

DX コンクリート貫入試験機によるコンクリート施工管理の省力化

小島 秋[※] 岩崎 佳祐[※]
藤倉 裕介 高橋 直希
秋山 雄哉 平野 勝識

概 要

コンクリート構造物の品質管理において、特に壁や橋脚等のコンクリート打設では打重ね部のコールドジョイントに起因する一体性低下は、構造物の耐久性、水密性、および力学的性能を確保する上で極めて重要な課題である。従来、施工現場における打重ね可能時間の管理には、外気温に基づく一律の時間管理が適用されてきた。しかし、日射や風速、外気温の急激な変動を伴う実際の施工環境下では、時間のみを指標とした管理では材料の実際の凝結状態を的確に評価できず、品質にばらつきが生じる懸念があった。

本研究では、フレッシュコンクリート硬化に関与する外的要因を対象とし、施工現場で簡易かつ迅速に測定可能な「DXコンクリート貫入試験機」を開発した。スランプおよび練上がり温度の異なるコンクリートを対象とした実証実験を通じて、貫入抵抗値の経時変化を連続的に把握し、従来のJIS A 1147モルタルプロクター貫入抵抗試験結果との比較から本試験機の有効性・優位性を確認した。さらに、得られた貫入抵抗値に基づく将来の予測システムを導入した許容打重ね時間管理への適用可能性、およびデジタル技術（DX）を活用した施工管理の省力化・ヒューマンエラー低減効果について定量的に検討した。

Efficient Concrete Construction Management Using the DX Concrete Penetration Tester

Abstract

Cold joints at construction interfaces in concrete structures, especially in walls and bridge piers, pose a critical challenge to maintaining durability, watertightness, and structural integrity. Conventional management of allowable placing intervals relies on uniform time control based on ambient temperature; however, this approach may fail under actual site conditions with fluctuating temperature, solar radiation, and wind, leading to inconsistent quality.

This study developed a “DX Concrete Penetration Testing Device” that enables simple and rapid on-site evaluation of the setting behavior of fresh concrete. Experiments with varying slump and temperature conditions demonstrated that time-dependent penetration resistance can be effectively monitored. Comparison with the conventional JIS A 1147 test confirmed the device's effectiveness and superiority.

Furthermore, the study examined the applicability of a predictive system using penetration resistance values for managing allowable placing intervals, as well as the potential of digital transformation (DX) to reduce labor and minimize human error in construction management.

キーワード：コンクリート工、DX、コールドジョイント、
許容打重ね時間間隔、凝結特性

※ 土木本部土木エンジニアリングセンター

§1. はじめに

コンクリート打設における代表的な初期欠陥であるコールドジョイントは、先打ちコンクリートと後打ちコンクリートの一体性を阻害し、構造物の長期的な耐久性や遮水性を著しく低下させる要因となる。現行のコンクリート標準示方書においては、外気温に応じた許容打重ね時間（外気温25℃未満で2.0時間、25℃以上で1.5時間以内など）が規定されており、これが施工管理の一般的基準となっている。しかしながら、実際の施工現場は日射、局所的な温度変化、風などの複合的な気象因子の影響下にあるため、コンクリートの凝結進行速度は一律ではない。したがって、時間のみに依拠した一律の管理では、実際の凝結状態との乖離が生じ、施工品質に不確実性を残す課題があった。

コンクリートの凝結性状を直接評価する既存の手法として、JIS A 1147「コンクリートの凝結時間試験方法」に規定されるプロクター貫入抵抗試験が存在する。しかし同手法は、コンクリートからウェットスクリーニングによってモルタル分を抽出する前処理を要するため、多大な労力と時間を消費し、現場施工管理においてリアルタイムな意思決定を支援する即応性に欠けていた。



写真1 コールドジョイント

そこで本研究では、粗骨材を含むフレッシュコンクリートを直接測定対象とし、現場適用性の高い簡易型の「DXコンクリート貫入試験機」を開発した。本報では、室内実験を通じて、温度および配合条件が本試験機の測定値に与える影響を明らかにするとともに、JIS規格試験との相関関係を整理し、本試験機を用いた新しい品質管理システムの妥当性について考察する。

§2. DX コンクリート貫入試験機の概要および実験計画

2.1 DX コンクリート貫入試験機のシステム概要

開発したDXコンクリート貫入試験機（以下、本試験機）は、ロードセル、無線データロガー、温度用データロガー、先端ロッド（外径φ30mm、20mm）、および記録・表示用PC（またはタブレット端末）から構成される（写真2）。本試験機は、施工現場のコンクリートに直接ロッドを圧入した際の荷重をロードセルで検出し、デジタルデータとしてリアルタイムに記録・グラフ化する機能を有する。さらに、現場の外気温自動計測機能、許容打重ね時間に対するアラート機能、および測定データから自動的に施工記録報告書出力する帳票作成機能を統合したデジタル管理システムを構築している（図2、3）。



写真2 本試験機の構成

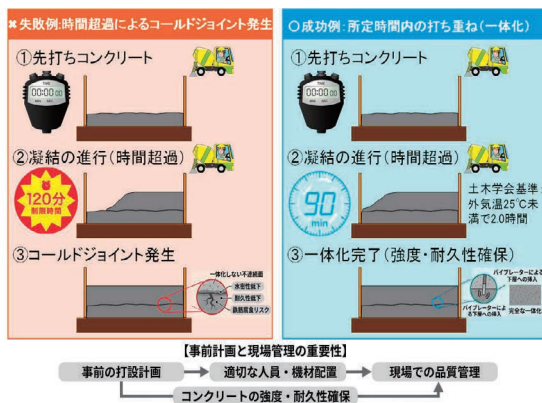


図1 コンクリート打重ね管理の重要性

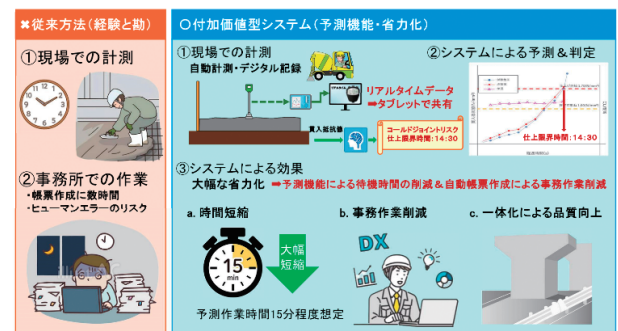


図2 DX コンクリート貫入試験機システム

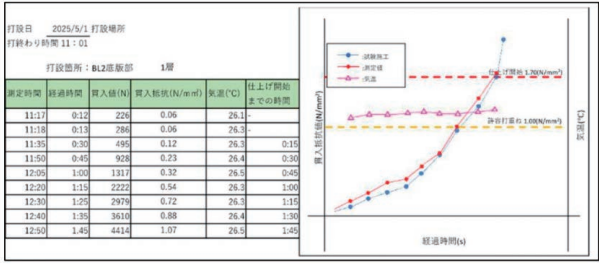


図3 帳票作成イメージ

2.2 実験材料および配合条件

実験に用いたコンクリートの配合およびフレッシュ性状を表1～3に示す。水セメント比(W/C)は55%に固定し、目標スランブが異なる2種類の配合(スランブ12cm:AE減水剤使用、およびスランブ18cm:高性能AE減水剤使用)を設定した。

表1 コンクリート品質試験内容

試験水準	No.1 目標スランプ (cm) : 12 ± 2.5 , 練上がり温度 20°C		
	No.2 目標スランプ (cm) : 12 ± 2.5 , 練上がり温度 30°C		
	No.3 目標スランプ (cm) : 18 ± 2.5 , 練上がり温度 20°C		
	No.4 目標スランプ (cm) : 18 ± 2.5 , 練上がり温度 30°C		
試験内容	試験区分	試験項目	
	フレッシュ コンクリート	コンクリート 品質確認試験	・スランプ ・空気量 ・コンクリート温度 ・凝結試験
	硬化 コンクリート 試験体	圧縮強度	

表2 コンクリートの配合

目標 スランプ (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメ ント比 W/C (%)	細骨 材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
12±2.5	4.5±1.0	55	47	164	298	850	982
18±2.5		55	48	167	304	860	958



写真3 フレッシュコンクリート練混ぜ状況



写真4 フレッシュコンクリート品質試験結果

表3 フレッシュコンクリート性状一覧

環境温度 (℃)	目標 スランプ (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメン ト比 W/C (%)	細骨 材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (C×%)	AE剤 (C×%)	フレッシュコンクリートの性状		
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G			スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)
20	12±2.5	4.5±1.0	55	47	164	298	850	982	0.9	0.004	11.5	4.9	20
	18±2.5		55	47	170	309	837	968	0.95	0.005	18.5	4.8	20
30	12±2.5	4.5±1.0	55	47	164	298	850	982	1.0	0.004	11.0	4.9	31
	18±2.5		55	47	170	309	837	968	0.95	0.005	18.5	4.5	32



写真5 試験供試体作成状況



写真8 貫入抵抗値タブレット画面

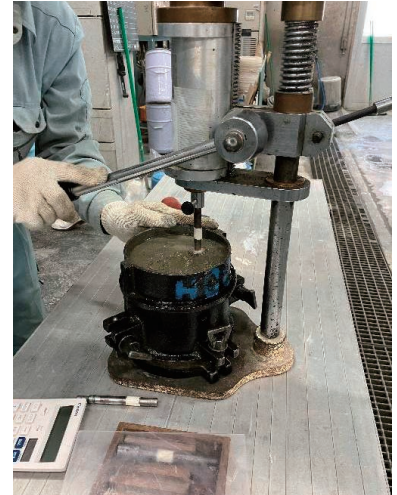


写真10
プロクター貫入抵抗試験状況



写真6 供試体保管状況



写真9 ウェットスクリーニング状況



写真7 貫入抵抗値計測状況

§3. 実験結果および考察

3.1 本試験機による貫入抵抗値の経時変化特性

本試験機により得られた貫入抵抗値の経時変化を、図4に示す。いずれの水準においても、時間の経過に伴い貫入抵抗値の上昇傾向が確認され、コンクリートの硬化・凝結プロセスの進展を連続的にトラッキング可能であることが示された。特に材料温度が測定値に与える影響は顕著であった。貫入抵抗値が 1.0N/mm^2 に達する時間を比較すると、温度条件 30°C では約2時間であったのに対し、 20°C では約4時間を要した。スランプ（12cmおよび18cm）の差異による影響と比較して、温度因子がフレッシュコンクリートの初期変形抵抗特性を支配する主要因であることが定量的に確認された。

3.2 JIS A 1147 凝結時間試験結果との比較考察

並行して実施したJISプロクター貫入抵抗試験（凝結試験）の結果を図5に示す。

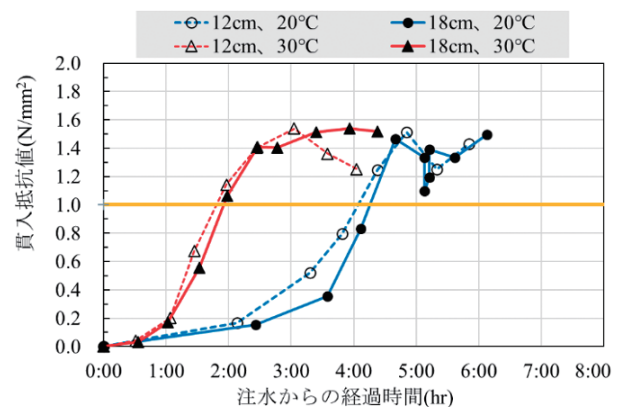


図4 本試験機による時間と貫入抵抗値の関係

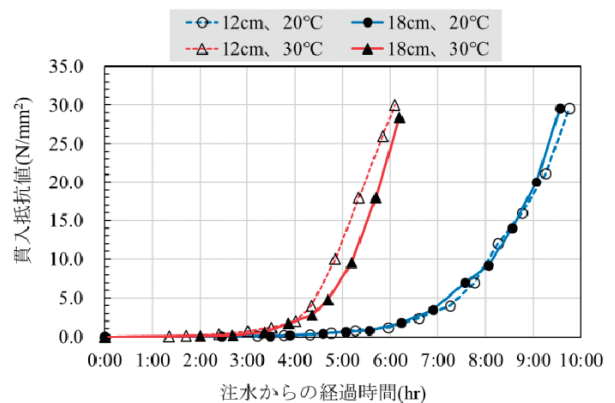


図5 凝結試験結果

JIS試験においても、環境温度30℃が環境温度20℃に比して早期に貫入抵抗値が立ち上がる傾向を示し、温度感受性のトレンドは本試験機の測定結果と良好に一致した。しかし、両者の絶対値および曲線の形状には明瞭な差異が認められた。JIS試験では、加水後4～6時間（30℃）または6～9時間（20℃）が経過した段階で抵抗値が急激に対数関数的増加を示すのに対し、本試験機による測定値は時間経過とともに増加するものの、1.2N/mm²～1.5N/mm²付近で漸近線を描き、頭打ちとなる挙動を示した。

この現象は、双方の試験における物理的な「測定対象」および「破壊メカニズム」の相違に起因するものと考えられる。JIS試験は、ウェットスクリーニングによって粗骨材を排除した均質な「モルタルマトリックス」の純粋な化学的凝結進行に伴うせん断抵抗を、微小なピン（先端面積が極小）の圧入により評価するものである。一方、本試験機は粗骨材を含んだ「コンクリート全体」を比較的大きな先端面積（φ20mm、30mm）のロッドで直接押し込む構造を採用している。そのため、セメントペーストの化学的凝結作用のみならず、骨材同士のかみ合わせ効果や、圧入に起因するロッド先端近傍の局所的なせん断破壊、ならびに自由境界側への側方変形（逃げ現象）の影響を大きく受ける。したがって、マトリックス自体の凝結がある程度進行した段階においては、純粋な硬化度ではなく、コンクリートの「マクロ変形抵抗」の限界値が測定値に現れるため、一定値で頭打ち傾向を示すものと推察される。

学術的な観点において、本試験機の目的はJIS試験値との完全な数値的一致（一対一の相関）を得ることではない。本手法の核心的な意義は、現場仕様のコンクリートそのものが有する複合的な変形抵抗特性の経時変化を簡便にインライン計測し、事前の試験施工等によって得られた「許容打重ね時間」における貫入抵抗値をあらかじめ「基準抵抗値（閾値）」として校正（キャリブレーション）しておく点にある。本施工において、打重ね前にこの閾値を下回っているか否かを現場でダイレクトに「状態管理」できる点に、実務上および工学上の高い有用性が認められる。

§4. 施工管理システムの省力化評価

本試験機を中心としたデジタル品質管理システムの導入に伴う、施工管理における省力化および信頼性向上の効果を考察する。

4.1 測定プロセスのインライン化・即応性

従来のJISプロクター貫入試験では前述のとおりモルタルの抽出作業を要し、現場判断へのフィードバックに数時間のタイムラグが生じていた。これに対し、本試験機はフレッシュコンクリートに直接挿入するのみで数秒以内に測定値が確定するため、現場の環境変動に対して即時的な打設速度の調整やコールドジョイントリスクの判定が可能となった。

4.2 事務作業の効率化と品質記録の高度化

測定データは無線ロガーを介してPCに自動転送・蓄積されるため、従来手作業で行われていたアナログな数値記録および事務所に帰ってからの帳票・グラフ作成に要する作業時間が大幅に削減された（試算では従来の記録・帳票化プロセスに数時間を要していたものが、自動生成機能により約15分に短縮可能）。これは施工管理者の業務負担軽減にとどまらず、転記ミス等のヒューマンエラーを根源的に排除する品質管理上のメリットを有する。

§5. 今後の課題と改善策

実証実験を通じて抽出された、今後の土木工事現場展開へ向けたハードウェアおよびソフトウェア両面における技術的課題を以下に整理する。

5.1 配線系の無線化および軽量化による作業安全性確保

型枠や高所足場が錯綜するコンクリート打設現場においては、機器接続ケーブルの存在が取り回し性を阻害し、引掛かりによる転倒や断線トラブルの誘因となる。配線系の完全無線化および筐体の軽量化を進めることで、現場作業性の向上と安全性の担保を同時に達成する必要がある。

5.2 建設現場に耐えうる電氣的・機械的堅牢性の向上

実験初期に発生した一時的な接触不良は、水分、微細粉じん、振動が日常的に存在する建設現場固有の環境因子に起因する。これに対し、IP67等級以上の防水・防じん性能を有する高耐久コネクタの採用、ロック機構の付加、および回路配線の冗長化（金メッキ処理やパラレル配線）といったハードウェアの抜本的な最適化設計が不可欠である。

5.3 予測管理機能の検証とインターフェースの最適化

本システムには蓄積データから将来の硬化状況を推定し「天端仕上げ可能時間」を予測するアルゴリズム

が組み込まれているが、今回の実験ではその予測精度の定量的検証には至っていない。今後は様々な気象変動を伴う実現場への適用を通じて予測モデルの校正を進めるとともに、スマートフォンやタブレット端末へのプッシュ通知等によるリアルタイム情報共有を可能にするUI/UXの最適化を図る予定である。

§6. 結論

本研究では、フレッシュコンクリートを直接対象とする「DXコンクリート貫入試験機」を開発し、その実用性および初期性能を検証した。得られた主な知見を以下に総括する。

1. 本試験機は、粗骨材を含むコンクリートの状態変化に起因する変形抵抗の経時変化を、連続的かつ安定して計測可能である。
2. 環境温度および材料温度の差異が貫入抵抗値の立ち上がり挙動に与える影響を明確に捉えることができ、JIS A 1147試験との物理的機構の相違を考慮した上で、打重ね時のコンクリートの「状態管理」のための指標として十分な有効性を有することを確認した。
3. 外気温の同期計測、時間アラート、および自動帳票作成機能を組み合わせることで、従来の属人的かつ勘に頼っていた施工管理から脱却し、コンクリート構造物の品質向上と施工管理業務の大幅な省力化（DX化）を同時に推進できる見通しを得た。

参 考 文 献

- 1) コンクリートライブラリー 103、コンクリート構造物におけるコールドジョイント問題と対策、土木学会、2000.07
- 2) 2023年制定コンクリート標準示方書施工編、土木学会、2023

ひとこと

本技術が、技術提案の評価向上および受注機会の創出に寄与するとともに、コンクリート打重ね管理の高度化を通じて、高品質なコンクリート構造物の実現に貢献できれば幸いです。



小島 秋