

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1428 June 2025

円柱状シアキーによる部材接合部の耐荷性能に関する実験的検討
田中 豊, 加藤 絵万, 網野 貴彦, 田中 亮一

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 円柱状シアキーによる接合面の処理工法の概要	4
3. 小型試験体による基礎物性試験	5
3.1 引張強度試験	5
3.2 曲げ強度試験	7
3.3 せん断強度試験	9
4. 嵩上げ接合部を想定した実大せん断試験	11
4.1 試験体概要	11
4.2 実大せん断試験の概要	12
4.3 試験結果	12
5. 円柱状シアキーのせん断強度設計式の提案	14
6. おわりに	14
参考文献	14

Experimental Study on Load Bearing Capacity of Cylindrical Shear Key for Concrete Connection

Yutaka TANAKA*

Ema KATO**

Takahiko AMINO***

Ryoichi TANAKA****

Synopsis

Due to global warming and climate change, reports indicate that sea levels will rise and typhoons will become more intense. Therefore, it is necessary to implement appropriate countermeasures, such as increasing the height of breakwaters or seawalls. When doing so, the joint surface between existing concrete and newly cast or precast concrete must be roughened to ensure structural integrity. However, the mechanical properties of roughening are not considered in the design process of elevated breakwaters or seawalls. Additionally, since roughening all joint surfaces is required in civil engineering structures, the process is time-consuming and labor-intensive. Thus, a surface roughening method with well-defined mechanical properties that is more efficient and less labor-intensive is desirable.

In this study, the authors focused on a roughening method utilizing a cylindrical shear key for the joint surface between existing and newly cast concrete. This method was initially developed for buildings, so its applicability to civil engineering structures, such as breakwaters and seawalls, must be evaluated. Tensile strength, bending strength, and shear strength tests were conducted to assess the mechanical properties of the shear key. Additionally, for future application in raised breakwaters, a full-scale shear test was performed, and a design equation for the shear strength of the shear key was proposed.

Key Words: Cylindrical shear key, Tensile strength, Bending strength, Shear strength, Joint section of members

*Senior Researcher, Structural Mechanics Group, Structural Engineering Department

** Visiting Senior Resercher, Structural Mechanics Group, Structural Engineering Department

*** Project Manager, Research and Development Center, TOA CORPORATION

**** Group Manager, Materials and Renewal Technology Group, Research and Development Center, TOA CORPORATION
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5059 Fax : +81-46-844-0255 e-mail:tanaka-yu@p.mpat.go.jp

円柱状シアキーによる部材接合部の耐荷性能に関する 実験的検討

田中 豊*・加藤 絵万**・網野 貴彦***・田中 亮一****

要 旨

地球温暖化による気候変動に伴い、海面水位の上昇および台風の激甚化が予想されている。これらに対して港内静穏度の確保や後背地の防護を達成するためにも、既設防波堤や護岸の嵩上げ等のハード的な対策の検討・実施が今後増加すると考えられる。嵩上げに際しては、既設部と新設部の一体性の確保を目的として目荒らしが行われるが、部材接合部の耐荷性能への寄与が十分に明らかになっていないこと等から、設計には陽に反映されていない。そこで本検討では、建築分野で開発・研究が進められてきた円柱状シアキーを用いた接合面の処理工法に着目し、港湾構造物への適用性および特に接合部のせん断抵抗への寄与を検討するため、基礎的な強度試験および実大せん断試験を実施した。その結果、引張強度は圧縮強度との関係式から得られる値を特性値として用いることができること、曲げ強度は引き続きの検討が必要であるものの、平面保持を仮定した梁の曲げと応力の関係から計算できることを示した。また、せん断強度は既往の提案式の適用性を確認するとともに、試験結果からせん断強度のばらつきを考慮する部分係数1.3を提案し、円柱状シアキーによる部材接合部のせん断強度の設計式を提案した。

キーワード：円柱状シアキー，引張強度，曲げ強度，せん断強度，部材接合

* 構造研究領域 構造研究グループ主任研究官
** 構造研究領域 構造研究グループ客員研究官
*** 東亜建設工業（株） 技術研究開発センター プロジェクトマネージャー
**** 東亜建設工業（株） 技術研究開発センター 新材料・リニューアル技術グループリーダー
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5059 Fax：046-844-0255 e-mail:tanaka-yu@p.mpat.go.jp

1. はじめに

地球温暖化による気候変動に伴い、海面水位の上昇や台風等の外力の増大が予想されている。港湾構造物、特に防波堤や護岸においては、その設置目的である港内静穏度の確保や後背地の防護を達成するためにも、海面水位上昇や外力増大に対して適切な対応を取る必要がある。具体的な対策としては、必要な天端高さの確保を目的とした嵩上げ、自重増加や部材の剛性向上を目的とした拡幅や増厚等が挙げられる。

既設防波堤等の嵩上げでは、既設部と新設部（嵩上げ部）との接合に際して、作用に対して不足する抵抗（転倒および滑動）を補い、既設部と新設部を一体化する目的で差筋やホゾ等を設けることがある。これらは部材接合部の設計において陽に考慮され、設計の考え方も整理されつつある¹⁾。同じく既設部と新設部の一体性の確保を目的として、既設部に目荒らしが行われる。目荒らしにより経年変化等で脆弱化した表層部を除去するとともに接合面を粗にすることで、新設部のコンクリートとの良好な付着が期待される。一般的に、コンクリートの接合面同士が粗になり付着性が向上する場合、接合面の引張やせん断抵抗の向上が予想される。しかし、目荒らし面の管理・検査手法が確立していないこと、目荒らし面の状態は施工者の技量に左右されること、目荒らし面の状態と引張抵抗やせん断抵抗との関係が十分に明らかとなっていない等の理由から、現行の設計においては目荒らしによる接合部の引張あるいはせん断抵抗への寄与を陽に考慮することが難しい。このことに加えて、目荒らし工法として一般に用いられるチップング工法やブラスト工法では粉塵、騒音、振動等の作業・環境面での負荷が高いことも課題として挙げられる。特に、護岸の後背地に民家や精密機器を取り扱う工場がある場合は、これらの要素も考慮して目荒らし工法を選定する必要がある。

上記に加えて、土木構造物では全面目荒らしが一般的であることから、施設延長の長い防波堤や護岸における目荒らしは非常に労力を要する工程であると考えられる。したがって、目荒らし工程の効率化や省力化は工事全体の生産性向上に寄与すると予想される。建設現場の生産性向上や自動化（i-construction 2.0²⁾）、働き方改革が社会的に要請されていることから、目荒らし工程の効率化や省力化の効果および需要は高いと推察される。

以上の背景を踏まえて、本検討では建築分野で開発された円柱状シアキーによる接合面の処理工法^{例えは3)}に着目した。本工法は、チップングによる目荒らしの代替として薄い円柱状の溝（円柱状シアキー）を設ける方法であり、



図-1 円柱状シアキー施工機器の例

目荒らしの管理・検査を容易かつ定量的に行うことができる。更に、円柱状シアキー単体のせん断抵抗を計算可能であり、設計の考え方がマニュアルとして取りまとめられている。施工面に関しては、施工管理が行いやすいことに加えて、低粉塵・低騒音・低振動であること、小型の専用機器（図-1）による施工のため施工者への負荷が小さいこと、施工者の技量の影響を受けにくいこと等が挙げられ、目荒らしの課題や作業・環境面での負荷低減を実現し得る工法と考えられる。一方で、本工法は建築物への適用を念頭に研究・開発が進められたため、土木構造物への適用事例がなく、設計の基本的考え方も土木分野と異なる部分がある（詳細は後述する）。そのため、土木構造物へ円柱状シアキーによる接合面の処理工法の適用可能性を検討することを目的に、小型試験体による各種強度試験（引張、曲げおよびせん断）を実施した。また、防波堤等の嵩上げを想定すると、円柱状シアキーは接合部のせん断抵抗への寄与が期待される。そのため、円柱状シアキーのせん断抵抗への寄与を定量的に評価することを目的として、嵩上げ接合部を想定した実大せん断試験を実施した。

2. 円柱状シアキーによる接合面の処理工法の概要

円柱状シアキーは、手持ち可能な小型のコア削孔機を用いて、所定の深さに既設コンクリートを削孔する方法で設けられる。このことにより、施工者の技量に依らず一定の形状で施工可能であることや、検査および管理が容易となること等の利点がある。また使用機器が小型でありコア削孔によることから、低騒音・低振動・低粉塵であるため、工事現場に近接する民家や工場への影響軽減、作業者の負担軽減への寄与も期待できる。

円柱状シアキーの破壊形態は、円柱状シアキーの厚さ（ t ）に対する直径（ D ）の比（ D/t ）によって変化する⁴⁾。具体

的には、 D/t が10程度と比較的薄い円柱状シアキーの場合には支圧破壊型、 D/t が5以下と比較的厚い円柱状シアキーの場合にはせん断破壊型となる（図-2）。建築分野では脆性的な破壊を避けるため、支圧破壊型となるよう D/t は10程度と定められている。しかし、港湾構造物は長期間にわたり外環境に曝されているため、コンクリート表層の劣化が懸念される。建築分野で想定されている比較的薄型の円柱状シアキーでは、表層劣化部の影響を受けて十分なせん断抵抗を発揮できない可能性がある。そのため本検討では、 D/t が2程度と比較的厚い円柱状シアキー（せん断破壊型）を対象とし、円柱状シアキーのせん断抵抗の定量評価を行うこととした。

3. 小型試験体による基礎物性試験

円柱状シアキーによる部材接合部の基礎的な物性として引張強度、曲げ強度およびせん断強度を小型試験体により確認し、一体打ちと比較した。また、試験結果より設計における各種強度の考え方を整理した。

3.1 引張強度試験

円柱状シアキーによる部材接合部の引張強度を確認するため、直接引張試験を実施した⁵⁾。

(1) 試験概要

表-1に引張試験ケースを示す。試験ケースは比較対象の一体打ち（N100）と試験体断面寸法および円柱状シアキー数量を変えた3ケースの計4ケースとした（図-3）。各ケースの試験体数量は5体とした。円柱状シアキーを配置したケース（BKシリーズ）では、片側のL/2の範囲を先打ち

した後、残りの片側を後打ちすることで部材接合部を模擬した。BKシリーズでは、先打ち部に直径50mm、厚さ25mmの発泡スチロールを設置し、硬化後取り除くことで円柱状シアキーを模擬した。なお、部材接合面については特に処理を行っていない。

表-2に用いたコンクリートの配合を示す。先打ち部および後打ち部ともに同配合のコンクリートを用いた。セメント種類は、港湾構造物で一般に用いられる高炉セメントB種（BB）を用いた。引張試験時のコンクリートの圧縮強度はN100で37.3N/mm²、BKシリーズで41.5N/mm²であった。

加力は図-4に示すように万能試験機を用いて、試験体を直接引っ張る方法とした。



図-2 円柱状シアキーの破壊形態

表-1 引張強度試験および曲げ強度試験ケース

ケース	円柱状シアキー個数	試験体寸法 (mm)	試験体数
N100	—	B100×H100×L400	5
BK100-1	1	B100×H100×L400	5
BK150-1	1	B150×H150×L550	5
BK150-4	4	B150×H150×L550	5

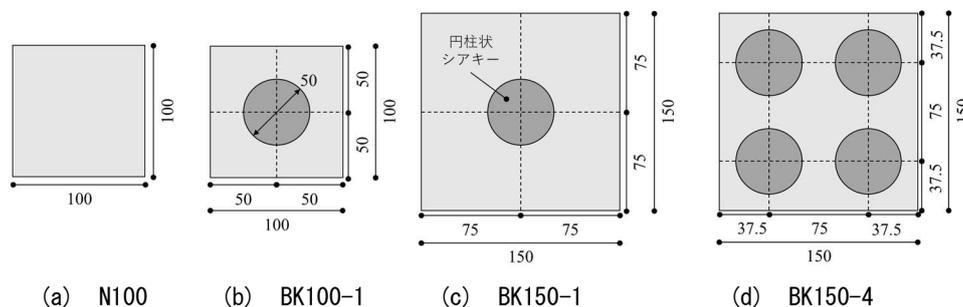


図-3 引張強度試験体の部材接合部断面寸法と円柱状シアキーの配置（単位：mm）

表-2 引張強度試験体および曲げ強度試験体のコンクリート配合

セメント種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	C	S	G	Ad
BB	55.5	43.6	167	301	786	1050	3.62

(2) 試験結果

表-3に試験結果を示す。引張強度について、N100は最大荷重を試験体の断面積で除した値、BKシリーズは最大荷重を円柱状シアキーの断面積で除した値とした。また、N100とBKシリーズでコンクリートの圧縮強度に差があるため、引張強度をそれぞれのコンクリートの圧縮強度で除した値（無次元化した引張強度と称する。）も合わせて示した。更に、コンクリート標準示方書〔設計編〕に記載されている式(1)⁹から求めたコンクリートの引張強度の特性値および式(1)に接合部の断面積を乗じた引張耐力も示した。

$$f_{tk} = 0.23f'_{ck}{}^{2/3} \quad (1)$$

ここで、 f_{tk} ：コンクリートの引張強度の特性値 (N/mm²)、 f'_{ck} ：コンクリートの圧縮強度の特性値 (N/mm²) で、N100およびBKシリーズの圧縮強度試験結果の値を用いた。

表より、各ケースでばらつきがみられるものの、無次元化した引張強度の平均値を比較すると、一体打ちしたN100に対するBKシリーズの比は、BK100-1：1.11、BK150-1：1.33、BK150-4：0.98と同程度となった。BK150-1の平均値が他のケースよりも若干大きい理由として、円柱状シアキー部以外の接合同士の付着が影響した（図-5）ことが考えられるが、付着面積や付着強度に関する検討は行っていないため、円柱状シアキー部以外の接合同士

の付着が引張強度に与える影響については今後の検討課題である。

サンプルサイズ5と小さいものの、多重比較検定の一種であるSteel-Dwass多重検定を実施し、各ケース間の無次元化した引張強度の平均値の差が統計的に有意であるか検討した。検定は統計解析ソフト⁷を用い、パッケージNSM3⁸)に含まれるpSDCFlig関数を使用した。また、有意水準は0.05とした。表-4に多重比較検定の結果を示す。検定の結果、BK150-1とBK150-4の検定においてp値が有意水準を下回ったことから、BK150-1とBK150-4の無次元化した引張強度の平均値には統計的に有意な差があると判断できる。一方、その他の組み合わせでは帰無仮説（平均



図-4 引張強度試験の実施状況

表-3 引張強度試験結果

ケース	最大荷重 (kN)			引張強度 (N/mm ²)			無次元化した引張強度			引張強度の特性値 式(1) (N/mm ²)	引張耐力の特性値* (kN)
	個別	平均値	標準偏差	個別	平均値	標準偏差	個別	平均値	標準偏差		
N100	34.88	35.35	6.72	3.46	3.50	0.65	0.093	0.094	0.018	2.57	25.68
	40.22			3.97			0.106				
	24.02			2.40			0.064				
	40.22			3.99			0.107				
	37.42			3.69			0.099				
BK100-1	7.22	7.64	0.51	3.67	3.89	0.26	0.089	0.094	0.006	2.76	5.41
	8.50			4.33			0.104				
	7.72			3.93			0.095				
	7.35			3.74			0.090				
	7.44			3.79			0.091				
BK150-1	10.16	9.13	0.84	5.17	4.65	0.43	0.125	0.112	0.010	2.76	5.41
	9.88			5.03			0.121				
	8.33			4.24			0.102				
	8.40			4.28			0.103				
	8.91			4.54			0.109				
BK150-4	24.93	26.84	3.17	3.17	3.42	0.40	0.076	0.082	0.010	2.76	21.65
	25.54			3.25			0.078				
	26.89			3.42			0.082				
	32.28			4.11			0.099				
	24.56			3.13			0.075				

*引張強度の特性値に接合部の断面積を乗じて計算した荷重

値に差が無い)が棄却されないため、N100とBKシリーズの無次元化した引張強度の平均値に差があるとは言えない結果となった。

N100の引張耐力の特性値は最大荷重の平均値に対して70%程度の値となった。また、円柱状シアキーを設けた各ケースにおいても、引張耐力の特性値は最大荷重より小さな値となった。このことは試験体の寸法が比較的小さいことによる寸法効果の影響が考えられる。現時点では円柱状シアキーの直径を変更することは検討していないため、実構造物への適用に際しても、寸法効果の影響が予想される。したがって、引張強度の特性値の算定式として式(1)を用いることで、円柱状シアキー部の引張耐力を低く見積もることとなり、引張荷重に対して安全側の設計が可能と考えられる。

3.2 曲げ強度試験

円柱状シアキーによる部材接合部の曲げ強度を確認するため、JIS A 1106:2018に沿って3等分点載荷法による曲げ試験を実施した⁵⁾。

(1) 試験体概要

試験ケースは3.1節の引張強度試験と同様の4ケースとした(表-1)。試験体の製作手順、数量およびコンクリートの配合(表-2)も3.1節と同様とした。なお、曲げ試験におけるN100はBKシリーズの後打ち部と同時に打ち込みしたため、曲げ試験時の圧縮強度はN100およびBKシリーズともに38.4N/mm²であった。

加力は図-6に示す4点曲げにより部材接合部(試験体中央)に曲げが作用する方法とした。せん断スパン(載荷点-支点間距離)および等曲げ区間の長さは各試験体の高さとした(3等分点載荷法)。

(2) 試験結果

表-5に試験結果を示す。曲げ強度について、N100は平面保持を仮定した一般的な梁の曲げと応力の関係式(式(2))と最大荷重を用いて求めた。

$$\sigma = \frac{M}{I} \times \frac{h}{2} \quad (2)$$

$$M = \frac{1}{2}Pl \quad (3)$$

ここで、 σ : 部材下縁に生じる引張応力(N/mm²)、 M : 曲げモーメント(N*mm)、 I : 断面二次モーメント(mm⁴)、 h : 部材高さ(mm)、 P : 荷重(N)、 l : せん断スパン(mm)である。

BKシリーズの曲げ強度について、最終的には式(2)を用



図-5 接合面の破壊状況の例 (BK150-1)

表-4 無次元化した引張強度の多重比較検定結果

	N100	BK100-1	BK150-1
BK100-1	0.875		
BK150-1	0.353	0.144	
BK150-4	0.763	0.353	0.043



図-6 曲げ強度試験の実施状況

いて求めたが、以下に示す仮定の下で計算した。

- ・計算を簡易にするため、円形断面と同等の断面二次モーメントを有する正方形断面として計算する(図-7(a))。具体的には直径 D の円の断面二次モーメント $I_c = \pi D^4/64$ と1辺 a の正方形の断面二次モーメント $I_s = a^4/12$ が等しくなるような a を計算した。本検討では $D = 50\text{mm}$ のため、 $a = 43.8\text{mm}$ である。

- ・部材高さ h は試験体上面からシアキー下縁までの距離とする。シアキーが複数配置されている場合は、最も試験体下面に近いシアキーを対象とする。中立軸位置は、平面保持を仮定し、圧縮領域と引張領域にそれぞれ作用する圧縮力と引張力が釣り合う位置とする(図-7(b))。

- ・シアキー部以外の接合面について、付着は考慮せず、引張作用時は即座に剥離し引張力を受け持たないとする。

表-5 曲げ強度試験結果

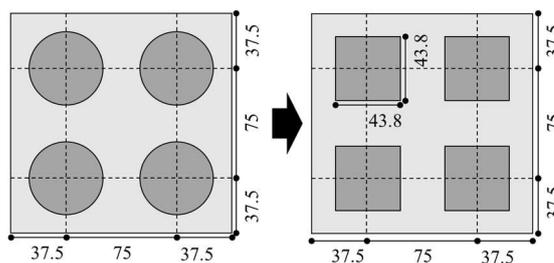
ケース	最大荷重 (kN)			曲げ強度 (N/mm ²)			無次元化した曲げ強度			曲げ強度の特性値式(4) (N/mm ²)	曲げ耐力の特性値* (kN)
	個別	平均値	標準偏差	個別	平均値	標準偏差	個別	平均値	標準偏差		
N100	16.21 21.27 21.87 21.33 20.99	20.33	2.33	4.78 6.22 6.41 6.17 6.03	5.92	0.65	0.124 0.162 0.167 0.161 0.157	0.154	0.017	3.88	12.92
BK100-1	6.20 9.10 6.47 7.82 7.65	7.45	1.17	6.82 10.02 7.12 8.61 8.42	8.20	1.28	0.178 0.261 0.185 0.224 0.219	0.213	0.033	4.47	4.06
BK150-1	14.88 18.47 12.57 20.92 15.53	16.47	3.26	13.03 16.17 11.01 18.32 13.59	14.42	2.85	0.339 0.421 0.287 0.477 0.354	0.376	0.074	3.93	4.48
BK150-4	16.54 20.02 19.73 24.62 21.93	20.57	2.98	4.58 5.55 5.46 6.82 6.07	5.70	0.83	0.119 0.144 0.142 0.178 0.158	0.148	0.022	3.40	12.27

*曲げ強度の特性値，式(2)および式(3)を用いて計算した荷重

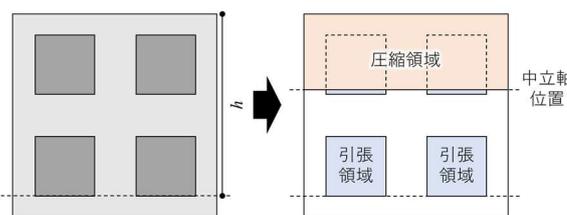
また，圧縮作用時は圧縮力を受け持つとする．したがって，圧縮作用時は圧縮領域の全断面を，引張作用時は引張領域内の円柱状シアキー部のみを有効断面とする（図-7 (b)）．

・圧縮領域および引張領域それぞれの断面二次モーメントを計算し，中立軸位置において合成した断面二次モーメントを用いる．

また，N100とBKシリーズでコンクリートの圧縮強度に差はないものの，曲げ強度をそれぞれのコンクリートの圧縮強度で除した値（無次元化した曲げ強度と称する．）も表-5に合わせて示した．更に，コンクリート標準示方書〔設計編〕に記載されている式(4)～(7)⁹⁾から求めた曲げひび割れ強度（曲げ強度）の特性値および式(2)～(7)から求めた荷重（曲げ耐力の特性値）も示した．なお，式(5)および(6)は部材高さ $h > 0.2\text{m}$ が適用範囲として示されており，本検討の断面はいずれも下式の適用範囲外であるが，本検討では式(4)を外挿可能としてそのまま適用した．



(a) 円柱状シアキーの置き換え



(b) 有効断面の考え方

図-7 円柱状シアキーの曲げ強度計算における仮定

コンクリートの引張軟化特性に起因する引張強度と曲げ強度の関係を表す係数， k_{1b} ：乾燥，水和熱等，その他の原因による曲げひび割れ強度の低下を表す係数， f_{tk} ：引張強度の特性値 (N/mm²)， l_{ch} ：特性長さ (m)， E_c ：コンクリートのヤング係数 (N/m²)， G_F ：コンクリートの引張破壊エネルギー (N/m) である．なお，式(5)および(6)の部材高さ h の単位はm，式(7)の引張強度の特性値 f_{tk} の単位は

$$f_{bck} = k_{0b} k_{1b} f_{tk} \quad (4)$$

$$k_{0b} = 1 + \frac{1}{0.85 + 0.45(h/l_{ch})} \quad (5)$$

$$k_{1b} = \frac{0.55}{\sqrt[3]{h}} \quad (6)$$

$$l_{ch} = E_c G_F / f_{tk}^2 \quad (7)$$

ここで， f_{bck} ：曲げひび割れ強度の特性値 (N/mm²)， k_{0b} ：

表-6 無次元化した曲げ強度の多重比較検定結果

	N100	BK100-1	BK150-1
BK100-1	0.042		
BK150-1	0.042	0.042	
BK150-4	0.952	0.042	0.042

表-7 せん断強度試験ケース

ケース	円柱状シアキー 個数	試験体寸法 (mm)	試験体数
N200	—	B200×H200×L300	3
BK200-1	2	B200×H200×L300	3

N/m²である。

表-5より、試験結果にばらつきがみられるものの、無次元化した曲げ強度の平均値で比較すると、N100に対するBKシリーズの比は、BK100-1:1.39, BK150-1:2.44, BK150-4:0.96となり、BK100-1およびBK150-1はN100よりも大幅に大きな値となった。一方BK-150-4はN100と同程度の値となった。

3.1節と同様に、無次元化した曲げ強度についても、多重比較検定の一種であるSteel-Dwass多重検定を実施し、有意水準0.05として、各ケース間の無次元化した曲げ強度の平均値の差が統計的に有意であるか検討した。表-6に多重比較検定の結果を示す。検定の結果、N100とBK150-4のみp値が有意水準を上回ったことから、この2群間の無次元化した曲げ強度の平均値の差には統計的に有意な差があるとは判断できない。一方、その他の組み合わせでは帰無仮説が棄却されるため、無次元化した曲げ強度の平均値の差に統計的に有意な差があると判断できる。BK100-1および特にBK150-1については3.1節の引張試験と同様に円柱状シアキー部以外の接合同士の付着が影響したことや断面高さが小さいことによる寸法効果が影響したことにより、最大荷重ひいては曲げ強度が増加したと考えられる。このことに加えて、今回採用した曲げ強度の計算方法が適切でなかった可能性が考えられるため、今回採用した曲げ強度の適用性について更なる検討が必要である。

N100の曲げ耐力の特性値は最大荷重の65%程度であった。N100の試験体の高さは0.1mであり、式(4)の適用範囲外であることから、曲げ試験においても寸法効果の影響を受けていると考えられる。BKシリーズの曲げ耐力の特性値は最大荷重の平均値に対して、BK100-1:0.55, BK150-1:0.27, BK150-4:0.60と、特にBK150-1に関して試験結果との乖離が大きい結果となった。このことは前述のとおり、円柱状シアキー部以外の接合同士の付着の影響、

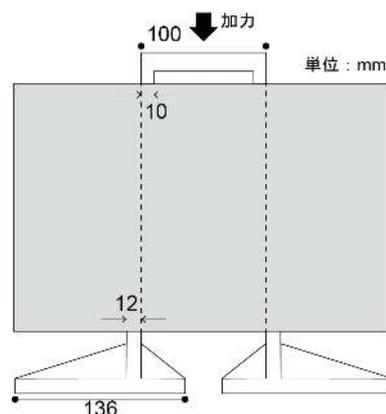


図-8 二面せん断試験装置

寸法効果の影響や曲げ強度(曲げ耐力)の計算方法の影響を受けていると考えられる。特に曲げ強度の計算方法について検討の必要があるものの、全てのケースにおいて曲げ耐力の特性値は最大荷重よりも小さいことから、ここでは式(4)により得られた曲げ強度を用いることで、円柱状シアキー部の曲げ耐力を実際よりも低く見積もることになり、曲げに対して安全側の設計が可能と考えられる。

3.3 せん断強度試験

円柱状シアキーによる部材接合部のせん断強度を確認するため、図-8に示す二面せん断試験を実施した^{10),11)}。

(1) 試験体概要

表-7にせん断強度試験ケースを示す。試験体はB200×H200×L300mmの直方体とし、両端の100mmの範囲を先打ちした後、中央部の100mmを後打ちすることで部材接合部を模擬した(図-9)。3.1および3.2節と同様に先打ち部の中央には直径50mm、深さ25mmの発泡スチロールを設置し、円柱状シアキーを模擬した。また、円柱状シアキー部以外には、グリスを塗布して付着および摩擦を低減させた。試験体数量は3体とした。

表-8に用いたコンクリートの配合を示す。先打ち部は早強セメント(H)を、後打ち部は高炉セメントB種(BB)を用いた。一体打ちのケース(N200)は後打ち部と同配合のコンクリートとし、後打ち部打込み時に合わせて製作した。せん断強度試験時のコンクリートの圧縮強度は、先打ち部:37.9N/mm²、後打ち部:27.1N/mm²であった。

加力は図-8に示した二面せん断治具を用いて、後打ち部上に設置した治具(上側)に鉛直荷重を加え、部材接合部にせん断力が作用させる方法とした。

(2) 試験結果

表-9に試験結果を示す。せん断強度は、最大荷重を接合

部の断面積で除した値とし、二面せん断であることを考慮して、更に2で除した値とした。なお、BK200-1の1体以外は片面せん断破壊であったが、破壊に至る直前までは二面で均等に荷重に抵抗していたと仮定し、破壊形態に関わらず前述の方法でせん断強度を計算した。また、本試験においてはN200およびBK200-2のコンクリートの圧縮強度は等しいが、せん断強度をコンクリートの圧縮強度で除した値（無次元化したせん断強度）も合わせて示す。

せん断強度の計算値に関して、コンクリート標準示方書には圧縮強度に関連付けられた計算式が示されていない。そのため、壁式プレキャスト部材の部材接合部のせん断耐力に関する望月らの研究¹²⁾を参考にした。具体的には以下に示す部材接合部のせん断耐力に関する提案式のうち、シアキー部（望月らはコッター部と表現）の負担を表す右辺第1項により、シアキー部のせん断強度が計算できると考えた。

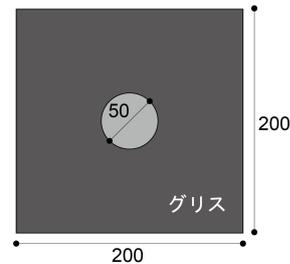
$$Q_u = 0.09A_c f'_c + 1.28a_s \sqrt{\sigma_y f'_c} + 0.54a_s \sigma_y + 0.84\sigma_n A \quad (8)$$

ここで、 Q_u ：接合部のせん断耐力(kgf)、 A_c ：コッター（シアキー）の断面積(cm²)、 f'_c ：コンクリートの圧縮強度(kgf/cm²)、 a_s ：コッター筋の断面積(cm²)、 σ_y ：コッター筋の降伏強度(kgf/cm²)、 σ_n ：接合面に垂直な外部圧縮応力(kgf/cm²)、 A ：接合面の全断面積(cm²)である。

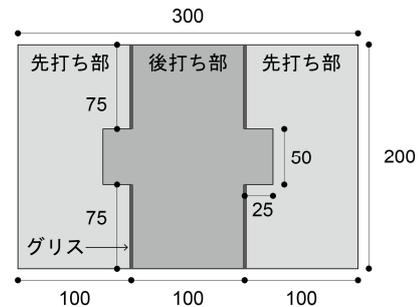
式(8)の右辺第1項より、シアキーのせん断強度の特性値 f_{sk} は以下の式で求められると考えられる。

$$f_{sk} = 0.09f'_c \quad (9)$$

表-9には、式(9)から求めたせん断強度の特性値および式(9)に接合部の断面積を乗じて求めたせん断耐力の特性値も合わせて示した。なお、コンクリートの圧縮強度として



(a) 接合面図



(b) 断面図

図-9 二面せん断試験体図 (BK200-2)

表-8 せん断強度試験体のコンクリート配合

名称	セメント種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
				W	C	S	G	Ad
先打ち部	H	58.4	48	173	296	851	952	2.96
後打ち部	BB	58.4	48	173	296	849	947	1.78

表-9 せん断強度試験結果

試験体	せん断破壊の形態	最大荷重 (kN)			せん断強度 (N/mm ²)			無次元化したせん断強度			せん断強度の特性値式(9) (N/mm ²)	せん断耐力の特性値* (kN)		
		個別	平均値	標準偏差	個別	平均値	標準偏差	個別	平均値	標準偏差				
N200	片面	239.3	252.25	41.43	2.99	3.15	2.48	0.110	0.116	0.019	2.44	195.12		
	片面	298.6			3.73			0.138						
	片面	218.9			2.74			0.101						
BK200-2	片面	9.5	9.75	3.88	2.42	2.48	0.99	0.089	0.092	0.036			2.44	9.58
	片面	6.0			1.53			0.056						
	二面	13.8			3.50			0.129						

*せん断強度の特性値に接合部の断面積および2を乗じて計算（二面せん断であることを考慮）

後打ち部の 27.1N/mm² を用いた。表より、N200 および BK200-2 とともにせん断試験から得られたせん断強度と式(9)から計算されたせん断強度の特性値が同程度の値となった。試験体数量が少ないため、今後更なる結果の蓄積が必要であると考えられるが、本検討の範囲では、式(9)より円柱状シアキー体のせん断強度が算定可能と考えられる。なお、N200 および BK200-2 において、無次元化したせん断強度の平均値の差の検定 (Mann-Whitney 検定) を行った結果、p 値は 0.4 となり、有意水準として設定した 0.05 を上回る結果となった。このことから、N200 と BK200-2 の無次元化したせん断強度の平均値に差があるとは言えない結果となった。

N200 および BK200-2 のせん断耐力の特性値は最大荷重の平均値の約 77%、約 98% となり、BK200-2 では試験結果と計算結果がほぼ一致した。このことは式(9)で計算されたせん断強度の特性値が試験結果から得られたせん断強度と同程度であったためであり、繰返しになるが式(9)で計算されるせん断強度の特性値に断面積を乗ずることで、円柱状シアキーのせん断耐力の特性値が計算可能であると考えられる。

なお、本章(要素試験)では発泡スチロールで円柱状シアキーを模擬したが、実施工では専用機器(図-1)により円柱状シアキーを設ける。このため、専用機器を用いた場合の部材接合部の引張強度や曲げ強度が要素試験の結果と大きく相違ないことを確認したい。

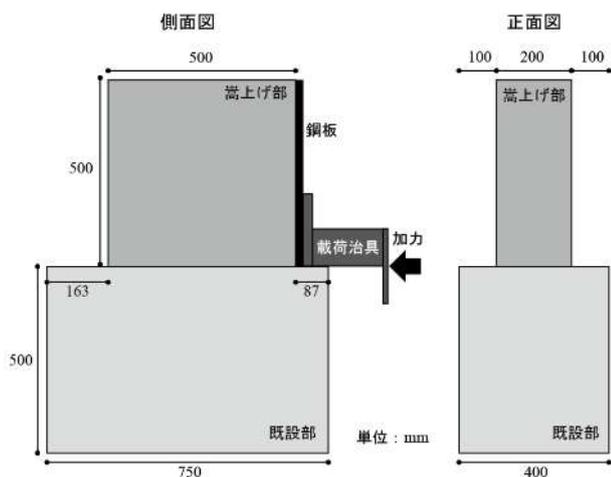


図-10 実大せん断試験体図

4. 嵩上げ接合部を想定した実大せん断試験¹¹⁾

3.1~3.3 節において、小型試験体による円柱状シアキーの基礎的な物性試験を実施し、円柱状シアキーの引張強度、曲げ強度およびせん断強度を計算により求める方法を整理した。嵩上げ接合部では、円柱状シアキーは主として滑動に対する抵抗として寄与することが期待される。そこで、円柱状シアキーの配置や数量が嵩上げ接合部の滑動抵抗に及ぼす影響を把握することを目的に、嵩上げ接合部を想定した実大せん断試験を実施した。

4.1 試験体概要

試験体諸元を図-10 に示す。試験体は既設部と嵩上げ部に分かれており、実際の護岸の嵩上げ高さを参考に、嵩上げ部の高さを 500mm とした。既設部上面には、専用の小型コア削孔機を用いて、図-11 に示す数量・配置の円柱状シアキーを設けた。円柱状シアキー部以外の接合面にはグリスを塗布し、付着および摩擦を低減させた。試験体数量は各ケース 3 体とした。

表-10 に既設部および嵩上げ部に用いたコンクリートの配合を示す。既設部は早強セメント (H) を、嵩上げ部は高炉セメント B 種 (BB) をそれぞれ用いた。せん断試験時のコンクリートの圧縮強度は、既設部 : 38.0N/mm²、嵩上げ部 : 33.3N/mm² であった。

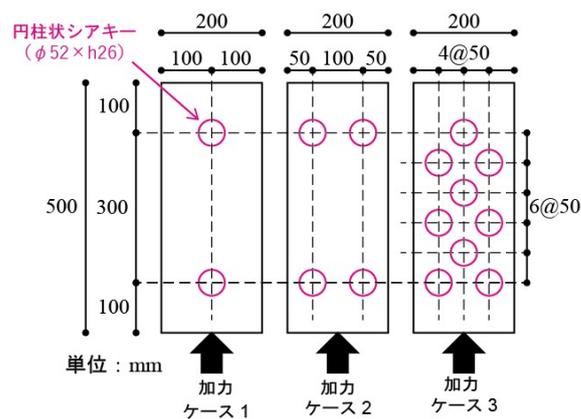


図-11 円柱状シアキーの配置

表-10 実大せん断試験体のコンクリート配合

名称	セメント種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
				W	C	S	G	Ad
既設部	H	58.5	48.4	177	303	851	929	3.03
嵩上げ部	BB	58.5	45.9	163	279	835	1024	2.79

4.2 実大せん断試験の概要

図-12 に実大せん断試験の実施状況を、図-13 に変位計設置位置を示す。嵩上げ部正面を均等に加力するために、嵩上げ部正面と加力治具との間に鋼板を設置した。

4.3 試験結果

(1) 最大荷重

表-11 に試験結果を示す。せん断強度は最大荷重を円柱状シアキーの断面積および個数で除した値とした。本試験においても、各ケースのコンクリート強度は同一であるが、せん断強度をコンクリートの圧縮強度で除した値（無次元化したせん断強度）も示す。また、式(9)から得られたせん断強度の特性値およびせん断強度の特性値に円柱状シアキーの断面積および個数を乗じて得られたせん断耐力の特性値も合わせて示す。

各ケースの最大荷重は、円柱状シアキーの個数に比例して増加しているが、単純に個数分増加してはいない。このことは、後述する嵩上げ部の回転の影響や円柱状シア



図-12 実大せん断試験実施状況

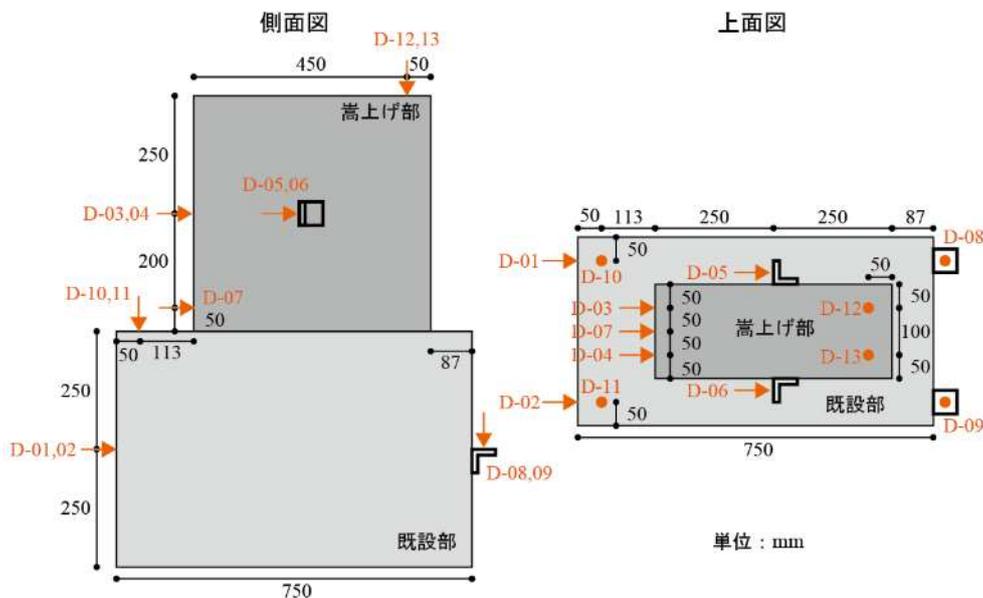


図-13 変位計設置位置図

表-11 実大せん断試験結果

ケース	円柱状 シアキー 個数	最大荷重 (kN)			せん断強度(N/mm ²)			無次元化したせん断強度			せん断強度の 特性値 式(9) (N/mm ²)	せん断耐力の 特性値* (kN)
		個別	平均値	標準 偏差	個別	平均値	標準 偏差	個別	平均値	標準 偏差		
1	2	12.0	15.13	4.08	2.82	3.56	0.96	0.085	0.107	0.029	3.00	12.73
		19.7			4.65			0.140				
		13.7			3.22			0.097				
2	4	28.6	20.94	6.68	3.37	2.46	0.79	0.101	0.074	0.024	3.00	25.46
		17.3			2.04			0.061				
		16.9			1.99			0.060				
3	9	65.8	52.29	16.78	3.44	2.73	0.88	0.103	0.082	0.026	3.00	57.28
		57.6			3.01			0.090				
		33.5			1.75			0.053				

*せん断強度の特性値に接合部の断面積を乗じて計算

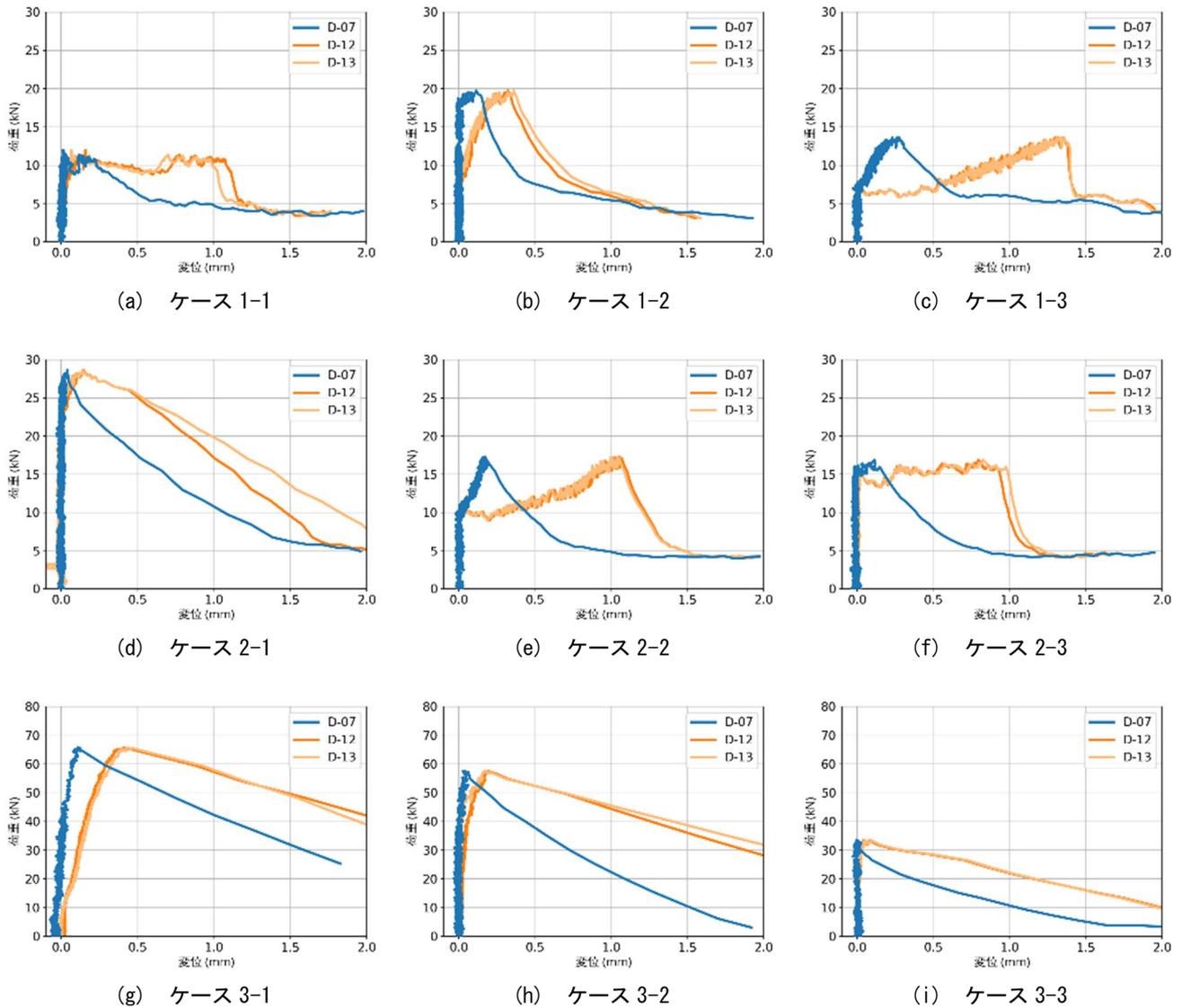


図-14 荷重-変位関係

表-12 無次元化したせん断強度の多重比較検定結果

	ケース 1	ケース 2
ケース 2	0.700	1.000
ケース 3	0.943	

キーの配置が影響している可能性があり、今後の検討課題である。

サンプルサイズが3と小さいが、3.1および3.2節と同様に多重比較検定の一種である Steel-Dwass 多重検定を実施し、有意水準 0.05 として、各ケース間の無次元化したせん断強度の平均値が統計的に有意であるか検討した。表-12 に多重比較検定結果を示す。いずれの結果も有意水準を大きく上回っており、無次元化したせん断強度の平均値に差があるとは言えない結果となった。

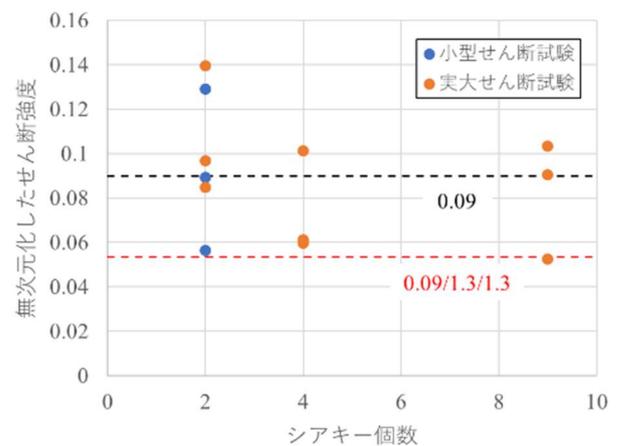


図-15 無次元化したせん断強度とシアキー個数との関係

式(9)で計算された円柱状シアキーのせん断強度の特性値と比較すると各ケースの平均値は式(9)で計算した値の±20%以内(2.40~3.60N/mm²)に収まっており、円柱状シアキーのせん断強度の特性値算定に式(9)が適用可能であると考えられる。

(2) 嵩上げ部の変位

図-14に荷重-嵩上げ部の変位関係を示す。嵩上げ部の変位として、嵩上げ部の水平変位(D-07)嵩上げ部の鉛直変位(D-12およびD-13)を示す。なお、嵩上げ部の水平変位は、既設部の水平変位(D-01とD-02の平均値)を差し引いた値とした。図より、最大荷重時の水平変位は最大で0.25mm以内であり、最大荷重後に一気に水平変位が増加する脆性的な破壊形態であることがわかる。

嵩上げ部の鉛直変位に着目すると、ケース1-1、1-3、2-2および2-3は、鉛直変位が1.0mm程度に増加した後に破壊に至っていた。鉛直変位の増加とともに、水平変位も若干増加していることから、嵩上げ部は加力面と反対側の嵩上げ部下端を中心に回転していると考えられる。このことから、円柱状シアキーにはせん断力以外にも引張も生じており、最大荷重が低下した要因の一つであると考えられる。しかし、ケース3については、最も鉛直変位の小さい3体目の最大荷重が同ケース内で最も小さい結果となっており、嵩上げ部の回転以外の他の要因も最大荷重に影響を及ぼしていると考えられる。

5. 円柱状シアキーのせん断強度設計式の提案

望月らが提案したせん断耐力算定式から抜粋した式(9)により、円柱状シアキー単体のせん断強度についてはせん断耐力を算定できると考えられる。一方で、試験体数量の少なさ、試験体寸法、載荷方法等様々な影響を受けて試験結果にばらつきが生じることが分かった。そのため、これらのばらつきを考慮するために、式(9)に部分係数を導入することとし、その値について検討する。

図-15に3.3節および4章のせん断試験で得られた円柱状シアキー単体の無次元化したせん断強度を示す。図より、望月らが提案している係数(0.09)は、全体の平均としては適した値と考えられるが、最小値(0.053)と比較すると約1.7倍大きな値となっている。ここで、コンクリートの材料係数として一般的に用いられる値(1.3)を考慮すると、円柱状シアキーによるせん断強度のばらつきを考慮する部分係数として1.3(コンクリートの材料係数と合わせて1.69となる)を採用することで概ね最小値と一致する。以上から、本検討では、円柱状シアキーのせん断強度の設計式として、以下の式を提案する。

$$f_{sd} = 0.09f'_{ck}/\gamma_c/\gamma_{key} \quad (10)$$

ここで、 f_{sd} ：円柱状シアキーによるせん断強度の設計値(N)、 f'_{ck} ：コンクリートの圧縮強度の特性値(N/mm²)、 γ_c ：コンクリートの材料係数で1.3、 γ_{key} ：円柱状シアキーのせん断強度のばらつきを考慮した部分係数で1.3である。

6. おわりに

チップングの代替、低騒音・低振動・低粉塵、目荒らしの定量評価を目的に建築分野で開発された円柱状シアキーを港湾分野で適用するに際しての基礎的検討として、せん断破壊型の円柱状シアキーの引張強度、曲げ強度およびせん断強度に関する試験および嵩上げ部を想定した実大せん断試験を実施した。

本検討で得られた知見を以下に示す。

- ・円柱状シアキーを用いた部材接合部の引張強度の特性値は、コンクリート標準示方書〔設計編〕に示されているコンクリートの引張強度の計算式(式(1))で求めることができる。
- ・円柱状シアキーを用いた部材接合部の曲げ強度および曲げ耐力は、3.2節で示した平面保持を仮定した梁の曲げ-応力関係から求められると考えられるが、その適用可能性については引き続き検討が必要である。
- ・円柱状シアキーを用いた部材接合部のせん断強度の特性値は式(9)で求めることができる。
- ・円柱状シアキーのせん断強度のばらつきを考慮する部分係数および円柱状シアキーのせん断強度の設計式(式(10))を提案した。

本検討では、限られた試験体数量や試験条件の影響を受けて試験結果にばらつきが大きい。今後は、ばらつきの要因について精査するとともに、それらの要因を極力排除した載荷試験を行い、特に曲げ強度の計算方法と提案した式(10)の適用範囲について検討を進める。

(2025年4月24日受付)

参考文献

- 1) 田中豊, 川端雄一郎, 小林怜夏, 竹信正寛, 横田弘, 山本修司, 鈴木高二朗, 下迫健一郎: 既設防波堤上部工の嵩上げにおける部材接合部の照査法の整理, 港湾空港技術研究所資料, No.1413, 2023.
- 2) 国土交通省: i-Construction 2.0 ~建設現場のオートメーション化~, 2024.
<https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/content/001738240>.

pdf, (参照2025年3月18日)

- 3) 阿部隆英, 樋渡健, 高瀬裕也, 香取慶一: コンクリート構造物の耐震補強の接合部に適用する円柱状シアキーの力学モデルの構築, コンクリート工学論文, 第30巻, pp.11-20, 2019.
- 4) 阿部隆英, 樋渡健, 久保田雅春, 高瀬裕也, 香取慶一: コンクリート構造物の耐震補強の接合部に適用する円柱状シアキーの提案と耐力式の構築 円柱状シアキーを用いた間接接合部に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 736 号, pp.873-883, 2017.6
- 5) 田中亮一, 網野貴彦, 田中豊, 加藤絵万: 円柱状シアキーを配置した接合部の曲げ強度および引張強度に関する実験的検討, 第80回年次学術講演会概要集, Vol.80, 2025. (投稿中)
- 6) (公社) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], p.40, 2022.
- 7) R Core Team: A Language and Environment for Statistical Computing, R Foundation for Statistical Computing, <https://www.R-project.org>, 2025.
- 8) Schneider G., Chicken E. and Becvarik R.: NSM3: Functions and Datasets to Accompany Hollander, Wolfe, and Chicken – Nonparametric Statistical Methods, Third Edition, R package version 1.19, <https://CRAN.R-project.org/package=NSM3>, 2024.
- 9) (公社) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], pp.40-45, 2022.
- 10) 魚本健人, 峰松敏和: コンクリートのせん断強度試験方法に関する基礎的研究, コンクリート工学, 1981, Vol.19, No.4, pp.106-117, 2013.
- 11) 田中豊, 加藤絵万, 網野貴彦, 田中亮一: 円柱状シアキーを設けた部材接合部のせん断耐力に関する基礎的検討, 第79回年次学術講演会概要集, Vol.79, V-517, 2024.
- 12) 望月重, 榎谷栄次, 永坂具也: 壁式プレキャスト構造鉛直接合部のせん断耐力ダウエル効果および圧縮拘束力を考慮した場合, 日本建築学会構造系論文報告集, 第424号, pp.11-22, 1991.

港湾空港技術研究所資料 No.1428

2025. 6

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <https://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2025) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。