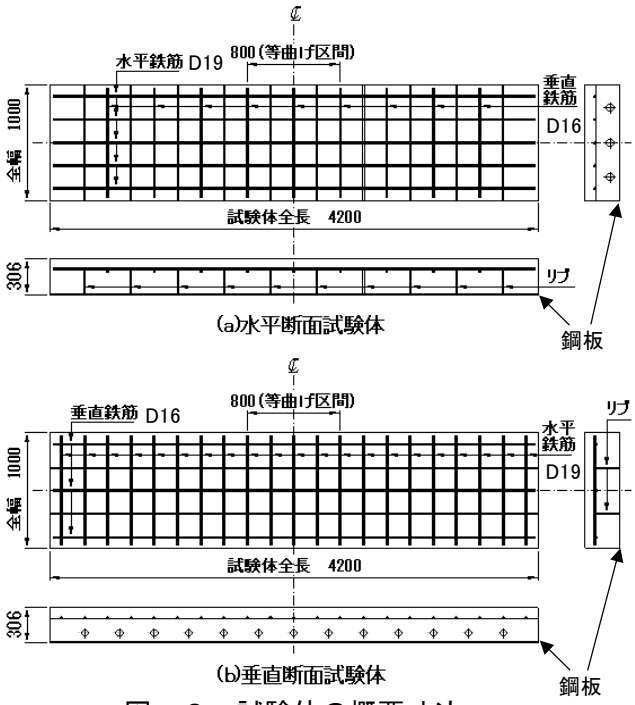
2.1　試験体

試験体は，**図－１**のようにケーソン壁を垂直方向に切り出したはり（以下，垂直断面試験体と呼ぶ）と水平方向に切り出したはり（以下，

*1　（独）港湾空港技術研究所 構造強度研究室 主任研究官　工博　（正会員）
*2　（株）横河ブリッジ 技術本部 技術研究所　工修
*3　（独）港湾空港技術研究所 構造強度研究室長　工博　（正会員）

表－１　試験体の諸元

試験体名	断面方向	鉄筋		孔あき鋼板リブ			コンクリート厚	鋼板厚
		径×間隔	鉄筋比	幅×厚さ	間隔	孔間隔		
		mm	%	mm	mm	mm	mm	mm
HB1X	水平	D19×200	0.48	205×10	400	300	300	6
HB1Y	垂直	D16×400	0.17					
HB2X	水平	D19×200	0.48		500			
HB2Y	垂直	D16×500	0.13					
HB3Y	垂直	D16×400	0.17		400	500		
試設計断面	水平	D19×200	0.48	205×10	500	300	300	6
	垂直	D16×500	0.13					



図－２　試験体の概要寸法

表－２　配合条件

コンクリートの種類	呼び強度	スランプ	粗骨材最大寸法	セメントの種類
	N/mm^2	cm	mm	
普通	27	8	20	普通ポルトランドセメント

表－３　示方配合

水セメント比	細骨材率	単位量				
		セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
%	%	kg/m3				
53.0	41.4	289	153	762	1126	0.578

※ 混和剤:AE減水剤

表－４　コンクリートの試験結果

材齢	圧縮強度	ヤング係数	養生方法
日	N/mm^2	kN/mm^2	
7	26.4	－	標準
28	35.1	－	標準
51	31.0	25.9	現場
109	38.4	25.8	現場

表－５　使用鋼材の機械的性質

種 類	規 格	寸 法	降伏強度	引張強度	伸 び
		mm	N/mm^2	N/mm^2	%
底鋼板	SS400	t=6	349	442	30
リブ	SS400	t=10	297	424	33
鉄 筋	SD345	D16	326	460	35
		D19	331	465	32

水平断面試験体と呼ぶ）とした。垂直断面試験体では，リブがはり軸方向に配置され，水平断面試験体では，リブがはり軸直角方向に配置されている。リブと鋼板は，すみ肉溶接により接合した。試験体の基本的な構造諸元は，既往の試設計[2)]に基づいて設定した。この試設計は，ハイブリッドケーソン設計マニュアル[3)]（以下，マニュアルと呼ぶ）に準拠し，さらに道路橋の合成床版の設計手法を取り入れて実施したものである。また断面の縮尺は，実構造の1/1とした。

試験体の形状・寸法を**図－２**および**表－１**に示す。試験体のパラメタは，リブの間隔およびずれ止め孔の間隔とし，リブ間隔は道路橋の場合のリブ間隔に近い400mmと500mmの2水準，ずれ止め孔の間隔はスタッドの最大間隔[3)]である300mmと，ずれ止め耐力がスタッドの場合と同程度となる500mmの2水準とした。リブ孔の直径は，60mm（道路橋では70mm）とした。

(2) 使用材料の特性

試験に使用したコンクリートの配合と材料試験結果を**表－２～４**に，用いた鋼材の機械的性質を**表－５**に示す。

2.2　載荷方法

支点間隔3700mmで単純支持した試験体に対して，容量2MNの油圧ジャッキで正曲げまたは負曲げ荷重を加えた。載荷点は，支間中央から400mm離れた2点とした。載荷ステップは，後

述する設計荷重まで載荷し，一旦除荷した後，試験体の終局まで単調に荷重を増加させた。載荷中には，荷重，試験体の鉛直変位，鋼板，リブ，鉄筋およびコンクリートのひずみ，コンクリートのひび割れ幅を計測した。なお，載荷時のコンクリートの材齢は51～109日であった。

3. 抵抗断面

リブを用いた合成はりの耐荷性能を検討するためには，各ケースでリブが曲げに対して抵抗するかどうかを適切に考慮する必要がある。ここで仮定した抵抗断面は以下のとおりである。

① RC（リブ無視）断面：コンクリートの圧縮断面，鋼板および鉄筋で抵抗している断面。

② RC（リブ考慮）断面：コンクリートの圧縮断面，鋼板，鉄筋およびリブ（垂直試験体の場合）で抵抗している断面。

水平断面試験体では，リブがはり軸直角方向に配置されているため，リブは曲げに抵抗せず，一般的なRCと同様に取り扱うことができると考えられる。一方，垂直断面試験体では，リブがはり軸方向に配置されており，リブも曲げに対する抵抗を分担すると考えられる。よって，リブによる曲げ抵抗を考慮するかどうかが耐荷性能を評価する上で重要となる。

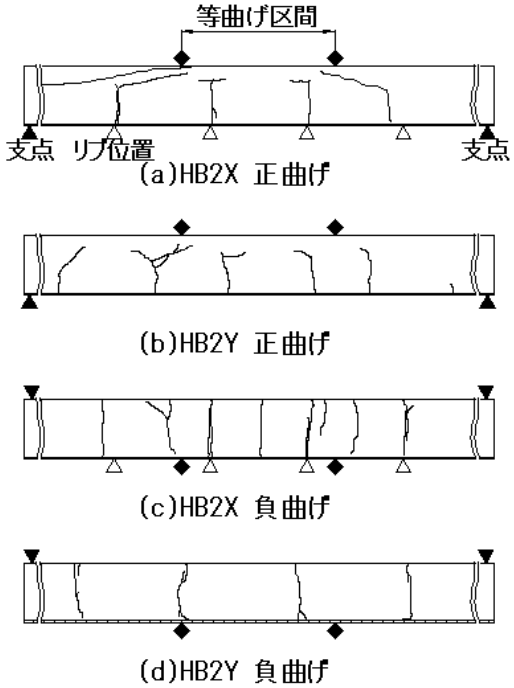
4. 実験結果と考察

4.1 ひび割れ性状と破壊の進行過程

HB2XおよびHB2Yの終局状態におけるひび割れ発生状況を**図－３**に示す。支点付近ではひび割れが発生しなかったので，図中には示していない。他の試験体も，同様の結果となった。

(1) 正曲げを受ける合成はり

水平断面試験体では，載荷試験前に自重によりリブとコンクリートの境界面にひび割れ（剥離）が発生した。載荷中は，新たなひび割れは発生せず，既存のひび割れ幅のみが漸増した。荷重が最大荷重に近づくと，ひび割れはリブ頂部から水平方向に進展し，隣り合うリブどうしを結ぶひび割れを形成し終局に至った。終局状態では，鋼板は降伏し，圧縮縁コンクリートは圧壊した。



図－３　ひび割れ発生状況

垂直断面試験体では，等曲げ区間内に間隔200～300mmでひび割れが発生し，荷重の増加とともに圧縮縁方向に進展した。ひび割れは概ね中立軸位置で止まり，その後はひび割れ幅が増大した。終局状態では鋼板が降伏したが，圧縮縁コンクリートは圧壊しなかった。

(2) 負曲げを受ける合成はり

水平断面試験体では，載荷試験前に自重によりリブ位置にひび割れが発生した。載荷開始直後に，リブとリブの中間にひび割れが発生した。荷重の増加とともにひび割れは中立軸位置まで進展し，その後はひび割れ幅が拡大した。終局状態においては引張鉄筋が降伏し，ひび割れ間隔はリブ間隔の約1/2となった。

垂直断面試験体では，曲げスパン内にひび割れが1本発生し，荷重の増加とともにひび割れ幅が拡大した。このひび割れが中立軸位置まで進展した後，新たなひび割れが発生したが，ひび割れ間隔は他のケースと比較して大きく，500～600mmとなった。この場合，ひび割れ分散性が著しく悪く，ひび割れ幅も大きかった。

表－６　載荷試験結果のまとめ

試験体	載荷方向	ひび割れ発生荷重	最大荷重（実験値）	最大荷重（計算値）		最大荷重比（実験値／計算値）		最大荷重時変位
				RC（リブ無視）	RC（リブ考慮）	RC（リブ無視）	RC（リブ考慮）	
		kN	kN	kN				mm
HB1X	正曲げ	87	480	411	－	1.17	－	15.5
	負曲げ	60	155	108	－	1.44	－	30.2
HB1Y	正曲げ	360	597	442	574	1.35	1.04	20.1
	負曲げ	60	163	41	171	3.98	0.95	48.2
HB2X	正曲げ	0	670	414	－	1.62	－	28.5
	負曲げ	76	158	108	－	1.46	－	39.1
HB2Y	正曲げ	150	496	443	577	1.12	0.86	20.1
	負曲げ	63	151	33	137	4.58	1.10	38.7
HB3Y	正曲げ	260	584	445	580	1.31	1.01	21.0
	負曲げ	60	172	41	144	4.18	1.19	35.3

4.2　耐荷性能

(1) 載荷試験による考察

載荷試験で得られた各試験体のひび割れ発生荷重，最大荷重およびそのときの支間中央変位を**表－６**に示す。同表には，抵抗断面をRC（リブ無視）断面とした場合とRC（リブ考慮）断面（垂直断面試験体のみ）とした場合の最大荷重の計算値を併せて示した。最大荷重の算出は，マニュアルを参考にして，鋼板を同断面積を有する鉄筋と置き換えて，通常のRCの場合と同様に行った。なお，HB1Xの正曲げ試験体は，鋼板が降伏する前にコンクリートのせん断破壊が生じたため，以降の検討からは除外した。このように，鋼板の降伏前にせん断破壊が生じたのは，せん断ひび割れの発生位置となり得る，はり軸直角方向リブの数が他のケースと比較して多かったためと推察される。

各パラメタと最大荷重の関係を調べると，正曲げ試験体のうち，リブ間隔が400mmのHB1YおよびHB3Yでは，実験値が計算値（RC（リブ考慮）断面）を上回ったのに対し，リブ間隔が500mmのHB2Yでは実験値が計算値（RC（リブ考慮）断面）を15%程度下回った。これは，リブ間隔が大きくなったことにより，リブによるリブ間コンクリートの拘束効果が小さくなり，リブとコンクリートの合成作用が低下したためと考えられる。また，水平断面試験体の最大荷重が計算値に比べて大きくなる傾向も見られた

表－７　設計荷重

試験体	載荷方向	設計荷重 (kN)		
		浮遊時	常時	地震時
HB1X	正曲げ	―	54.7	48.0
	負曲げ	66.7	―	―
HB1Y	正曲げ	―	84.4	124.4
	負曲げ	65.9	―	―
HB2X	正曲げ	―	54.7	48.0
	負曲げ	66.7	―	―
HB2Y	正曲げ	―	84.4	124.0
	負曲げ	65.9	―	―
HB3Y	正曲げ	―	84.4	124.0
	負曲げ	65.9	―	―

が，リブ間隔による明確な違いは認められなかった。さらに，リブ孔間隔が300mmのHB1Yと500mmのHB3Yにも明確な差違はなかった。これより，リブ間隔が正の曲げ耐力に影響する他は，リブ間隔およびリブ孔間隔が試験体の耐荷性能に及ぼす影響は小さいことが示された。

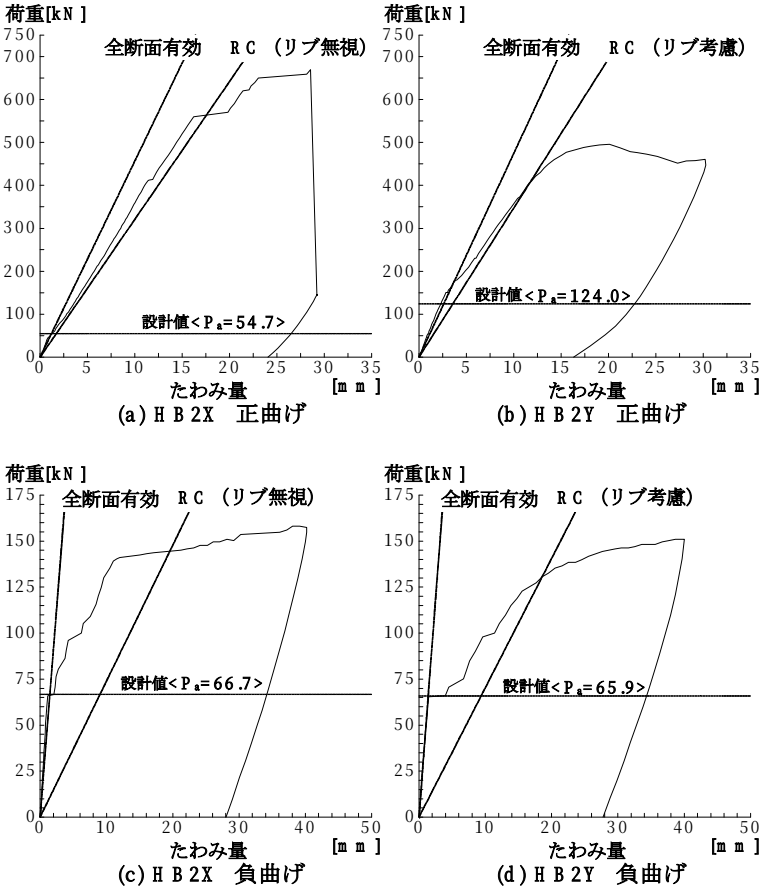
(2) 計算値との比較

水平断面試験体の最大荷重は，RC（リブ無視）断面を仮定した計算値をいずれも上回った。これより，ケーソン壁水平断面の耐荷性能はRC（リブ無視）断面を抵抗断面として照査してよいといえる。

一方，垂直断面試験体では，リブを抵抗断面に入れると，実験値が計算値（RC（リブ考慮）断面）を下回るケースがあった。これは，最大荷重時には，リブの全断面が曲げに抵抗しているとは言えず，コンクリートとの一体性が不完全であったためと考えられる。これは，リブ孔内コンクリートのひび割れやせん断・支圧破壊

に起因するものと推測される。一方，リブを抵抗断面に含めないRC（リブ無視）断面で計算すると，実験値は計算値を大きく上回り，著しく安全側の評価を与えた。特に，負曲げ試験体の最大荷重の計算値は，実験値の1/5～1/4となり，はりの耐荷性能を著しく過小評価した。

リブを抵抗断面に入れた方が経済的な断面設計が可能となるが，実際の耐荷性能はRC（リブ無視）断面による計算値とRC（リブ考慮）断面による計算値の中間にあった。実設計では，耐荷性能の計算値を正確に求めることは現状では難しい。そこで，RC（リブ考慮）断面による計算値に対する実験値の比が1を若干下回ったことをバラツキの範囲と捉えて，例えば部材係数のように，適切な部分安全係数を導入することを提案する。本研究の範囲では，部分安全係数を1.15とすれば，いずれの試験体でも安全側の計算結果を与えた。



図－４ 荷重とたわみ量の関係

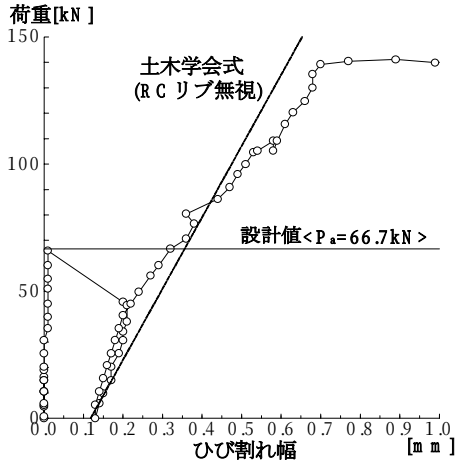
4.3 曲げ剛性に関する考察

リブを用いた合成はりの曲げ剛性を検討するため，各試験体の設計荷重作用時におけるたわみ性状を調べた。**表－７**に，試設計時の設計断面力[2)]が生じる荷重P_a（以下，設計荷重と呼ぶ）を示す。

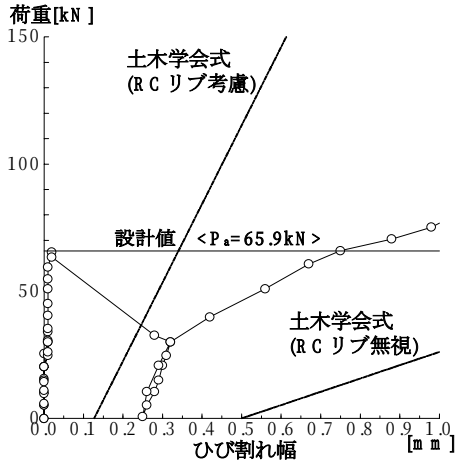
図－４に，HB2XおよびHB2Yの荷重と支間中央たわみ量の関係を示す。いずれの試験体においても，載荷初期には，実験値は全断面有効の計算値とほぼ一致した。その後，ひび割れが発生し，徐々に剛性が低下すると，HB2XではRC（リブ無視）断面，HB2YではRC（リブ考慮）断面の計算値に近くなった。これらことは，正曲げ，負曲げにかかわらず認められた。設計荷重時におけるたわみ量は，全断面有効の計算値より大きく，HB2XではRC（リブ無視）断面の計算値，HB2YではRC（リブ考慮）断面の計算値よりも小さくなった。よって，実設計上は，水平断面試験体ではRC（リブ無視）断面，垂直断面試験体ではRC（リブ考慮）断面を抵抗断面として曲げ剛性を計算してよいといえる。

4.4 ひび割れ幅に関する考察

4.1(2)でも述べたように，負曲げを受けた試験体のひび割れ幅が過大となる傾向があった。そこで，負曲げを受ける合成はりのひび割れ幅に関する検討を行った。**図－５**に，HB2XとHB2Yの負曲げ載荷試験における荷重とひび割れ幅の関係を示す。図には，コンクリート標準示方書[4)]に示された曲げひび割れ幅算定式（以下，土木学会式と呼ぶ）による計算値も併せて示した。これによれば，水平断面試験体のひび割れ幅は，抵抗断面をRC（リブ無視）断面とした計算値とよく一致した。よって，ケーソン壁水平断面のひび割れ幅照査を行う場合には，抵抗断面をRC（リブ無視）断面とすればよい。



(a)HB2X 負曲げ



(b)HB2Y 負曲げ

図－５ 荷重とひび割れ幅の関係

一方，垂直断面試験体の場合，載荷初期には抵抗断面をRC（リブ考慮）断面とした計算値より若干大きくなったが，荷重－ひび割れ幅曲線の傾きはRC（リブ考慮）断面の計算値と一致した。しかしながら，荷重が約30kNを超えるとひび割れ幅が急増し，RC（リブ無視）断面の計算値に近い挙動を示した。リブのひずみ計測結果によると，荷重が30kNの時点で，リブ孔中心位置のひずみがおおよそ150×10^{-6}となった。よって，この段階でリブ孔内のコンクリートにひび割れが発生し，リブとコンクリートの合成作用が不確実になったと考えられる。以上より，ケーソン壁垂直断面のひび割れ幅照査を行う場合は，リブ孔中心位置のひずみが150×10^{-6}を超えていなければ，RC（リブ考慮）断面を抵抗断面とすることができる。ただし，これ以上のひずみが生じている場合には，リブとコンクリートの合成が不完全である可能性があるため，抵抗断面にはRC（リブ無視）断面を用いることが望ましい。

5. 結論

リブをずれ止めに用いた合成はりの正負曲げ性状に関して，はり試験体の載荷試験結果から得られた主要な結論は以下のとおりである。

(1) 終局限界状態の照査は，適切な抵抗断面を仮定すれば,ハイブリッドケーソン設計マニュアルに準拠してよい。すなわち，鋼板を同断面積を有する鉄筋に置き換えて，通常のRCの場合と同様に検討することができる。

(2) 負曲げを受ける垂直断面試験体では，鉄筋量が少ないと,ひび割れの分散性が著しく低下し，ひび割れ幅が過大になる。

(3) 曲げ剛性は，水平断面試験体ではRC（リブ無視）断面，垂直断面試験体ではRC（リブ考慮）断面を抵抗断面として算出してよい。

(4) ひび割れ幅については，適切な抵抗断面を仮定して,土木学会式を用いて計算してよい。ただし，垂直断面試験体の場合，抵抗断面の設定に注意が必要である。

参考文献

1) 永田　淳，岩波光保，横田　弘：孔あき鋼板ジベルを用いたハイブリッドケーソン合成板の基礎的力学性状,港湾空港技術研究所資料，No.1033，2002.12

2) 渡辺豊彦，高田　寛，大塚　勝，鈴木孝幸：ハイブリッドケーソンの試設計－パワースラブ型合成部材の提案－，横河ブリッジグループ技報，No.30，pp.92-103，2001.3

3) （財）沿岸開発技術研究センター：ハイブリッドケーソン設計マニュアル，1999.6

4) （社）土木学会：2002年制定 コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，2002.12