

根入れ式鋼板セル工法

設計・施工技術資料（補足）

平成 31 年 3 月

根入れ式鋼板セル協会

はじめに

根入れ式鋼板セル工法は、あらかじめ加工された鋼製円筒体（鋼板セル）を海底地盤に打込んで中詰して柱状構造物とした後、隣接する相互の柱状構造物を円弧状の鋼板（鋼板アーチ）でつないで中詰し、護岸や岸壁などの堤体を築造する工法である。根入れ式鋼板セル工法は、堤体が地盤に根入れされるため、耐震性、止水性に優れ、大水深への適用も可能である。また、堤体を構成する鋼板セルおよび鋼板アーチは、あらかじめ工場やヤードで製作し、現地に運搬して一気に設置することができるため、急速施工にも適した工法である。

根入れ式鋼板セルの設計は、模型実験や現場観測を基にした技術を蓄積し、有識者で構成された委員会での検討と審議を経て、昭和 60 年 6 月に「根入れ式鋼板セル設計指針」として取りまとめられた。その後、平成元年 2 月発刊の「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に「根入れ鋼板セル式係船岸」が掲載されたことによって、数多く採用される工法となった。

しかしながら、最新版の「港湾の施設の技術上の基準・同解説」においては、根入れ式鋼板セルの基本的な形状寸法や鋼板セルおよび鋼板アーチの板厚に関する設計手法は記述されているものの、補剛材や施工時に安定を確保するための部材などの設計手法については記述されていない。2005 年 3 月には当協会から「根入れ式鋼板セル工法 設計・施工マニュアル」を発行しているが、そのマニュアルにおいても構造例としてアーチ継手や補剛材等の図を掲載しているものの、それらの設計手法については記述していない。補剛材などの詳細設計を実施する際、参考となる基準やマニュアル類が整備されていないのが現状である。また、根入れ式鋼板セル工法は、鋼板セルおよび鋼板アーチを海底地盤に打込んで構築する方法が一般的であるが、近年、鋼板セルおよび鋼板アーチを海底地盤に打ち込まずに設置してから埋戻す方法も採用されている。

以上のことから、詳細設計を実施する際に参考となるマニュアルを整備する必要があると考えるが、まずは現時点の知見に基づいて、設計・施工時に留意すべき事項として以下の項目について本技術資料に取りまとめることとした。

- ・ セル殻の仮置時の風対策
- ・ 施工時波浪に対するセル殻およびアーチの部材補強
- ・ アーチ継手の部材設計時の留意事項
- ・ アーチ弦長の調整
- ・ 地盤に打設しない鋼板セルの中詰材の流出防止

平成 31 年 3 月末日

根入れ式鋼板セル協会 技術部会長

目 次

1. セル殻の仮置時の風対策	1-1
2. 施工時波浪に対するセル殻およびアークの部材補強	2-1
3. アーク継手の部材設計時の留意事項	3-1
4. アーク弦長の調整	4-1
5. 地盤に打設しない鋼板セルの中詰材の流出防止	5-1

< 参考資料 >

参考資料 「鋼製円筒ケーソン設計マニュアル（案）」 （平成 9 年 3 月，（財）沿岸開発技術研究センター）抜粋	参考資料-1
---	--------

1. セル殻の仮置時の風対策

セル殻の仮置時において、仮置する場所、時期、期間等に応じてセル殻に作用する風圧力を適切に評価し、部材の安全性および転倒、滑動に対する安定性を確保できるように必要に応じて対策を講じる。

【解説】

鋼板セルは、セル殻がたわみ性に富んでいるため、製作終了後は速やかに現地に打設または設置して中詰を行い、早期に安定が確保できるように施工することを基本としている。しかしながら、事業計画等の関係から、セル殻を製作した後に長期間仮置しなければならない場合もあり、仮置中に強風にさらされることも考えられる。近年は、台風だけでなく、いわゆる爆弾低気圧と呼ばれるような急速に発達した低気圧が強風や暴風をもたらすこともあることから注意を要する。

(1) 設計風速の設定

セル製作ヤードは、通常、製作後の運搬等を考えて岸壁や護岸の背後に設けられるが、沿岸域は陸域に比べて風速が大きい。また、地形の影響によって突風率（ガストファクター）も変わることから、検討に用いる設計風速を設定する際には、製作ヤード周辺の地形等を考慮して設定する。また、近年のセルは大型化しており、高さが 30m を超えるような場合も珍しくないため、高さ方向の風速分布も考慮して検討することが望ましい。アメダス等の観測データを用いて設計風速を推算する場合は、観測点周辺の地形や観測高さを考慮する必要がある。

(2) 仮置時の配置

セル殻の仮置計画は、製作と築造のサイクルタイムや全体工程を考慮して決定するが、一般的に複数函を同時に仮置し、製作ヤードを有効に活用できるようにセル殻を近接して配置する場合が多い。しかしながら、セル殻を近接して仮置すると、図 1.1 に示すような風向で強い風が作用すると、セル間に大きな負圧が生じることがある。

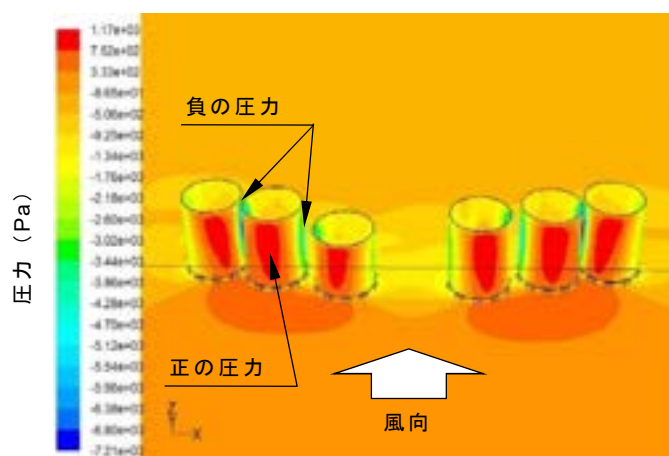


図 1.1 風圧力分布の解析事例

図 1.1 に示した解析事例では、仮置されているセル間の間隔は狭いところで 1.5m 程度となっている。この事例の場合、左から 2 番目のセルの高さ 20m における外周の圧力係数を算定すると図 1.2 のようになり、セル側面に大きな負圧が作用していることが分かる。

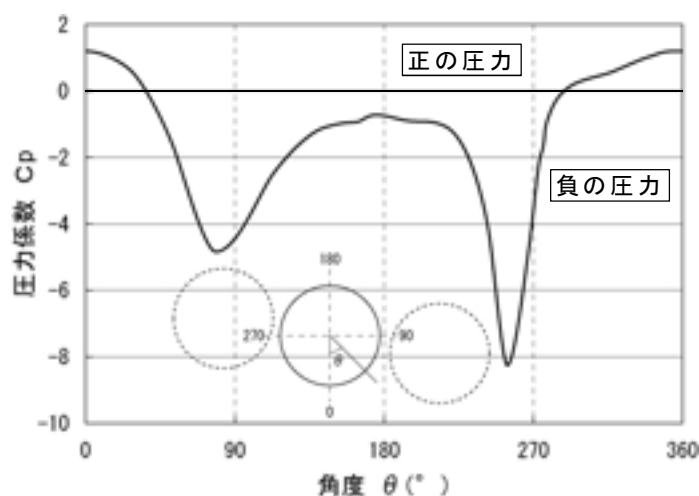


図 1.2 セル外周の圧力係数の算定事例

セル殻は円筒形であり、均一な圧力が周囲に作用するような場合は、アーチアクションの効果によって耐力も比較的大きい。しかし、図 1.2 のようにセル正面から押され、側面を引っ張られるような外力が作用すると、比較的容易に変形して破壊することもある。このような状態を避けるため、セル殻を仮置する場合は、ある一定以上の間隔を設けて配置することが望ましい。

「容器構造設計指針・同解説」（1996 年 10 月，日本建築学会）には、2 つの円筒体が並列に配置された場合の風力係数 (C_f) およびストローハル数 (S) ※の図が示されている（図 1.3 参照）。この図や解析事例などから、セルの設置間隔 (d) が広くなると風力係数は小さくなるが、ストローハル数 (S) は設置間隔 (d) がセル直径 (D) の 0.2 倍 ($d/D=0.2$) 程度で最小となることから、設置間隔 (d) は $d/D=0.2$ を目安に設定するのが良い。

ただし、その場合においても大きな負圧が生じることも考えられることから、セル仮置場周辺の風況について数値シミュレーションを実施するなどして、セル殻の部材の安全性および全体系の安定性について検討することが望ましい。

※ ストローハル数とは、時間変化によって生じる力と慣性力の比を表した無次元数であり、次式で定義される。

$$S = \frac{fD}{U}$$

ここに、 S : ストローハル数

f : 流れにある振動現象の周波数 [1/s]

D : 代表長さ [m]

U : 代表速度 [m/s]

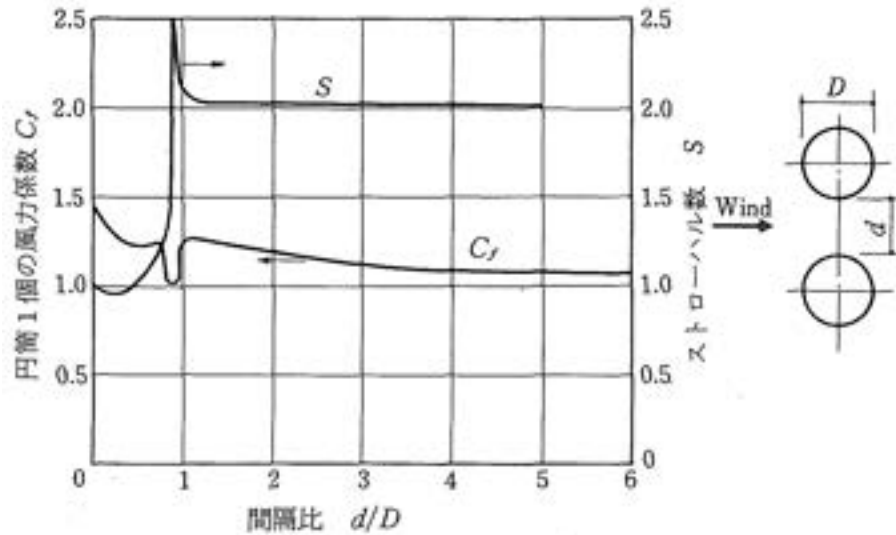


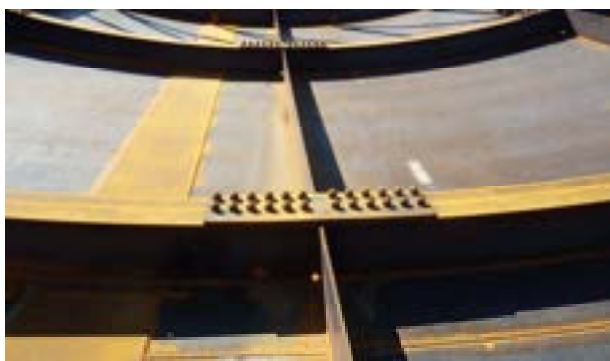
図 1.3 並列 2 円筒の風力係数とストローハル数
「容器構造設計指針・同解説」(1996 年 10 月, 日本建築学会) より抜粋

(3) セル殻の補強および仮置台

仮置時の風に対するセル殻の構造検討は、築造時の波浪に対して設置する円周リブおよび縦リブ等の補強部材を考慮して行う。ただし、波浪に対する検討で設定した補強部材のみでは、部材の安全性が確保できない場合は、円周リブおよび縦リブ等の部材寸法や設置間隔を見直すか、その他の補強部材を追加するなどして安全性を確保しなければならない。特に、セル殻の頭部（最上部）には大きな風圧力が作用することに加え、頭部の剛性が小さいとセルが変形しやすくなるため、通常の円周リブにフランジを設けるなどして、頭部の剛性を大きくするとよい（図 1.4, 図 1.5 参照）。



図 1.4 頭部円周リブの設置事例



フランジ付きの円周リブ



フランジのない円周リブ

図 1.5 円周リブの構造例

セル殻を仮置する仮置台（大組台を含む）は、セル殻の自重の他に風荷重の作用反力に対して十分な支持力を確保できるように計画する。風荷重作用時はセル下端に水平力と鉛直下向きの荷重の他に、風上側はセル殻を持ち上げるような鉛直上向きの荷重も発生することがある。仮置台はセル殻の大きさに応じて一般に 6～10 基程度を配置するが、大きな鉛直上向き力が発生する場合は、仮置台の自重を増したり設置基数を増やしたりして、仮置台の安定を確保しなければならない。また、それらの力をセル殻から仮置台に十分に伝達できるように、仮置台には固定金具等を設け（図 1.6 参照）、セル殻の下端は必要に応じて補強する。



セル外側



セル内側

図 1.6 仮置台と固定金具の事例

2. 施工時波浪に対するセル殻およびアークの部材補強

セル殻およびアークは、打設または設置時に作用する波力に対して、部材の安全性を確保できるように必要に応じて補剛材を取り付ける。

【解説】

セル殻およびアークの打設または設置は、施工精度の確保と部材の安全性確保のため、海象条件が比較的静穏な日を選定して実施する。セル殻およびアークの打設または設置は、作業海域における有義波の波高や周期をもとに作業可否判断を行うことが多く、壁体の安定性が確保できる中詰材の投入完了まで静穏な状態が継続する日を気象・海象予報を参考にして選定する。アーク部の中詰材はセル部に比べて数量が少ないため、アークを打設または設置する日に中詰材の投入が完了することが多いが、大型のセルの場合には中詰材の投入完了まで数日かかることもあるため、施工時の波浪に対して特に注意を要する。

セル殻およびアークは製作や運搬の際に有害な変形を生じないように円周リブや縦リブ等の補剛材を取り付けるが、円周リブの形状や配置間隔は、一般に施工時に作用する波力に対する安全性確保や前項で示した仮置時の風対策の検討から決定される。縦リブ等の縦方向の補剛材は、セル殻およびアークの吊り上げ時または打設時の補強を主目的としたものであり、施工時に作用する波力に対する検討においては、その効果を期待しないのが一般的である。補剛材の検討手法は、「鋼製円筒ケーソン設計マニュアル(案)」(平成9年3月、(財)沿岸開発技術研究センター)を参考にすることができる(参考資料参照)。

セル殻に取り付ける円周リブは円周方向に切れ間なくリング状に配置することができるが、アークに取り付ける円周リブは、アーク継手との干渉を避けるため、アーク端部まで配置することができない。そのため、円周リブの端部で剛性が大きく変化することから応力集中が生じることがある。応力集中によって部材の安全性を確保することができない場合は、アーク胴板の厚さを増すか、円周リブ端部に補強板を溶接するなどの対策が考えられる(図2.1参照)。

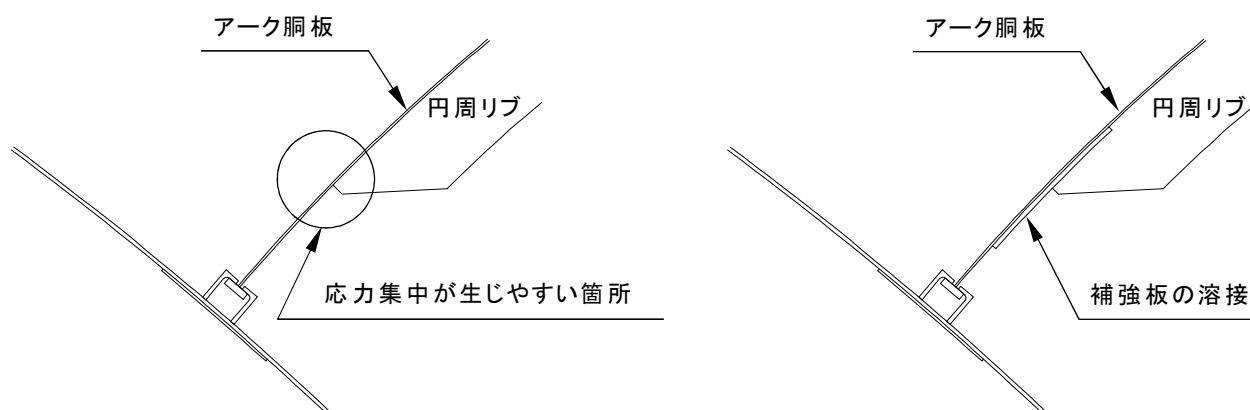


図 2.1 アーク端部の応力集中と補強板による対策事例

3. アーク継手の部材設計時の留意事項

セル本体とアークの継手部は、アークに作用する最大水平方向張力に対して安全な構造とする。継手部の構造検討においては、継手部に設けられる遊間でアークが偏って設置されることを想定する。

【解説】

アーク部の中詰によってアークには水平方向張力が作用する。その水平方向張力がセル本体とアークの継手部に伝達されるため、継手部はアークに作用する最大水平方向張力に対して安全性を確保しなければならない。

継手構造は、セル側に向かい合う L 型の鋼材（「アーク継手」と称す）を取り付け、アーク端部にフランジ（「アークフランジ」と称す）を取り付けて、鋼管矢板の L・T 型継手のような構造とするのが一般的である。アーク継手の L 型鋼材は、溶接時の施工性を考慮して設計上 30mm 程度の間隔（隙間）を空けて取り付けられるため、挿入されるアークには遊間があり、必ずしも中央に設置されるとは限らない。アーク継手やアークフランジは小さな部材であるため、この隙間でのアーク設置位置の偏りが継手部の部材に発生する応力に大きな影響を与える。このため、セル本体とアークの継手部の安全性を確保するには、アーク継手の製作時の施工誤差（一般的な管理値は -0mm , $+10\text{mm}$ ）を考慮した隙間でアークが偏って設置されることも想定して構造細目を検討する必要がある。

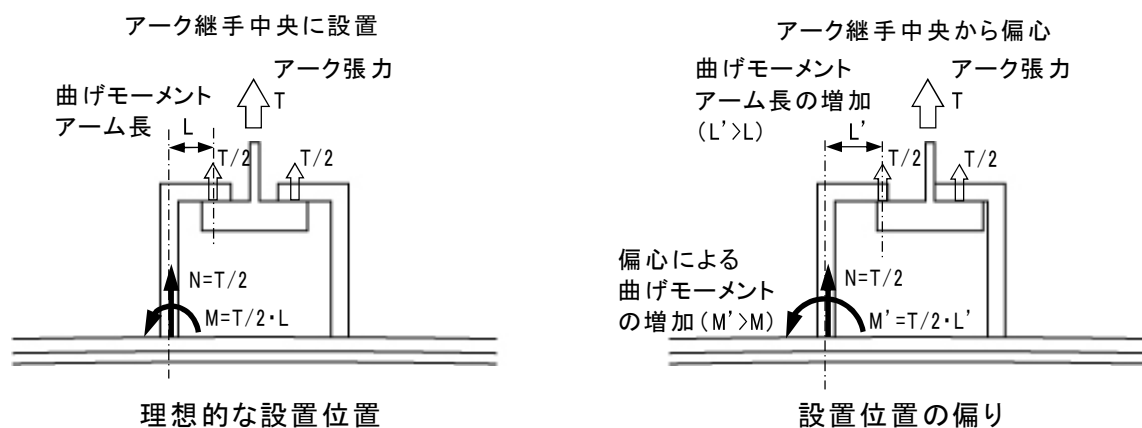


図 3.1 継手部におけるアーク設置位置の偏り

アーク設置位置の偏りを低減する対策として、図 3.2 に示すようにアーク端部に当板を溶接して遊間を狭くする方法などが考えられる。

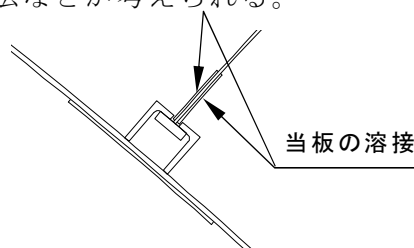


図 3.2 当板の溶接によるアーク設置位置偏りの低減事例

アーク継手部においては、セルやアーク胴板と同様に腐食代を考慮する。また、防食工を施すまでの期間が長く、腐食の進行が懸念される場合は、それらを考慮した腐食代を見込んで検討する必要がある。

また、中詰材の性状（単位体積重量やせん断抵抗角等）の変化、鋼板セルの打設または据付誤差や中詰後の変形による継手間距離の変化が中詰土圧の増加につながり、継手部の安全性に影響を及ぼすが、一般にこれらの施工精度等に起因する事象は、安全性照査における部分係数や調整係数で包括される。しかし、それらの影響が大きいと判断される場合は、安全性の照査をする上で別途考慮する必要がある。

4. アーク弦長の調整

アークの打設または設置の前にアーク継手間の距離を計測し、必要に応じてアーク弦長を調整する。

【解説】

セル殻の打設または設置位置の管理は施工直後に実施され、その後の中詰材の投入によってセル殻が楕円状に変形したり基礎が沈下したりして、アーク継手の位置が変位する。アーク継手位置が変位することによって、アークの打設や設置が困難となることも考えられる。このような状況を避けるため、アークを打設または設置する前にアーク継手間の距離を計測し、必要に応じてアーク弦長を調整する。

アーク弦長の調整は、アークの円周リブに図 4.1 に示すような切り欠きを設けて行う。この時、アーク胴板に有害な変形を与えないように、調整量に応じて切り欠きの位置や箇所数を適切に設定しなければならない。

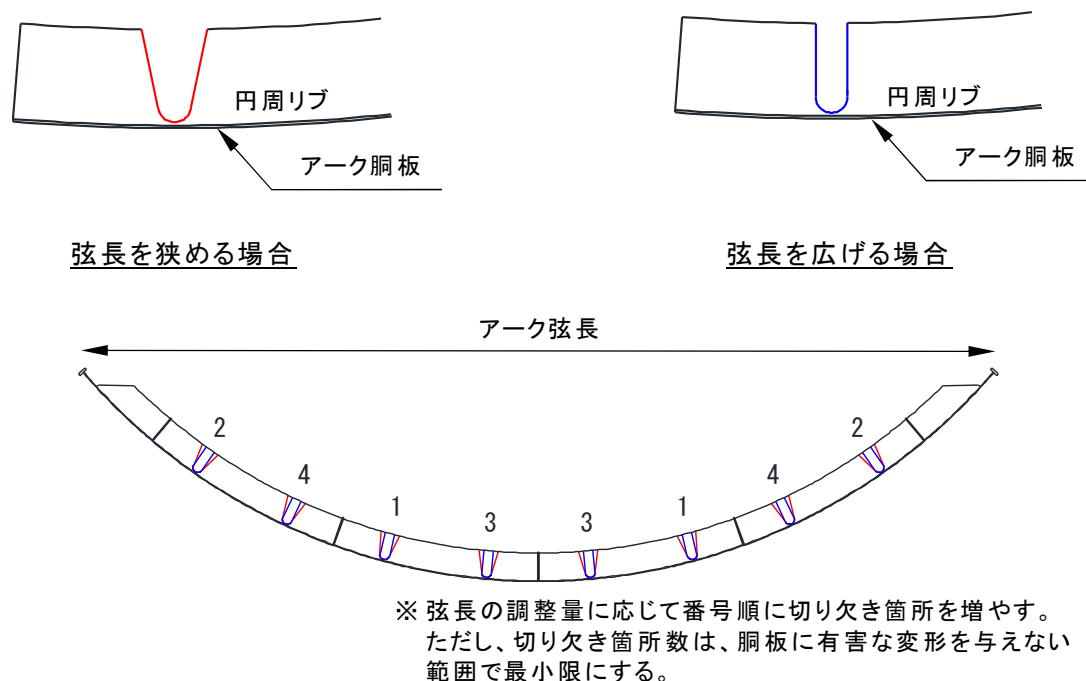


図 4.1 アーク弦長調整のための円周リブ切り欠き事例

アーク継手間の距離が設計値よりも大きくなりすぎると、アーク半径が大きくなることから、アーク胴板に作用する中詰土圧も大きくなり、アーク胴板の安全性確保が困難となることも考えられる。そのような状況を避けるため、アーク継手間距離の設計値からの増加量に閾値を設けて管理するのがよい。また、閾値を超えるような場合は、アーク胴板を延長するなどの対応が必要となる。

なお、アーク弦長を調整した後、円周リブの切り欠き部に添接板を設置するなどして、当初の強度を確保できるように再構築することを基本とする。ただし、波浪の影響が小さく、かつ中詰材を早期に投入してアークの安全性を確保できる場合は、この限りではない。

5. 地盤に打設しない鋼板セルの中詰材の流出防止

地盤に打設せずに設置して築造する鋼板セルは、セル殻およびアーク下端に中詰材の流出防止対策を施さなければならない。

【解説】

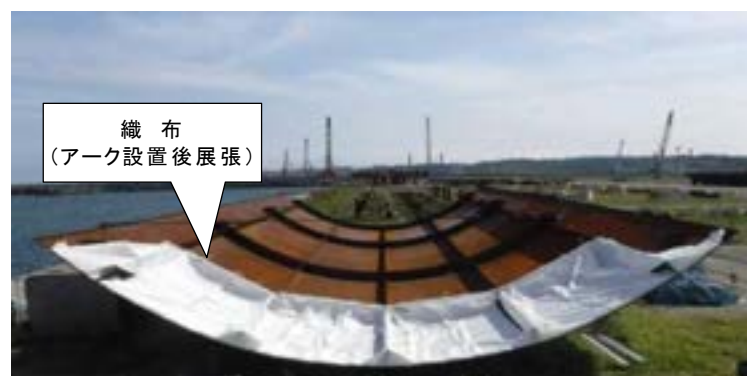
地盤に打設せずに設置して築造する鋼板セルは、基礎捨石等で接地面を均して設置するが、均し面の施工精度、隣り合うセル本体の高低差、中詰による変形等から、セル殻およびアーク下端に隙間が生じる可能性がある。その隙間が大きくなると、中詰材が下端部より流出することが考えられる。また、中詰材の細粒分含有率が大きい場合は、細粒分の沈降速度が遅いことから泥水密度が高くなり、セル殻またはアーク内の水頭が外部より高くなるため、中詰材流出のリスクが大きくなる。

中詰材が流出すると、それに伴ってセル殻またはアーク内の水位が低下して外圧と内圧の差が大きくなる。このような状態は一般に設計で考慮されていないため、注意が必要である。

中詰材の流出防止対策としては、図 5.1 に示すようにセル殻およびアークの下端に織布などを設置するのがよい。また、中詰材には細粒分含有率の小さな材料を選定するとよい。



セルの中詰材流出防止事例



アークの中詰材流出防止事例

図 5.1 中詰材流出防止対策の事例

< 参 考 资 料 >

「鋼製円筒ケーソン設計マニュアル（案）」（平成 9 年 3 月，（財）沿岸開発技術研究センター）の「9 鋼板セルおよびアークの応力検討 9.2 施工時の応力検討」の抜粋を以下に示す。

9.2 施工時の応力検討

- (1) 縦リブは吊り荷重に対して許容応力度を越えないよう配置と断面を定める。
- (2) 円周リブは、鋼板セルに作用する沈設時の水圧によって鋼板セルの胴板と円周リブが座屈しないよう配置と断面を定める。

【解説】

(1) 縦リブの応力検討

吊り金具が縦リブに接続される場合、吊り荷重は縦リブに一次的に作用するが胴板によって分散され、鋼板セルの下部では胴板と縦リブに一樣に分布する。しかし、縦リブの設計では安全のため縦リブに吊り荷重が集中するものとして応力を検討する。

円筒ケーソンは従来ケーソンに比べ吊り点数が少ないが、不均等係数は従来ケーソンと同じ 1.8 を標準とする。許容応力度は短期許容応力度とする。

(2) 円周リブおよび胴板の応力検討

円筒ケーソンを運水・曳航・沈設させる時、鋼板セルの内外に水位差が生じ、鋼板セルの外側から内側方向に水位差に相当する水圧が作用する。

この水圧に対して、鋼板セルの胴板および円周リブの限界座屈圧力が式(9.54)を満足するように、胴板の板厚、円周リブの配置と断面を定める。なお、曳航すること考慮して、このとき、鋼板セルに作用する水圧は内外の水位差に 1.0 m の余裕を加えた水圧とする。

$$F_s \cdot \frac{P_o}{P_k} \leq 1 \quad \text{式(9.54)}$$

ここに

F_s : 安全率で、1.2 を標準とする。

P_o : 作用圧力 (kgf/cm²)

P_k : 限界座屈圧力 (kgf/cm²)

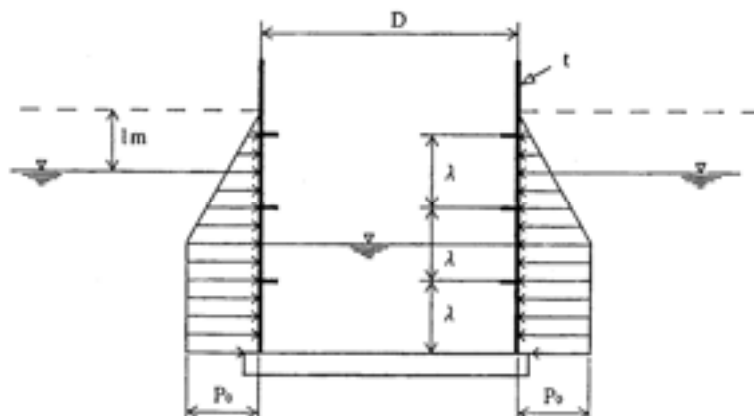


図 9.3 内外水圧差による座屈の検討

鋼板に対して

$$P_k = 2.59 \times \frac{E \cdot t^{2.5}}{\lambda \cdot D^{1.5}} \quad \text{式(9.55)}$$

ここに

D : 鋼板セルの直径 (cm)

t : 鋼板の板厚 (cm)

λ : 円周リブの配置間隔 (cm)

E : 鋼のヤング率 = 2.1×10^6 (kgf/cm²)

円周リブに対して

$$P_k = \frac{2.4 E I_s}{(1 - \nu^2) D^2 \cdot \lambda} \quad \text{式(9.56)}$$

ここに

ν : 鋼のポアソン比 (通常 0.3とする)

I_s : 円周リブと鋼板を合成した有効断面の断面二次モーメント (cm⁴)
(図9.4において斜線で示される範囲)

t_r : 円周リブの板厚 (cm)

t : 鋼板セルの鋼板厚 (cm)

R : 鋼板セルの半径 (cm)

h_r : 円周リブの高さ ($h_r \leq 16 t_r$ とする)

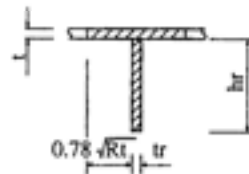


図9.4 有効断面とする範囲