

ケーソン構造の構造設計手法の 改善に関する実験的検討

EXAMINATION FOR IMPROVEMENT OF STRUCTURAL DESIGN METHODS OF CAISSON STRUCTURES

福島賢治¹・横田弘²・秋本孝³・岩波光保⁴

Kenji FUKUSHIMA, Hiroshi YOKOTA, Takashi AKIMOTO and Mitsuyasu IWANAMI

¹若築建設株式会社 技術本部設計部 (〒153-0064 目黒区下目黒2-23-18)

²正会員 工博 独立行政法人港湾空港技術研究所 構造強度研究室 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

³工修 若築建設株式会社 技術本部設計部 (〒153-0064 目黒区下目黒2-23-18)

⁴正会員 工博 独立行政法人港湾空港技術研究所 構造強度研究室 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

Some methods regarding stress calculation etc. of a caisson have to be updated because they follow the former conventional ones. In this study, improvement of the structural design method to a caisson was examined on the following two points.

(1) Reduction in the span length of wall and slab.

(2) Effect of filling sand in a caisson chamber on bending moment induced in a wall.

As a result, essential data to rationalize of structural design methods were obtained. The main findings were summarized as follows:

(1) The span length of wall and slab could be reduced, because fixed supporting points existed in the haunch region.

(2) Due to resistance of filling sand, bending moment of a side wall became smaller than that without filling sand when loads were applied to the wall.

Moreover, diagonal pull-off tests were carried out on hooks for suspension of a caisson. The equation of design shear capacity of concrete around the hooks for suspension was reviewed, and a modified equation was proposed based on the test results.

Key Words : Caisson, structural design, bending moment, rigid region, filling sand, hooks for suspension

1. まえがき

近年, ケーソン合理化設計のための検討が数多く行われている。しかし, ケーソン部材断面力の算定手法については, 従来の手法を踏襲している部分が多く, 算定値が必ずしも合理的ではない箇所があると考えられるにも関わらず, 改善のための目立った試みがなされていないのが現状である。

そこで本研究では, ケーソン部材断面力の算定手法を合理化するための基礎的なデータを収集することを目的とした。現在のケーソン部材の断面力算出手法には, いくつかの改善可能箇所が考えられる。そのなかで本研究では, 「部材の設計スパン長の短縮」および「モーメント算出時における中詰砂の影響」の2項目を抽出して, それぞれについての検討を行うこととした。

また本研究では, 上記の部材設計法改善のための検討と併せて, 斜め引張力作用時における, ケーソン吊筋とその周辺コンクリートの力学挙動についての検討を行った。

2. 試験体概要

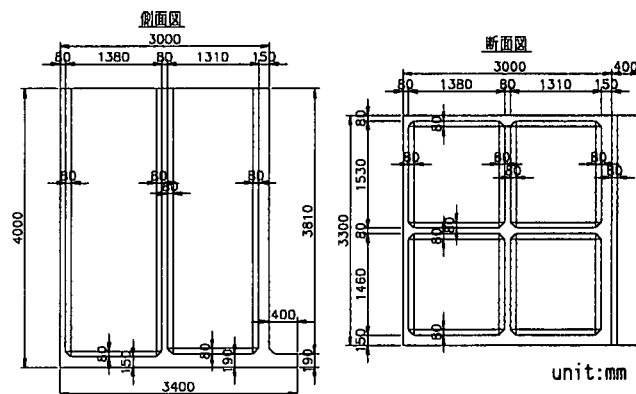


図-1 模型ケーソン試験体構造図

実験に用いた模型ケーソン試験体は, 長さ3.3m, 幅3.0m, 高さ4.0mの鉄筋コンクリート構造である。片側に長さ0.4mのフーチングを有しており, 隔室数は2×2の4隔室である。構造概要を図-1に示す。

また、吊筋の載荷実験を実施するため、側壁頭部のスパン中央部に、実験用吊筋を設けた。吊筋の形状寸法を図-2に示す。

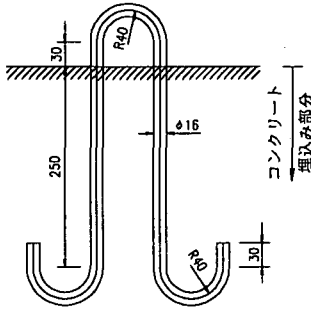


図-2 実験用吊筋の形状寸法

3. 部材の設計スパン長短縮に関する検討

(1) 実験概要

部材の水平スパン長短縮を行うに当たって、本研究では側壁部材の固定点の位置に着目した。現行の港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁾（日本港湾協会）（以下、技術基準とする）に従って、ケーソン側壁部材に発生する水平方向モーメントを求めると、隅角部でのモーメント分布は図-3のように、支持壁中心で最大値を取るようになる。これは側壁部材の固定点が、支持壁中心としてモデル化されていることを示している。

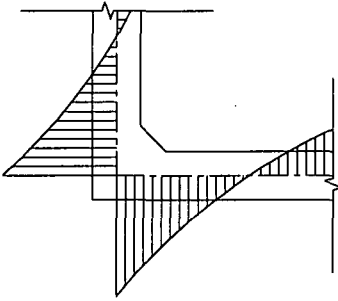


図-3 隅角部でのモーメント分布(技術基準での計算値)

しかしながら、支持壁の内り～中心までの区間は剛性が極めて高い箇所であり、コンクリート標準示方書 設計編²⁾（土木学会）においても「ラーメン構造の解析は、節点およびハンチ部に剛性を考慮することを原則とする」との記述がある。つまり側壁部材を固定している位置は、部材接合部の剛性を考慮して定める必要があるといえる。

そこで本研究では模型ケーソン試験体を用いて、側壁部材への載荷実験を行った。その際に、ケーソン隅角部に発生する水平方向モーメントの分布を測定し、部材接合部の剛性の影響を考慮した部材固定点の位置を調べることにした。

(2) 実験方法

ケーソン隅角部に発生する水平方向モーメントは、モーメント測定位置のコンクリートひずみから算出

した。ひずみの測定位置は、図-4に示すとおりである。載荷する荷重は、ケーソン隔室に投入した砂による中詰土圧とし、中詰砂投入前から投入後までのひずみ変化量を測定した。

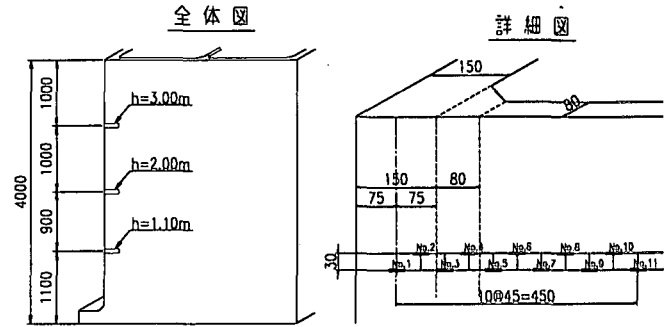


図-4 コンクリートひずみの測定位置

(3) 実験結果

図-5に発生モーメントの分布の一例を示す。モーメントの分布は、測定を行った $h=1.1\text{m}$ 、 2.0m 、 3.0m の3カ所全てにおいてハンチ直下付近で最大値を取り、部材中心部に向かって減少していく傾向を示した。

この結果から、側壁部材の固定点は、支持壁の中心ではなくハンチ直下～側壁内りのりにあり、部材接合部の剛性の影響は、全ての箇所に同様に適用できることが確認された。

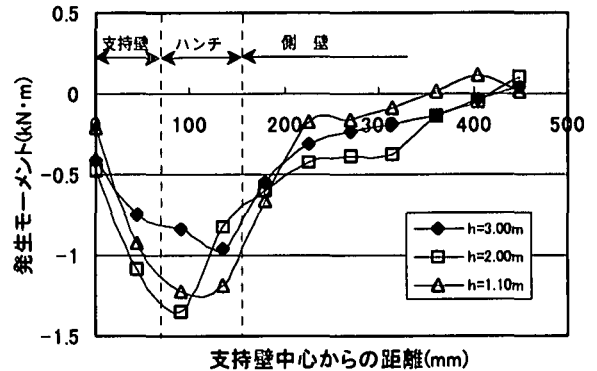


図-5 ケーソン隅角部の発生モーメント分布

(4) まとめと今後の課題

部材のスパン長は、支点間の距離が一般的に取られている。そのため、本研究の結果は、側壁部材の設計スパン長を内り間隔とするための根拠として十分活用できる。今後は、今回の測定結果を基に、計測値と解析値の比較や部材中央部分の検討を行い、部材設計スパン長の短縮を行う方向で提案していきたい。

4. モーメント算出時の中詰砂の影響に関する検討

(1) 実験概要

ケーソン側壁部材の設計は、ケーソン進水（施

工) 時および供用時に作用する荷重に対して、同様の境界条件で断面力を計算することになっている。しかし、施工時のケーソン隔室が中空であることに對して、供用時のケーソン隔室には中詰砂が存在している。供用時のケーソンに波力が作用するとき、中詰砂が外側からの荷重に対して抵抗として働き、結果としてケーソン部材の発生モーメントを低減させるという現象は以前から考えられていた³⁾。

そこで本研究では、中詰砂が無い場合と有る場合で、側壁に水平方向荷重が作用した時の、発生モーメントの測定を行った。そして、それらの計測結果を比較して、モーメントの低減状況を調べることにした。

(2) 実験方法

実験は、ケーソン隔室が中空の場合、隔室に砂を投入した場合の2つの状態を再現して、側壁に対する水平方向集中荷重の載荷を行うこととした。再現した2つの条件を、①中詰砂ナシ、②中詰砂アリ、とそれぞれ呼ぶこととする。

実験に用いる中詰砂は、材料の均一性を考慮して、相馬硅砂5号を用いた。隔室への投入方法は、実際のケーソン中詰砂が水中落下方式で投入されていることに倣って、空中落下方式で行った。投入の段階での締固め作業は行わなかった。

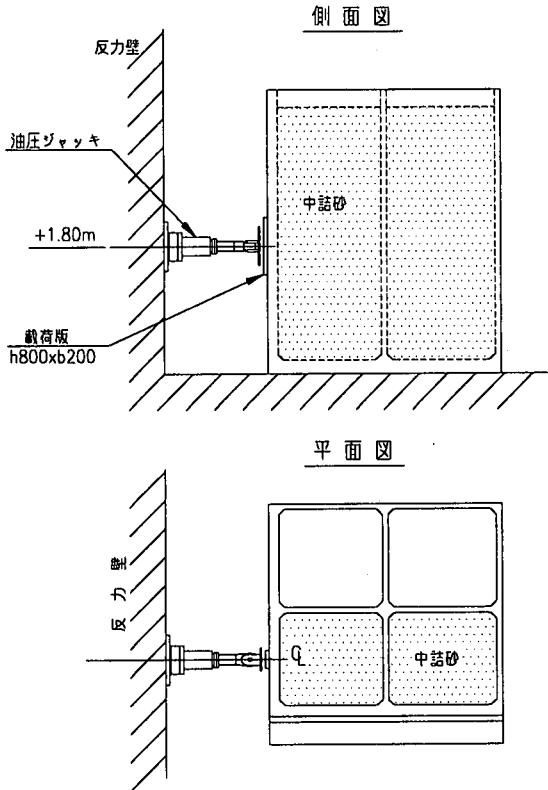


図-6 載荷実験の概要

中詰砂の影響については、側壁に生じた水平方向曲げモーメントで検討することとした。側壁部材に発生する曲げモーメントは、モーメント測定位置のコンクリートひずみから算出した。ひずみの測定位置は図-7に示すとおりである。設置高さ毎に測定位置番号をつけ、上部からA、B、C、D、Eとした。

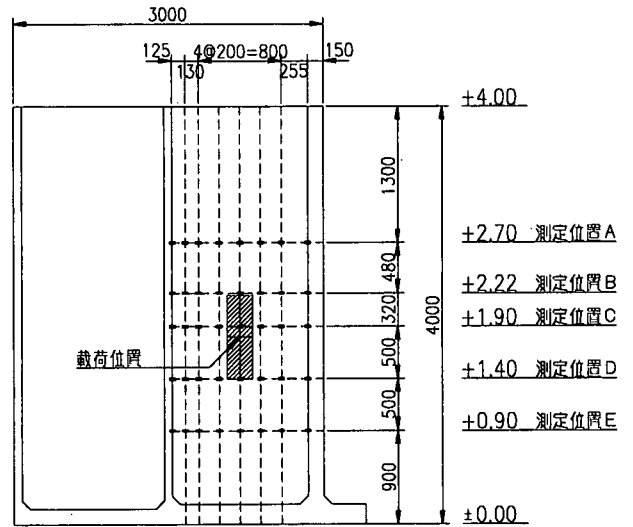


図-7 ひずみの測定位置

本実験では、弾性領域内での繰り返し載荷を行うために、コンクリートにひび割れが発生する前に載荷を終了した。その結果、最大荷重は約40kNとなった。

(3) 実験結果

図-8および図-9に測定位置A～Eのモーメント分布を示す。A～Eの全測定位置で、中詰砂アリの曲げモーメントが中詰砂ナシの曲げモーメントを下回っており、中詰砂の抵抗により曲げモーメントが低減されたことを示している。

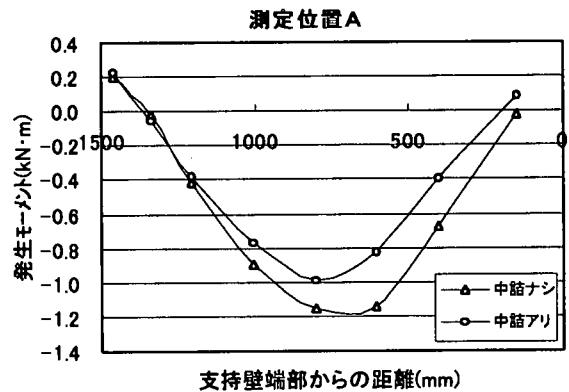


図-8 測定位置Aでのモーメント分布

ケーソン側壁への水平方向荷重の載荷は、油圧ジャッキを用いた集中荷重を載荷することとした。載荷実験の概要を図-6に示す。

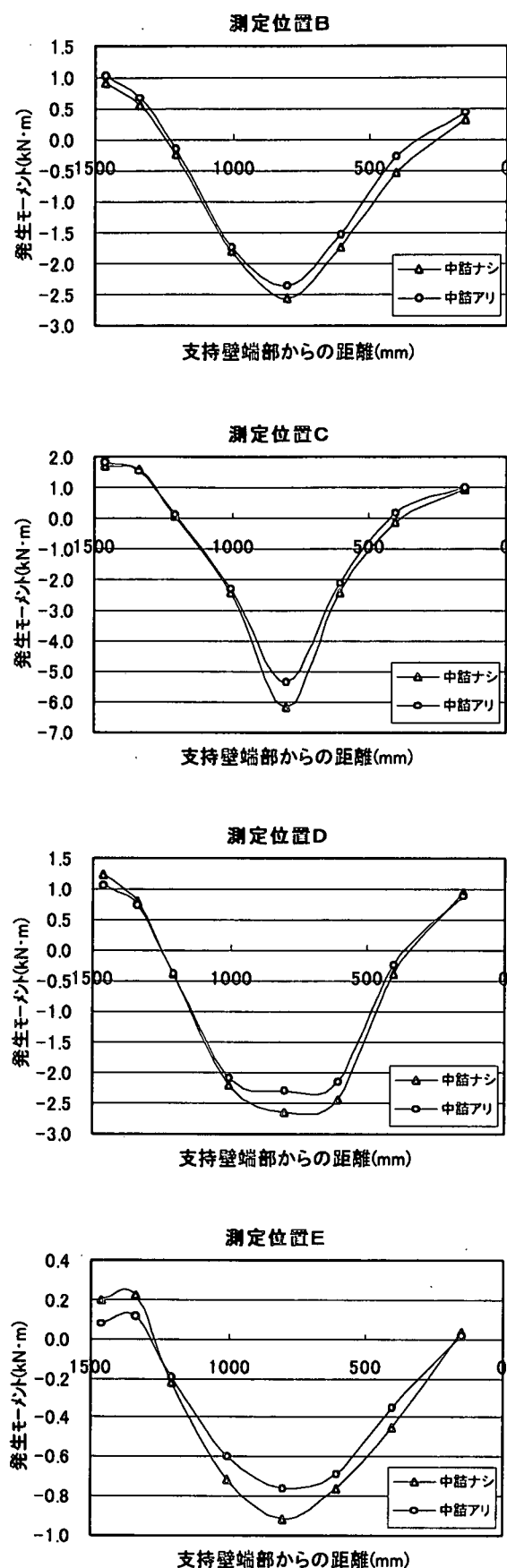


図-9 測定位置B～Eでのモーメント分布

(4) まとめと考察

本実験結果より、ケーソン隔室に投入された中詰砂によって、発生モーメントが低減されることを確認することができた。

本実験では、中詰砂の状態が最も厳しい条件で実験を行うため、使用する砂は締固まりにくいものを採用した。しかし、実際にケーソン中詰砂として使用される砂は、実験で使用された砂と比較すると、粒径が不均一で締固まりやすい性質を持っている砂がほとんどである。また、波の作用によりケーソンが振動し、それによって投入直後よりもケーソン中詰砂が締め固まるという現象は、模型実験によっても証明されている⁴⁾。よって、一般に供用されているケーソンの中詰砂は、実験で使用した中詰砂よりも、きつく締固められている可能性が高く、その分だけ抵抗力も大きいものと推測される。これについては今後検証を続けていく予定である。

5. 斜め方向から引張力を受けるケーソン吊筋の力学挙動に関する検討

(1) 実験概要

斜め方向から引張力を受けるケーソン吊筋およびその周辺コンクリートの力学挙動について、これまでの研究では、水平方向・鉛直方向それぞれの載荷実験を行ってデータを収集するという手法が取られていた⁵⁾。

これに対して、本実験では、実際に斜め方向からの載荷を行って、そのときのケーソン吊筋およびその周辺コンクリートの力学挙動を調べることにした。

また、現行の技術基準における吊筋周辺コンクリートのせん断耐力の算定式に対して、本実験結果を踏まえて、破壊メカニズムに応じたより合理的な算定式の提案を行うことにした。

(2) 実験方法

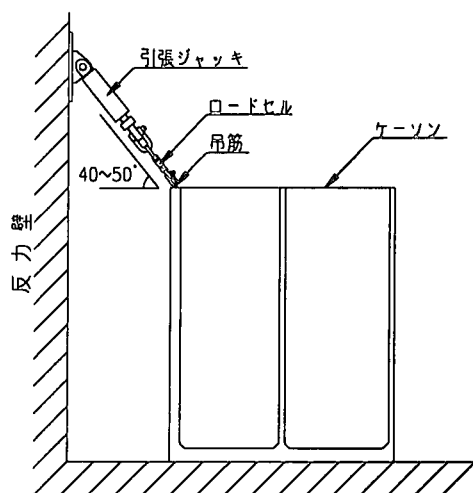


図-10 吊筋載荷状況

実験には、載荷実験用に側壁頭部のスパン中央部に、同じ径、同じ埋め込み条件で設置した3本の吊筋を使用した。実験を行った吊筋を、吊筋a～cと呼ぶこととする。載荷方法を図-10に示す。また、図-11のように計測器を設置して、吊筋の降伏荷重、引張側コンクリートのひび割れ、破壊荷重などの測定を行うとともに、目視によってひび割れの進展や破壊性状などの確認を行うこととした。

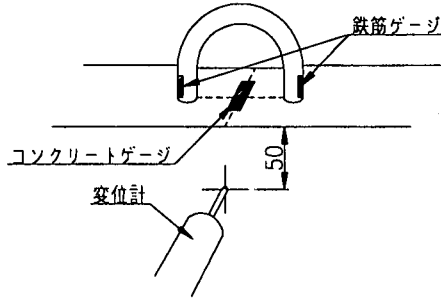


図-11 計測器の設置位置

(3) 実験結果

吊筋a～cの各実験結果を表-1に示す。

表-1 吊筋引張荷重載荷実験の測定値

	引張 角度 (°)	コンクリート ひび割れ 発生荷重 (kN)	コンクリート 破壊荷重 (kN)	吊筋 降伏荷重 (kN)
吊筋a	48.9	8.4	20.6	9.2
吊筋b	48.9	7.7	20.6	9.8
吊筋c	41.8	7.7	15.7	8.9

吊筋周辺部のコンクリートひび割れは、図-12に示す①→⑤の順序で進展した。しかし、実際の吊筋の設計では、周辺の初期欠損を防ぐために④⑤のような全体的な破壊までは考慮しない。そのため、本実験での「破壊荷重」とは、③のひび割れが進展して、周辺コンクリートが破壊したときの荷重とした。また、周辺コンクリートの破壊は、押抜きせん断破壊のような破壊性状になることが確認された。

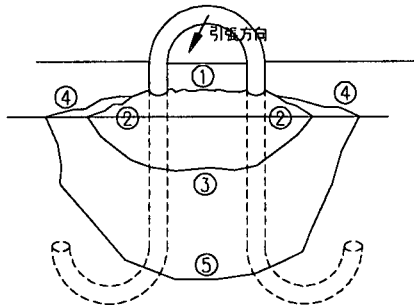


図-12 吊筋周辺コンクリートのひび割れの進展

(4) 吊筋周辺部のせん断耐力算定式

吊筋引張側コンクリートのせん断破壊に対する設

計せん断耐力については、現行の技術基準において以下のような算定式が示されている。

$$V_{cd} = f_{vcd} \cdot A_t / \gamma_b \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

V_{cd} : 設計せん断耐力 (N)

$$f_{vcd}: f_{vcd} = 0.20 \beta_d \beta_p \beta_r \sqrt{f'_{cd}} / \gamma_b \quad (\text{N/mm}^2)$$

$$\beta_d: \beta_d = \sqrt{1000/d} \quad \text{ただし、} \beta_d > 1.5 \text{ となる場合は } 1.5$$

$$\beta_p: \beta_p = \sqrt{100p} \quad \text{ただし、} \beta_p > 1.5 \text{ となる場合は } 1.5$$

$$\beta_r: \beta_r = 1 + 1 / (1 + 0.25 \frac{u}{d})$$

d : 吊筋中心からせん断力の作用する方向の壁面までの距離 (mm)

$$p: p = A_s / (bd)$$

A_s : 鉄筋量 (mm²)

b : 幅 (mm)

u : 載荷面の周長 (mm) $u = \phi + d$ としてよい

ϕ : 吊筋の直径 (mm)

f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度 (N/mm²)

γ_b : 部材係数、一般に1.3としてよい

$$A_t: \text{せん断抵抗面積 (mm}^2\text{)} \quad A_t = \sqrt{3} / 4 \times (\sqrt{2}d)^2 \times 2$$

しかし算定式中に、破壊領域が吊筋埋め込み部周辺のみであることなど、不合理な箇所がいくつか見受けられるため、本実験の結果を踏まえて、新たな算定式を提案することとした。

その際、吊筋引張側コンクリートの破壊性状は押抜きせん断破壊に近いことが確認されたため、実験結果を基に新たな算定式を以下のように定めた。

$$V_{cd} = 0.20 \cdot \sqrt{f'_{vcd}} \cdot \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot A_t / \gamma_b \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

記号は式(1)と同じ。ただし、

$$\beta_r: \beta_r = 1.0$$

d : 吊筋中心から水平方向鉄筋までの距離 (mm)

$$p: \text{せん断面内の水平方向鉄筋の鉄筋比} \quad p = A_s / (b \times \sqrt{2}d)$$

A_s : 水平方向鉄筋の鉄筋量 (mm²)

b : 吊筋間隔 + d (mm)

ただし、吊筋間隔 $\leq D$ D : 吊筋の直径

$$A_t: \text{せん断抵抗面積 (mm}^2\text{)} \quad A_t = b \times \sqrt{2}d$$

新たな算定式は、コンクリート標準示方書の押抜きせん断耐力の算定式¹⁾を基本としたものである。吊筋が設置される側壁頭部のような特殊な箇所に適用するに当たり、以下の修正を行った。

a) 有効高さおよび鉄筋比を計算する鉄筋を、水平方向鉄筋に限定した。

b) コンクリートのせん断抵抗面積 A_t は、 $A_t = b \cdot \sqrt{2}d$ として算定する。

c) 載荷面の寸法による割増し係数 β_r については、自由縁に近い場所での検討であるために、押抜

きせん断耐力が低下する可能性があることなどの理由から $\beta_f=1.0$ とし、耐力の割増しは行わない。

本実験での実測値と、現行の技術基準での計算値および提案式による計算値の比較を行った。ただし、計算値と比較する実測値は、斜め方向引張荷重の水平方向成分とした。計算に用いた吊筋周辺の寸法などを図-13に示す。また実測値と計算値の比較結果を表-2に示す。

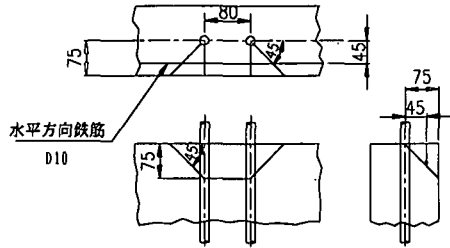


図-13 吊筋周辺寸法（本実験モデル）

表-2 本実験測定値と計算値の比較表

	試験吊筋	引張角度 (°)	破壊荷重の水平方向成分 (kN)
測定値	吊筋a	48.9	13.5
	吊筋b	48.9	13.5
	吊筋c	41.8	11.7
計算値	計算式	せん断耐力 $\langle \gamma_f=1.0 \rangle$ (kN)	
	技術基準式	25.4	
	提案式	10.5	

実測値の破壊荷重との比較を行う際、耐力の計算は部材係数 γ_f を1.0とするのが適当である。 $\gamma_f=1.0$ として比較を行った結果、現行の技術基準による計算値は、実験で得られた破壊荷重よりも大きな値を算出していることが確認された。提案式による計算値は、実測値と比較してやや小さい荷重となっているが、ほぼ適当な値が算出されている。

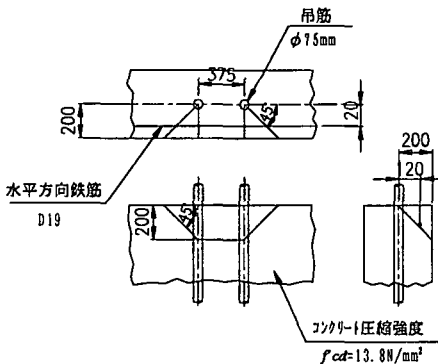


図-14 吊筋周辺寸法（フルスケール試験体）

提案式の照査のため、過去に行われたフルスケール試験体での吊筋水平方向荷重実験の結果⁵⁾と、提案式による計算値の比較を行った。フルスケール試験体の寸法などを図-14に、比較表を表-3に示す。

比較の結果、提案式による破壊荷重 ($\gamma_f=1.0$) は、フルスケール試験体の実験結果に対しても、適当な値を計算できていることが確認された。

表-3 フルスケール実験測定値と計算値の比較表

		破壊荷重 (kN)
フルスケール試験体での測定値	ケース1	88.0
	ケース2	64.0
	ケース3	64.0
提案式での計算値 $\langle \gamma_f=1.0 \rangle$		65.4

(5) まとめと今後の課題

本実験の結果より、実際の施工状況に近い条件下での、吊筋の力学挙動を確認することができた。また、吊筋引張側コンクリートの設計せん断耐力については、現行の算定式の不合理な部分を改善し、より合理的な算定式を提案することができた。

しかし、本実験結果は模型ケーソンに設置した3本の吊筋の実験データおよび過去の実験データから導き出したものであり、今後は供試体数を増やしてさらなるデータの蓄積を図る必要がある。その蓄積したデータによって提案式の精査を行い、可能であればさらに合理的な式を提案することが望ましい。

謝辞：本研究の計画策定および結果の取りまとめにおいて、前港湾技術研究所の山本修司室長および長尾毅室長から適切な助言をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 運輸省港湾局編(1999)：港湾の施設の技術上の基準・同解説、日本港湾協会、pp.363~386。
- 2) 土木学会(1996)：コンクリート標準示方書、設計編、pp. 171~173。
- 3) 高橋重雄、津田宗男、下迫健一郎、横田弘、清宮理(1998)：防波堤ケーソンの破壊と衝撃砕波力について、海岸工学論文集、第45巻、土木学会、pp.751~755。
- 4) 高橋重雄、鈴木高二朗、油谷進介(1995)：衝撃砕波力によるケーソン壁の土圧とひずみに関する実験、海岸工学論文集、第42巻、土木学会、pp.906~910。
- 5) 西堀忠信、山本修章、浦江恭和、稲垣紘史(1974)：大型ケーソンの吊筋の力学性状について、第29回土木学会年次学術講演会概要集、V-146、pp.311~312。
- 6) 土木学会(1996)：コンクリート標準示方書、設計編、pp. 65~67。
- 7) 横田弘、福島賢治、秋本孝、岩波光保(2001)：鉄筋コンクリートケーソンの構造設計の合理化に関する2、3の検討、港湾技研資料、No.1009