

泥水濃度に着目した場所打ちコンクリートの強度評価法

神田 政幸* 西村 昌宏**
西岡 英俊* 千葉 佳敬***

A Method of Evaluating Compressive Strength for Cast-In-Place Concrete Focused on Drilling Fluid Density

Masayuki KODA Masahiro NISHIMURA
Hidetoshi NISHIOKA Yoshitaka CHIBA

The characteristic value of compressive concrete strength in design of cast-in place piles, caisson type piles and diaphragm wall foundations is the specified concrete strength multiplied by the reduction factor β in railway structures. The β was decided by the construction conditions, which were poor and those without the concrete compaction compared with the concrete placement on the ground. In this study we proposed a newly reduction factor based on the drilling fluid densities, which were surveyed by pile construction methods in the fields.

キーワード：場所打ちコンクリート，泥水濃度，泥水比重，圧縮強度，弾性係数

1. はじめに

鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物¹⁾ (以下、基礎標準と呼ぶ) では、場所打ち杭、深礎杭、連壁基礎の設計に用いるコンクリート強度等の特性値は、施工条件として気中条件、自然泥水条件 (ベントナイト泥水濃度:3%未満) およびベントナイト泥水条件 (ベントナイト泥水濃度:3%以上~10%以下) によって3種類に分け、表1に示す低減係数 β をコンクリートの呼び強度 (設計基準強度) に掛け合わせ求めている。従来、安定液は、孔壁の崩壊防止と孔内土粒子の沈降を阻止することを主目的として、ベントナイト安定液が使用されてきた。最近ではコンクリートとの置換性が重視され、低比重・低

中粘性のポリマーを併用した安定液が使用されるようになってきたが、その品質については十分な検討がなされておらず、場所打ち杭のコンクリート強度等に関する取り扱いの規定もない。著者らは、ポリマーを併用した安定液中に打設されるコンクリートの強度等を明らかにする目的として、場所打ち杭の施工を模擬したコンクリートの打設試験、コア供試体の強度試験等を実施した。その結果、コンクリートの強度等は、ポリマー濃度 (一般的な適用濃度範囲0.1%~0.6%) よりもベントナイト濃度に依存し、ベントナイト濃度の増加とともに、減少することが明らかになった²⁾。

本研究では、場所打ちコンクリートの強度等に影響を与えると考えられる孔内水の泥水濃度 (泥水比重) に着目し、実施工現場の初期安定液の配合調査、工法別の泥水濃度の実態調査を実施した上で、泥水中のコンクリート強度等の特性値を求める新たな低減係数 β を提案した。さらに実杭のコア供試体を対象に提案した低減係数 β の妥当性を検証した。なお、本研究では図1に示すように、「安定液」とは新液を指し、従来からあるベントナ

表1 施工条件による低減係数 β (基礎基準 解説表 6.2-1)

施工条件	設計強度		コンクリートのヤング係数	コンクリートが受け持つせん断耐力 ³⁾ V_{cd}
	圧縮強度 曲げ強度 引張強度 支圧強度	付着強度		
気中施工	0.9	0.9	0.9	1.0
自然泥水 ¹⁾	0.7	0.6	0.8	0.9
ベントナイト泥水 ²⁾	0.6	0.5	0.7	0.8

*1 ベントナイト濃度が3%未満であれば、この項によってよい。
*2 ベントナイト濃度が10%を超える場合は、別途検討して求める。
*3 V_{cd} は、 β により低減した設計強度により求める。

* 構造物技術研究部 (基礎・土構造)
** (株)復建エンジニアリング (前 構造物技術研究部)
*** ジェイアール東海コンサルタンツ(株)(前 構造物技術研究部)

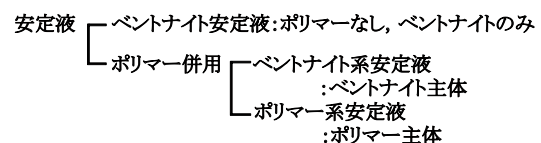


図1 安定液と泥水の定義

特集：基礎構造物の設計技術

イトのみの「ベントナイト安定液」とポリマーを併用した「ベントナイト系安定液」、「ポリマー系安定液」に区別することとし、「泥水」とはこれらの安定液に掘削中に地下水や土粒子が混入したものを示すこととした。

2. 安定液と孔内の泥水濃度の実態調査

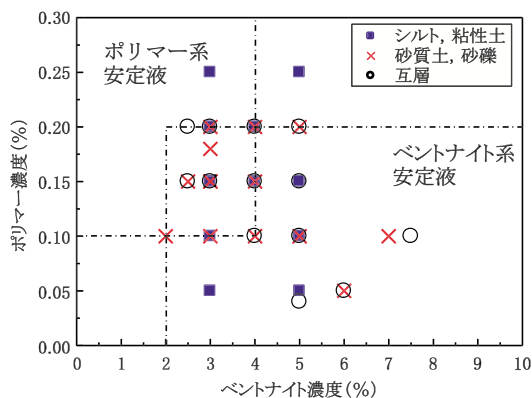
2.1 安定液の配合調査

安定液の使用実態を把握するため、関東近郊の場所打ち杭（アースドリル工法）の配合実態調査を行った（図2）。調査総数は合計80箇所である。調査結果より得られた安定液の配合条件を図3に示す。図3（a）には土質別配合分布の他に、ベントナイト系安定液およびポリマー系安定液の標準的な配合条件の範囲を一点鎖線で併記した。一方、図3（b）には配合度数分布を示した。

地盤の主たる土質が砂・砂礫の場合、ベントナイト濃度2～7%と配合量の幅が比較的広い。砂・砂礫地盤ではベントナイト濃度5%以上の高比重・高粘性のベント



図2 安定液の配合実態調査位置



(a) 土質配合分布

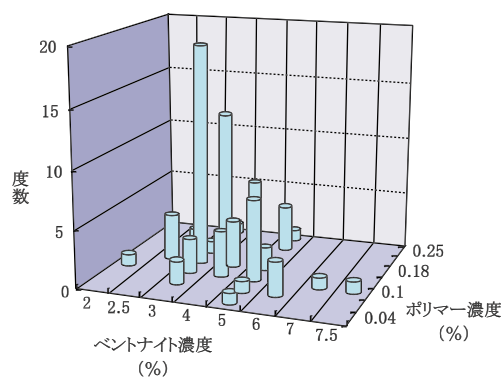
ナイト系安定液を用いることで、孔壁の崩壊やスライムの沈降防止に効果があるものの、コンクリートの置換性が悪く、品質が低下することが想定される。そこで、ポリマーを加えベントナイト濃度を低減させた低比重・高粘性のポリマー系安定液が使用され、ベントナイト濃度の幅が2～7%と広がったものと考えられる。一方、シルト・粘性土の場合、そもそも地盤材料そのものに造壁性の高い粘性土が含まれることからベントナイト濃度は必要最小限の3%程度に留められ、粘性の確保からポリマー濃度が0.05～0.25%と比較的広がったものと考えられる。図3（a）（b）より安定液は、ベントナイト系安定液・ポリマー系安定液のラップした範囲に調査結果が多く分布し、両者の中間的な配合条件のものがほとんどであることがわかった。

安定液は、掘削の繰返しにより自然地山の土粒子の混入によってその性状が徐々に変化する。新液ではなく、地盤材料の細粒分が浮遊する泥水中でコンクリートが打設されることから、場所打ちコンクリートの品質を一定に保つためには、コンクリート打設前の孔内水の泥水濃度を適切な範囲に維持する必要がある。コンクリート打設前の孔内水の泥水濃度については、アースドリル工法や連壁基礎で安定液管理項目の1つとして、泥水比重が計測されているものの、これまでオールケーシング工法やリバース工法などでは実施されてこなかった。そこで、次節では工法別にコンクリート打設前の孔内水の泥水濃度、泥水比重の調査を行った。

2.2 孔内水の泥水濃度、泥水比重調査

2.2.1 泥水の採取方法

対象とする泥水は、2次スライム処理を行ったコンクリート打設前のものとする。採取位置は、「孔口」近傍、「孔底」近傍の2箇所とする。以下に工法毎の孔内の泥水採取方法を示す。なお、安定液の管理項目が定められていないオールケーシング工法、リバース工法については、簡易な方法で採取を行った。



(b) 配合度数分布

図3 安定液の配合実績（関東近郊、アースドリル工法）



(a) オールケーシング工法

(b) リバース工法

図4 泥水の採取方法

- (1) オールケーシング工法：底ざらいバケツで採取した泥水の上澄み液を「孔底」とし、「孔口」は、ケーシングより直接採取したものとする（図4（a））。
- (2) リバース工法：孔内水のもどり液を採取しこれを「孔底」とし、投入口より採取した孔内水を「孔口」とする（図4（b））。
- (3) 地中連続壁：良液置換した供給液を「孔底」とし、投入口よりくみ上げた孔内水を「孔口」とする。
- (4) アースドリル工法：「孔底」は、一般的な孔内水採取機を使用して採取する。「孔口」は、投入直前の供給液とする。

2.2.2 分析方法

(1) 泥水濃度の測定

泥水濃度の測定状況を図5～図8に示す。泥水の質量(W)を計測する。泥水をバットに移し110℃の恒温乾燥炉にて24時間乾燥させ、乾燥した試料の質量(W_s)を測定する。75 μm ふるいで水洗いを行い通過分は洗い流し、残留分を蒸発皿に入れ残留試料の質量(W_{s1})を測定する。75 μm ふるい通過した細粒分質量を算出($W_{ss} = W_s$

$- W_{s1}$)し、泥水中に含まれる細粒分を濃度で表した。これを泥水濃度($=W_{ss}/W \times 100\%$)とする。

(2) 泥水比重の測定

採取した泥水を容器に移し質量(W)を測定する。その後、メスシリンダで容積(V)を測定し（図9）、マッドバランス測定(W/V)を行う（図10）。一般に、泥水比重の測定方法は、API規格マッドバランスや浮秤による直読式があり、泥水比重が1.02～1.09であれば良好な泥水と判断できる。

2.2.3 泥水濃度、泥水比重の測定結果

2次スライム処理後の泥水濃度の分布を図11に示す。ここで、安定液使用の工法はアースドリル工法、地中連続壁であり、安定液未使用の工法はオールケーシング工法、リバース工法である。左が孔口、右が孔底を表し、分布中心と標準偏差を示した。測定結果より2次スライム処理後の泥水に含まれる土粒子の殆どは、75 μm 未満の細粒分であった。ただし、オールケーシングの孔底に関しては、安定液未使用にも関わらず突出して高い泥水濃度を示すデータが含まれた。これは底ざらいバケツか



図5 乾燥前試料



図6 乾燥試料の質量測定



図7 75 μm ふるい水洗い



図8 残留試料の質量測定

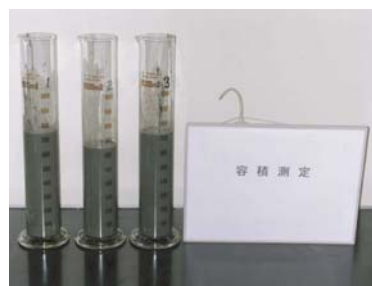


図9 容積測定



図10 マッドバランス値測定

特集：基礎構造物の設計技術

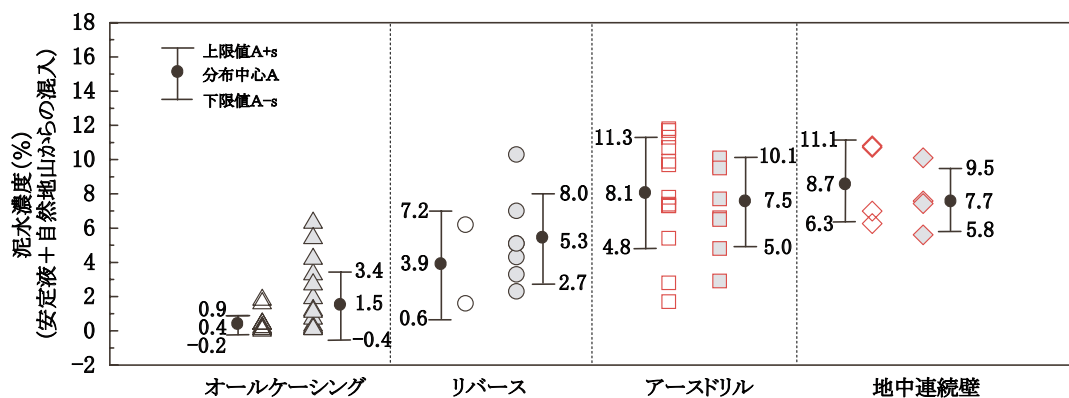


図 11 工法別泥水濃度分布 (左：孔口, 右：孔底)

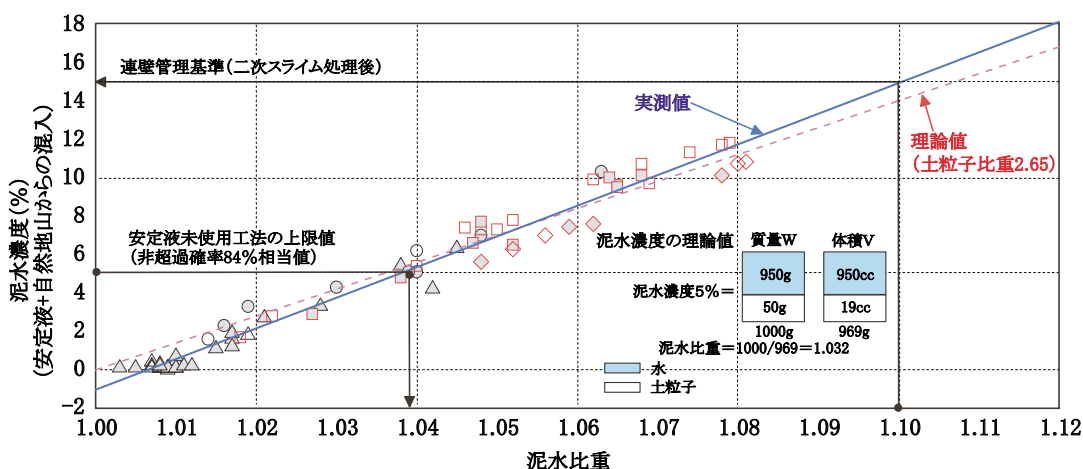


図 12 泥水濃度と泥水比重の関係

らのサンプル採取の際、スライムの巻き上げ等人為的な作業ミスが考えられるため、一部データを除去した。なお、安定液の初期配合条件は、ベントナイト濃度2～3%、ポリマー濃度0.13～0.2%であった。これより以下の知見が得られた。

- (1) 新液時のベントナイト濃度よりも、コンクリート打設前の孔内水の泥水濃度は、自然地山から発生する土粒子が泥水に混入するため、高くなる。
- (2) 安定液未使用の工法の泥水濃度の分布中心は、安定液使用の工法のそれより低い。
- (3) 安定液使用の工法の場合、2次スライム処理後では最大でも11%程度となった(安定液使用の工法の場合、泥水比重が管理項目となっているため確実に泥水濃度を低減できる)。
- (4) 安定液未使用の工法の場合、非超過確率84%相当の泥水濃度は5%程度である。

2次スライム処理後の泥水濃度と泥水比重の関係を図12に示す。図12より2次スライム処理で砂分が除去されるため、泥水比重と泥水濃度は相関が高いことがわかる。したがって、泥水比重を泥水濃度の管理基準として適切に設定することによって、コンクリート打設前の泥水中に含まれる土粒子の量を管理することが可能とな

る。つまり、コンクリートの品質に直結するコンクリート打設前の泥水に含まれる土粒子の量をコントロールでき、コンクリートの強度等の評価に繋がるものと考えられる。ここで、安定液未使用の工法の泥水濃度の上限が非超過確率84%相当で5%程度であったこと、および地中連続壁では孔内水の管理基準(泥水比重1.10：泥水濃度15%)³⁾が定められていることから、図12を参考に泥水比重の管理値を定めることが可能となる。これより安定液未使用の工法の場合の管理基準として泥水比重1.04(泥水濃度5%)以下が設定され、一方、安定液使用の工法の場合では、泥水比重1.10(泥水濃度15%)以下とすれば地中連続壁並の管理基準となる。

以上のように場所打ち杭各工法および地中連続壁の孔内水の泥水濃度を調べ、安定液未使用の場合、あるいは安定液使用の場合で孔内水の泥水濃度の限界値(管理値)を設定することができた。

以下では、ポリマーを併用した安定液がコンクリート強度等に与える影響を調べるために実施した、コンクリート打設実験、およびコア供試体による強度試験²⁾を基に、安定液の種類によらず、コンクリート打設前の孔内の泥水濃度による新しいコンクリートの低減係数 β を提案した。

3. 泥水濃度がコンクリート強度等に与える影響⁴⁾

3.1 泥水濃度の影響

参考文献²⁾ではベントナイト濃度を变化させてコンクリート強度等の分析を実施しているものの、場所打ち杭、地中連続壁の孔内水を模擬していることから、ベントナイト濃度を泥水濃度と読み替えることが可能である。以下では、横軸のベントナイト濃度を孔内水の泥水濃度に読み替え、泥水濃度によるコンクリート強度等の影響を比較検討するため、強度試験結果等(圧縮強度比、静弾性係数比、引張強度比)をプロットした。これを図13～図15に示す。縦軸はコアコンクリートの圧縮強度、静弾性係数、割裂強度をそれぞれ設計基準強度 f'_{ck} および設計基準強度 f'_{ck} から算出した静弾性係数の特性値 E_c 、割裂強度の特性値 f'_{tk} で除した。ここで、割裂強度は割裂引張強度試験から求めたが、泥水濃度の高い領域で十分なデータがなかったことから、割裂強度と設計基準強度の間で、 $f'_{tk}=0.23f'_{ck}{}^{2/3}$ (N/mm²)が成り立つと仮定し⁵⁾、図13で得られた圧縮強度比を用いて割裂強度比を算定した。同図には本試験結果の他に、既往の試験結果⁶⁾も併せて示した。既往の試験結果を含め、泥水濃度の増加に伴い圧縮強度比、静弾性係数比は低下する傾向にあることがわかる。また、割裂強度比についても同様に泥水濃度の増加に伴い低下する傾向にあると言える。

3.2 泥水濃度による低減係数 β の提案

以上の結果を踏まえ、コンクリート強度等の低減係数 β を新たに提案し、これを図13～図15に実線で示した。圧縮強度および割裂強度の低減係数 β は、実験結果の下限値相当になることを勘案し設定した。一方、静弾性係数の低減係数 β は、実験結果の平均値相当のラインとなるよう設定した。図12より安定液未使用の場合には泥水比重1.04(泥水濃度5%)以下、安定液使用の場合には泥水比重1.10(泥水濃度15%)以下が、それぞれ設定可能な泥水管理基準値になると考えられる。これらの基準値を考慮し、施工条件を表すコンクリート打設前の泥水比重を管理項目とした低減係数 β (案)を表2に示す。なお、割裂強度は、付着強度とほぼ同一であることから⁵⁾これを付着強度の特性値の評価に用いることとした。

3.3 実杭のコア供試体による検証

設計基準強度50N/mm²以下のコンクリートが打設された実杭から採取したコア供試体の強度試験結果⁷⁾を用いて、提案した低減係数 β (案)の妥当性の検証を行った。圧縮強度の検証結果の一例(アースドリル工法、コア供試体総数553個)を図16に示す。検討では、従来の基礎標準で定められた低減係数 β ①(表1)および提案した低減係数 β ②(表2)の両者で予測されるコンクリー

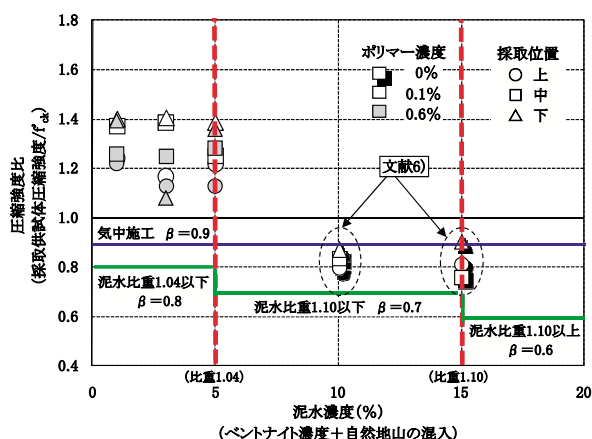


図13 圧縮強度比と泥水濃度の関係

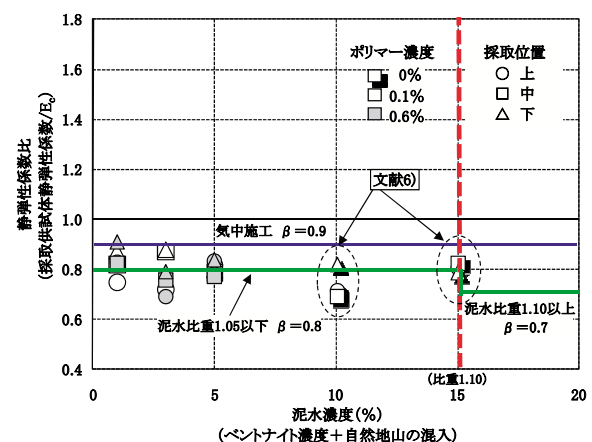


図14 静弾性係数比と泥水濃度の関係

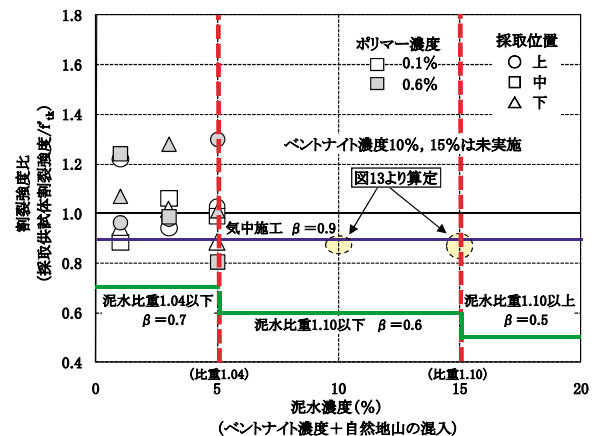


図15 割裂強度比と泥水濃度の関係

ト強度の特性値と実測値の比を対数正規分布で整理し、比較した。低減係数 β ①は、平均値で2.45、95%信頼値で1.88を示している。また、低減係数 β ②においては平均値で2.04、95%信頼値で1.64となった。これより本提案方法によれば実強度の特性値は十分な安全マージンを確保しつつ、より実強度に近い値が得られることがわかった。なお、静弾性係数においても同程度の安全マージンを確保可能であることを確認している。

特集：基礎構造物の設計技術

表2 施工条件による低減係数β(案)

施工条件と コンクリート打設前の泥水比重	設計強度		コンクリートの ヤング係数	コンクリートの受け持つ せん断耐力 ^{*3} V_{cd}
	圧縮強度 曲げ強度 引張強度 支圧強度	付着強度		
気中施工(パイプレーター未使用)	0.9	0.9	0.9	1.0
泥水比重 1.04 以下 ^{*1}	0.8	0.7	0.8	0.9
泥水比重 1.10 以下 ^{*2}	0.7	0.6	0.8	0.9
泥水比重 1.10 超～1.20 以下 (管理不十分)	0.6	0.5	0.7	0.8

*1 安定液未使用,あるいは安定液を使用する場合で,コンクリート打設前の泥水比重が1.04以下となるように管理する場合。
 *2 安定液未使用,あるいは安定液を使用する場合で,コンクリート打設前の泥水比重が1.10以下となるように管理する場合。
 *3 V_{cd} は,βにより低減した設計強度より求める。

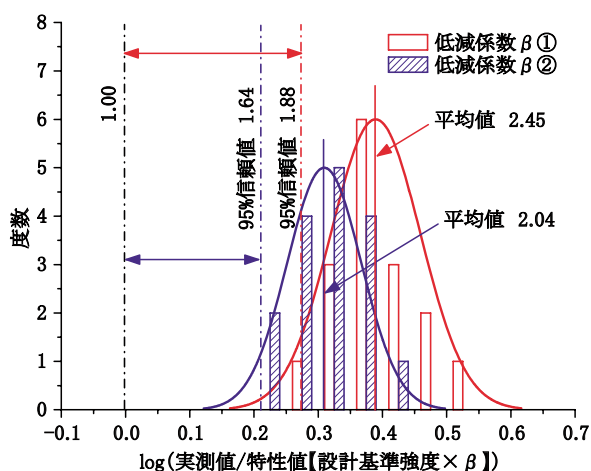


図16 実杭のコア供試体の圧縮強度と低減係数β①, β②による特性値の比較

4. まとめ

本研究では,場所打ちコンクリートの品質に影響を与える孔内水の泥水濃度(泥水比重)に着目し,実施工現場の初期安定液の配合実態調査,工法別の泥水濃度の実態調査を実施した上で,泥水中のコンクリート強度等の特性値を求める新たな低減係数βを提案し,実杭のコア供試体を対象に提案した低減係数βの妥当性を検証した。これより以下の知見が得られた。

- (1) 安定液の配合実態調査より,土質条件に応じた初期安定液の配合条件(ベントナイト濃度,ポリマー濃度)を把握した。
- (2) 2次スライム処理後の孔内水の泥水濃度を調査した結果,安定液未使用の場合の泥水濃度は安定液を使用する場合より泥水濃度が低く,孔内水の泥水濃度を泥水比重で適切に管理することによって,コンクリートの品質管理が可能であることがわかった。

(3) 孔内水の泥水比重に着目した新たなコンクリート強度等の低減係数βを提案し,実杭のコア供試体を対象に提案した低減係数の妥当性を確認した。

謝辞

泥水サンプルを提供いただいた(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構,東日本旅客鉄道(株),東海旅客鉄道(株),(社)日本基礎建設協会および地中連続壁基礎協会には,ここに記して謝意を表す。

文献

- 1) 運輸省鉄道局監修,(財)鉄道総合技術研究所編:鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物,丸善,2000
- 2) 千葉佳敬,神田政幸,西岡英俊,舘山勝,原夏生,伊藤始:ポリマー系安定液中でのコンクリート強度評価試験,第62回土木学会年次学術講演会,V部門,pp.719-720,2007.9
- 3) 地中連続壁基礎協会:地中連壁基礎工法施工指針(案),2002
- 4) 西村昌宏,神田政幸,西岡英俊,舘山勝,千葉佳敬:掘削泥水中に打設される場所打ちコンクリートの品質に関する研究,第63回土木学会年次学術講演会,V部門,pp.925-926,2008.9
- 5) 国土交通省鉄道局監修,(財)鉄道総合技術研究所編:鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物,丸善,2004
- 6) 渡邊忠朋,村田修,谷口善則:場所打ちRC杭の圧縮強度,鉄道総研報告,Vol.9, No.4, pp.7-12,1995.4
- 7) 宮本和徹,嶋谷欣巳:場所打ちコンクリート杭のコンクリートコアの強度について,基礎工,Vol.26, No.9, pp.43-46,1998.9