

防波堤の嵩上げ設計における差し筋の コーン状破壊照査に関する検討

本間靖明*・竹信正寛**

要 旨

近年、気候変動に伴う海面上昇や波浪の増大を背景として、既設防波堤の嵩上げ対策の重要性が高まっている。嵩上げ部と既設構造物の一体化に用いる差し筋については、コーン状破壊の照査において全ての差し筋列を設計対象とする必要があるが、差し筋配置条件等の影響により、実務上は照査の負担が大きいことが課題となっている。

本検討では、防波堤嵩上げ時の差し筋を対象に、差し筋配置、埋込長およびコンクリート強度等の設計パラメータが、コーン状破壊に対する作用耐力比に与える影響を分析した。その結果、作用耐力比が相対的に大きくなりやすい差し筋列は、港外側から数えた最前列とその内側の列（1列目および2列目）で条件により入れ替わることを明らかにした。

さらに、この入れ替わり（逆転）が生じる条件を嵩上げ幅、埋込長および差し筋間隔により整理し、コーン状破壊照査において重点的に留意すべき差し筋列を効率的に把握するための図表（ $B-d_{\text{slim}}$ グラフ）を提案した。

キーワード：防波堤，気候変動，コーン状破壊，嵩上げ，あと施工アンカー

* 元 港湾・沿岸海洋研究部 港湾施設研究室 交流研究員（株式会社エコー）

** 港湾・沿岸海洋研究部 港湾施設研究室長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省国土技術政策総合研究所

電話：046-844-5019 Fax：046-842-9265 e-mail：ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

Study on Concrete Cone Failure Verification for Dowel Bars in Breakwater Heightening Design

HOMMA Yasuaki*

TAKENOBU Masahiro**

Synopsis

In recent years, the importance of heightening existing breakwaters has increased due to sea-level rise and intensified wave conditions associated with climate change. For dowel bars used to integrate the heightened section with the existing structure, concrete cone failure verification generally requires all rows to be considered in the design. However, the verification process can impose a significant practical burden because the governing row may vary depending on the bar arrangement and other design conditions.

In this study, focusing on dowel bars used in breakwater heightening, the effects of design parameters, including bar arrangement, embedment length, and concrete strength, on the demand-to-capacity ratio for concrete cone failure were investigated. The results showed that the row exhibiting a relatively high demand-to-capacity ratio is either the foremost row counted from the seaward side (first row) or the adjacent inner row (second row), depending on the design conditions.

Furthermore, the conditions under which this reversal occurs were classified in terms of heightening width, embedment length, and bar spacing. Based on these findings, a chart (the $B-d_{slim}$ graph) was proposed to efficiently identify the rows that require priority consideration in concrete cone failure verification.

Key Words : breakwater, climate change, concrete cone failure, heightening, dowel bars

* Guest Research Engineer, Port Facilities Division, Port, Coastal and Marine Department (Ecoh Co., Ltd.)

** Head, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM

National Institute for Land and Infrastructure Management

Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5019 Fax : +81-46-842-9265 e-mail : ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

目 次

1. はじめに	1
2. 検討における各種条件の整理	1
2.1 コーン状破壊に関する性能照査の概要	1
2.2 検討の前提条件	2
2.3 検討モデル	3
2.4 嵩上げ工のコーン状破壊の性能照査に関する特徴	4
2.5 各種パラメータの分析方針	4
3. 設計パラメータの影響検討	6
3.1 作用耐力比の逆転に対する設計パラメータの分析	6
3.2 作用の変化に伴う逆転条件の検討	9
3.3 分析結果のまとめ	9
4. 逆転条件の発生判断図表の提案	10
4.1 逆転条件の整理方法	10
4.2 $B-d_{slim}$ グラフによる整理	10
4.3 $B-d_{slim}$ グラフの活用	11
5. まとめ	11
参考文献	12
記号表	12
付録A	13
付録B	16
付録C	32

1. はじめに

近年、気候変動に伴う海面水位の上昇や台風の激甚化などが指摘されており、港湾施設の防護機能への影響が懸念されている。このため、防波堤等の既設構造物に対しても、気候変動の影響を踏まえた適応策を講じる必要がある。

日本沿岸においては、日本の気候変動 2025¹⁾によると、2004 年から 2024 年の間に平均海面水位が年平均 3.4mm のペースで上昇しており、21 世紀末には 2℃ 上昇シナリオにおいて最大 0.55m、4℃ 上昇シナリオでは最大 0.88m 上昇することが予測されている。また、本多ら (2025)²⁾は、d4PDF を用いた解析により、2℃ 上昇シナリオにおいて、21 世紀末に平均波高が最大 1.08 倍、平均潮位偏差が最大 1.10 倍になると報告している。2024 年には港湾の施設の技術上の基準・同解説³⁾が改訂され、性能照査において気候変動に伴う将来の作用変化を勘案することとなった。

気候変動への適応策の一つとして、既設構造物を有効活用しつつ、天端高を確保する嵩上げはその有力な手法として期待される。この際、既設構造物と嵩上げ部分は差し筋により一体化させることが一般的であるが、その設計手法についてはこれまで統一的に整理されてこなかった。

そこで、田中ら (2023)⁴⁾ (以下、「既往研究」と称する) は、差し筋を用いる場合の防波堤嵩上げ部における設計手法の基本的な考え方を整理し、設計手法を体系化した。既往研究では主にパラペットを対象として、防波堤前面に波浪が作用した際の差し筋の性能照査手法を扱っており、差し筋接合部における降伏、付着破壊、支圧破壊、コーン状破壊といった各種破壊形態に対する照査手法を提示している。

しかしながら、これらの手法においても検討すべき課題が残されている。特に差し筋接合部におけるコーン状破壊の照査に関しては、差し筋に作用する引張力の大小だけでなく、差し筋の配置間隔やコンクリート強度等の耐力側の諸要因が複雑に影響を及ぼす性質を持つ。しかし、差し筋の平面的な配置条件が変化した際の差し筋への作用とコーン状破壊耐力の相互関係については、必ずしも明確になっていない。また、コーン状破壊の照査は、後述する有効投影面積の算定がやや複雑であることから、性能照査自体に手間を要するという課題もある。

そこで、本稿では防波堤嵩上げ部における差し筋を対象として、その配置変化や各種設計パラメータがコーン状破壊の性能照査結果に及ぼす影響を明らかにすると

もに、コーン状破壊照査の効率化に資する判断図表を提案し、設計技術者の参考となる資料を提供することを目的とする。

2. 検討における各種条件の整理

2.1 コーン状破壊に関する性能照査の概要

本稿で取り扱うコーン状破壊とは、既往研究⁴⁾で示すように、差し筋の引抜き力に対して既設側のコンクリートがコーン状 (錐状) に破壊される現象である (図 2.1)。このモデルでは、差し筋の埋込長 l_d に対して 45 度の角度で破壊範囲が広がると想定する。また、この範囲を上部から平面的にみると円形となり、その面積を有効水平投影面積 A_c と呼ぶ。以降の検討においては、このモデルを前提とする。

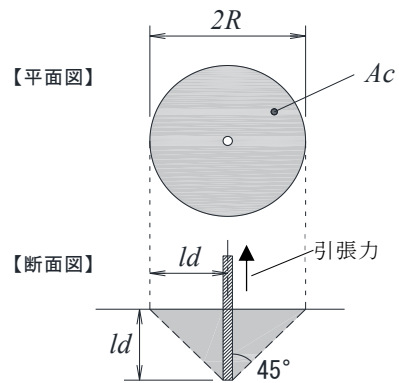


図 2.1 コーン状破壊のモデル図

既往研究におけるコーン状破壊の照査方法に関しては、あと施工アンカー施工指針 (案)⁵⁾に示す式 (2.1) が一般的に用いられており、このとき式中の T_{id} は作用力、 T_{cd} は耐力である。添字 d は設計用値を示す。 T_{id} および T_{cd} の導出に関しては、それぞれ式 (2.2) ~ 式 (2.4) が用いられており、本検討においてもこの照査手法を基に検討を行う。

$$\frac{T_{id}}{T_{cd}} \leq 1.0 \quad (2.1)$$

$$T_{id} = \gamma_t \cdot T_{ik} \quad (2.2)$$

$$T_{ik} = \frac{B - c_1 - d_s(i-1)}{\sum_{i=1}^N (B - c_1 - d_s(i-1))^2} \cdot \left(m \cdot \frac{\gamma_s}{\gamma_t} \cdot P_{Hk} - W_k + P_{Uk} \right) \quad (2.3)$$

$$T_{cd} = \frac{K_t \cdot \alpha_t \cdot A_c \sqrt{f_{ck}} / \gamma_c}{\gamma_b} \quad (2.4)$$

$$T_{cd} \approx 0.126114 \cdot A_c \sqrt{f_{ck}} \quad (2.5)$$

ここに、 i ：港外側から数えた差し筋列番号（最も港外側の差し筋列を1列目とする．）， T_{id} ：差し筋に生じる引張力の設計用値， T_{ik} ：差し筋に生じる引張力の特性値， γ_t ：差し筋に生じる引張力に関する部分係数， T_{cd} ：コーン状破壊に対する耐力の設計用値， B ：嵩上げ工の嵩上げ底面幅（嵩上げ幅）， c_l ：法線直角方向の芯かぶり（はしあき）， d_s ：法線直角方向の差し筋間隔， m ：調整係数， γ_s ：荷重項に乗じる部分係数， K_t ：使用期間の長さの影響を表す係数（短期荷重として1.0）， α_t ：あと施工アンカーの種類を表す係数（0.23）， A_c ：コーン状破壊の有効水平投影面積， f_{ck} ：コンクリートの圧縮強度の特性値， γ_c ：コンクリートの材料係数（1.3）， γ_b ：部材係数（1.6）である．

式(2.3)中の作用力（引張力） T_{ik} は、差し筋1本あたりの大きさを示しており、主に嵩上げ工の港内側端部を回転中心とした波力モーメント P_{Hk} と自重モーメント W_k および揚圧力モーメント P_{Uk} を基にして計算される．添字 k は特性値を示す．算定においては、嵩上げ工の底面幅 B や差し筋の配置条件（差し筋間隔 d_s 、はしあき c_l など）の影響を加味し、嵩上げ工の港内側端部を回転中心とした転倒モーメントのつり合いから、 i 列目の差し筋1本あたりに生じる引張力の特性値 T_{ik} を求める．なお、嵩上げ部に対する波力などの各種作用は、図2.2 に示すように前面に合田波圧を作用させ、揚圧力は三角形分布として仮定されている．

また、耐力 T_{cd} を示す式(2.4)の K_t 、 α_t 、 γ_b および γ_c は係数であり、条件によらず一定値である．既往研究⁴⁾をもとにこれらの値を整理すると式(2.5)のようになり、有効水平投影面積 A_c とコンクリートの強度 f_{ck} に依存する． f_{ck} はモーメント作用時に抵抗する既設側の上部工コンクリート強度が対象であり、一般的に活用されているコンクリート強度は $18 \sim 36 \text{ N/mm}^2$ 程度である．

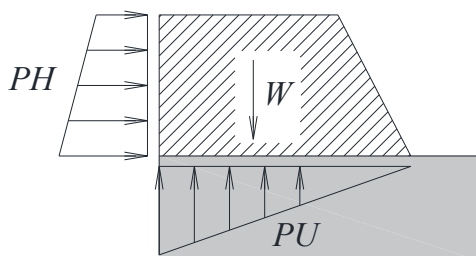


図2.2 作用波力のモデル

2.2 検討の前提条件

本検討では、特に嵩上げ部の差し筋による有効水平投影面積 A_c （以降、「投影面積」と称する）が重複する場合の検証を通じて、抵抗するコンクリート体積（破壊範囲）の減少が、性能照査におけるコーン状破壊の作用耐力比に与える影響に着目する．ここでいう重複とは、図2.3 に示すように隣接する差し筋（隣接筋）との位置が近く、投影面積の円（投影円）の一部が重なる場合を指している．

また、本検討では差し筋配置を一般的に実務設計で多く用いられている千鳥配置として想定する．千鳥配置とは、図2.4 に示すように隣接筋を法線平行方向に半ピッチ ($l_s/2$) ずらした配置であり、投影面積の重複を最小化できる利点がある．なお、千鳥配置は実務において広く採用される標準的な配置形式であり、本検討では格子状配置等の他の形式は対象外とする．

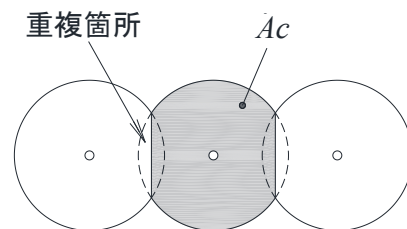


図2.3 有効水平投影面積の重複のイメージ

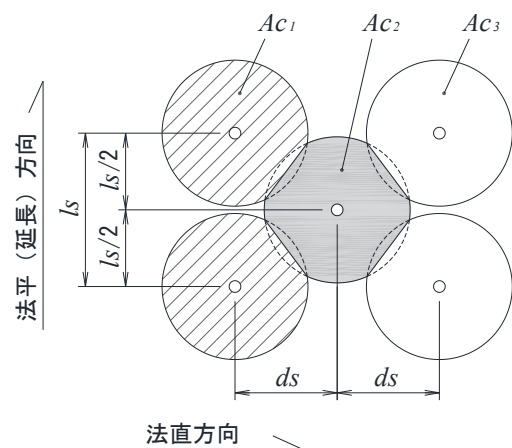


図2.4 千鳥配置の概要

図2.4において、 d_s ：法線直角方向の差し筋間隔， l_s ：法線平行方向の差し筋間隔である．投影面積 A_c の重複は隣接筋との配置間隔により変化し、一定ではないため、この d_s と l_s をパラメータとして算定する．投影面積の重複部分は、隣接する差し筋の投影円（半径 R ）の重なり面積として幾何学的に算定する．千鳥配置の場合、重複

面積は d_s および $l_s/2$ から定まる 2 円の交差面積として計算され、これを A_c から差し引くことで有効投影面積を得る（詳細は付録 A 参照）。なお、コーン状破壊の破壊面は図 2.1 に示すように 45° として固定するため、投影面積 A_c の半径 R は、差し筋の埋込長 l_d と等しくなる ($R = l_d$)。

差し筋の埋込長 l_d は、一般には定着長（コンクリートと鉄筋の付着に必要な長さ）であり、コンクリート強度と差し筋の径により算定できる。ただし、あと施工による嵩上げ工事では、既設のコンクリート面を削孔する必要があるが、ハンマドリル等の工具には穿孔深さに限界がある。そのため、定着長に相当する深さまで穿孔するのは容易ではない。このような施工上の制約から、実際には定着長による埋込みではなく、より短い穿孔長で性能を発揮できる、あと施工アンカー（接着系）が用いられることが多い⁶⁾。

あと施工アンカー（接着系）においては、挿入する差し筋（主に異形鉄筋）の径に応じて、接着させる穿孔長が知られており、その長さに対応した穿孔を行うことが一般的である。そこで、本検討においては接着系のあと施工アンカーの穿孔長を基本とし、これを埋込長 l_d として検討する。

なお、あと施工アンカー（接着系）に関しては、使用実績の多い標準型カプセルタイプを参考として、表 2.1 に示す差し筋径（規格）および埋込長とする。

表 2.1 鉄筋規格と埋込長 l_d

鉄筋規格	埋込長 l_d (mm)
D13	100
D16	130
D19	200
D22	250
D25	300
D29	350

2.3 検討モデル

本稿では、ケーソン式混成堤および消波ブロック被覆堤の代表ケースを対象として、将来の気候変動に対応した嵩上げ断面を想定し、この断面に対するコーン状破壊の検討を行う。具体的には、長尾（2001,2002）^{7) 8)}の地域的・設計条件的に偏りがないように全国から収集された防波堤 76 事例（ケーソン式混成堤 38 ケース、消波ブロック被覆堤 38 ケース）のうち、防波堤前面の有義波高 $H_{1/3}$ の大小に着目して計 6 ケースを抽出した。抽出した 6 ケースは、ケーソン式混成堤と消波ブロック被覆堤の各構造形式について、有義波高が最大・最小・中間（最大

値と最小値の平均に最も近い値）の 3 施設を対象とした。

これらの施設の設計条件に対して防波堤の前面潮位や波高の増大を想定し、これに対応するための防波堤の嵩上げが必要となったことを想定した嵩上げ断面モデルを作成する。嵩上げ工の天端高は、将来の気候変動による潮位上昇や波高増大の作用を考慮して所要天端高の算定式 ($H.W.L.+0.6H_{1/3}$) より決定する。

日本の気候変動 2025 では、 2°C 上昇シナリオに対する日本周辺海域における平均水位上昇量の 90 パーセントイル値として 55cm が示されている。本稿では、これを気候変動に対する潮位上昇量とし、長尾らの検討条件における H.W.L. に一律 55cm を加えて検討した。

また、有義波高 $H_{1/3}$ については、本多ら（2025）²⁾により示された海域別の波高の将来予測比の最大値である 1.12 倍を用いて、各ケースの有義波高に直接乗じることにより波高増大後の有義波高 $H_{1/3}$ を設定した。同研究の算定結果は、沖波としての 50 年確率波高の変化を対象としたものではあるが、本検討では便宜上、防波堤前面の有義波高にも同程度の増大が起こると仮定した。

これらの条件を踏まえ、気候変動に対して嵩上げが必要な所要天端高を算定して設計条件を整理した。整理結果の一覧を表 2.2 に示す。ただし、消波ブロック被覆堤の施設 No.6 では、算定された必要な嵩上げ高さ h は 0.1 m と低く、施工性を考慮すると現実的な嵩上げ高さではない。そのため、当該断面の嵩上げ高は 0.5m として設定した。

また、本検討では嵩上げ工差し筋のコーン状破壊に対する性能照査結果に着目しており、防波堤本体や嵩上げ工に対する全体安定性については考慮していない。

表 2.2 嵩上げ工の設計条件

項目	ケーソン式混成堤			消波ブロック被覆堤		
施設 No.	1	2	3	4	5	6
波高種別	最大	中間	最小	最大	中間	最小
設計波高 H_D m	19.80 (14.05)	12.10 (12.00)	4.60 (4.10)	24.20 (20.09)	14.10 (11.50)	4.00 (3.70)
有義波高 $H_{1/3}$ m	11.00 最大	6.70 中間	2.60 最小	13.44 最大	7.80 中間	2.24 最小
周期 T s	14.00	11.30	7.50	16.00	11.00	11.00
入射角 β °	0.0	7.0	43.0	0.0	0.0	0.0
海底勾配	0.009	0.0167	0.004	0.001	0.02	0.01
設計潮位 w_l m	1.05 (0.50)	1.45 (0.90)	2.65 (2.10)	4.05 (3.50)	0.95 (0.40)	1.05 (0.50)
所要天端高 Cr m	7.7 (6.4)	5.5 (4.5)	4.3 (3.5)	12.2 10.7*	5.7 (4.6)	2.4 (2.3)
設計堤体幅 B_{cu} m	24.5	19.3	5.4	21.1	14.5	4.3

〇書きは、引用元（長尾）の設計条件（現況）。太字は設定した設計条件。

* 引用元では $Cr=7.0\text{m}$ とあるが、設計潮位 $+0.6H_{1/3}$ より設定

2.4 嵩上げ工のコーン状破壊の性能照査に関する特徴

次に、差し筋のコーン状破壊の性能照査に関する特徴を整理する。既往研究の考え方に基づけば、嵩上げ工の自重による転倒安定性が確保されない場合、差し筋が負担する引張力は、図 2.5 に示すように支点（回転中心）からの距離に応じて増加し、港外側の差し筋が最大の引張力を負担する。すなわち港外側 1 列目の引張力が最大となり、2 列目以降の列では支点に近い分、作用する引張力は順次低下していく。

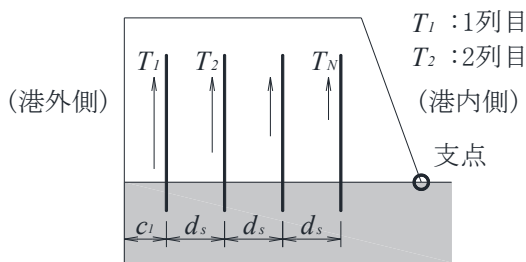


図 2.5 コーン状破壊の差し筋の作用に関する概念図

しかし、コーン状破壊の照査においては、引張力が最大となる港外側 1 列目の作用耐力比が必ずしも最大となるわけではない。これは、コーン状破壊耐力に影響を及ぼす投影面積 A_c が、前述のように差し筋の配置状況（隣接する差し筋との干渉）の影響を受けるためである。具体的には、港外側 1 列目よりも港内側に位置する差し筋（2 列目以降）は、両側の差し筋により投影面積 A_c が重複するため、耐力は 1 列目よりも 2 列目以降の方が小さくなる。このため、式 (2.1) に示す作用耐力比は、各列の差し筋に生じる作用力と耐力特性の双方に依存する。

ここで、差し筋の埋込長や配置間隔が等しいとした場合、港内側の差し筋に挟まれた 2 列目以降の差し筋（これを中間列と呼ぶ）の投影面積はすべて同一である。この条件において耐力面に着目すると、中間列の中で最も大きな作用力が加わる 2 列目は、他の中間列（3 列目以降）に比べて、常に作用耐力比が大きくなる。そのため、これらの中間列は、港外側 2 列目をその代表とすることができる。したがって、コーン状破壊における性能照査においては、作用力が最大となる港外側 1 列目と 2 列目の作用耐力比の大小関係が重要となる。

差し筋の配置間隔 (d_s, l_s) が十分に広く投影面積 A_c の重複がない場合では、耐力は一定値となることから、作用力が最大となる港外側 1 列目の作用耐力比が最も大きくなる。一方、差し筋の配置間隔が狭まるにつれ、投影面積 A_c の重複による耐力低下の影響は相対的に大きくなり、2 列目以降の作用耐力比が大きくなる。

図 2.6 は、算定パラメータを固定し、法線直角方向の差し筋間隔 d_s のみ変化させた際に 1 列目（図中実線）と 2 列目（図中点線）のコーン状破壊に対する作用耐力比 (T_{id}/T_{cd}) の関係を概念的に示したものである。法線直角方向の差し筋間隔を狭くした d_{s1} では、2 列目の作用耐力比が大きくなり、差し筋間隔を広くした d_{s2} では、1 列目の作用耐力比が大きくなることから、ある d_s を境として、作用耐力比の「逆転」が生じることになる。

ここで、コーン状破壊に対する性能照査に関しては、コーン状破壊の投影面が重複する場合の投影面積 A_c の算定が複雑（付録 A）であるという課題がある。このため、どのような条件の場合に 1 列目のみを照査対象とすべきか、2 列目も含めて照査対象とすべきかを検討しておくことは、設計実務における効率上の観点から有益であると考えられる。しかし、図 2.6 に示すような 1 列目と 2 列目の作用耐力比が逆転する条件は、一概には不明である。以降、港外側 1 列目と 2 列目の作用耐力比が等しくなる ($T_{1d}/T_{cd} = T_{2d}/T_{cd}$) を「逆転条件」とし、この逆転条件のときの法線直角方向の差し筋間隔 d_s 値を d_{stim} と定義して、この値を中心に各設計パラメータの影響を分析する。

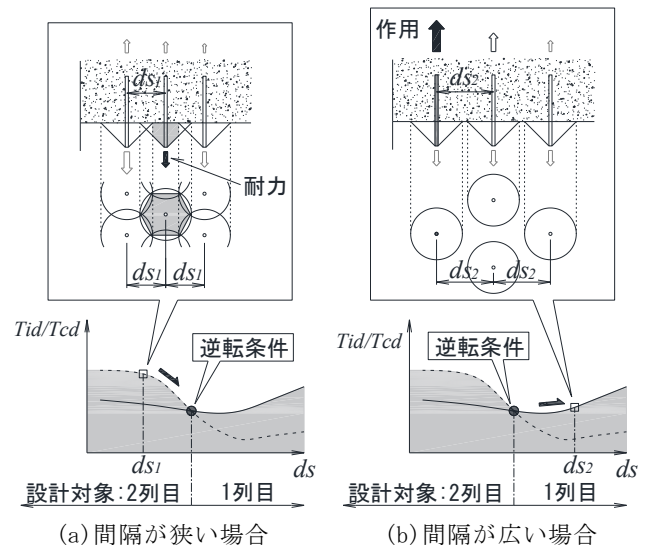


図 2.6 逆転条件の概要図

2.5 各種パラメータの分析方針

以下では、コーン状破壊の逆転条件における各種パラメータの感度の分析方針を示す。式 (2.1) ～ (2.5) に示す嵩上げ工の照査および投影面積 A_c の算定において主要なパラメータである嵩上げ幅 B 、法線直角方向の差し筋列数 N 、既設上部工のコンクリート強度 f_{ck} 、差し筋の埋込長 l_d 、法線直角方向の差し筋間隔 d_s および法線平行方

向の差し筋間隔 I_s の変化に対する、逆転条件の変化の有無を分析する。設計パラメータの組み合わせが膨大となるため、分析において着目した設計パラメータの設定手法を以下に整理する。

(1) 嵩上げ幅 B

嵩上げ工の底面幅（嵩上げ幅） B に関しては、設計条件や利用条件により様々な寸法が設定される。本検討で対象とする嵩上げ工は、既設上部工にパラペットを追加するケースを想定する。嵩上げ工の形状は、一般的な形状を想定して図 2.7 に示すような台形形状のパラペットとした。このパラペットの底面幅を B とし、嵩上げ工の港内側には 1:0.5 の法勾配を設けた。検討する嵩上げ幅 B は、大小様々な幅を想定するため、 $B=2.0\text{m}$ を最小幅と設定し、2m 間隔で幅を変動させた（図 2.8）。この際、幅に応じて自重や揚圧力も変化するため、図 2.2 の荷重の考え方を基本として、検討モデルごとに表 2.3 に示す作用力を設定した。

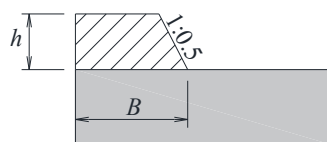


図 2.7 嵩上げ工の基本形状

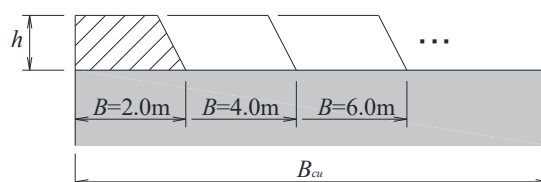


図 2.8 各種嵩上げ幅の検討

表 2.3 嵩上げ幅別作用力の一覧表

■ケーソン式防波堤									
施設	施設No.1			施設No.2			施設No.3		
嵩上げ高	h=1.30m			h=1.00m			h=0.80m		
堤体幅	Bcu=24.5m			Bcu=19.3m			Bcu=5.4m		
嵩上げ幅	波力 モーメント	自重 モーメント	揚圧力 モーメント	波力 モーメント	自重 モーメント	揚圧力 モーメント	波力 モーメント	自重 モーメント	揚圧力 モーメント
B (m)	P_{IR} (kN・m/m)	W_k (kN・m/m)	P_{IK} (kN・m/m)	P_{IR} (kN・m/m)	W_k (kN・m/m)	P_{IK} (kN・m/m)	P_{IR} (kN・m/m)	W_k (kN・m/m)	P_{IK} (kN・m/m)
2.0	140.619	56.692	230.017	44.094	44.256	123.013	7.116	35.668	33.086
4.0	140.619	233.004	920.414	44.094	179.840	492.238	7.116	144.141	132.395
5.4*	--	--	--	--	--	--	7.116	263.151	241.261
6.0	140.619	526.706	2,070.672	44.094	405.834	1,107.396	--	--	--
8.0	140.619	938.047	3,680.965	44.094	722.319	1,968.581	--	--	--
10.0	140.619	1,467.025	5,752.154	44.094	1,129.073	3,076.254	--	--	--
12.0	140.619	2,113.297	8,282.688	44.094	1,626.228	4,429.584	--	--	--
14.0	140.619	2,877.089	11,273.256	44.094	2,213.783	6,028.941	--	--	--
16.0	140.619	3,758.402	14,725.239	44.094	2,891.738	7,875.062	--	--	--
18.0	140.619	4,757.234	18,636.048	44.094	3,660.093	9,966.564	--	--	--
19.3*	--	--	--	44.094	4,208.000	11,458.462	--	--	--
20.0	140.619	5,874.164	23,006.891	--	--	--	--	--	--
22.0	140.619	7,108.096	27,839.667	--	--	--	--	--	--
24.0	140.619	8,459.547	33,130.752	--	--	--	--	--	--
24.5*	140.619	8,815.772	34,524.875	--	--	--	--	--	--

■消波ブロック被覆堤									
施設	施設No.4			施設No.5			施設No.6		
嵩上げ高	h=1.50m			h=1.10m			h=0.50m		
堤体幅	Bcu=21.1m			Bcu=14.5m			Bcu=4.3m		
嵩上げ幅	波力 モーメント	自重 モーメント	揚圧力 モーメント	波力 モーメント	自重 モーメント	揚圧力 モーメント	波力 モーメント	自重 モーメント	揚圧力 モーメント
B (m)	P_{IR} (kN・m/m)	W_k (kN・m/m)	P_{IK} (kN・m/m)	P_{IR} (kN・m/m)	W_k (kN・m/m)	P_{IK} (kN・m/m)	P_{IR} (kN・m/m)	W_k (kN・m/m)	P_{IK} (kN・m/m)
2.0	152.210	64.618	188.783	41.692	48.459	97.232	2.660	22.480	31.303
4.0	152.210	268.019	755.417	41.692	197.617	389.073	2.660	90.291	125.258
4.3*	--	--	--	--	--	--	2.660	104.358	144.749
6.0	152.210	606.960	1,699.476	41.692	446.186	875.304	--	--	--
8.0	152.210	1,081.514	3,021.102	41.692	794.294	1,555.999	--	--	--
10.0	152.210	1,691.803	4,721.003	41.692	1,241.700	2,431.522	--	--	--
12.0	152.210	2,437.434	6,797.904	41.692	1,788.546	3,501.216	--	--	--
14.0	152.210	3,319.127	9,252.372	41.692	2,435.173	4,765.374	--	--	--
14.5*	--	--	--	41.692	2,612.294	5,112.200	--	--	--
16.0	152.210	4,336.026	12,085.540	--	--	--	--	--	--
18.0	152.210	5,488.525	15,295.284	--	--	--	--	--	--
20.0	152.210	6,776.624	18,882.595	--	--	--	--	--	--
21.1*	152.210	7,542.877	21,017.828	--	--	--	--	--	--

*:全幅Bcuの場合の算定値

(2) 法線直角方向の差し筋列数 N

差し筋列数 N と法線直角方向の差し筋間隔 d_s の組み合わせパターンは多岐にわたる。そのため検討する差し筋列数 N を数パターンに固定することとした。

この際、1 列目のかぶり（はしあき） c_1 は図 2.9 に示すように 500mm と仮定した。これは、想定する最大の投影面積半径（ $l_d=350\text{mm}$ ）以上を確保することで、かぶりによる 1 列目の投影面積の欠損の影響を排除するためである。

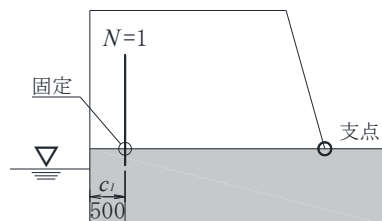


図 2.9 1 列目のかぶり（はしあき） c_1 の設定

差し筋列 1 列目を起点として、2 列目以降を差し筋間隔 d_s の一定間隔で港内側に配置した。この際、 N は嵩上げ幅 B に収まる列数が上限である。嵩上げ幅 B に対して、 d_s を 0.50m, 1.00m 間隔およびその中間となる間隔とした際に上限となる N が以下の式 (2.6) を満足するようにして求めた。

$$c_1 + d_s(N - 1) \leq B \quad (2.6)$$

また、この中間となる間隔の N についても検討した。具体的には式 (2.7) から求めた調和平均値より、 $d_s=0.66\text{m}$ 間隔とした。このようにして得られる 3 パターンを検証

対象とする．

$$d_{s3} = \frac{2}{\frac{1}{d_{s1}} + \frac{1}{d_{s2}}} = \frac{2 \cdot d_{s1} \cdot d_{s2}}{d_{s1} + d_{s2}} \quad (2.7)$$

ここで、 d_{s1} ：差し筋間隔①（＝0.50m）， d_{s2} ：差し筋間隔②（＝1.00m）， d_{s3} ：中間（調和平均）の差し筋間隔である．

6つの嵩上げモデル断面において、3パターンの列数 N の設定結果を表2.4に示す．

表2.4 法線直角方向の差し筋列数 N の設定値

施設 No.	差し筋列数	差し筋間隔
	N [列]	d_s [mm]
No.1	24, 36, 48	1000, 660, 500
No.2	19, 29, 38	"
No.3	5, 8, 10	"
No.4	20, 31, 41	"
No.5	14, 21, 28	"
No.6	4, 6, 8	"

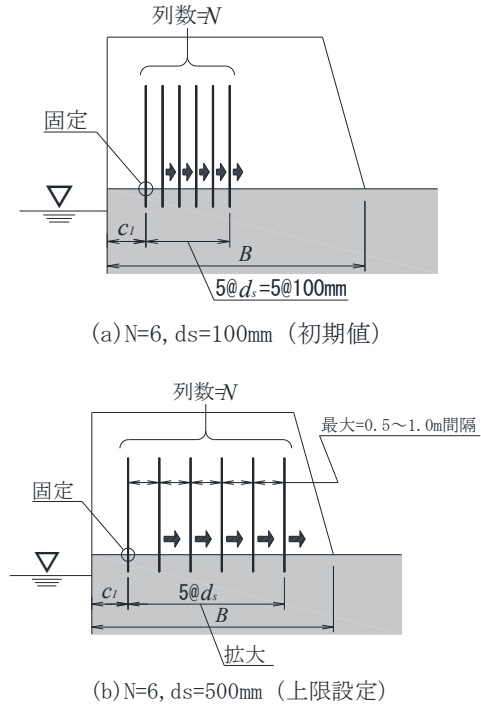


図2.10 法線直角方向の差し筋配置 d_s の設定方法

(3) 差し筋間隔および投影面積に関するパラメータ

図2.10は法線直角方向の差し筋間隔 d_s の設定方法を示したものである．

まず、(2)で設定した列数 N を固定する．次に、 d_s 以外のパラメータ (l_s , l_d) は、それぞれ一定範囲で固定条件として設定した．法線平行方向の差し筋間隔 l_s は 250, 500, 750mm の3ケース、差し筋の埋込長 l_d は表2.1に示す 100～350mm の6ケースである．

このような条件に対し、 d_s の最小間隔を 100mm とし、 d_s を 10mm ずつ増加させて嵩上げ幅 B に収まる範囲で d_s が最大 1.0m 間隔となるよう差し筋を配置していく．

使用する差し筋の規格（鉄筋径および埋込長）は全列において同一とし、異なる規格の差し筋が混在する状況は想定しないものとする．ただし本検討においては、法線平行方向のかぶり（へりあき） c_2 に伴う投影面積の減少は考慮していない．

(4) 既設上部工のコンクリート強度 f_{ck}

既設上部工のコンクリート強度に関しては、一般的に使用される強度を参考として、18, 21, 24, 27, 30, 33, 36N/mm² の7ケースとした．

以上の(1)～(4)に示す方針を踏まえて、施設 No.1 から No.6 の施設に対してコーン状破壊の逆転条件に着目した検討を総当たりに実施する．

3. 設計パラメータの影響検討

3.1 作用耐力比の逆転に対する設計パラメータの分析

本章では、2.で示した各パラメータが嵩上げモデルの逆転条件へ与える影響について検討する．嵩上げモデルに対して特定の設計パラメータのみを変化させ、他の値を固定した際の法線直角方向の差し筋間隔 d_s とコーン状破壊の作用耐力比の関係を整理した．

この際、作用耐力比の絶対値の変化ではなく、逆転条件となる法線直角方向の差し筋間隔 d_{slim} の変化に着目した．これは、実務設計において d_s の設定の任意性が比較的高く、どのような条件で作用耐力比が最大となる列（以下、支配列と表記．）が入れ替わるかを把握することは、設計実務にとって有用であると考えたためである．検討に用いる作用は、特に断りがない限り表2.2に示す条件で固定した．

また、本文中では各パラメータに対する分析結果のうち代表ケースを示しており、それ以外の主な結果については付録Bとして整理した．

(1) 法線平行方向の差し筋間隔 l_s および埋込長 l_d

図 3.1 および図 3.2 に、分析対象とするパラメータを法線平行方向の差し筋間隔 l_s および差し筋の埋込長 l_d とした場合の検討結果の一部を図 3.1 及び図 3.2 に示す。ここで、図 3.1 は、施設 No.3, $B=2.00\text{m}$, $l_d=300\text{mm}$, $N=3$, 図 3.2 は、施設 No.2, $B=8.00\text{m}$, $l_s=250\text{mm}$, $N=8$ とした際の結果である。図中の横軸は法線直角方向の差し筋間隔 d_s , 縦軸は各条件に対応する 1 列目または 2 列目の差し筋の作用耐力比である。

各図における逆転条件となる d_{slim} (各図中●印) に着目すると、各パラメータの変化に応じて d_{slim} も変化している。これらの結果から l_s および l_d は逆転条件に影響することがわかる。

これは、 l_d および l_s が投影円の半径と千鳥配置における重複形状を直接規定するパラメータであるためである。 l_d が大きくなると投影円の半径が増大し、重複面積も増加するが、両側に隣接筋を持つ 2 列目への影響が相対的に大きくなる。一方、 l_s が大きくなると隣接筋との重複面積が減少するため、2 列目の耐力低下が緩和される。その結果、 d_{slim} は、より小さな値に変化する結果となる。

なお、各図中の●印の d_{slim} は、 d_s を 100mm から 10mm 間隔で増加させた際に 1 列目と 2 列目の作用耐力比が逆転する直前・直後の 2 点を線形補間して得られる d_s 値を算定してプロットしている。

(2) 差し筋列数 N

差し筋列数 N が d_{slim} に及ぼす影響を検討するため、 d_s の最小間隔 100mm から順次 10mm ずつ増加させ、1 列目と 2 列目の作用耐力比をそれぞれプロットし、 d_{slim} の差し筋列数 N の違いによる変化の有無を検討した。

図 3.3 は、分析対象とするパラメータを差し筋列数 N とした場合の検討結果の一部(施設 No.5, $B=14.50\text{m}$ (全幅), $l_s=500\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$ (D19) の $N=14, 21, 28$) である。 d_{slim} (図中●印) に着目すると、これらのパラメータは、変化に伴い縦軸の作用耐力比は増減するものの、 d_{slim} の値は変化していないことがわかる。

その他、施設 No.1~6 における代表的な比較結果 ($l_s=750\text{mm}$, $l_d=250\text{mm}$, 嵩上げ幅 $B=B_{cu}$ の条件) を表 3.1 に示す。上記と同様に、差し筋列数 N の違いは、 d_{slim} の値に影響を及ぼさない。

この理由として、差し筋列数が変化したとしても差し筋 1 本あたりの作用力が一律に増減するのみであることから、作用耐力比の差し筋列間における相対的な変化を発生させる要因にはならないためであると考えられる。

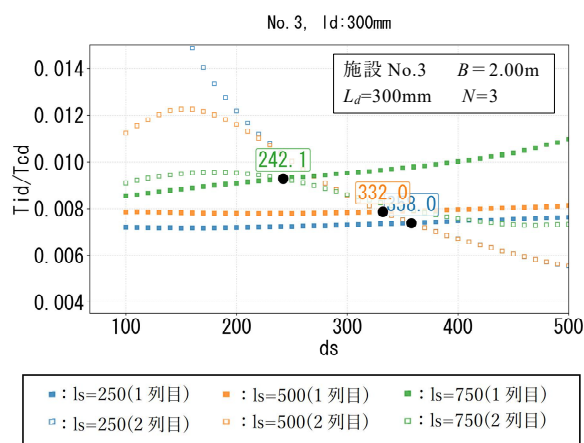


図3.1 法線平行方向の差し筋間隔 l_s と d_{slim} の関係

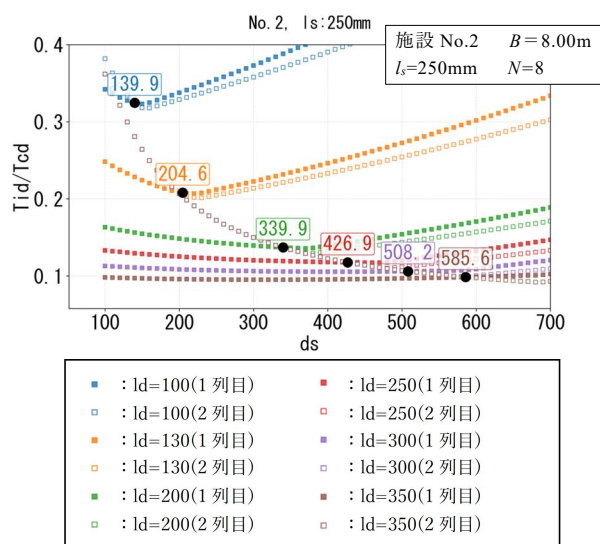


図3.2 埋込長 l_d と d_{slim} の関係

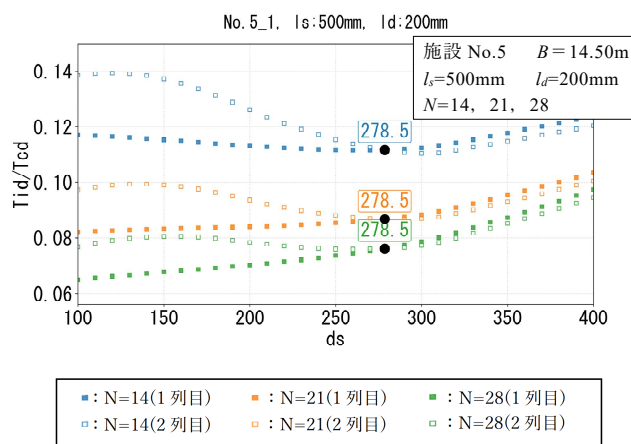


図3.3 差し筋列数 N と d_{slim} の関係

表3.1 差し筋列数 N に対する d_{slim}
($l_s=750\text{mm}$, $l_d=250\text{mm}$)

施設 No.	項目	①	②	③	d_{slim} 変化
No.1	N	24	36	48	なし
	逆転時 d_s	294.0	294.0	294.0	
No.2	N	19	29	38	なし**
	逆転時 d_s	287.7	287.8	287.7	
No.3	N	5	8	10	--
	逆転時 d_s	*	*	*	
No.4	N	20	31	41	なし
	逆転時 d_s	290.1	290.1	290.1	
No.5	N	14	21	28	なし
	逆転時 d_s	279.0	279.0	279.0	
No.6	N	4	6	8	なし**
	逆転時 d_s	217.7	217.5	217.6	

* : 自重で安定性が確保されているため差し筋が不要

** : 按分により, 逆転時 d_{slim} に誤差はあり(3) コンクリート強度 f_{ck}

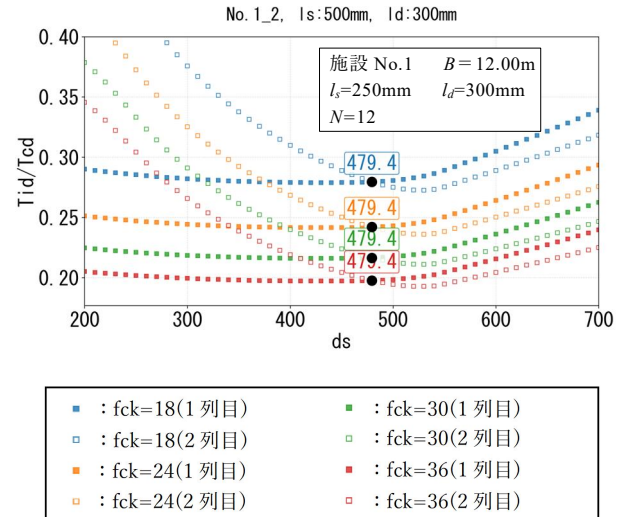
分析対象とする設計パラメータを既設防波堤側のコンクリート強度 f_{ck} とした結果を示す. 図 3.4 はその検討結果の一部 (施設 No.1, $B=12.00\text{m}$, $l_s=500\text{mm}$, $l_d=300\text{mm}$ (D25), $N=12$) であり, コンクリート強度 f_{ck} のみを変化させた際の, 法線直角方向の差し筋間隔 d_s に対する作用耐力比をプロットした結果である. 差し筋間隔 d_s は最小間隔を 100mm (初期値) から順次 10mm ずつ変化 (増加) させている. f_{ck} は 2. に示したとおり, $18\sim 36\text{N/mm}^2$ の 7 ケース (図 3.4 中においては $18, 24, 30, 36\text{N/mm}^2$ の 4 ケースのみ提示) とした.

上記と同様に逆転条件となる d_{slim} の変化に着目すると, 図 3.4 に示すとおり, コンクリート強度の変化に伴い縦軸の作用耐力比は増減するものの, d_{slim} の値は変化していない.

また, その他の条件 ($l_s=500\text{mm}$, $l_d=300\text{mm}$, 嵩上げ幅 $B=B_{cu}$) を抽出し, 施設 No.1~6 における比較結果を表 3.2 に示すが, d_{slim} は同様に変化が見られなかった. これは, コンクリート強度の変化は各列の耐力を一律に増減させるに留まるため, 作用耐力比の差し筋列間の大小関係の相対的な変化を起こす要因にならないためであると考えられる.

(4) 嵩上げ幅 B

嵩上げ工の底面幅 B は嵩上げ工の躯体形状に関する条件である. B は直接的な差し筋のパラメータとはいえないが, 転倒支点からの距離の条件が変化することにより, 荷重条件の変化をもたらし, 結果として d_{slim} に影響を与える可能性がある.

図3.4 コンクリート強度 f_{ck} と d_{slim} の関係表3.2 f_{ck} に対する d_{slim} の比較結果の一例
($l_s=500\text{mm}$, $l_d=300\text{mm}$)

施設 No.	f_{ck}							d_{slim} 変化
	18	21	24	27	30	33	36	
No.1	503.3	503.3	503.3	503.3	503.3	503.3	503.3	なし
No.2	496.3	496.3	496.3	496.3	496.3	496.3	496.3	なし
No.3	*	*	*	*	*	*	*	--
No.4	498.9	498.9	498.9	498.9	498.9	498.9	498.9	なし
No.5	486.3	486.3	486.3	486.3	486.3	486.3	486.3	なし
No.6	413.2	413.2	413.2	413.2	413.2	413.2	413.2	なし

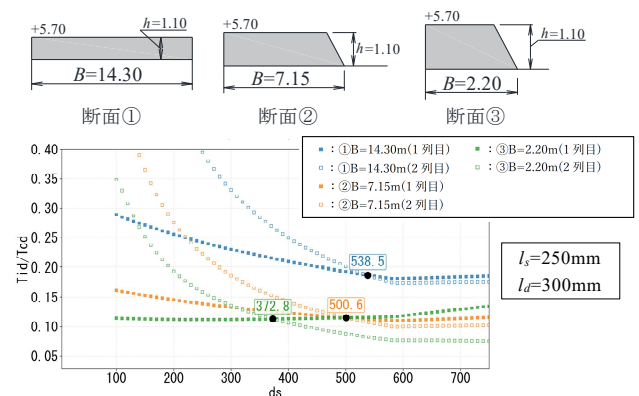
図3.5 嵩上げ幅 B と d_{slim} の関係

図 3.5 は任意の形状①~③において, パラメータを $l_s=250\text{mm}$, $l_d=300\text{mm}$ とした場合の法線直角方向の差し筋間隔 d_s に対する作用耐力比をプロットした結果である. 条件 B の違いにより, d_{slim} が異なることが確認されたが, この影響については 4. において整理する.

3.2 作用の変化に伴う逆転条件の検討

次に、各嵩上げ断面モデルに対して、式(2.3)の導出に用いる波力モーメント P_{Hk} 、自重モーメント W_k および揚圧力モーメント P_{Uk} が単純に増大した場合の逆転条件となる d_{slim} を算定し、作用波力などの作用の増減が1列目と2列目の d_{slim} に影響するか否かを検討した。

ここでは、表2.2に示す設計条件に基づく波力、自重、揚圧力によって生じる各モーメントの作用を、表3.3に示すように等倍、2倍、3倍と変化させた。この場合において、各 d_s に対する1列目と2列目の作用耐力比をプロットした結果の一部を図3.6に示す。ここで、図3.6で抽出した条件としては、No.1、 $B=4.00\text{m}$ 、 $l_s=500\text{mm}$ 、 $l_d=300\text{mm}$ (D25) である。なお、 d_s の変化方法については前節に示した方法と同様である。

図に示すとおり、各作用の増加に伴い、差し筋に対する作用耐力比を増加する。しかし、港外側1列目と2列目の d_{slim} の値(図中●印)は、同一の位置に留まっており、これらの外力パラメータに関しても1列目と2列目の d_{slim} には影響を与えないといえる。

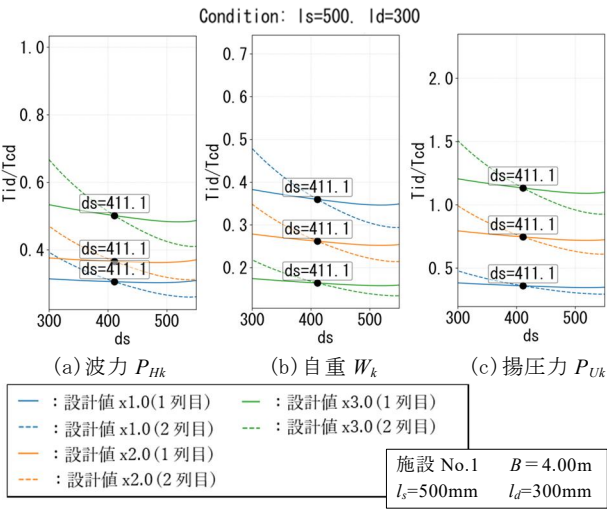


図3.6 作用に対する d_{slim} の関係

表3.3 各作用モーメントの値

作用	特性値 [kN・m/m]		
	x1.0 (等倍)	x2.0	x3.0
P_{Hk}	140.619	281.238	421.857
W_k	97.252	194.504	291.756
P_{Uk}	388.752	777.504	1166.256

3.3 分析結果のまとめ

以上の感度分析に基づき、各パラメータが逆転条件に及ぼす影響の有無を表3.4に整理する。

本章の分析により、差し筋列数 N およびコンクリート強度 f_{ck} は、作用耐力比を増減させるものの、逆転条件となる法線直角方向の差し筋間隔 d_s の相対的な関係性には影響を及ぼさないと考えられる。また、波力モーメント P_{Hk} 、自重モーメント W_k 、揚圧力モーメント P_{Uk} といった作用に関するパラメータについても、同様に d_{slim} には影響を及ぼさないことが確認された。

このため、法線直角方向の差し筋間隔 d_s の設定において、差し筋のコーン状破壊における作用耐力比の1列目と2列目の支配列が入れ替わる「逆転」の発生には、嵩上げ幅 B 、埋込長 l_d および法線平行方向の差し筋間隔 l_s に着目すればよいことが示唆される。

表3.4 各設計パラメータの d_{slim} に対する感度分析の結果

項目		増減	結果		要因 (メカニズム)
分類	パラメータ		逆転への感度	判定	
作用	PH	--	なし	被支配的	全列に対して作用力が一律に変化するため
	W	--	なし	被支配的	〃
	PU	--	なし	被支配的	〃
	N	--	なし	被支配的	〃
支点距離	B	$B(\uparrow) \Rightarrow d_s(\uparrow)$	あり	支配的	列間の作用力の分配比率が変化するため
耐力	f_{ck}	--	なし	非支配的	全列に対して耐力が一律に変化するため
配置・投影円	l_d	$l_d(\uparrow) \Rightarrow d_s(\uparrow)$	あり	支配的	耐力の干渉割合が非対称に変化するため
	l_s	$l_s(\uparrow) \Rightarrow d_s(\downarrow)$	あり	支配的	〃

4. 逆転条件の発生判断図表の提案

4.1 逆転条件の整理方法

本章では、嵩上げ幅 B 、埋込長 l_d および法線平行方向の差し筋間隔 l_s を用いて、差し筋のコーン状破壊照査において、着目すべき差し筋列の判断に有用と考えられる判断材料を整理する。前章において、逆転条件となる d_{slim} に対して感度がないと判定したパラメータについては、整理対象からは除外する。

実際の設計においては、各種条件が与えられていた場合の d_{slim} の値が迅速に判断できれば、設計の効率化に繋がると考えられる。

嵩上げ幅 B は、与条件として設定されることが多いと考えられる。このため、前章の検討結果を用いて嵩上げ幅 B ごとに d_{slim} を網羅的に収集し、横軸に B 、縦軸に d_{slim} をプロットした $B-d_{slim}$ グラフとして結果を整理する。その整理の概要図を図4.1に示す。

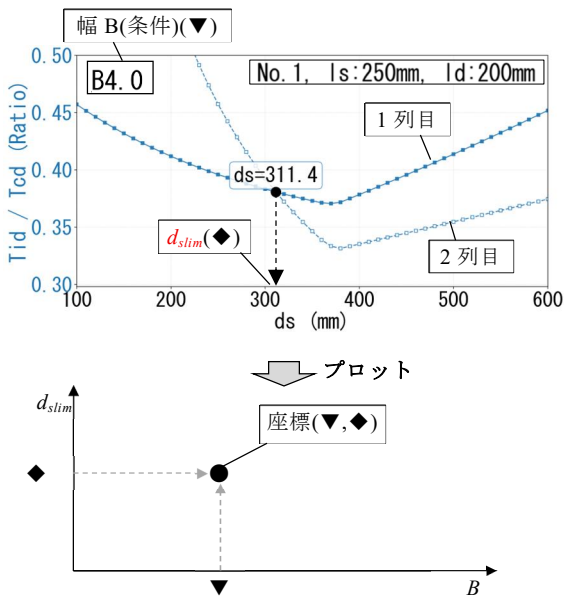


図4.1 整理の概要図 (例)

ここで、3. においては、 d_{slim} に関連するパラメータを抽出する観点から、図2.9に示すように港外側のかぶり(はしあき)を $c_l = 500$ mm と仮定して検討した。本章では、実際の配置における様々な応答値を整理する目的のため、 $c_l = 100, 200, 300, 400$ mm の条件についても整理する。なお、整理にあたっては、 c_l の設定値および埋込長 l_d の長さに応じた投影面積 A_c の減少 (図4.2) も考慮した。

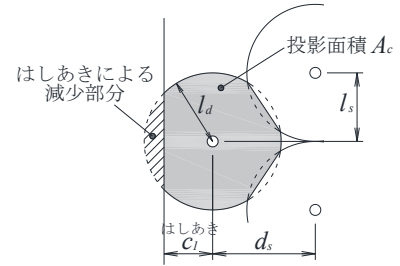


図4.2 かぶり (はしあき) による投影面積の減少

4.2 $B-d_{slim}$ グラフによる整理

(1) はしあきの影響がない場合の整理

図4.3にははしあきによる投影面積の減少がない場合の整理結果の一例を示す。同図は $c_l = 500$ mm の条件のうち、D2 2 のあと施工アンカーの埋込長に相当する $l_d = 250$ mm における $B-d_{slim}$ の関係を示したものである。法線平行方向の差し筋間隔は $l_s = 500$ mm に設定し、各プロットは本検討の対象とする6ケース (施設 No.1~6) 全ての結果を示している。

本結果は全体の一例であるが、全ケースにおいて、 $B-d_{slim}$ は、断面モデルを問わず概ね同一線上にプロットされる結果となった。これは、前章の感度分析において、外力条件 (P_{Hk} , W_k , P_{Uk})、差し筋列数 N 、およびコンクリート強度 f_{ck} は d_{slim} に影響を及ぼさないことが確認されているためである。逆転条件を規定するパラメータは B , l_d , l_s , d_s に絞られることから、施設ごとに異なる堤体規模や設計波高の違いによらず同一の B , l_s , l_d の条件に対して d_{slim} はほぼ一義的に定まると考えられる。

また、嵩上げ幅 B が狭いほど d_{slim} は小さくなる。これは B が狭い断面では、1列目と2列目の距離の差が支点距離 (嵩上げ工の転倒支点からの距離) に占める相対差が大きくなり、1列目の作用力は相対的に2列目を大きく上回ることになる。そのため、このような条件下において、2列目の作用耐力比が1列目を上回る条件となるには投影面積の大

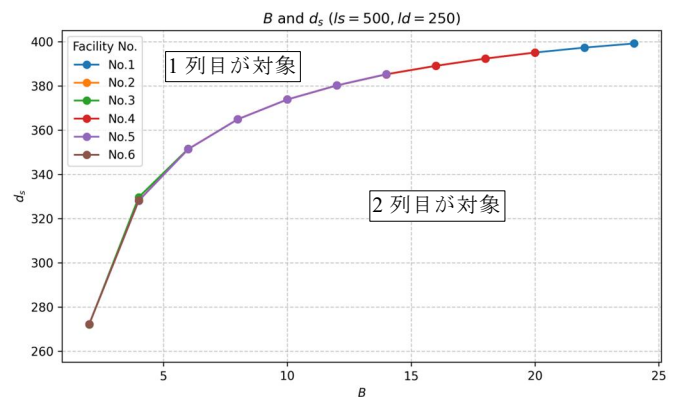


図4.3 $B-d_{slim}$ グラフ
($c_l = 500$ mm, $l_s = 500$ mm, $l_d = 250$ mm)

幅な減少，すなわち差し筋を密に配置しなければ逆転しない。したがって， B が狭いほど d_{slim} は小さくなる傾向を示すと考えられる。

(2) はしあきによる影響がある場合

次に，かぶり（はしあき） c_I を $c_I=200$ から 400mm としたときの結果を図4.4～図4.6に示す。条件は $l_s=500\text{mm}$ ， $l_d=250\text{mm}$ である。 $c_I=500\text{mm}$ のときに比べると， c_I が 400mm のときは大きな変化が見られない一方， c_I が 300mm 以下では， c_I が小さいほど d_{slim} は低下する。

これは，本検討の埋込長 l_d を最大 350mm としており，かぶり c_I により港外側 1 列目の投影面積が低下していくためである。結果として，かぶり c_I による投影面積の減少は 1 列目のみ耐力を低下させており，2 列目との耐力差が縮小することにより d_{slim} が低減すると考えられる。

また， $c_I=100\text{mm}$ の条件においては，このかぶり c_I による 1 列目の耐力低下がより顕著であり，2 列目の投影面積の重複による耐力低下を上回ることから，1 列目と 2 列目の逆転は発生せず，グラフも得られない結果となった。

以上をまとめると，かぶり（はしあき） c_I による影響は，前述のとおり， c_I は 1 列目の投影面積のみ減少させるため，2 列目との耐力の差が縮小することにより発生する。 c_I により 1 列目の投影面積が減少すると d_{slim} は低減し，2 列目が支配列になりにくくなる。さらに， c_I が小さい場合には，逆転が発生せず，常に港外側 1 列目が支配列になるといえる。

なお，本節で示す条件以外の $B-d_{slim}$ グラフの結果に関しては，付録 C に示す。

4.3 $B-d_{slim}$ グラフの活用

本章で整理した $B-d_{slim}$ グラフは，港外側 1 列目と 2 列目の作用耐力比が逆転する条件の境界を意味している。境界より上側における法線直角方向の差し筋間隔 d_s を用いる場合は，港外側 1 列目が支配列であり，下側の範囲においては港外側 2 列目が支配列となる。

一般に，差し筋の配置間隔（ l_s や d_s ），埋込長 l_d 等の差し筋諸元は，差し筋の降伏応力や付着強度などのコーン状破壊以外の諸要因で決まることが多い。実務面では，それらの照査結果をもとに差し筋の配置条件を決定し，嵩上げ幅 B ，埋込長 l_d ，法線平行方向の差し筋間隔 l_s ，対応する $B-d_{slim}$ グラフを用いることで，コーン状破壊に対する支配列の効率的な抽出に繋がると考えられる。

ただし，本検討では一般的な事例を想定しており，差し筋が同一規格・等間隔かつ，千鳥配置であることなどを条件に限定していることに留意が必要である。

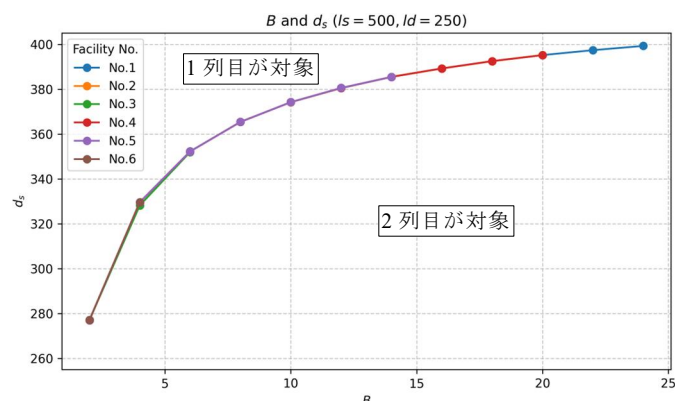


図4.4 $B-d_{slim}$ グラフ
($c_I=400\text{mm}$ ， $l_s=500\text{mm}$ ， $l_d=250\text{mm}$)

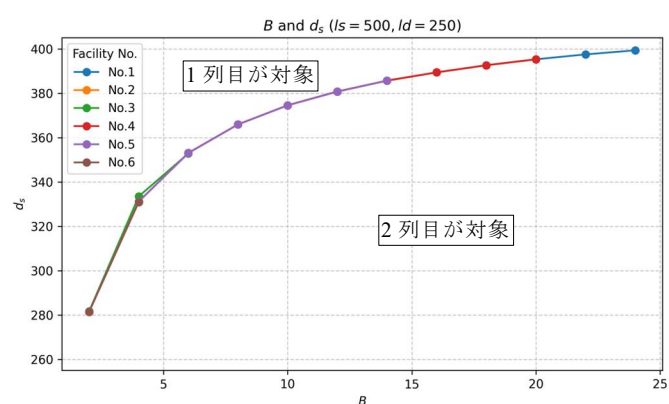


図4.5 $B-d_{slim}$ グラフ
($c_I=300\text{mm}$ ， $l_s=500\text{mm}$ ， $l_d=250\text{mm}$)

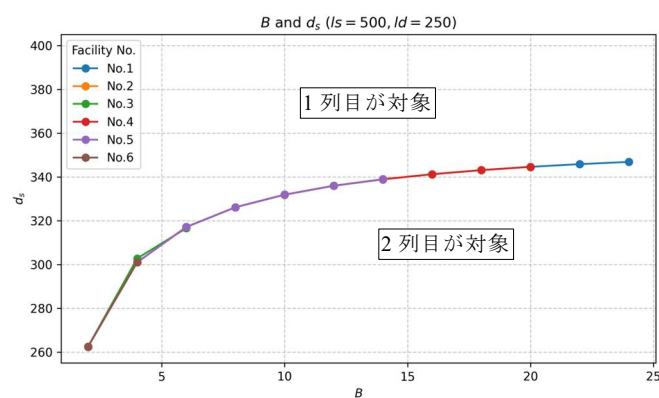


図4.6 $B-d_{slim}$ グラフ
($c_I=200\text{mm}$ ， $l_s=500\text{mm}$ ， $l_d=250\text{mm}$)

5. まとめ

本検討では，防波堤の上部工嵩上げ設計におけるコーン状破壊照査において，設計実務の効率化を目的に設計対象列（作用耐力比が最大となる列）の参考となる資料として整理した。得られた主な成果としては以下のとおりである。

- ① 差し筋の投影面積 A_c が重複することにより、コンクリートの耐力が低下し、港外側 1 列目よりも 2 列目以降の作用耐力比が逆転する場合があることを示した。
- ② 逆転条件の決定に寄与するパラメータは、嵩上げ幅 B 、埋込長 l_d および差し筋間隔 l_s, d_s であることを特定した。また、嵩上げ工に対する作用の大小には依存しない。
- ③ 嵩上げ幅 B と逆転条件における d_s 値 d_{stim} の関係から得られる $B-d_{stim}$ グラフを用いて、各種条件において設計対象列の判断基準となる図表を示した。

一般に、上部工の差し筋照査では差し筋の降伏応力や付着強度などで決定されることが多く、実務面で煩雑なコーン状破壊の照査は最小限にとどめたほうが合理的である。これらの結果を用いることにより、コーン状破壊照査の効率化につながることを期待される。

なお、本検討では一般的な事例を想定しており、差し筋が同一規格・等間隔かつ、千鳥配置であることなどを条件に限定している。今後は、例外的な配置間隔や差し筋規格が混在するケースなど考慮した知見を対象に、より多様な断面形状や差し筋配置に対しても設計の効率化を図ることを課題としたい。

(2026 年 6 月 16 日受付)

参考文献

- 1) 文部科学省 (2025), 気象庁: 日本の気候変動 2025, p.202.
- 2) 本多和彦・成田裕也・平山克也・高川智博・森信人・千田 優 (2025): 日本沿岸の主要港湾における高潮・波浪への気候変動の影響評価, 国土技術政策総合研究所研究資料 No.1302, p.40.
- 3) (公社) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 改訂 (2024) .
- 4) 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 (2023): 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.
- 5) (公社) 土木学会 (2021): コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工・維持管理指針 (案), コンクリートライブラリー160.
- 6) 梅原秀哲・中村光・新藤竹文・佐藤靖彦・古市耕輔 (2014): 土木学会「コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工指針 (案)」の制定について, コンクリート工学論文集, 52 (7), p.567.
- 7) 長尾毅 (2001): ケーソン式防波堤の外的安定に関する信頼性設計法の適用, 土木学会論文集, No.689, I -57, pp.173-182.

- 8) 長尾毅 (2002): ケーソン式防波堤の外的安定に関する信頼性設計手法の提案, 国土技術政策総合研究所研究報告, No.4, p.26.

記号表

m	: 調整係数
γ_R	: 抵抗項に乗じる部分係数
γ_S	: 荷重項に乗じる部分係数
γ_t	: 差し筋に生じる引張力に関する部分係数
γ_b	: あと施工アンカーに関する部分係数で 1.6
γ_c	: コンクリートの材料係数で 1.3
T_{ik}	: i 番目の差し筋に生じる引張力の特性値(kN)
T_{id}	: i 番目の差し筋に生じる引張力の設計用値(kN)
T_{cd}	: コンクリートの鉛直方向のコーン状破壊耐力の設計用値(kN)
A_c	: 母材コンクリートのコーン状破壊断面の有効水平投影面積(mm ²)
B	: 嵩上げ部底面幅(m)
B_{cu}	: 既設上部工の幅(m)
N	: 法線直角方向の差し筋列数
R	: コーン状破壊断面の有効水平投影面積の投影円の半径(mm)
l_d	: 差し筋の埋込長の設計用値(mm)
d_s	: 法線直角方向の差し筋の配置間隔(mm)
l_s	: 法線平行方向の差し筋の配置間隔(mm)
d_{stim}	: 設計対象となる差し筋が逆転する条件における法線直角方向の差し筋間隔の設定値(mm)
c_1	: 法線直角方向の差し筋のかぶり; はしあき(mm)
c_2	: 法線平行方向の差し筋のかぶり; へりあき(mm)
P_{Hk}	: 波力モーメント(kN・m)
Wk	: 自重モーメント(kN・m)
P_{Uk}	: 揚圧力モーメント(kN・m)
K_t	: 使用期間の長さを表す係数
a_t	: あと施工アンカーの種類を表す係数
f_{ck}	: コンクリートの圧縮強度の特性値(N/mm ²)

付録 A 有効水平投影面積 A_c の算定

差し筋が近接する場合において、有効水平投影面積 A_c （以降、投影面積と称する）は重複する面積により一部を減じる必要がある。本検討では、図-A.1 に示すような千鳥配置において、配置間隔 ds , ls が一定のときの投影面積の計算方法を示す。なお、ここでいう千鳥配置とは、隣り合う法線直角方向列の差し筋位置が半延長 ($ls/2$) ずれた配置と定義する。

A.1 計算方法

投影面積を計算するにあたり、本検討では求めたい面積を数値積分により算定する。図-A.2 のように始点 Lx から終点 Ux までを求積範囲とし、上側の境界線を $f_{up}(x)$ 、下側の境界線を $f_{low}(x)$ として囲まれる面積を求めると、投影面積 A_c は式 (A.1) のように算定できる。

$$A_c = \int_{Lx}^{Ux} \{f_{up}(x) - f_{low}(x)\} dx - A_s \quad (A.1)$$

ここで、境界線の $f_{up}(x)$ および $f_{low}(x)$ は、投影面積を決める境界線をそれぞれ設定する必要がある。各差し筋の投影面積が重ならない場合では、円周線として表されるため式 (A.2) となる。

$$f_{up}(x) = \sqrt{R^2 - x^2} \quad (A.2)$$

$$f_{low}(x) = -\sqrt{R^2 - x^2}$$

これを基本形としてかぶりや隣接筋との重複などの境界を考慮することで、様々なパターンの投影面積が考慮できる。想定する主な境界線の控除パターンについては以降に詳細を示す。

A.2 かぶりによる控除

このパターンの想定としては、芯かぶり（はしあき c_1 、へりあき c_2 ）により法線直角・法線平行方向の一部を控除する場合である。

その場合、はしあきは図-A.3(a) に示すように始点位置に対する控除として式 (A.3)、へりあきは図-A.3(b) に示すように下側境界に対する控除として式 (A.4) により求められる。

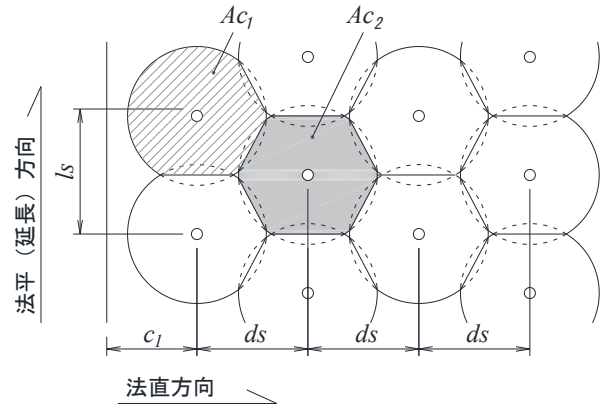


図-A.1 差し筋配置の想定（千鳥配置）

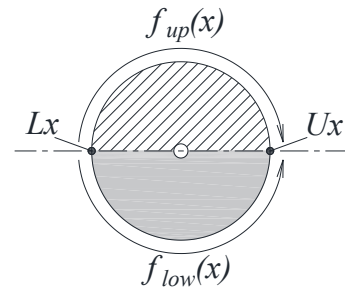


図-A.2 投影面積の基本形

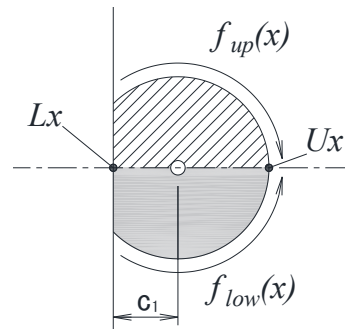


図-A.3(a) はしあき c_1 による控除

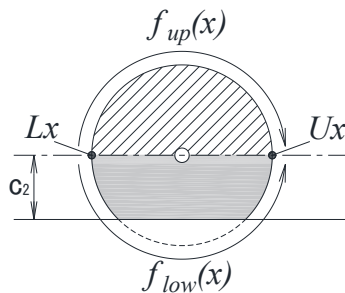


図-A.3(b) へりあき c_2 による控除

$$Lx = \max[-R, -c_1] \quad (A.3)$$

$$f_{low}(x) = \max[-\sqrt{R^2 - x^2}, -c_2] \quad (A.4)$$

A.3 両側隣接筋との境界による控除

このパターンの想定形状としては、両側に隣接する差し筋の投影面積との重複により対象とする投影面積の一部が控除される形である。各重複範囲の境界は近接円との間にできる2つの交点を結ぶ共通弦として求めることができる。

図-A.4(a), (b)は、両側および延長方向の差し筋による近接円1～6とその間にできる共通弦のモデルである。本検討では、上側(近接円1,3,5)と下側(近接円2,4,6)をそれぞれ $f_{up}(x)$ および $f_{low}(x)$ から控除するものとして扱うため、式(A.5)および式(A.6)によって求められる。

$$f_{up}(x) = \min \left[\sqrt{R^2 - x^2}, L_1(x), L_3(x), L_5(x) \right] \quad (A.5)$$

$$f_{low}(x) = \max \left[-\sqrt{R^2 - x^2}, L_2(x), L_4(x), L_6(x) \right] \quad (A.6)$$

ここで、 $L_i(x)$ は式(A.7)に示す各共通弦の直線を示している。

$$L_i(x) = a_i x + b_i \quad (A.7)$$

なお、ここでは千鳥配置であることを前提に、各近接円は、延長方向(図中上下)は対称となる配置としていることに留意する。

また、重複状況によっては、図-A.5に示すように共通弦が交差して始点 Lx 、終点 Ux の位置が移動することがある。この場合においては、始点側の共通弦の交点を $x_{L,left}$ 、終点側の共通弦の交点を $x_{L,right}$ として式(A.8)より、始点 Lx 、終点 Ux を求める。

$$Lx = \max[-R, x_{L,left}] \quad (A.8)$$

$$Ux = \min[+R, x_{L,right}]$$

A.4 共通弦の抽出方法

近接円との間にできる共通弦は、図-A.6に示すように2つの交点 S_1, S_2 を結ぶ線分である。これを求めるには、まず2つの円の中心点を結んだ線分(中心連線)を d とし、按分した a の長さを求める。ここで、近接円の中心 P の座標を (x_i, y_i) としたとき a は式(A.9)で求まる。

$$a = \frac{R^2 - r_i^2 + d^2}{2d} \quad (A.9)$$

$$d = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad (A.10)$$

ここで、 R : 検討対象となる投影面積の半径、 r_i : 近接円 i の投影面積の半径である。

この距離 a を用いて検討対象の円の中心 O から共通弦に下した

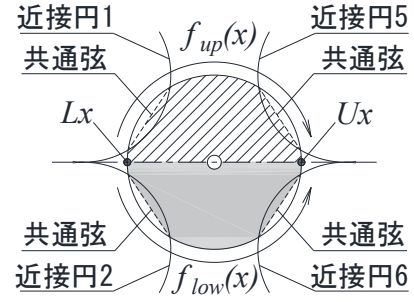


図-A.4(a) 共通弦による境界部分の控除（両側）

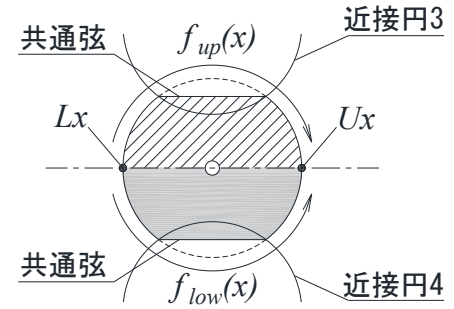


図-A.4(b) 共通弦による境界部分の控除（延長）

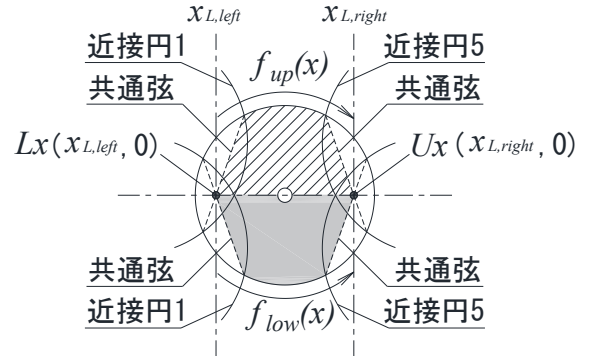


図-A.5 共通弦が交差する場合

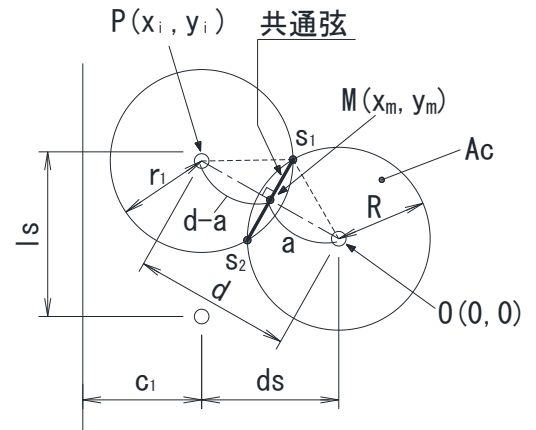


図-A.6 共通弦の設定

垂線の足を $M(x_m, y_m)$ とすると, 式(A.11)となる.

$$M(x_m, y_m) = \left(a \frac{x_i}{d}, a \frac{y_i}{d}\right) \quad (\text{A.11})$$

このとき、 M から直角方向に線を引き、交点 S_1, S_2 までの高さを h とすると交点 S_1 及び S_2 の座標は、それぞれ式(A.12)、式(A.13)のように求められる。

$$S_1(x_{s1}, y_{s1}) = \left(x_m + h \frac{y_i}{d}, y_m - h \frac{x_i}{d}\right) \quad (\text{A.12})$$

$$S_2(x_{s2}, y_{s2}) = \left(x_m - h \frac{y_i}{d}, y_m + h \frac{x_i}{d}\right) \quad (\text{A.13})$$

$$h = \sqrt{R^2 - a^2} \quad (\text{A.14})$$

これにより，得られた交点 S_1, S_2 を結ぶ線分は，傾き a_i と切片 b_i を持った関数となる．これを求めると，共通弦の直線の式 (A. 7) より以下とすることができる．

$$L_i(x) = a_i x + b_i \quad (\text{A.7})$$

$$a_i = \frac{y_{S2} - y_{S1}}{x_{S2} - x_{S1}} \quad (\text{A.15})$$

$$b_j = y_{\varsigma_1} - a_j x_{\varsigma_1} \quad (\text{A.16})$$

さらに、共通弦どうしが交差する位置 ($x_{L,left}$ および $x_{L,right}$) は、この直線の関数が $L(x)=0$ を満足するときに条件となる。

$$a_j x + b_j = 0 \quad (\text{A.17})$$

これを x に対して変形すると式 (A. 18) の形が得られる.

$$x_{L,i} = -\frac{b_i}{a_i} \quad (\text{A.18})$$

ここで、本検討の前提である上側と下側の差し筋配置が対象である点を考慮し、左側列 ($i \in \{1, 2\}$)、右側列 ($i \in \{5, 6\}$) (図-A. 7) とすると $x_{L, left}$ および $x_{L, right}$ は式 (A. 19)、式 (A. 20) として求められる。

$$x_{L,left} = -\frac{b_{i=1}}{a_{j=1}} \quad (\text{または} \quad -\frac{b_{i=2}}{a_{j=2}}) \quad (\text{A.19})$$

$$x_{L,right} = -\frac{b_{i=5}}{a_{j=5}} \quad (\text{または} \quad -\frac{b_{i=6}}{a_{j=6}}) \quad (\text{A.20})$$

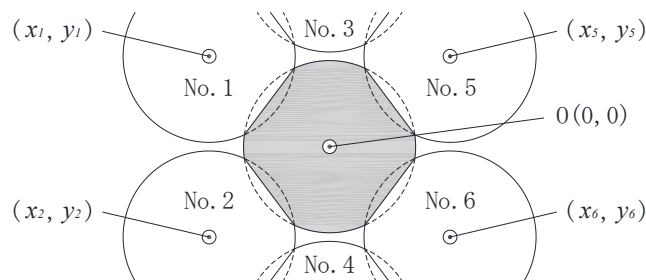


図-A.7 本検討における差し筋配置（番号）の想定

A.5 まとめ

前述までの内容を基に投影面積 A_c の算定方法を整理する。ここで、前述の式 (A. 15) および式 (A. 16) の a_i, b_i は、各値を代入して展開すると以下の形となる。

$$a_i = -\frac{x_i}{y_i} \quad b_i = \frac{R^2 + x_i^2 + y_i^2 - r_i^2}{2y_i}$$

したがって、この点を踏まえて整理すると投影面積 A_c の導出は以下ようになる。

$$A_c = \int_{l_{\infty}}^{U_x} \{f_{up}(x) - f_{low}(x)\} dx - A_s \quad (\text{A.21})$$

$$f_{up}(x) = \min \left[\sqrt{R^2 - x^2}, L_{i=1,3,5}(x) \right] \quad (\text{A.22})$$

$$f_{low}(x) = \max \left[-\sqrt{R^2 - x^2}, L_{i=2,4,6}(x), -c_2 \right] \quad (\text{A.23})$$

$$L_x = \max[-R, x_{L, left}, -c_1] \quad (\text{A.24})$$

$$U_x = \min[+R, x_{l, right}] \quad (\text{A.25})$$

$$L_i(x) = -\frac{x_i}{y_i}x + \frac{R^2 + x_i^2 + y_i^2 - r_i^2}{2y_i} \quad (\text{A.26})$$

$$x_{L,left} = -\frac{b_{i=1}}{a_{i=1}} = \frac{R^2 + x_1^2 + y_1^2 - r_1^2}{2x_1} \quad (\text{A.27})$$

$$x_{L,right} = -\frac{b_{i=5}}{a_{i=5}} = \frac{R^2 + x_5^2 + y_5^2 - r_5^2}{2x_5} \quad (\text{A.28})$$

ここで、 R : 検討対象となる投影面積の半径、 r_i : 近接円 i の投影面積の半径、 x_i : 近接する差し筋の法線直角方向距離、 y_i : 近接する差し筋の法線平行方向距離、 c_1 : はしあきの距離、 c_2 : へりあきの距離、 A_s : 差し筋の公称断面面積である。

付録 B 作用耐力比の逆転に対する設計パラメータの分析結果

B.1 嵩上げ幅 B

(1) $c_l=500\text{mm}$

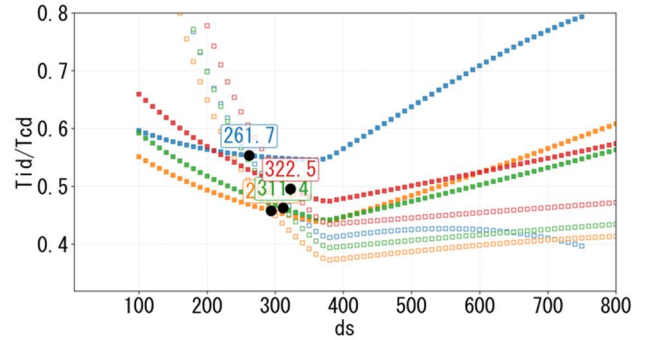
・条件 ; $B=2.0\text{m}\sim 5.0\text{m}$

凡例

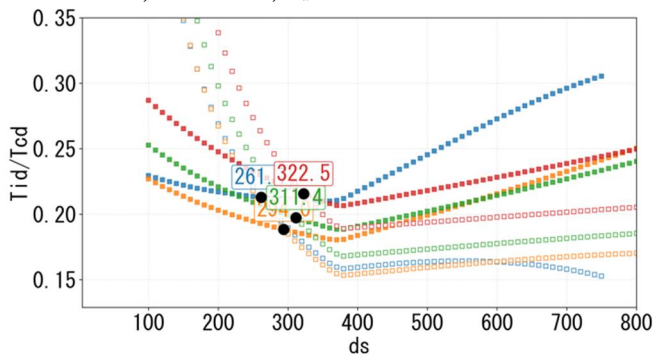
■ B2.0 (col.1)	■ B3.0 (col.1)	■ B4.0 (col.1)	■ B5.0 (col.1)
□ B2.0 (col.2)	□ B3.0 (col.2)	□ B4.0 (col.2)	□ B5.0 (col.2)

※col.1 : 1 列目, col.2 : 2 列目

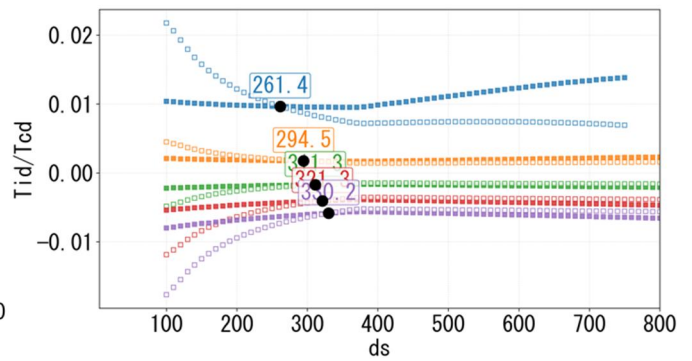
No.1, $l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$



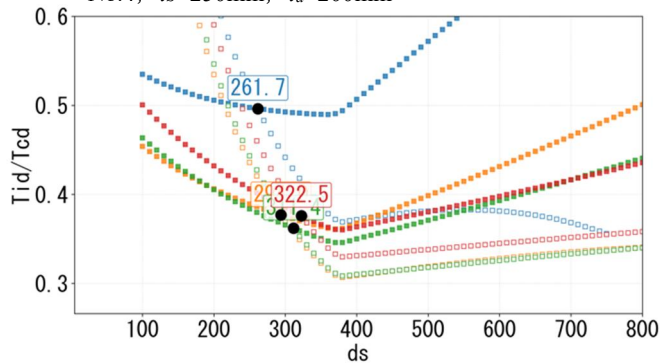
No.2, $l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$



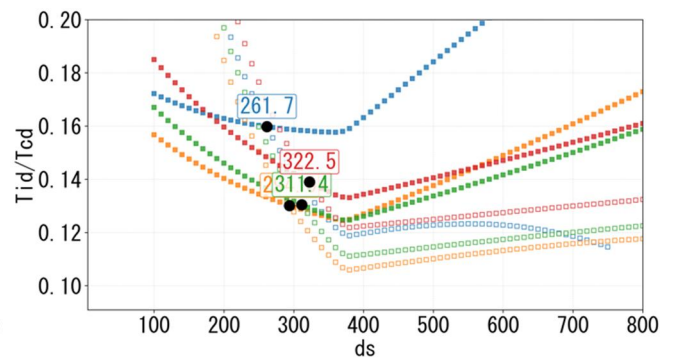
No.3, $l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$



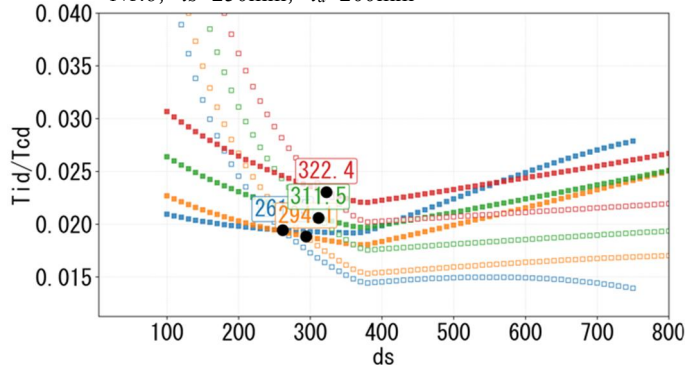
No.4, $l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$



No.5, $l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$



No.6, $l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$

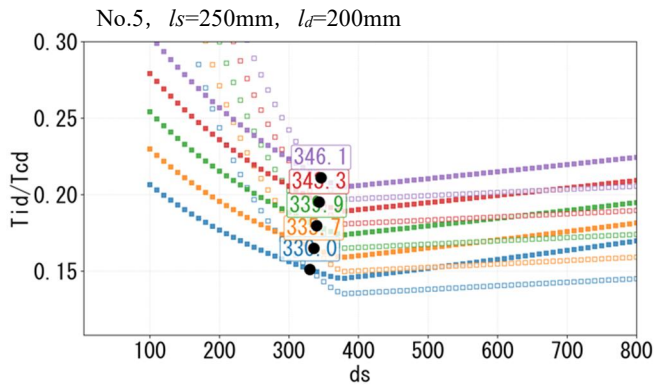
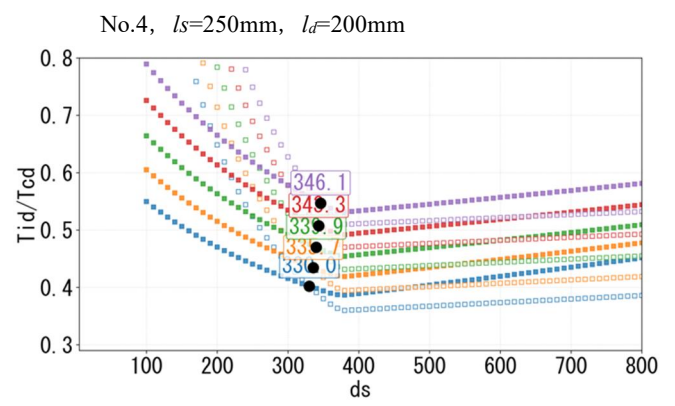
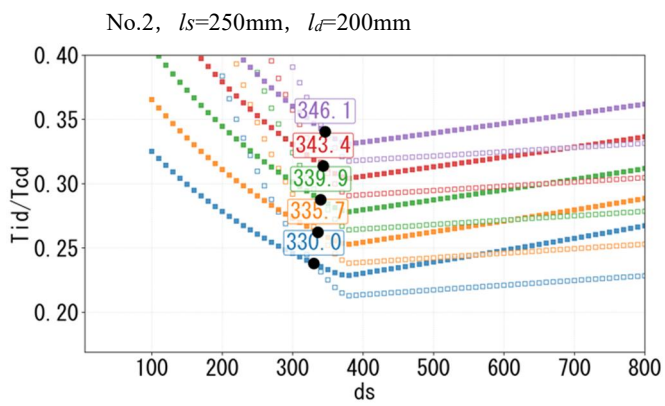
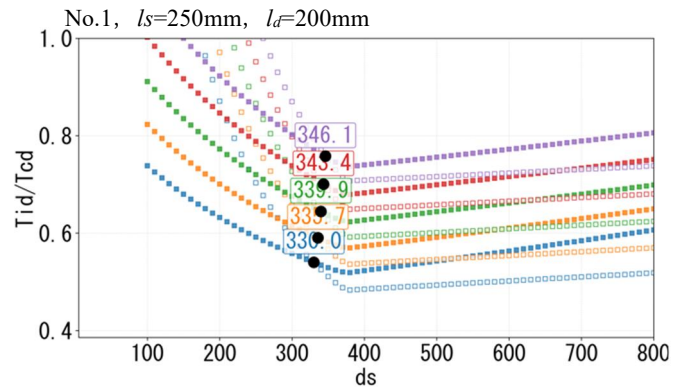


・条件 ; $B=6.0\text{m}\sim 10.0\text{m}$

凡例

■ B6.0 (col. 1)	■ B8.0 (col. 1)	■ B10.0 (col. 1)
□ B6.0 (col. 2)	□ B8.0 (col. 2)	□ B10.0 (col. 2)
■ B7.0 (col. 1)	■ B9.0 (col. 1)	
□ B7.0 (col. 2)	□ B9.0 (col. 2)	

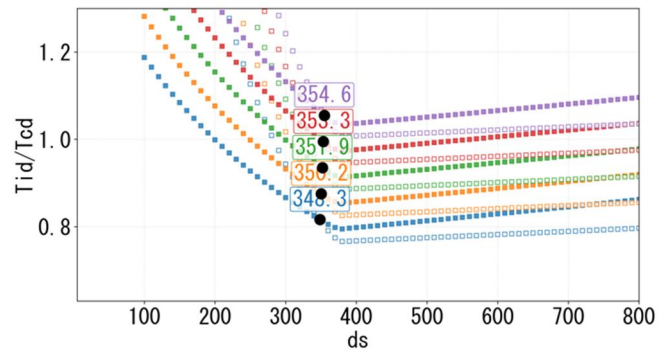
※col.1 : 1 列目, col.2 : 2 列目



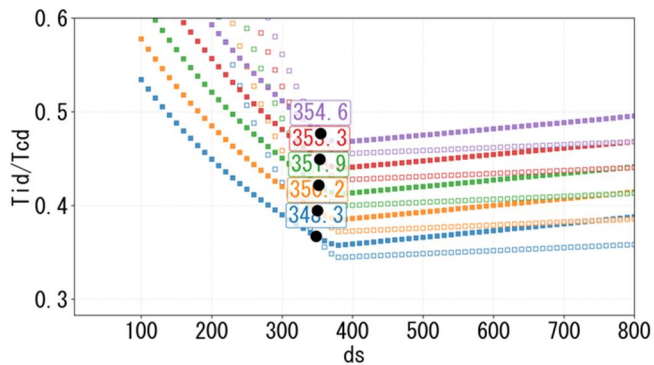
・条件 ; $B=11.0\text{m}\sim 15.0\text{m}$



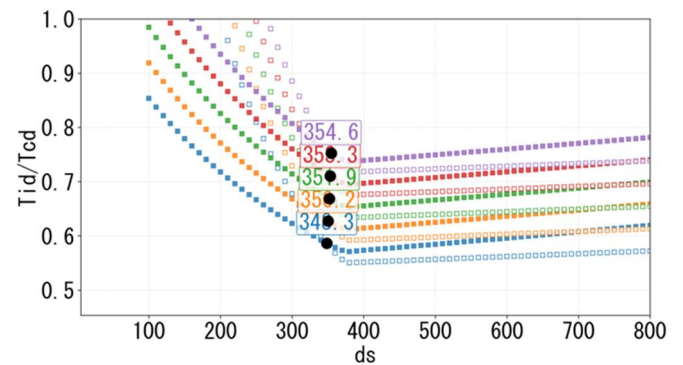
No.1, $l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$



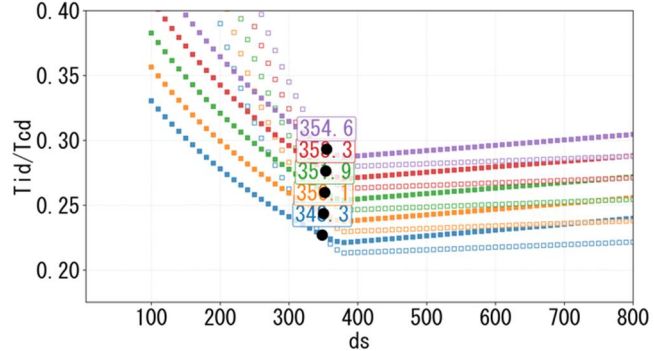
No.2, $l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$



No.4, $l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$



No.5, $l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$



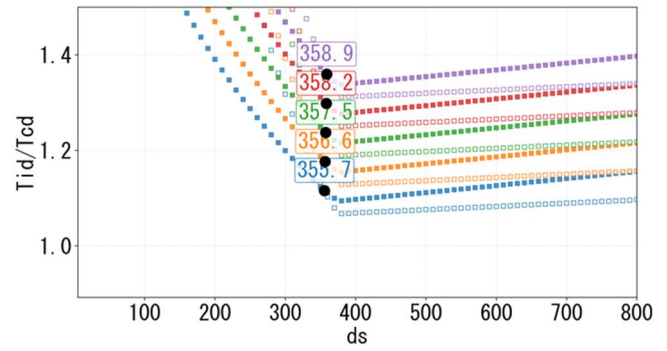
・条件 ; $B=16.0\text{m}\sim 20.0\text{m}$

凡例

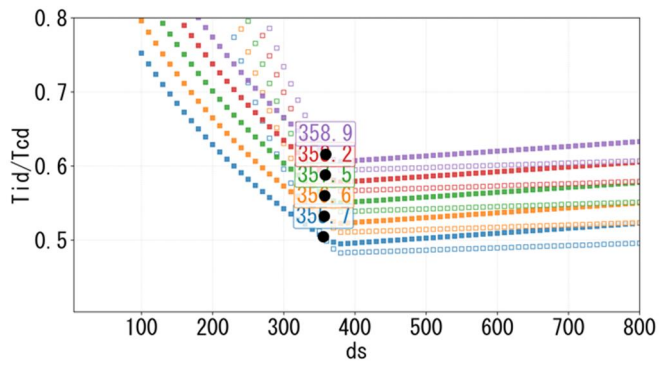
■ B16.0 (col. 1)	■ B18.0 (col. 1)	■ B20.0 (col. 1)
□ B16.0 (col. 2)	□ B18.0 (col. 2)	□ B20.0 (col. 2)
■ B17.0 (col. 1)	■ B19.0 (col. 1)	
□ B17.0 (col. 2)	□ B19.0 (col. 2)	

※col.1 : 1 列目, col.2 : 2 列目

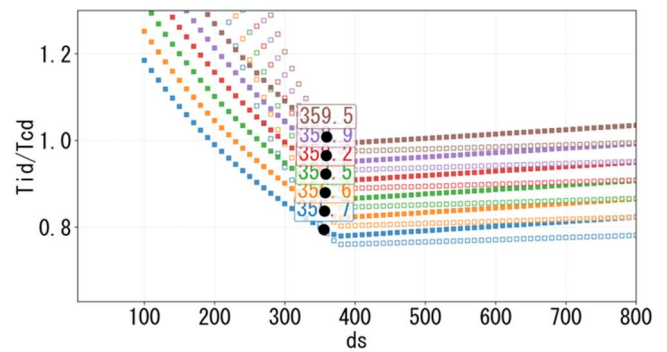
No.1, $l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$



No.2, $l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$



No.4, $l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$



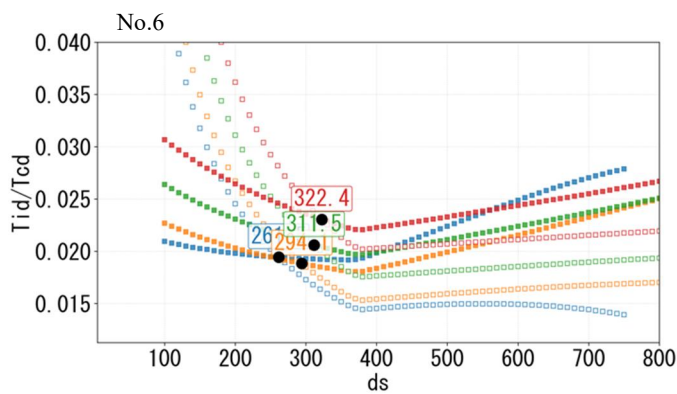
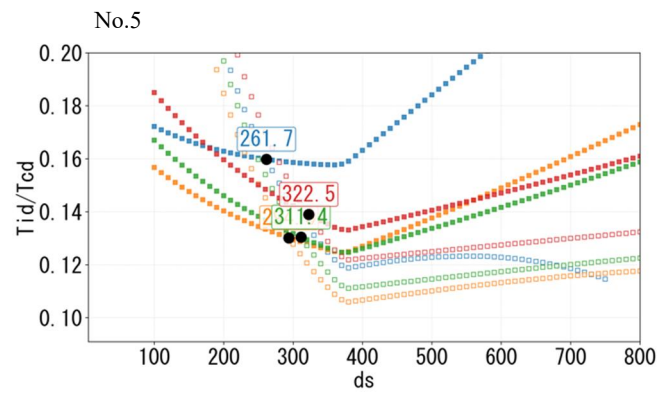
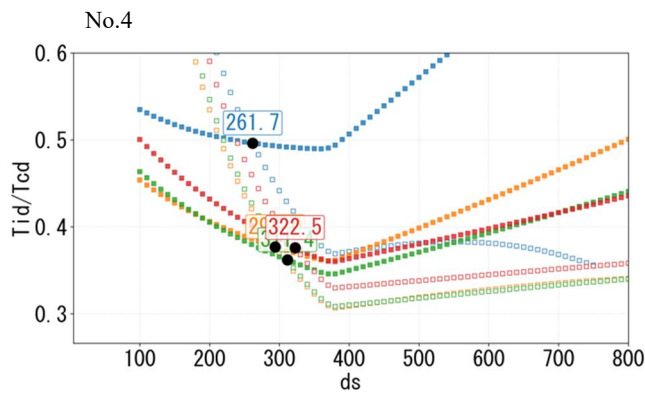
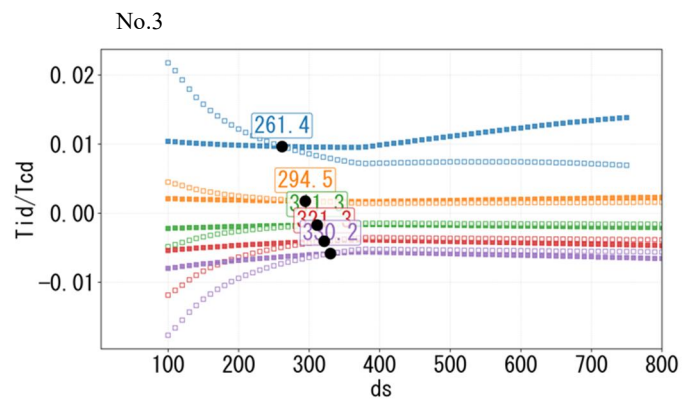
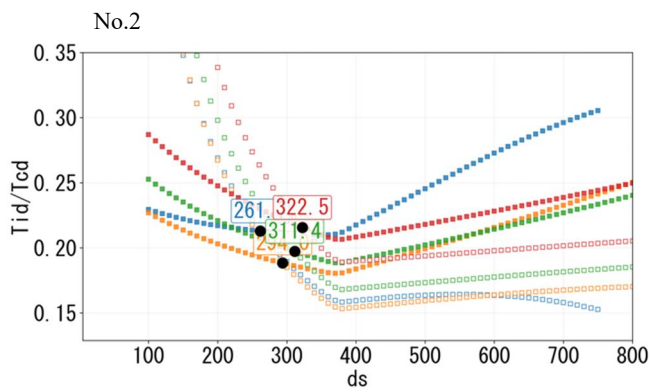
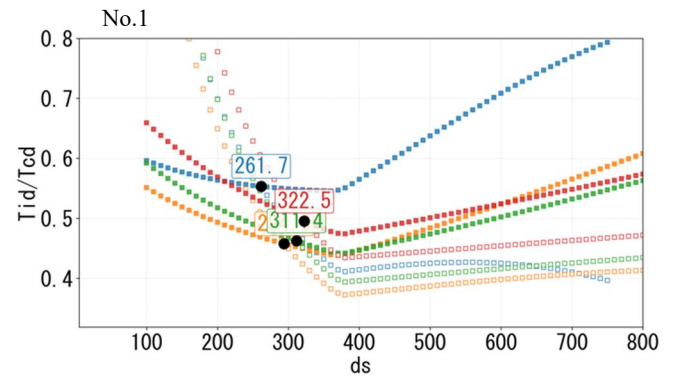
(2) $c_l=250\text{mm}$

・条件 ; $B=2.0\text{m}\sim 5.0\text{m}$ ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$)

凡例

■ B2.0 (col.1)	■ B3.0 (col.1)	■ B4.0 (col.1)	■ B5.0 (col.1)
□ B2.0 (col.2)	□ B3.0 (col.2)	□ B4.0 (col.2)	□ B5.0 (col.2)

※col.1 : 1 列目, col.2 : 2 列目



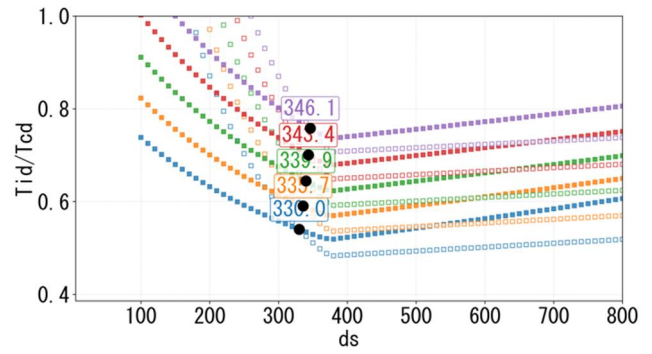
・条件 ; $B=6.0\text{m}\sim 10.0\text{m}$ ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$)

凡例

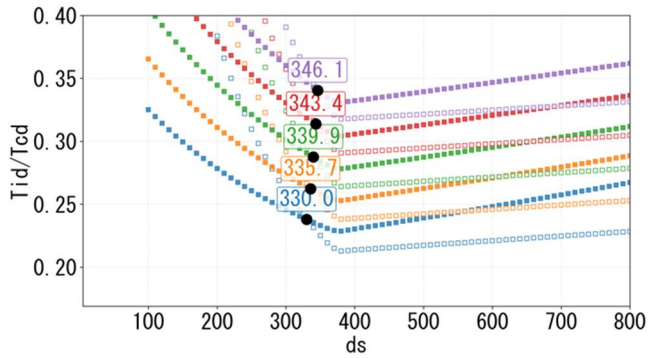
■ B6.0 (col. 1)	■ B8.0 (col. 1)	■ B10.0 (col. 1)
□ B6.0 (col. 2)	□ B8.0 (col. 2)	□ B10.0 (col. 2)
■ B7.0 (col. 1)	■ B9.0 (col. 1)	
□ B7.0 (col. 2)	□ B9.0 (col. 2)	

※col.1 : 1 列目, col.2 : 2 列目

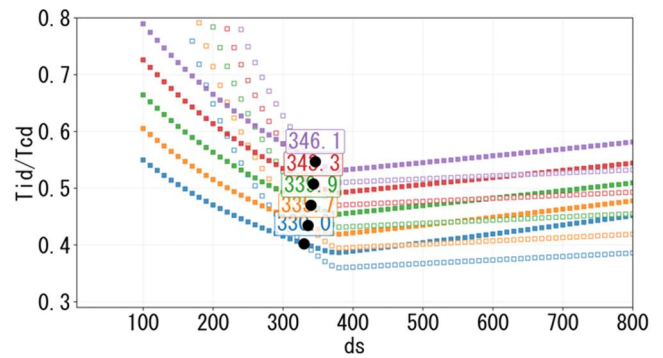
No.1



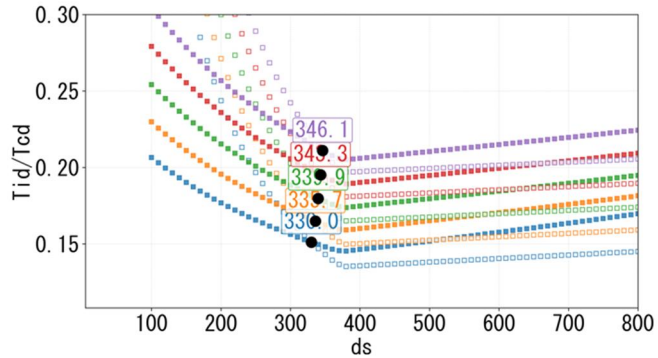
No.2



No.4



No.5



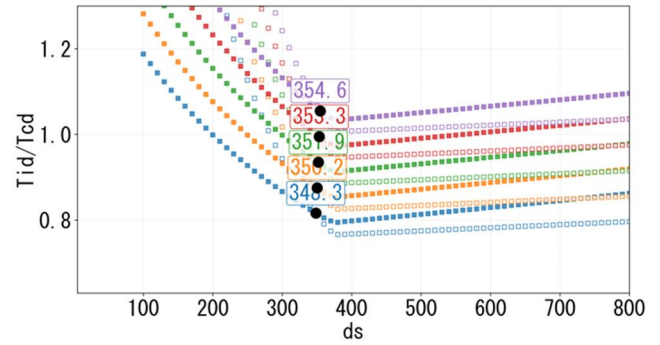
・条件 ; $B=11.0\text{m}\sim 15.0\text{m}$ ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$)

凡例

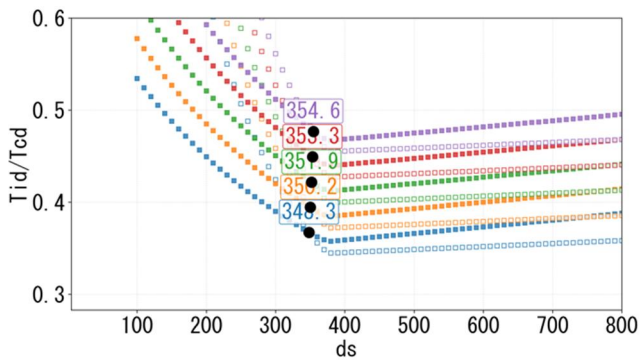
■ B11.0(col.1)	■ B13.0(col.1)	■ B15.0(col.1)
□ B11.0(col.2)	□ B13.0(col.2)	□ B15.0(col.2)
■ B12.0(col.1)	■ B14.0(col.1)	
□ B12.0(col.2)	□ B14.0(col.2)	

※col.1 : 1 列目, col.2 : 2 列目

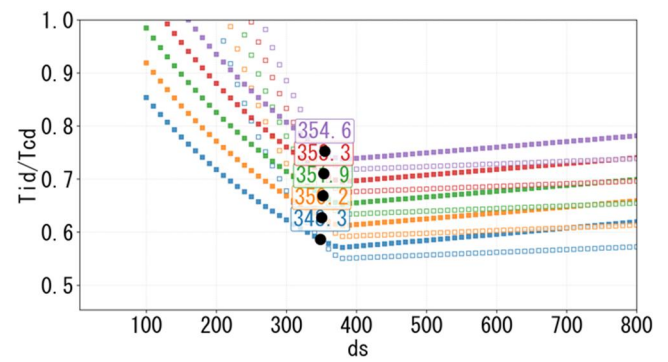
No.1



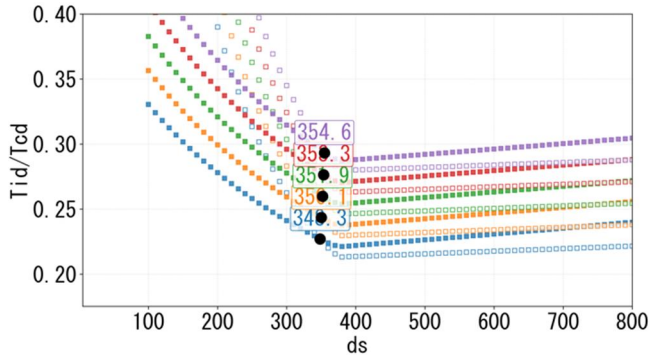
No.2



No.4



No.5



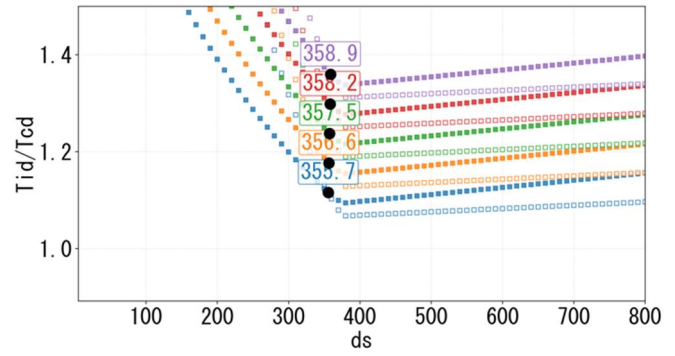
・条件 ; $B=16.0\text{m}\sim 20.0\text{m}$ ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$)

凡例

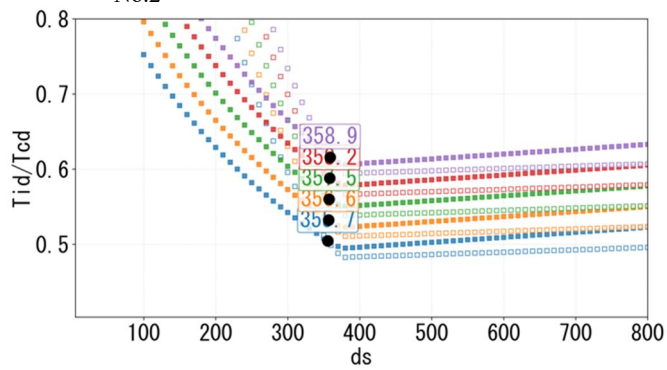
■ B16.0 (col. 1)	■ B18.0 (col. 1)	■ B20.0 (col. 1)
□ B16.0 (col. 2)	□ B18.0 (col. 2)	□ B20.0 (col. 2)
■ B17.0 (col. 1)	■ B19.0 (col. 1)	
□ B17.0 (col. 2)	□ B19.0 (col. 2)	

※col.1 : 1 列目, col.2 : 2 列目

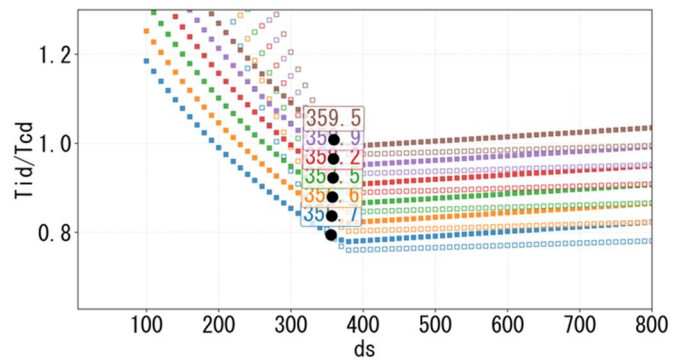
No.1



No.2



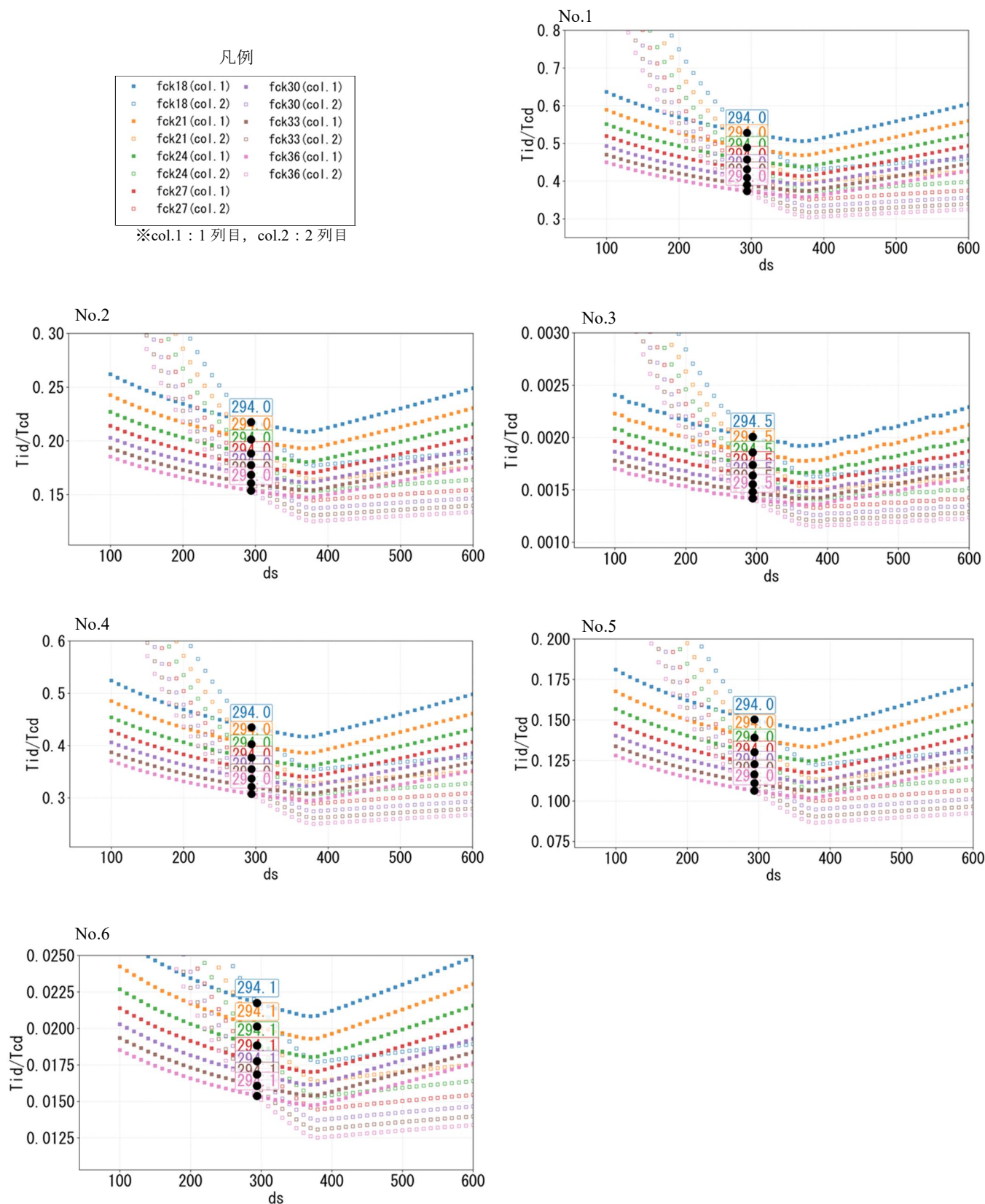
No.4



B.2 コンクリート強度 f_{ck}

(1) $c_l=500\text{mm}$

• 条件 ; $f_{ck}=18.0\sim36.0\text{N/mm}^2$ ($B=3.00\text{m}$, $l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$)



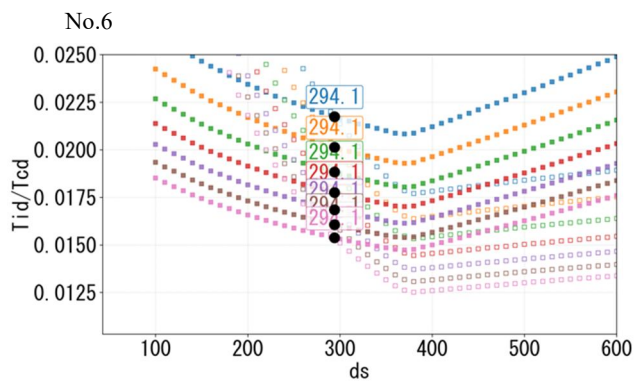
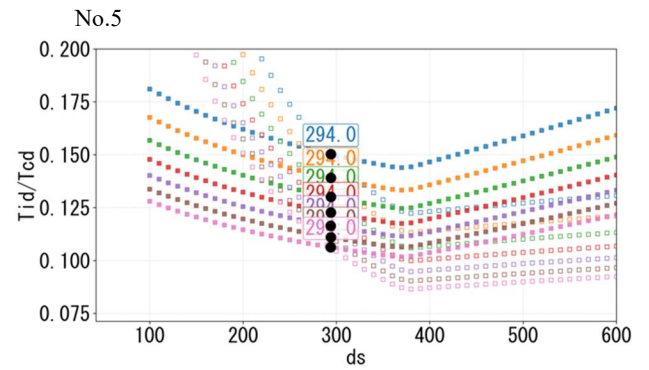
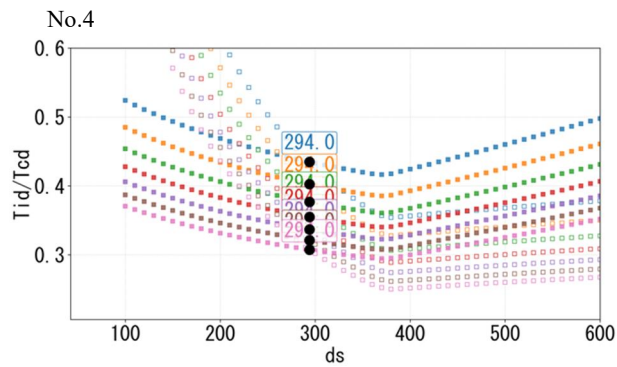
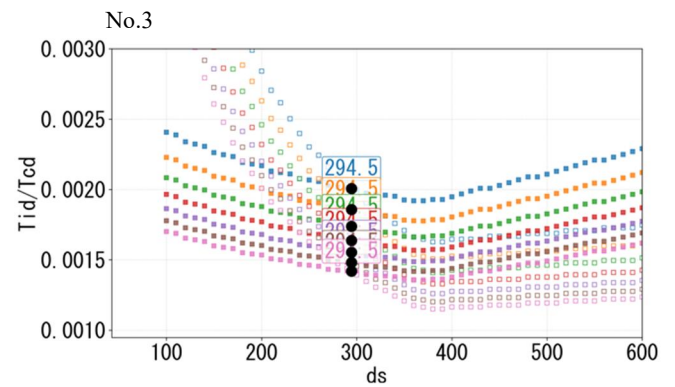
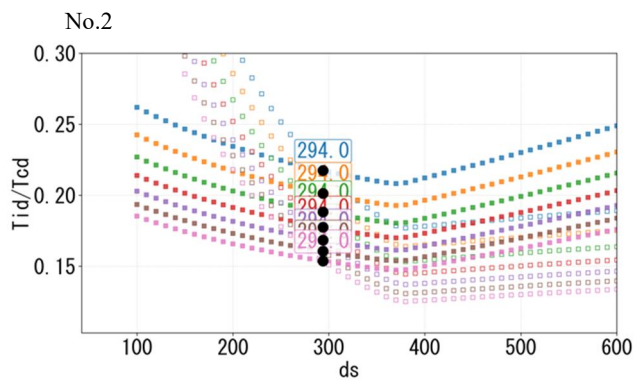
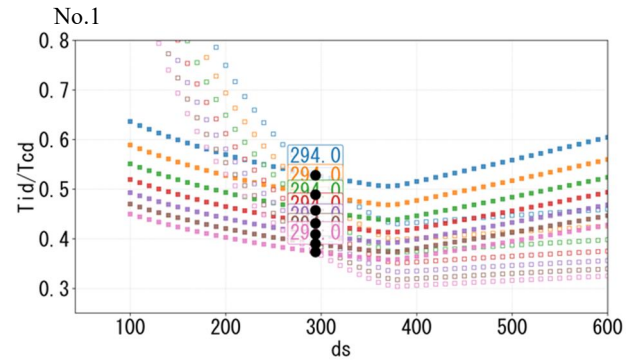
(2) $c_l=250\text{mm}$

・条件 ; $f_{ck}=18.0\sim 36.0\text{ N/mm}^2$ ($B=3.00\text{m}$, $l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$)

凡例

fck18 (col. 1)	fck30 (col. 1)
fck18 (col. 2)	fck30 (col. 2)
fck21 (col. 1)	fck33 (col. 1)
fck21 (col. 2)	fck33 (col. 2)
fck24 (col. 1)	fck36 (col. 1)
fck24 (col. 2)	fck36 (col. 2)
fck27 (col. 1)	
fck27 (col. 2)	

※col.1 : 1 列目, col.2 : 2 列目

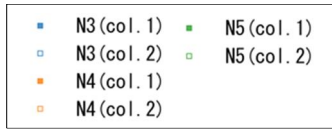


B.3 差し筋列数 N

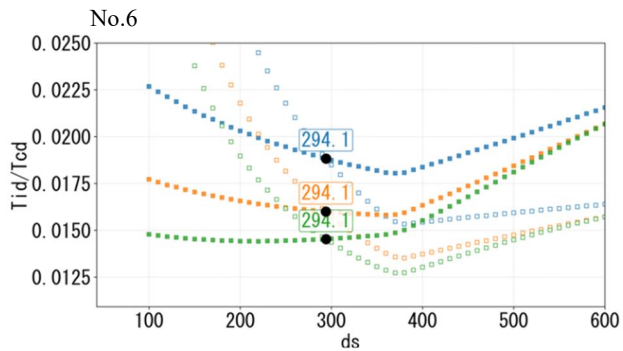
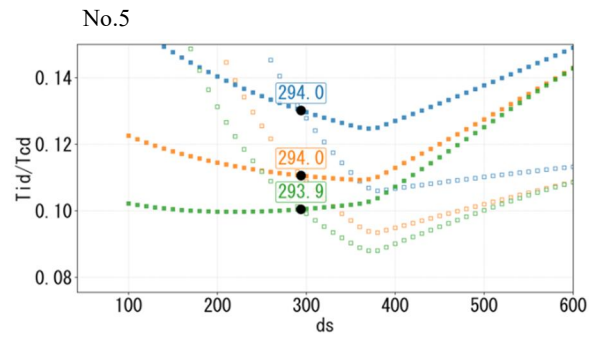
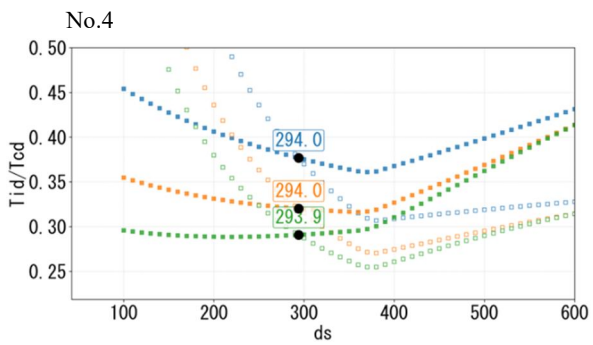
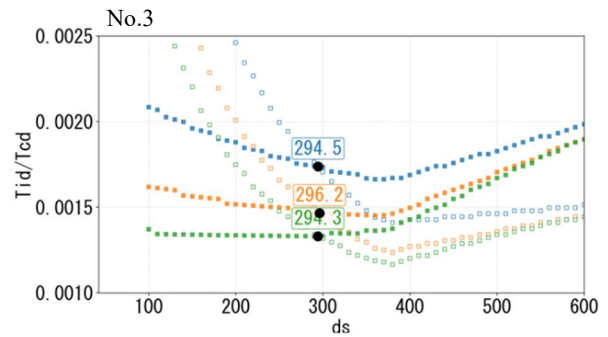
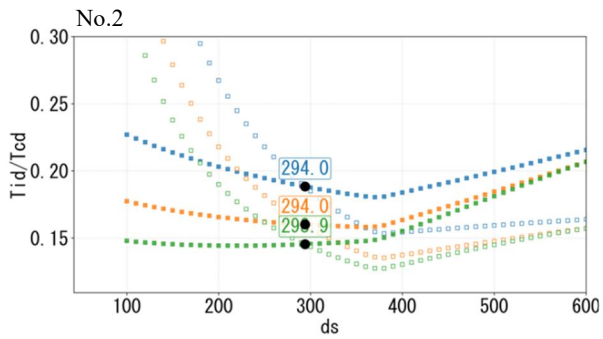
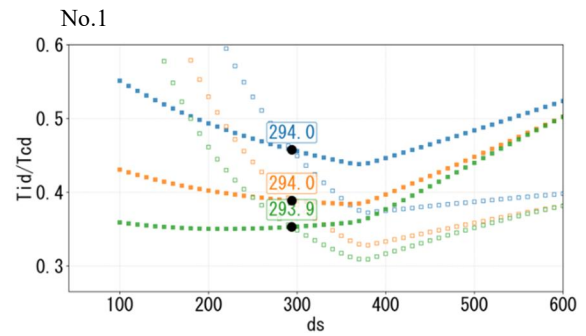
(1) $c_l=500\text{mm}$

・条件 ; $N=3,4,5$ ($B=3.00\text{m}$, $l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$)

凡例



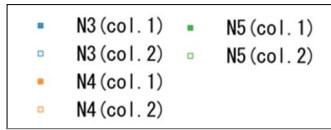
※col.1 : 1 列目, col.2 : 2 列目



(2) $c_l=250\text{mm}$

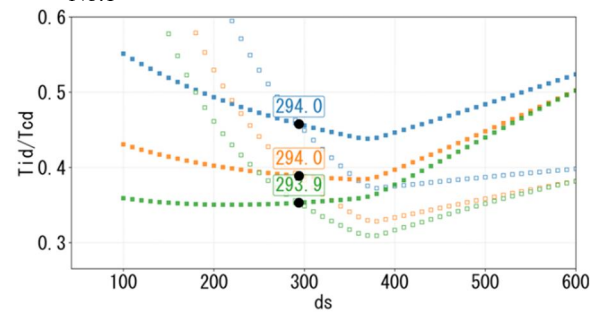
・条件 ; $N=3,4,5$ ($B=3.00\text{m}$, $l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$)

凡例

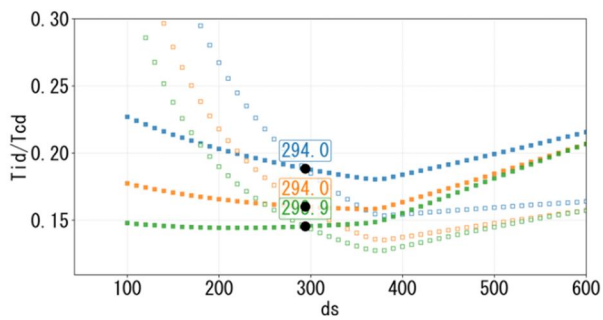


※col.1 : 1 列目, col.2 : 2 列目

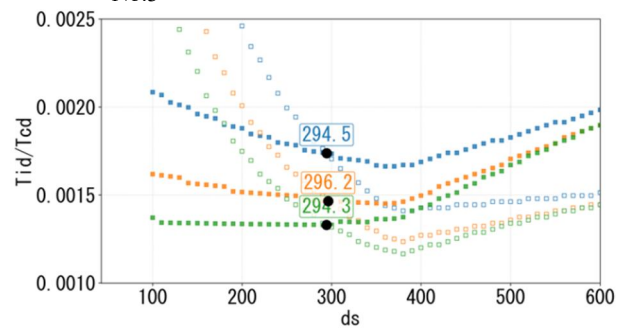
No.1



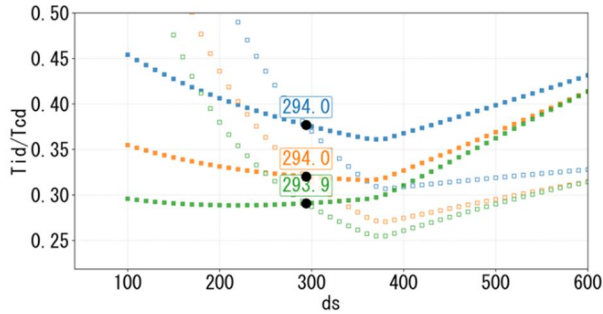
No.2



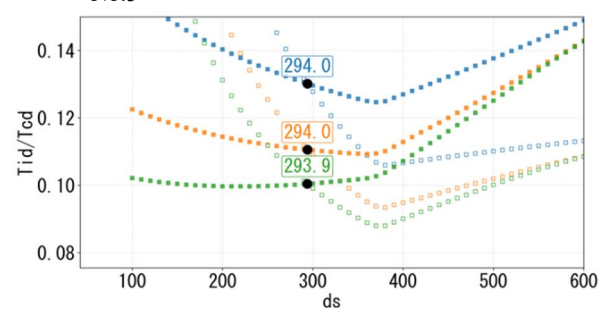
No.3



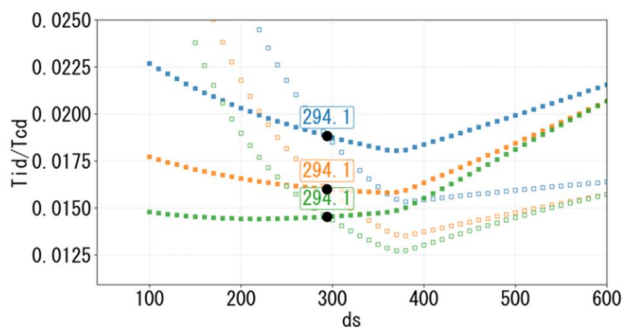
No.4



No.5



No.6

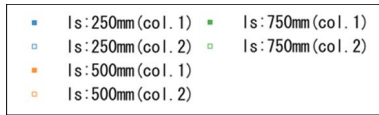


B.4 法線平行方向の差し筋間隔 l_s

(1) $c_l=500\text{mm}$

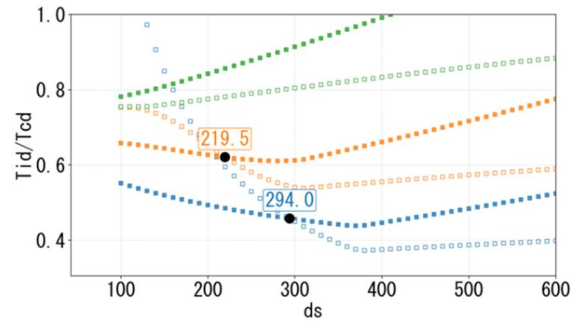
・条件 ; $l_s=250,500,750\text{mm}$ ($B=3.00\text{m}$, $l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$)

凡例

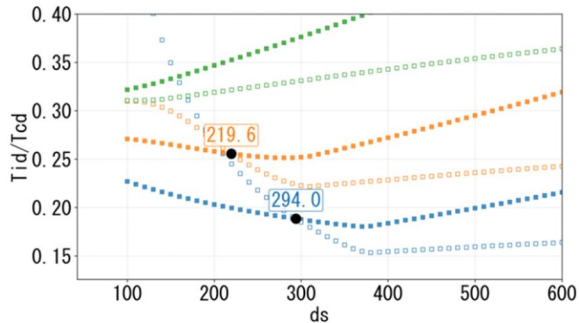


※col.1 : 1 列目, col.2 : 2 列目

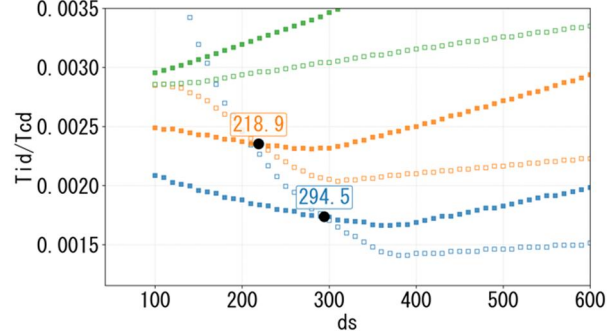
No.1



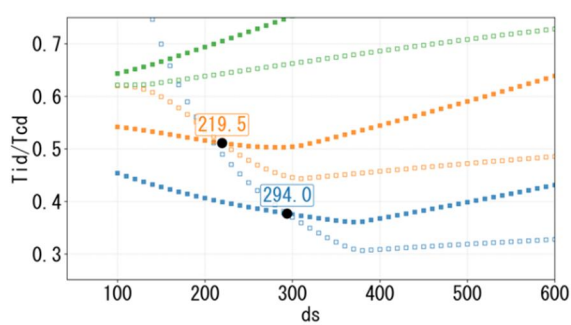
No.2



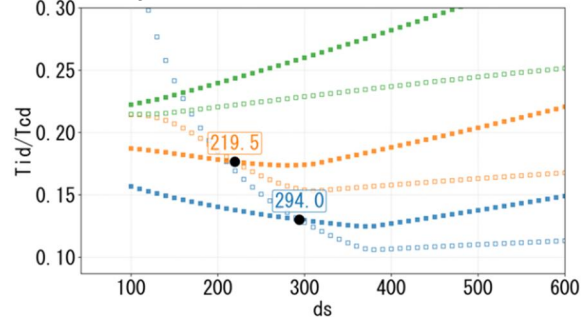
No.3



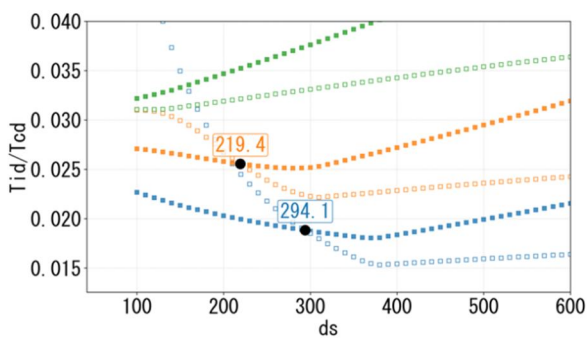
No.4



No.5



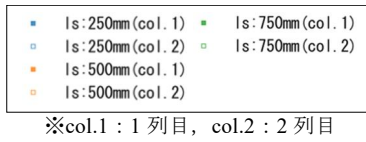
No.6



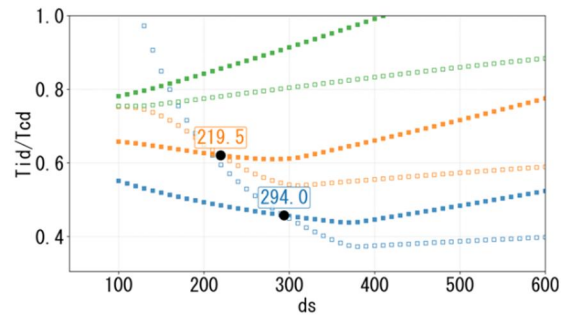
(2) $c_l=250\text{mm}$

・条件 ; $l_s=250,500,750\text{mm}$ ($B=3.00\text{m}$, $l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$)

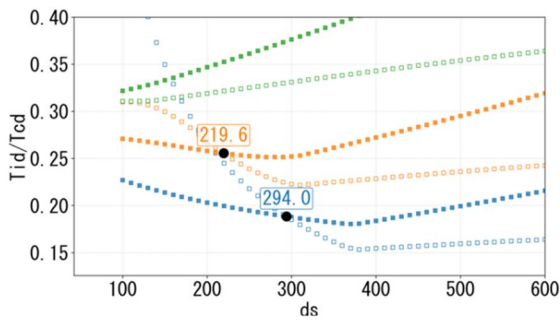
凡例



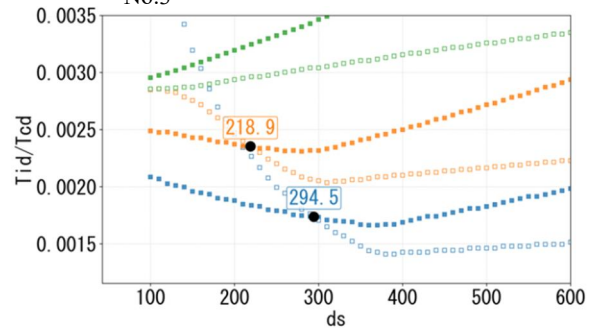
No.1



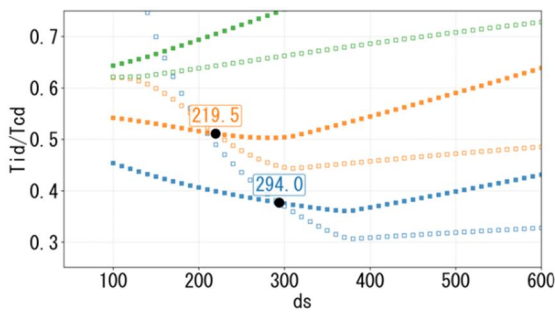
No.2



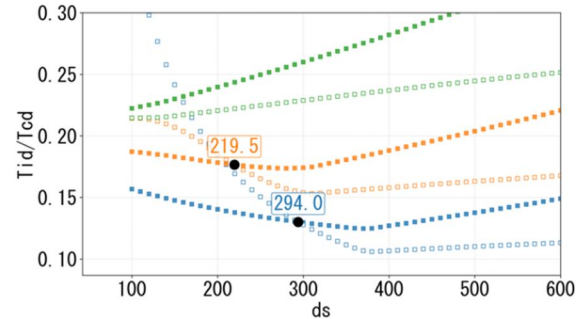
No.3



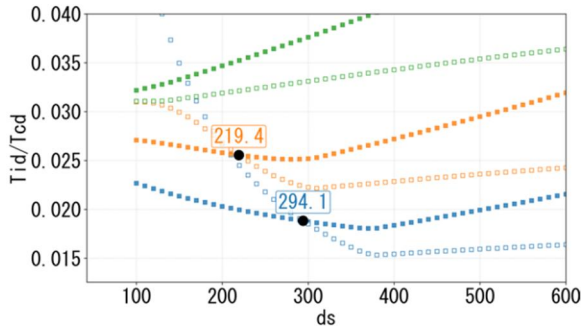
No.4



No.5



No.6

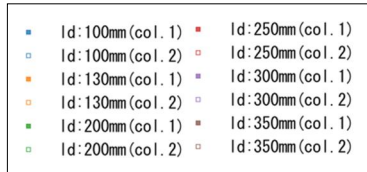


B.5 埋込長 l_d

(1) $c_l=500\text{mm}$

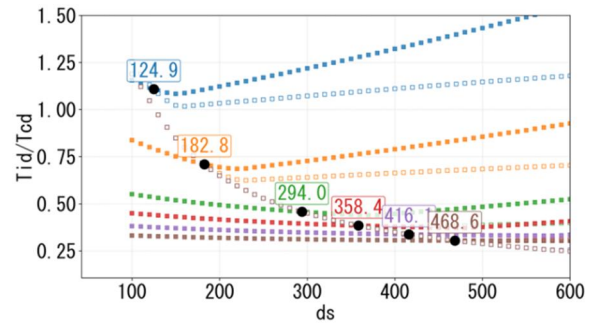
・条件 ; $l_d=100\text{mm}\sim 350\text{mm}$ ($B=3.00\text{m}$, $l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$)

凡例

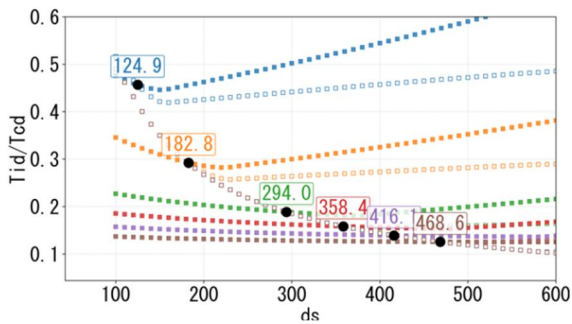


※col.1 : 1 列目, col.2 : 2 列目

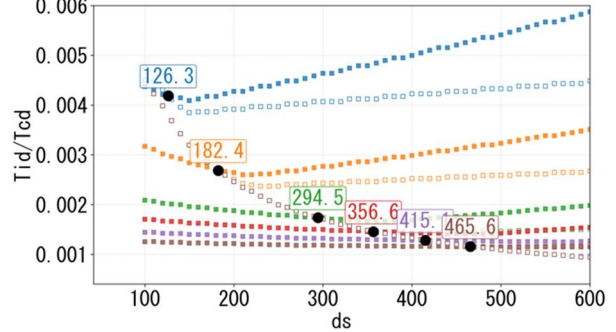
No.1



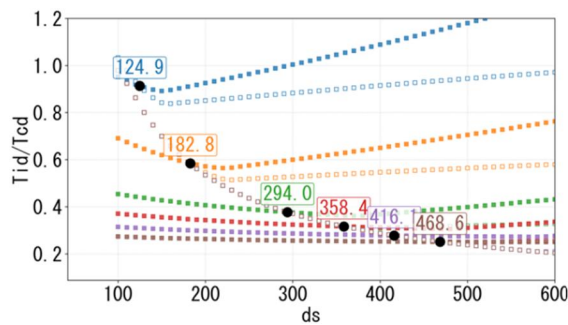
No.2



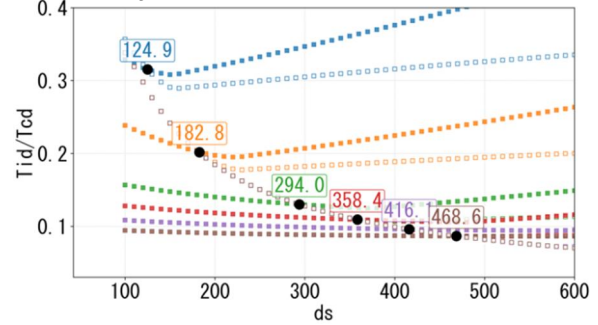
No.3



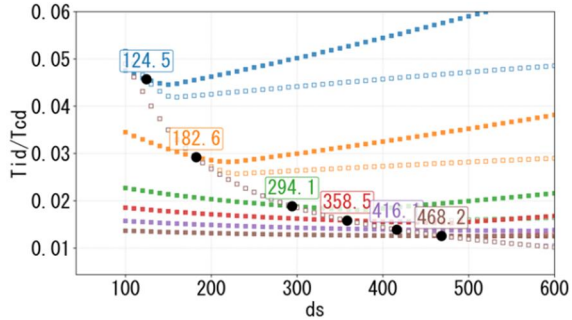
No.4



No.5



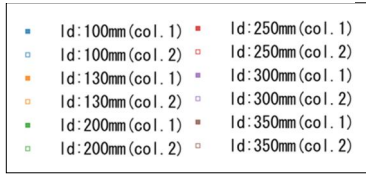
No.6



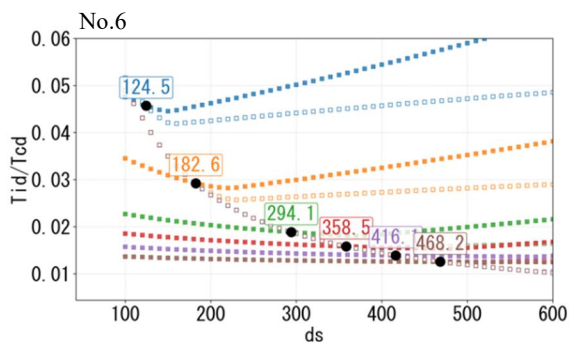
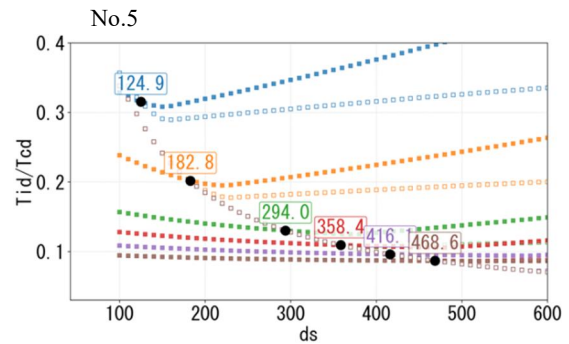
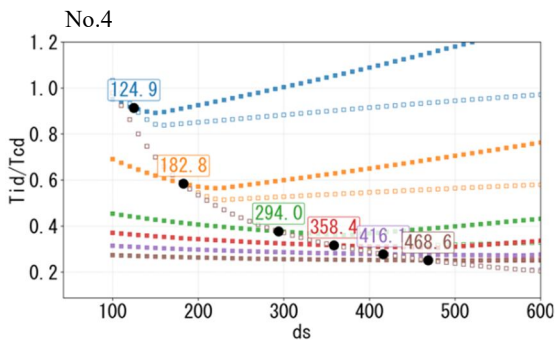
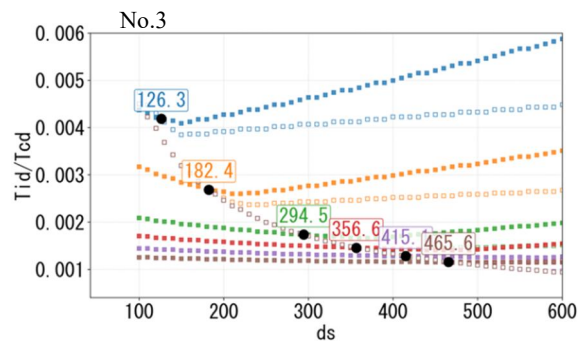
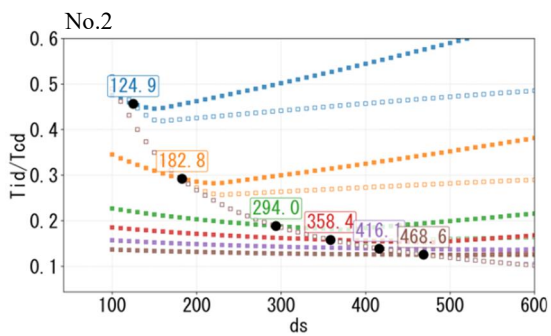
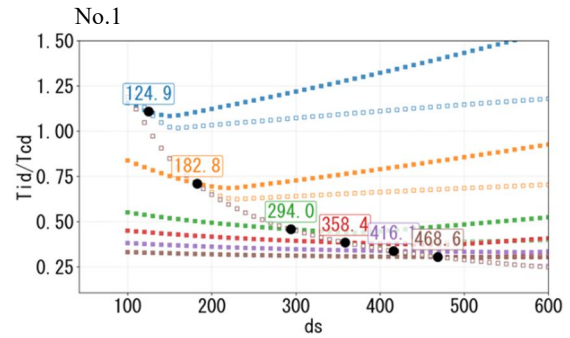
(2) $c_l=250\text{mm}$

・条件 ; No.1~6 ($B=3.00\text{m}$, $l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$)

凡例



※col.1 : 1 列目, col.2 : 2 列目



付録 C 逆転条件の発生判断図表

C.1 かぶり (はしあき) : $c_l=500\text{mm}$

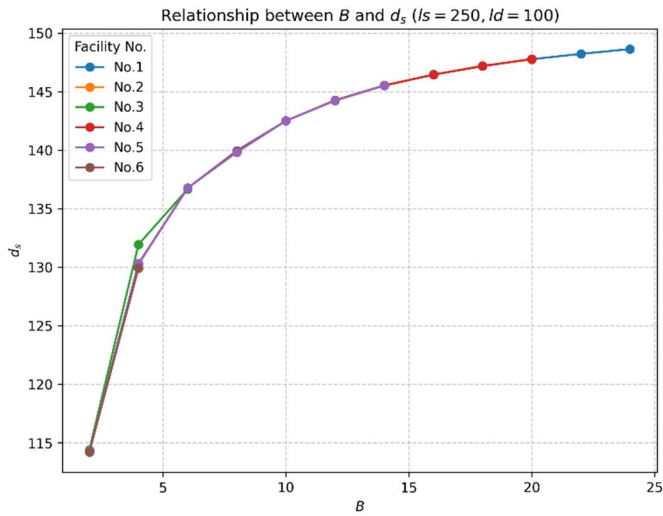


図-C.1 d_s-B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$)

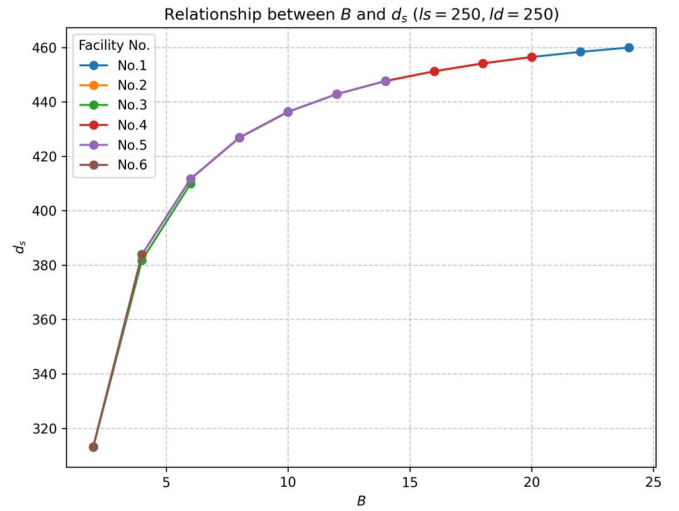


図-C.4 d_s-B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=250\text{mm}$)

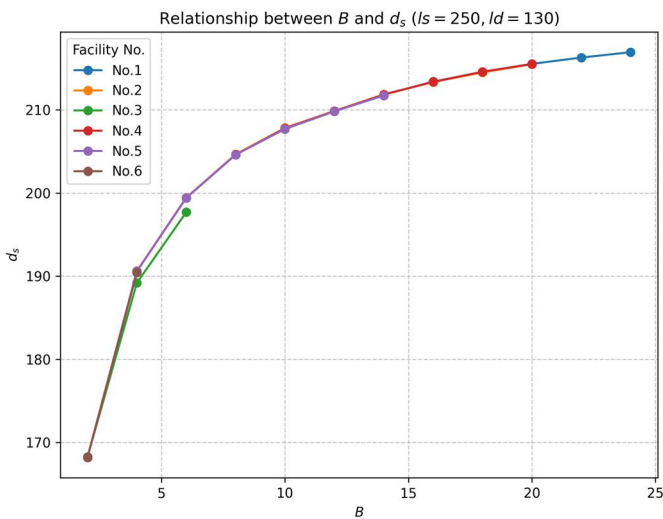


図-C.2 d_s-B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=130\text{mm}$)

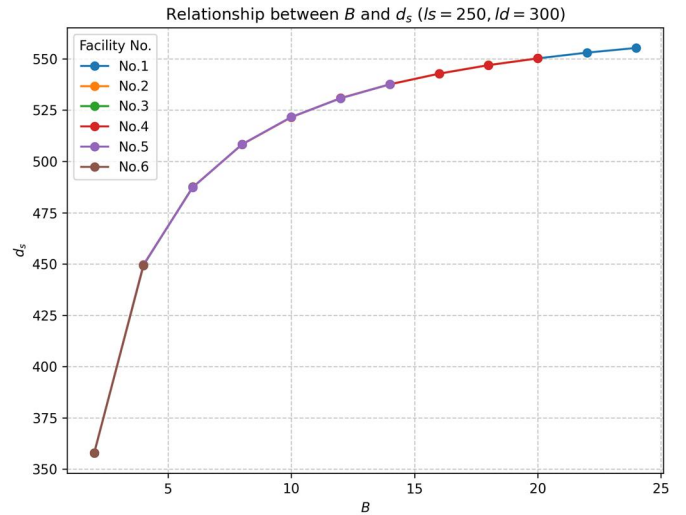


図-C.5 d_s-B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=300\text{mm}$)

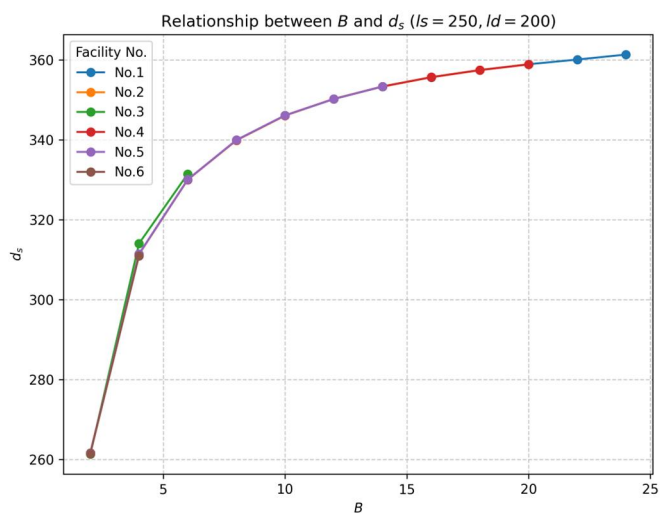


図-C.3 d_s-B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$)

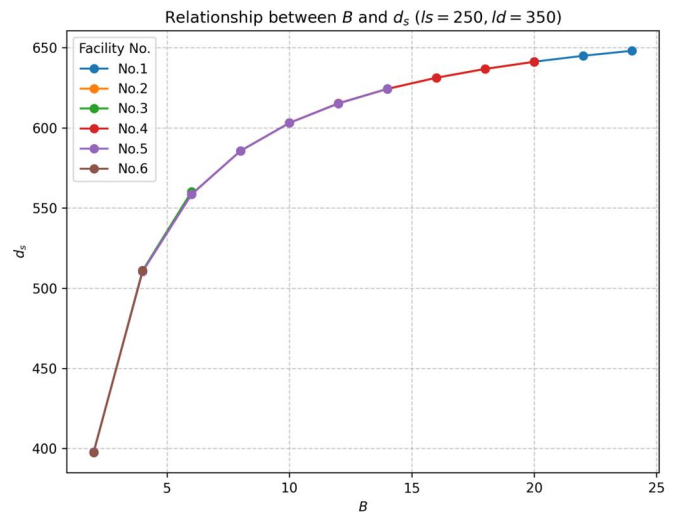


図-C.6 d_s-B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=350\text{mm}$)

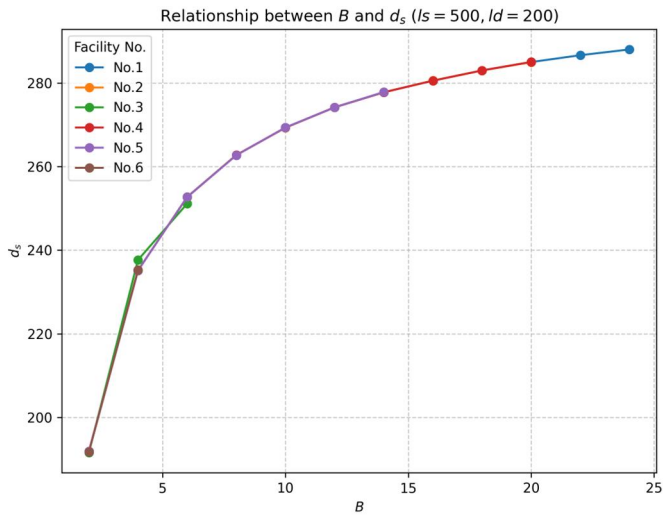


図-C.7 d_s - B グラフの結果 ($l_s=500$ mm, $l_d=200$ mm)

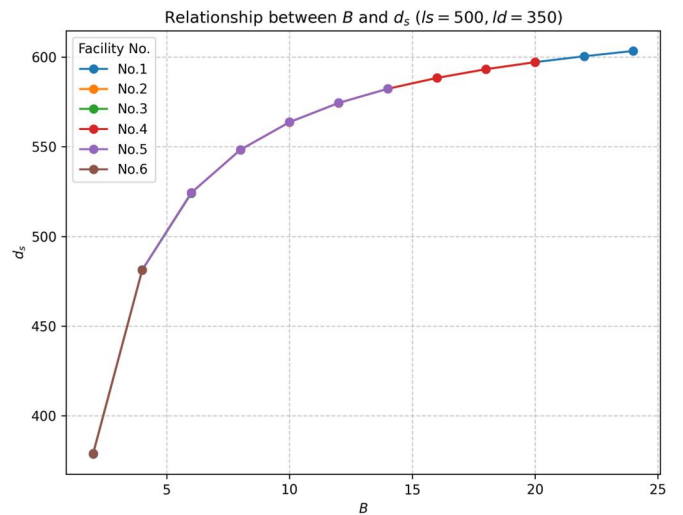


図-C.10 d_s - B グラフの結果 ($l_s=500$ mm, $l_d=350$ mm)

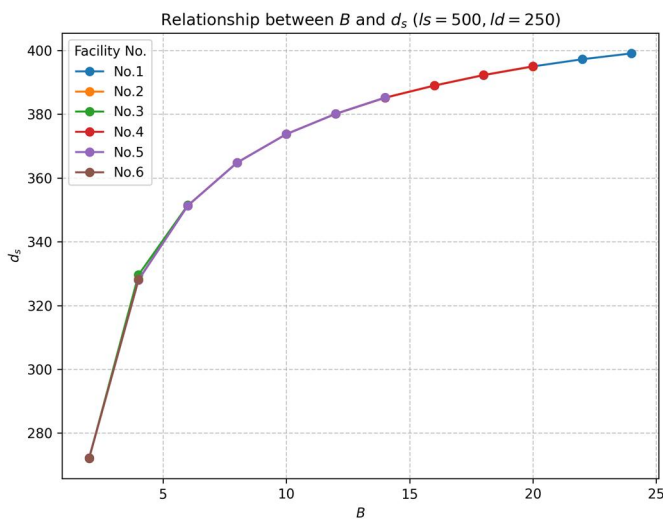


図-C.8 d_s - B グラフの結果 ($l_s=500$ mm, $l_d=250$ mm)

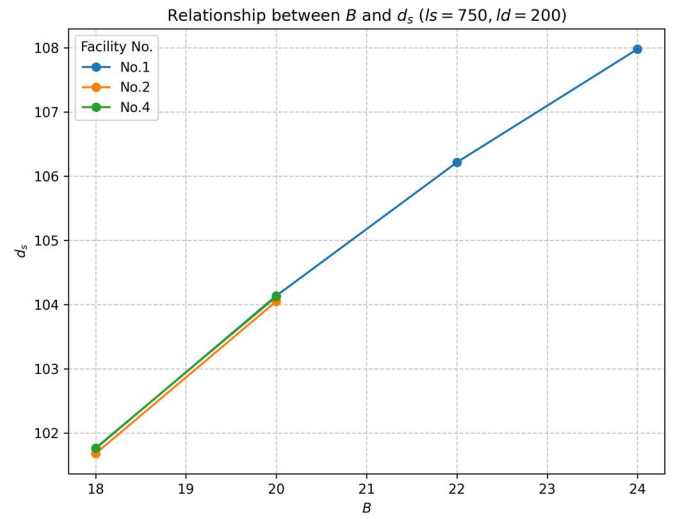


図-C.11 d_s - B グラフの結果 ($l_s=750$ mm, $l_d=200$ mm)

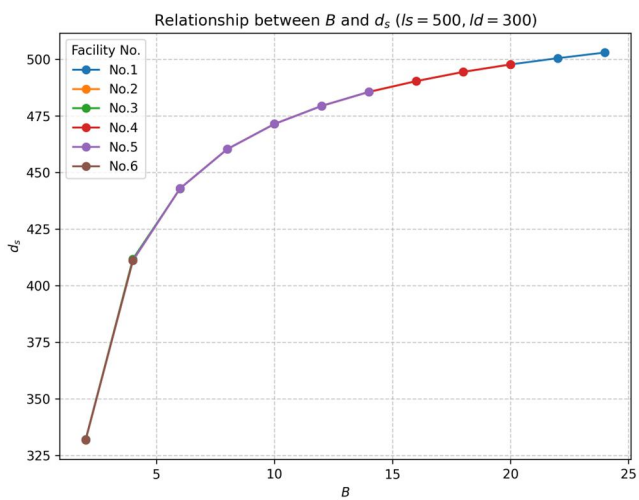


図-C.9 d_s - B グラフの結果 ($l_s=500$ mm, $l_d=300$ mm)

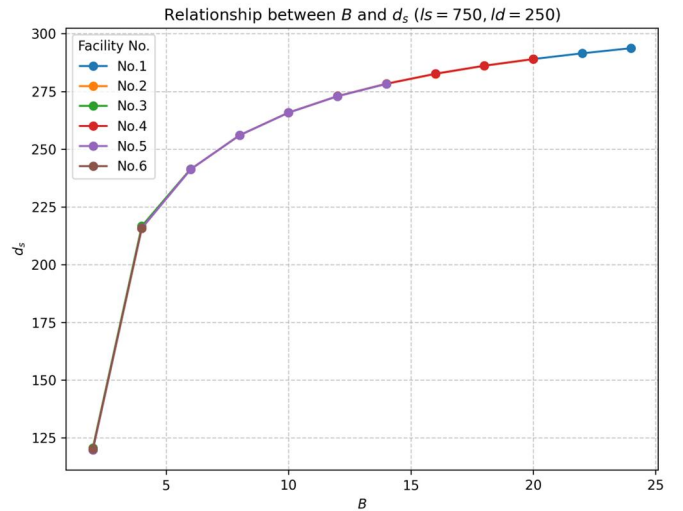


図-C.12 d_s - B グラフの結果 ($l_s=750$ mm, $l_d=250$ mm)

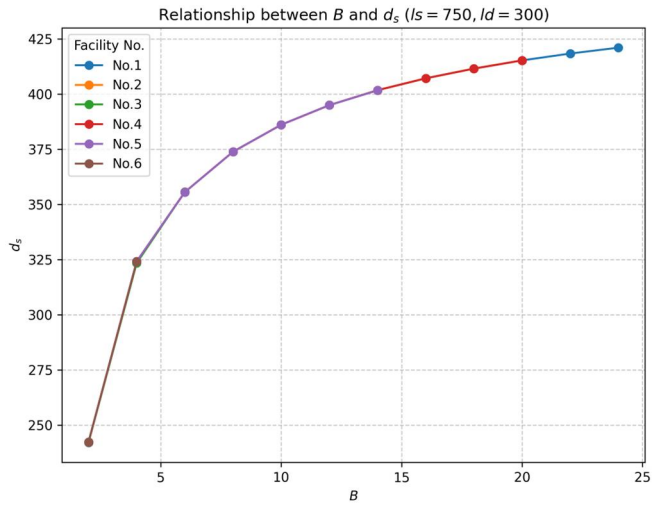


図-C.13 d_s-B グラフの結果 ($l_s=750\text{mm}$, $l_d=300\text{mm}$)

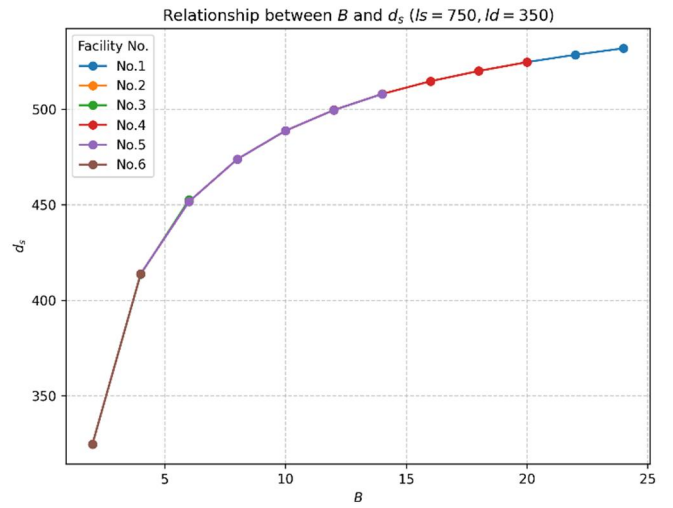


図-C.14 d_s-B グラフの結果 ($l_s=750\text{mm}$, $l_d=350\text{mm}$)

C.2 かぶり（はしあき）： $c_l=400\text{mm}$

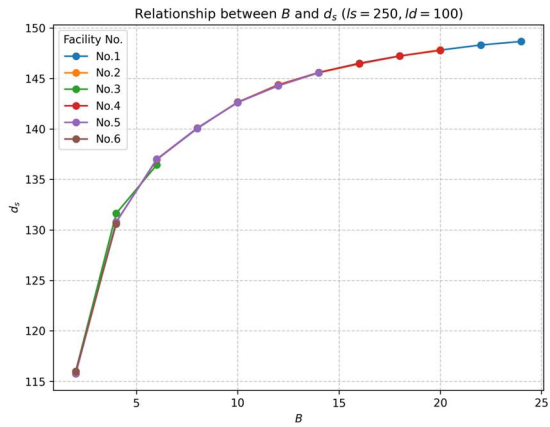


図-C. 15 d_s - B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$)

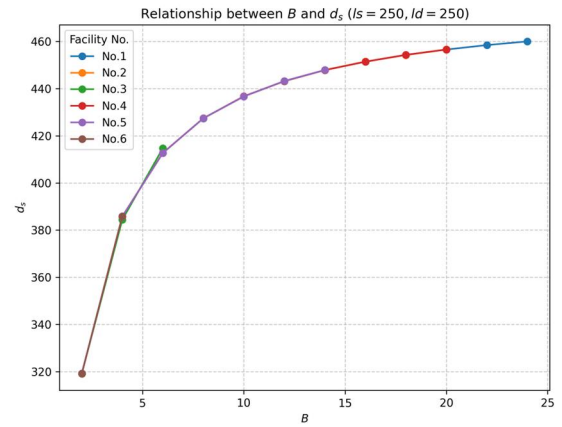


図-C. 18 d_s - B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=250\text{mm}$)

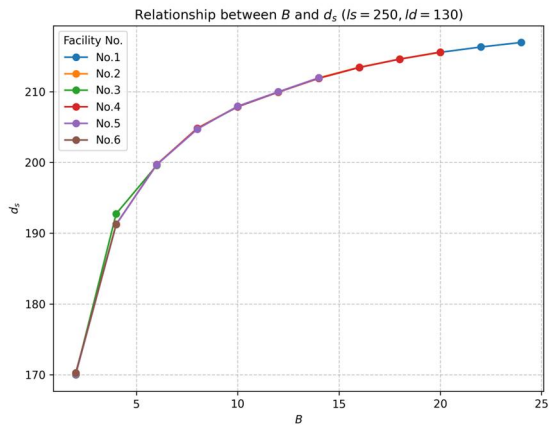


図-C. 16 d_s - B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=130\text{mm}$)

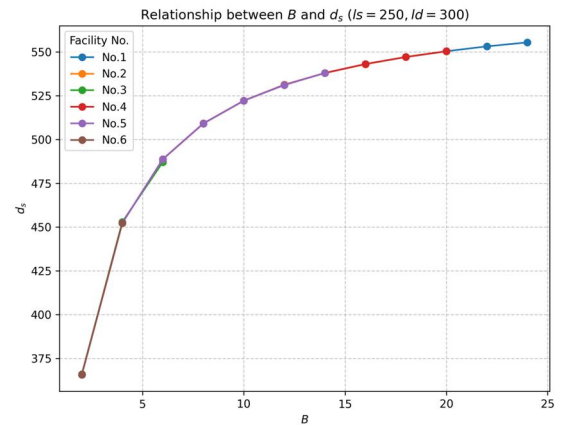


図-C. 19 d_s - B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=300\text{mm}$)

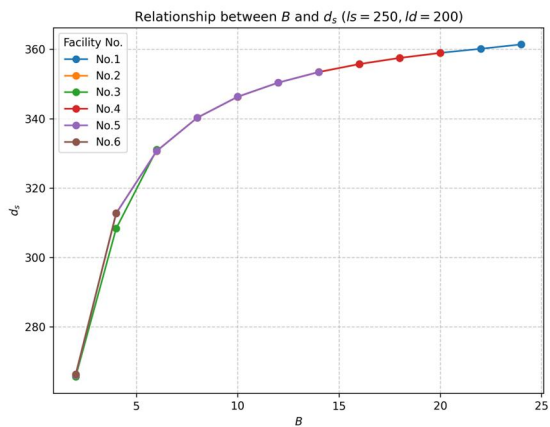


図-C. 17 d_s - B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$)

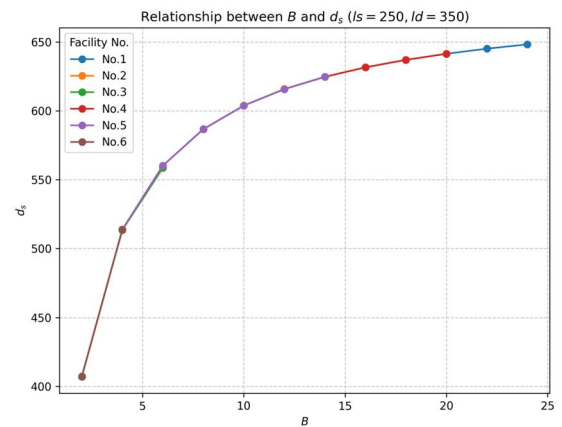


図-C. 20 d_s - B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=350\text{mm}$)

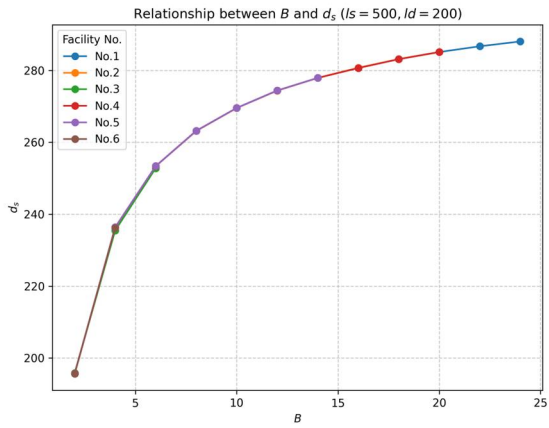


図-C.21 d_s - B グラフの結果 ($l_s=500\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$)

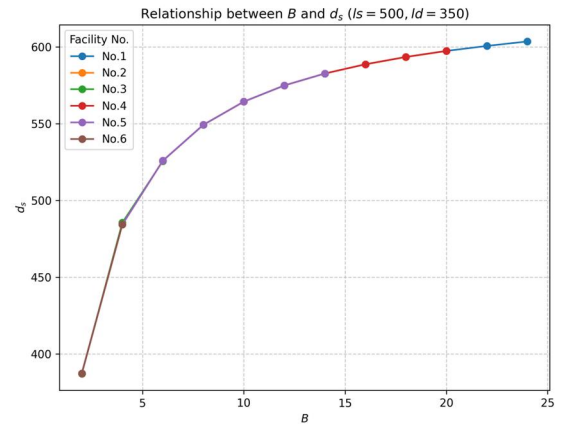


図-C.24 d_s - B グラフの結果 ($l_s=500\text{mm}$, $l_d=350\text{mm}$)

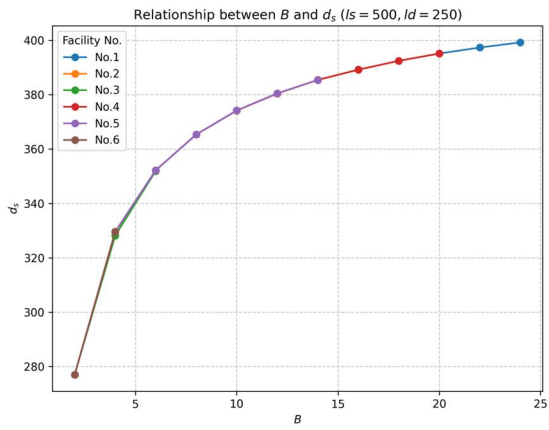


図-C.22 d_s - B グラフの結果 ($l_s=500\text{mm}$, $l_d=250\text{mm}$)

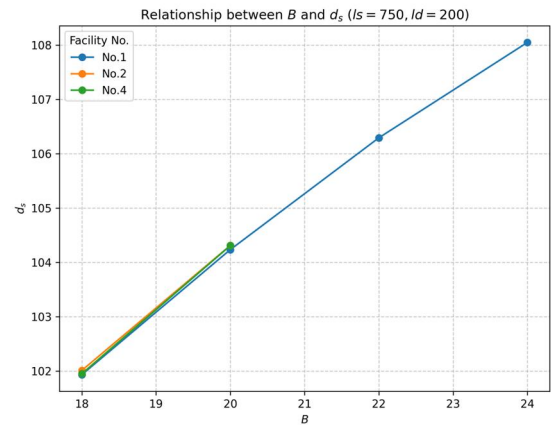


図-C.25 d_s - B グラフの結果 ($l_s=750\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$)

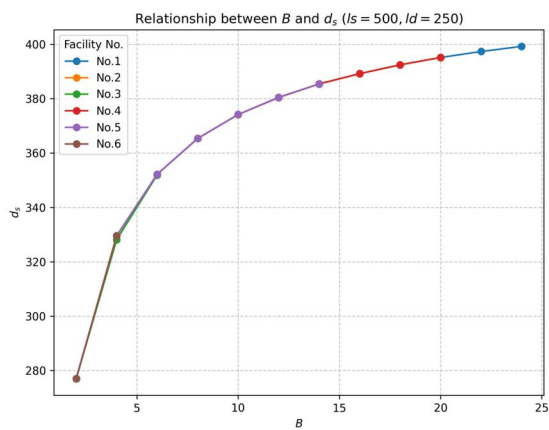


図-C.23 d_s - B グラフの結果 ($l_s=500\text{mm}$, $l_d=300\text{mm}$)

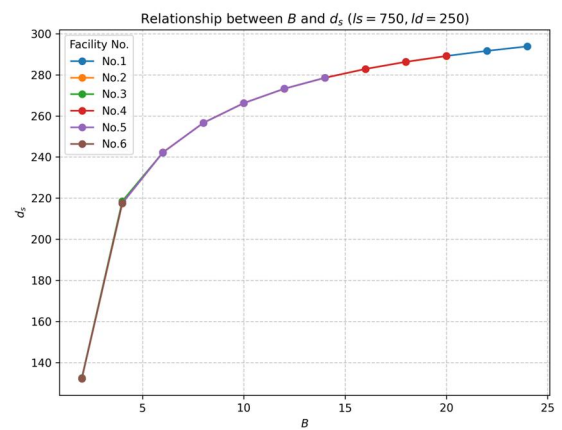


図-C.26 d_s - B グラフの結果 ($l_s=750\text{mm}$, $l_d=250\text{mm}$)

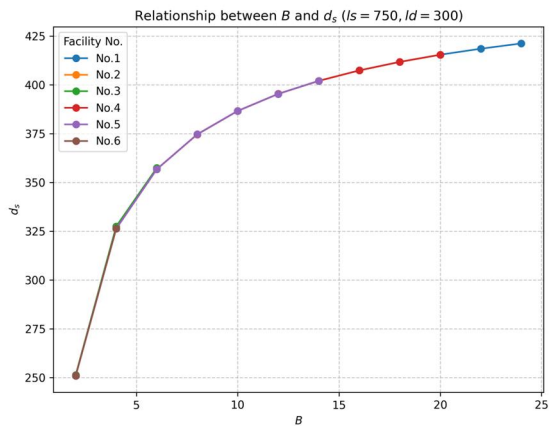


図-C. 27 d_s - B グラフの結果 ($l_s=750\text{mm}$, $l_d=300\text{mm}$)

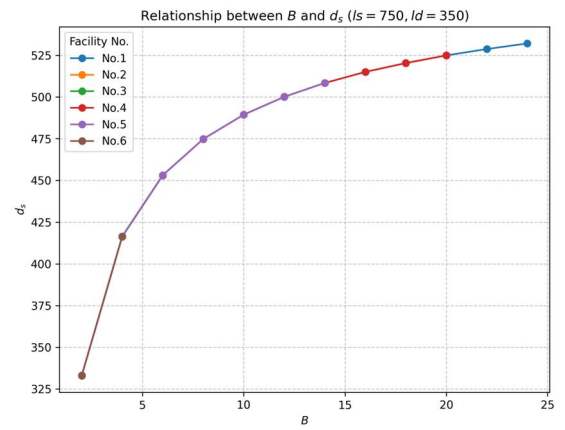


図-C. 28 d_s - B グラフの結果 ($l_s=750\text{mm}$, $l_d=350\text{mm}$)

C.3 かぶり（はしあき）： $c_f=300\text{mm}$

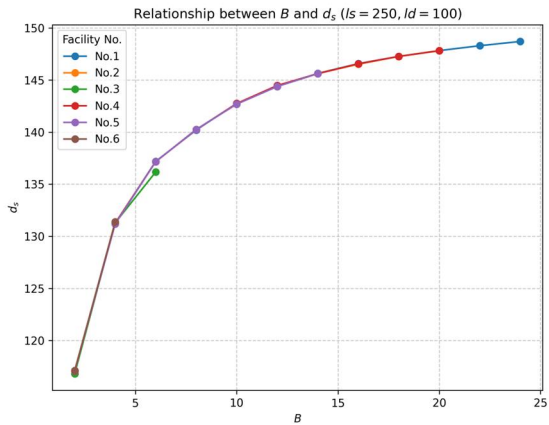


図-C.29 d_s-B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$)

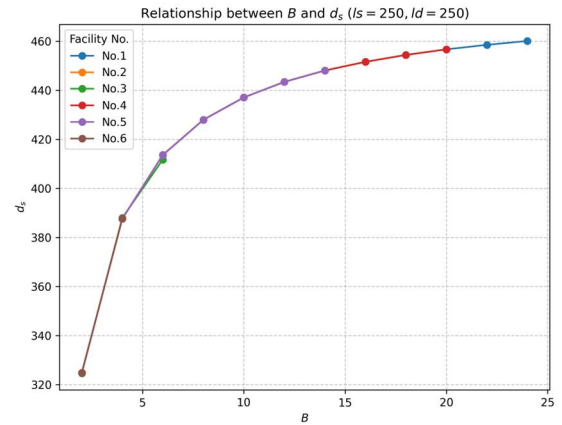


図-C.32 d_s-B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=250\text{mm}$)

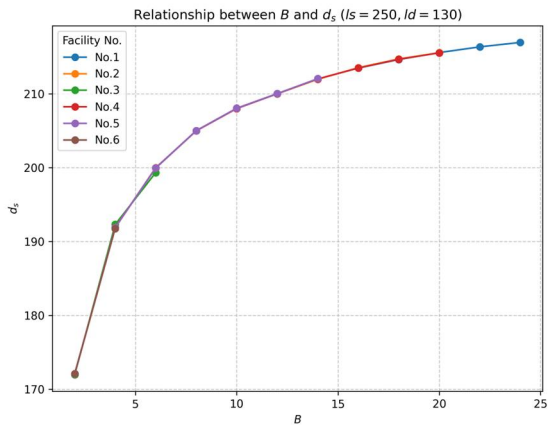


図-C.30 d_s-B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=130\text{mm}$)

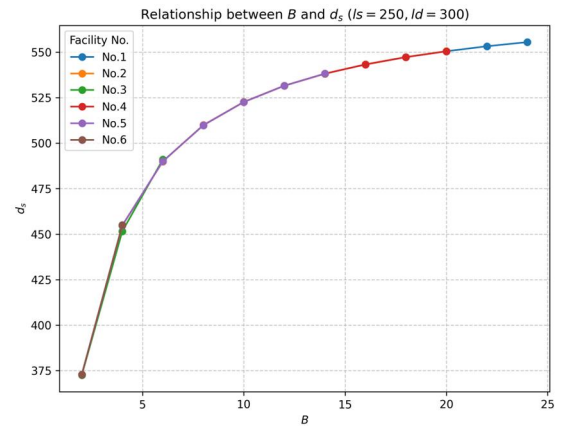


図-C.33 d_s-B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=300\text{mm}$)

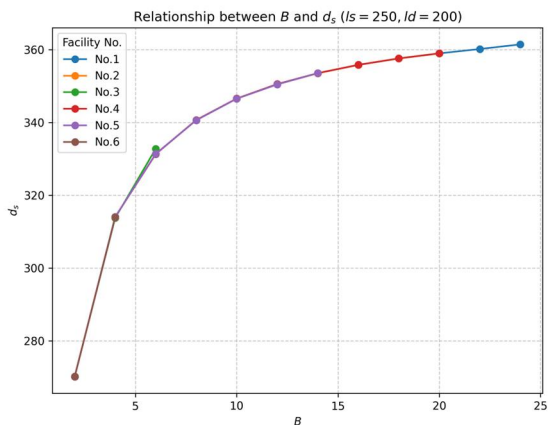


図-C.31 d_s-B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$)

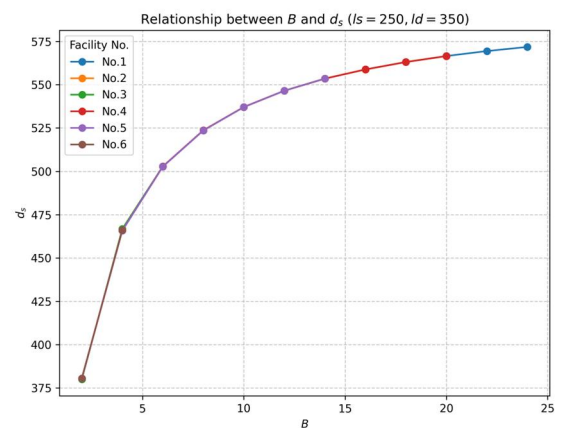


図-C.34 d_s-B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=350\text{mm}$)

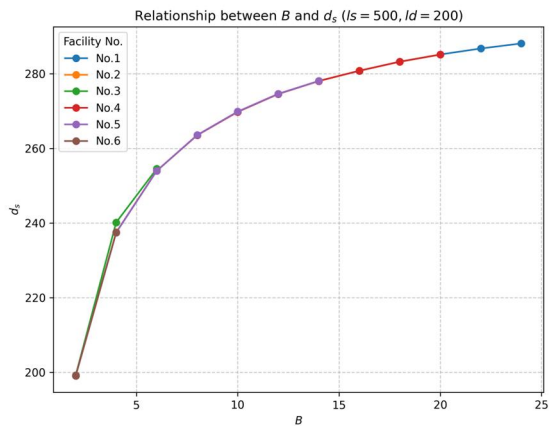


図-C. 35 d_s - B グラフの結果 ($l_s=500\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$)

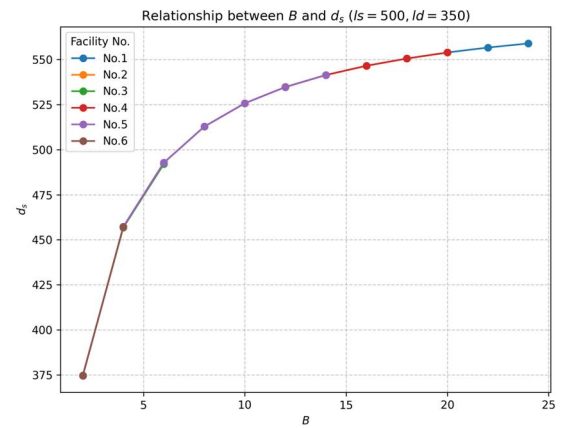


図-C. 38 d_s - B グラフの結果 ($l_s=500\text{mm}$, $l_d=350\text{mm}$)

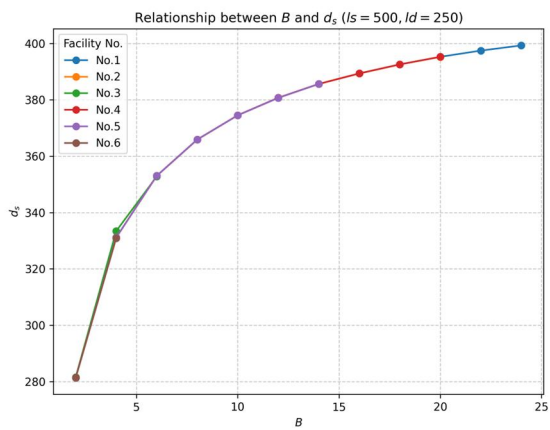


図-C. 36 d_s - B グラフの結果 ($l_s=500\text{mm}$, $l_d=250\text{mm}$)

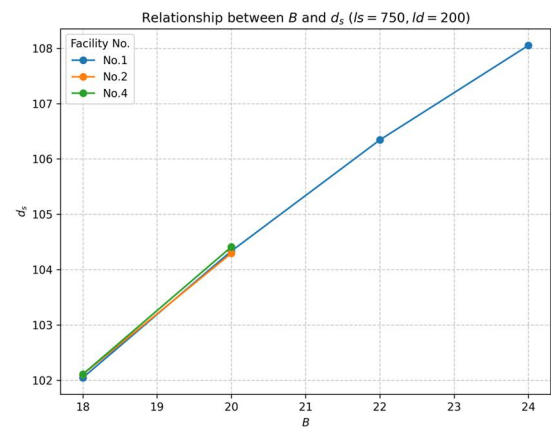


図-C. 39 d_s - B グラフの結果 ($l_s=750\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$)

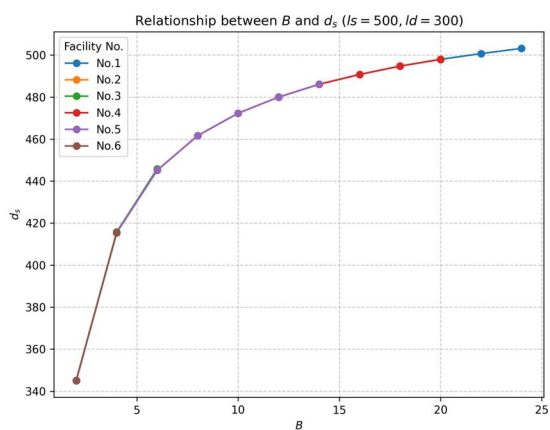


図-C. 37 d_s - B グラフの結果 ($l_s=500\text{mm}$, $l_d=300\text{mm}$)

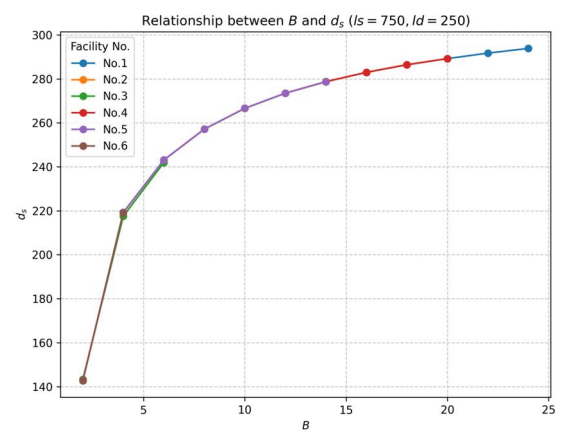


図-C. 40 d_s - B グラフの結果 ($l_s=750\text{mm}$, $l_d=250\text{mm}$)

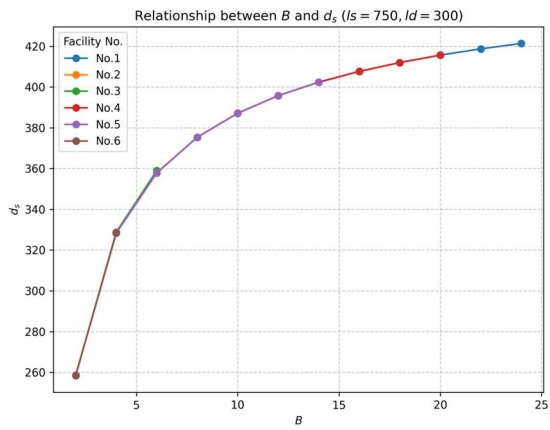


図-C. 41 d_s-B グラフの結果 ($l_s=750\text{mm}$, $l_d=300\text{mm}$)

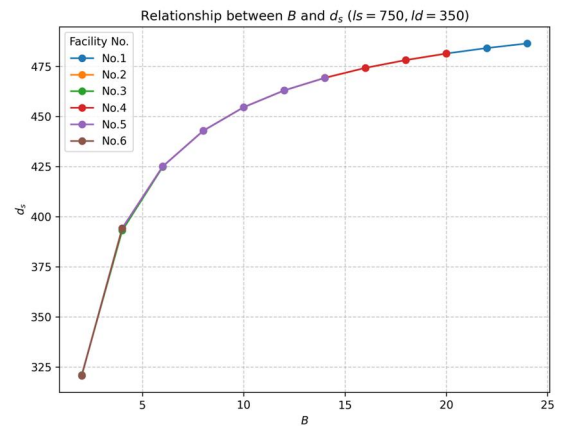


図-C. 42 d_s-B グラフの結果 ($l_s=750\text{mm}$, $l_d=350\text{mm}$)

C.4 かぶり（はしあき）： $c_f=200\text{mm}$

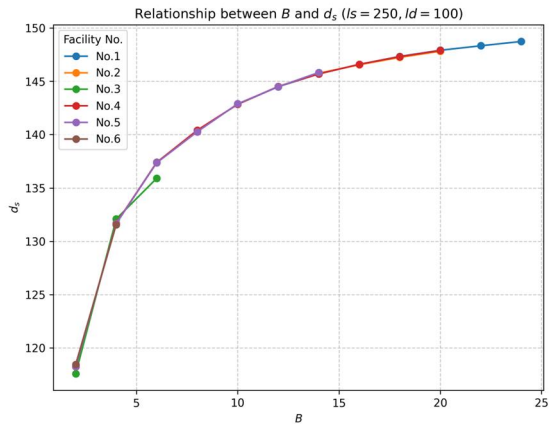


図-C. 43 d_s - B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$)

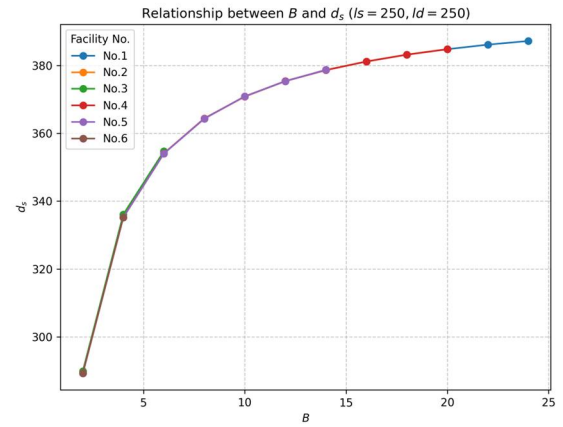


図-C. 46 d_s - B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=250\text{mm}$)

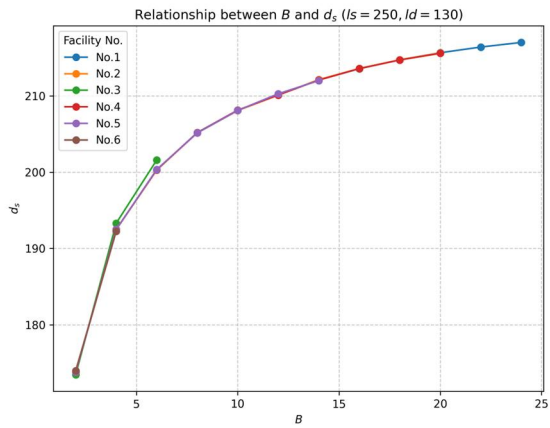


図-C. 44 d_s - B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=130\text{mm}$)

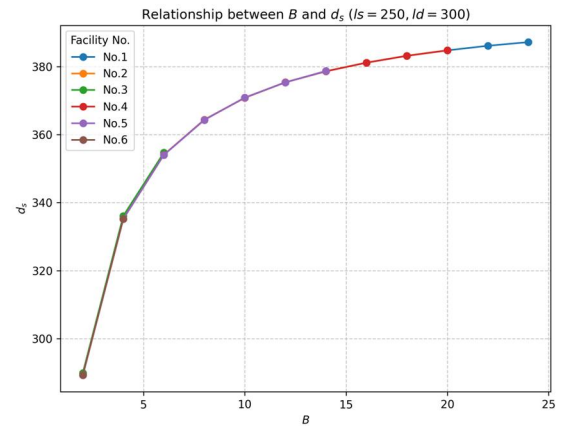


図-C. 47 d_s - B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=300\text{mm}$)

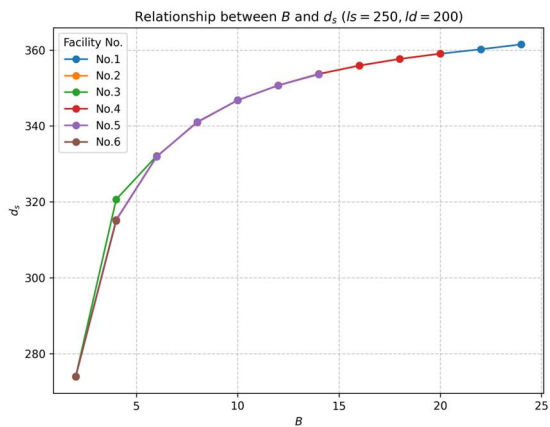


図-C. 45 d_s - B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$)

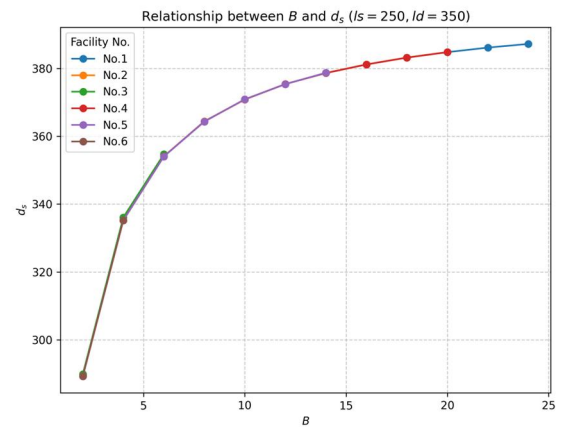


図-C. 48 d_s - B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=350\text{mm}$)

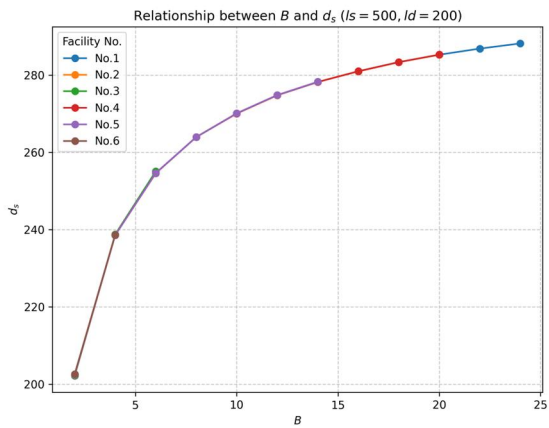


図-C. 49 d_s-B グラフの結果 ($l_s=500\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$)

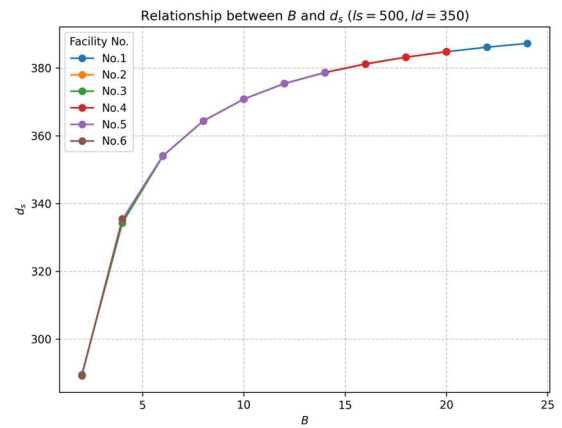


図-C. 52 d_s-B グラフの結果 ($l_s=500\text{mm}$, $l_d=350\text{mm}$)

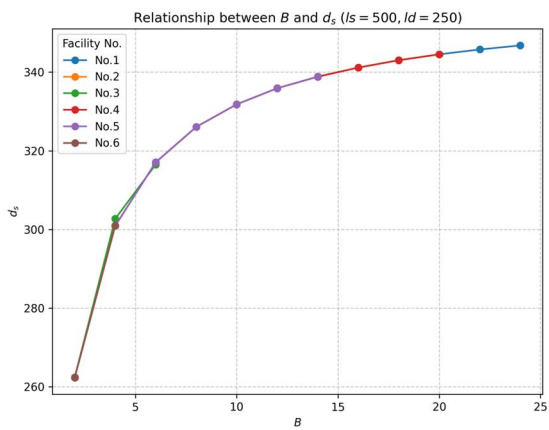


図-C. 50 d_s-B グラフの結果 ($l_s=500\text{mm}$, $l_d=250\text{mm}$)

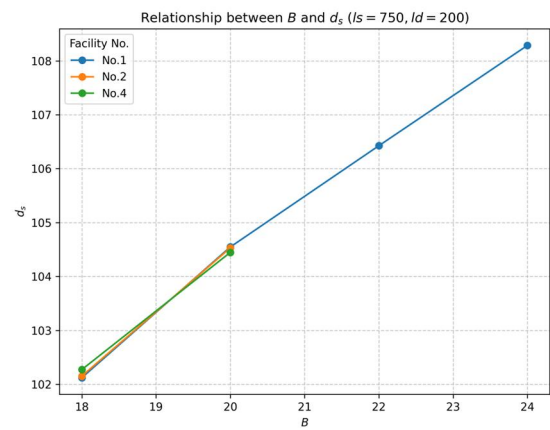


図-C. 53 d_s-B グラフの結果 ($l_s=750\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$)

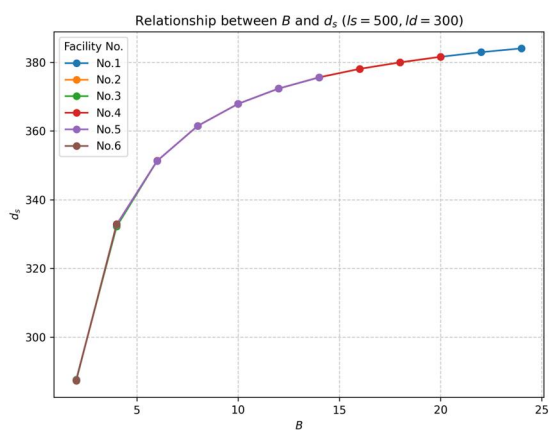


図-C. 51 d_s-B グラフの結果 ($l_s=500\text{mm}$, $l_d=300\text{mm}$)

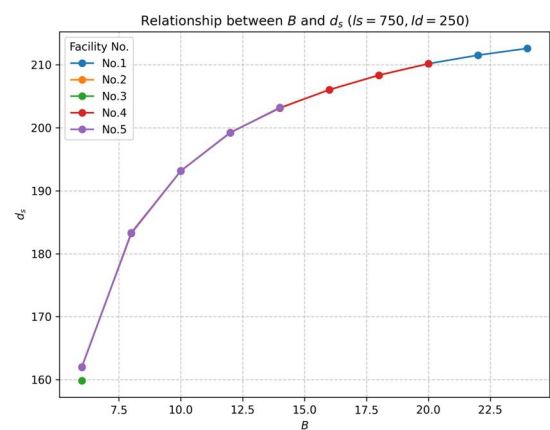


図-C. 54 d_s-B グラフの結果 ($l_s=750\text{mm}$, $l_d=250\text{mm}$)

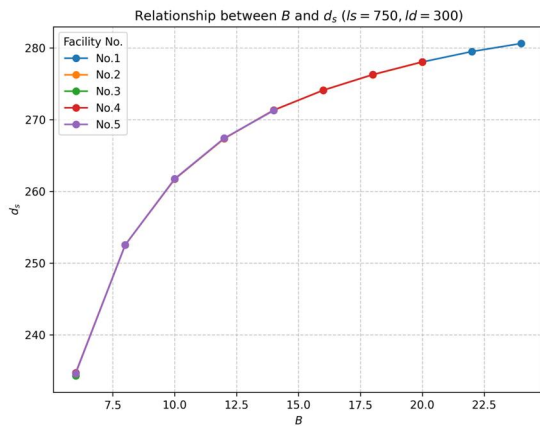


図-C. 55 d_s-B グラフの結果 ($l_s=750\text{mm}$, $l_d=300\text{mm}$)

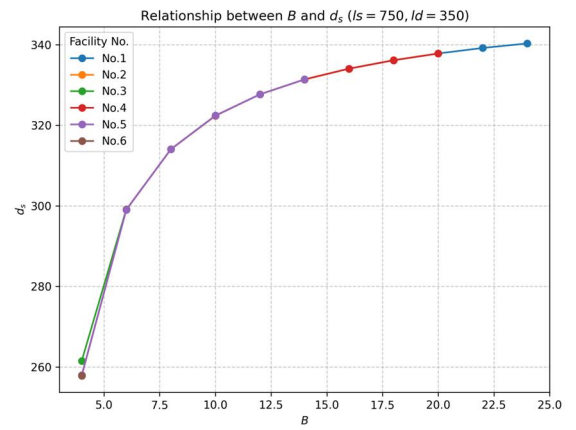


図-C. 56 d_s-B グラフの結果 ($l_s=750\text{mm}$, $l_d=350\text{mm}$)

C.5 かぶり（はしあき）： $c_f=100\text{mm}$

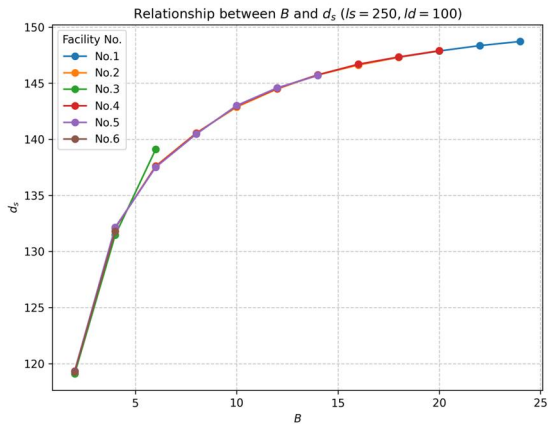


図-C.57 d_s - B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=100\text{mm}$)

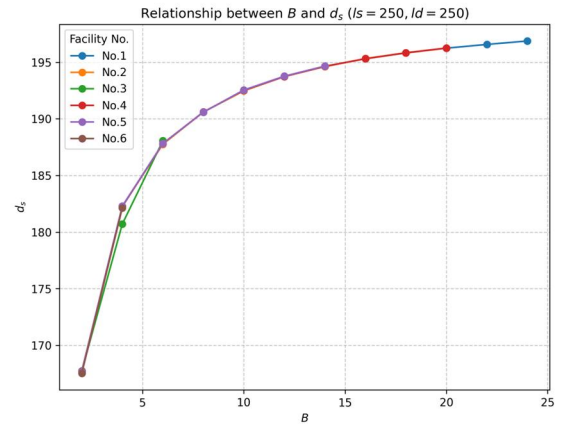


図-C.60 d_s - B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=250\text{mm}$)

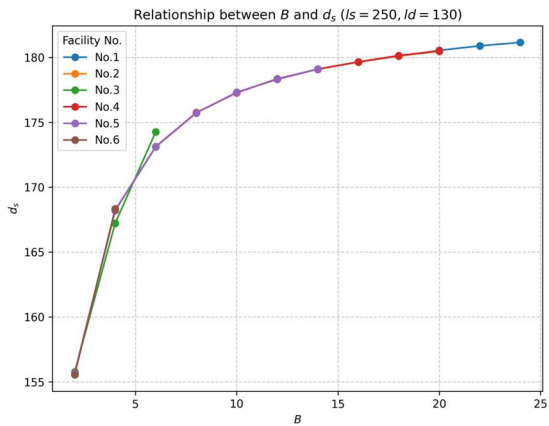


図-C.58 d_s - B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=130\text{mm}$)

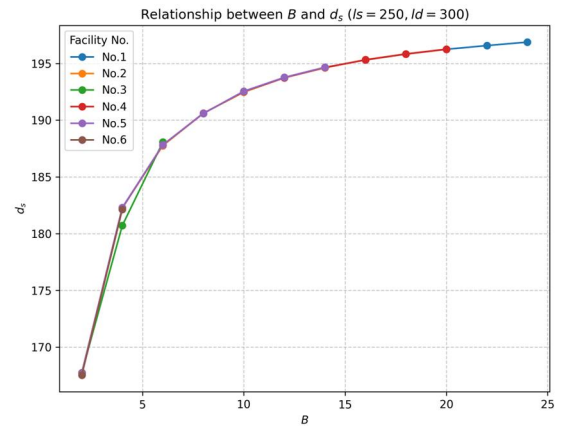


図-C.61 d_s - B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=300\text{mm}$)

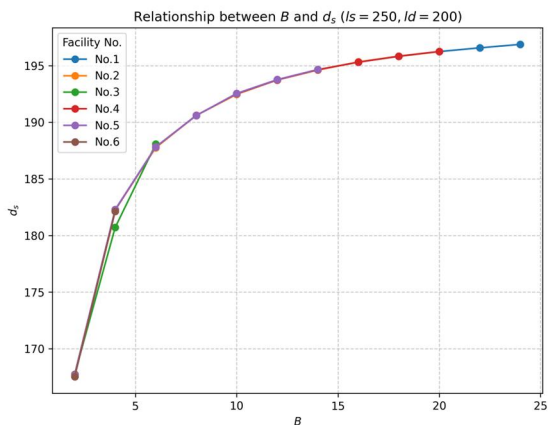


図-C.59 d_s - B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=200\text{mm}$)

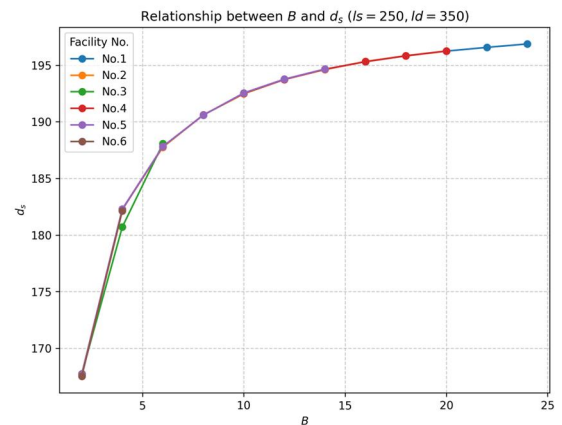


図-C.62 d_s - B グラフの結果 ($l_s=250\text{mm}$, $l_d=350\text{mm}$)