

委員会報告 コンクリートの確実な施工のためのPDCAサイクル研究委員会

綾野 克紀^{*1}・丸屋 剛^{*2}・神代 泰道^{*3}・山田 義智^{*4}・皆川 浩^{*5}

要旨：スランブと空気量を目安としたコンクリートの品質管理に基づく現状の施工に対し、新たに提案されている試験法等も用いたより確実なコンクリートの施工を目指し、施工のPDCAサイクルのあり方を検討した。現場で用いられるコンクリートが設計時に設定された施工性能を満足するものか確認し、基準を外れた場合はそれを修正する現場レベルでのPDCAと、設計時に設定されたコンクリートの施工性能に基づき作成された施工計画で施工された構造物を竣工時に確認することにより、次の施工においてより良い施工計画を立案する、計画レベルでのPDCAサイクルのあり方を議論し、PDCAの各段階で用いることができる技術を整理・検討した。

キーワード：品質試験法、施工の確実性、充填性、構造体コンクリート、PDCA

1. はじめに

コンクリート工事においては、設計で定められた品質の構造体コンクリートが造られるように、運搬、打込み、締固め、仕上げ、養生、型枠および支保工の取外しの各段階において、入念な施工が行われている。また、必要とされる品質を確保するために、各施工の段階で定められた仕様、例えば型枠脱型時強度の5N/mm²が確保されているか等の品質管理のための試験法が数多く提案されている。また、数値シミュレーションを用いて、型枠内へのコンクリートの充填状況を施工に先立ち確認する技術も、進歩を遂げている。本委員会は、これらの試験法および数値シミュレーション技術を用い、より良い構造物を構築するために必要とされるコンクリートの施工におけるPDCAサイクルのあり方を検討することを目的に設置された。

委員会の構成を表-1.1に示す。本委員会は、下記の3つのワーキングを設置し活動を行った。

WG1 (PDCA サイクル検討 WG)：確実な施工を確認する試験法を用いて施工のPDCAサイクルを実施する具体的な手法を検討する。

WG2 (シミュレーション WG)：レオロジー理論に基づく数値シミュレーションの施工のPDCAサイクルへの適用性を検討する。

WG3 (試験法規格化 WG)：PDCAサイクルを実施するために活用されるフレッシュコンクリートの試験方法に関する規準案を作成する。

2. PDCA サイクル検討 WG における活動内容

本WGではコンクリート工事におけるPDCAサイク

表-1.1 委員会構成

委員長：綾野克紀（岡山大学）	
副委員長：丸屋剛（大成建設）	
幹事長：山田義智（琉球大学）	
幹事：神代泰道（大林組）、皆川浩（東北大学）	
【WG1：PDCA サイクル検討 WG】 ○WG 主査	
○神代泰道（大林組）	池端信哉（NEXCO 中日本）
岩城一郎（日本大学）	土屋直子（国総研）
小島正朗（竹中工務店）	丸屋 剛（大成建設）
渡部 正（日本大学）	
【WG2：シミュレーション WG】 ○WG 主査	
○山田義智（琉球大学）	浦野真次（清水建設）
黒川善幸（鹿児島大学）	寺西浩司（名城大学）
三島直生（三重大学）	渡辺 健（徳島大学）
【WG3：試験法規格化 WG】 ○WG 主査	
○皆川浩（東北大学）	石関嘉一（大林組）
大澤章吾（JR 東日本）	大島正記（BASF ジャパン）
梁 俊（大成建設）	橋本紳一郎（福岡大学）
南浩輔（前田建設工業）	高橋幸一（八洋コンサルタント）
顧問：宇治公隆（首都大学東京）	

ルを示すことを目標に活動を行ってきた。ここではまず、そもそもPDCAとは何かについて述べ、次にコンクリート工事におけるPDCAサイクルの必要性について述べる。さらに既往の文献からPDCAサイクルの事例やPDCAサイクルに資する技術を紹介する。最後に本委員会が提案するコンクリート工事におけるPDCAサイクルを示す。

本WG担当の報告書の目次案を表-2.1に示す。

*1 岡山大学 大学院教授 工博（正会員）

*3 (株)大林組 技術研究所 工博（正会員）

*5 東北大学 大学院准教授 工博（正会員）

*2 大成建設（株） 技術センター 工博（正会員）

*4 琉球大学 工学部教授 工博（正会員）

表-2.1 PDCAサイクル検討WG 担当報告書の目次案

PDCA サイクル WG
1. 本委員会が提案するコンクリート工事における PDCA サイクル
1.1 PDCA サイクルとは
1.2 コンクリート工事における PDCA サイクルの必要性
1.3 本委員会が提案する PDCA サイクル
2. コンクリート工事における PDCA サイクルの事例紹介
2.1 PDCA サイクルの事例
2.2 品質や状態をチェックする方法・ツール
2.3 直接コンクリートの品質改善に資する技術
3. まとめ

2.1 PDCA サイクルとは

PDCA サイクル（ピーディーシーエー，PDCA cycle, plan-do-check-act cycle）は、事業活動における生産管理や品質管理などの管理業務を円滑に進める手法の一つであり、組織における業務や管理活動などを行うとき、最初に計画を立て、その計画に沿って実行し、その結果を確認する。その確認した結果が、計画との間に差異が認められたならば、目標や方法を改善し、次の活動に備える。

図-2.1 に示すように Plan（計画）→ Do（実行）→ Check（評価）→ Act（改善）の4段階を繰り返すことによって、業務を継続的に改善する取り組みの総称である。この4段階を順次行い、1周したら、最後の Act を次のPDCA サイクルにつなげ、螺旋を描くように1周ごとにサイクルを向上（スパイラルアップ）させて、継続的に業務改善する。この考え方は、ISO（国際標準化機構）9000 シリーズ、ISO 14000 シリーズなどの国際規格や JIS Q 15001 などの国内規格において取り入れられている。労働安全衛生マネジメントシステムにおいてもPDCAサイクルを活用して危険の元凶となる事柄を特定しリスクアセスメントを行うことでリスク低減を継続的に実施している。

2.2 コンクリート工事におけるPDCAサイクルの必要性

化学混和剤に代表されるコンクリート材料や施工管理における ICT 技術の活用など、コンクリート工事における最先端の技術開発が進んでいる一方で、コンクリート工事における施工や管理に関する初歩的な技術力の低下が危惧されている。今後、少子高齢化に伴って限られた投資と人員の中で、質の高いコンクリート構造物を提供していくには、PDCA サイクルをコンクリート工事の施工サイクルにおいて活用することが必要となる。PDCA サイクルを適切に運用することにより誰でも大きな負担を強いることなく計画に対して適切な品質を有するコンクリート構造物を構築できるようにしなければならない。

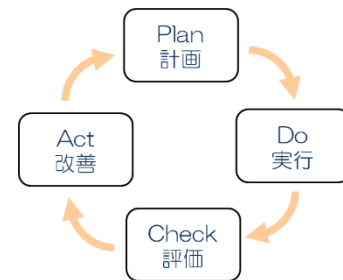


図-2.1 PDCA サイクル

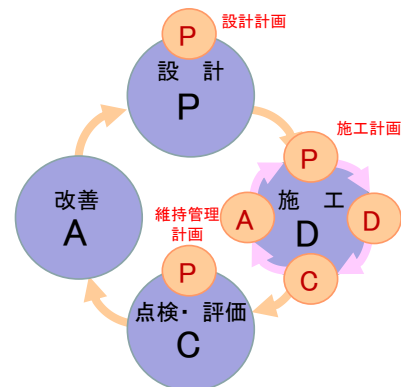


図-2.2 コンクリート構造物群のPDCA サイクル

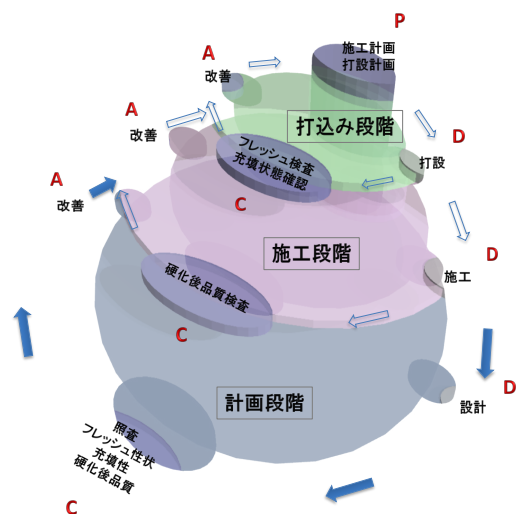
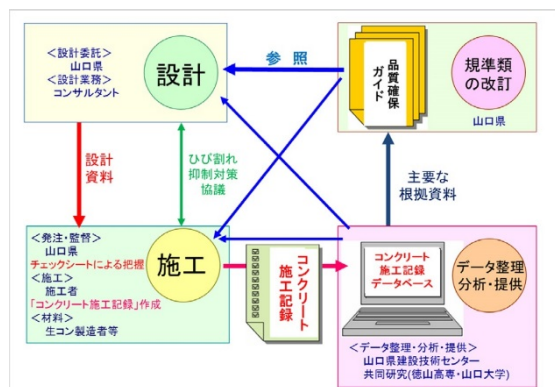


図-2.3 コンクリート工事におけるPDCAサイクルの検討例

図-2.2 は本 WG において検討したコンクリート構造物（群）におけるPDCAサイクルである。P（設計）→ D（施工）→ C（維持管理における点検・評価）→ A（改善）の流れとなり、次のコンクリート構造物の計画に反映することでスパイラルアップを図ることができる。このP（設計）、D（施工）、C（維持管理における点検・評価）については、それぞれ土木学会コンクリート標準示方書の設計編、施工編、維持管理編に対応する。また、それぞれの段階においてもPDCAサイクルがある。



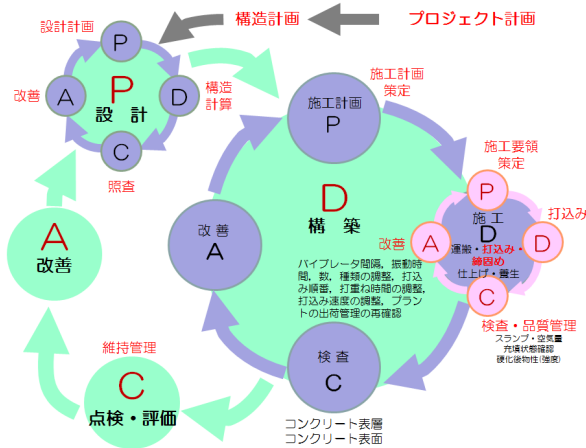


図-2.6 本委員会が提案するコンクリート工事における PDCA サイクル

は参照となる指針はない。これについては発注者と施工者あるいは現場係員と作業者など立場の異なる当事者同士が共通認識をもって評価（C）し、その評価結果を共有して同じ方向に向かってフィードバック（A）することが重要となる。このためには、評価の方法やそれを基にした人と人とのコミュニケーションが重要で、今後のコンクリート工事に関する研究開発においても、この改善する行為がどのようにすればうまくいくかというアプローチが必要である。

3. シミュレーション WG における検討

近年、コンクリート工事の現場では、高密度な配筋の構造物の増加や部材の薄肉化、良質な骨材の不足、様々な混和材料（フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、高性能 AE 減水剤等）の使用頻度が増加している背景に加え、経験豊富な技術者が不足する傾向にあるため、今後は経験則にもとづく施工性の評価は難しくなる場合もあると危惧される。また、スランプ試験による施工性の評価は一般的な施工条件を前提としており、特殊な条件下での施工性を判断するには、実施工の状況を再現したモデルによる実大施工実験等が必要となる場合もあり、これらによる評価の実施には過大なコストや時間を要する。

これらの問題を解決するためにコンクリートの打込み充填をシミュレーションにより予測する技術の開発が求められている³⁾。そこで、本委員会のシミュレーション WG においては、フレッシュコンクリートの流動モデルや流動解析手法の調査を行うとともに、近年、建築分野や土木分野において利用が進められている BIM (Building Information Modeling)⁴⁾および CIM (Construction Information Modeling)⁵⁾と流動解析を援用したコンクリート充填シミュレーションの試みなどを検討した。

BIM(CIM)の利用は、施工前に配筋状態を視覚化して検

表-3.1 シミュレーション WG 担当報告書の目次案

1. PDCA サイクルへの活用を目的としたフレッシュコンクリートの流動解析
1.1 はじめに
1.2 PDCA サイクルにおける流動解析の位置づけ
1.3 PDCA サイクルでの流動解析活用に向けた課題
2. フレッシュコンクリートの流動特性に関する既往研究調査
2.1 打設・振動締固めに関する既往の研究
2.2 材料分離に関する既往の研究
2.3 ポンプ圧送性に関する既往の研究
2.4 問題点と今後の課題
3. フレッシュコンクリートの構成則
3.1 連続体モデル
3.2 非連続体モデル
3.3 その他のモデル
3.4 問題点と今後の課題
4. フレッシュコンクリートの流動解析手法について
4.1 はじめに
4.2 流動解析手法の分類とその特徴
4.3 解析事例
4.4 流動解析の課題と展望
5. BIM/CIM および流動解析を活用した PDCA サイクル構築に向けて
5.1 BIM および CIM の概要
5.2 BIM および CIM における流動解析の位置づけ
5.3 BIM/CIM および流動解析を活用した PDCA サイクル構築に向けた課題
6. まとめ

討できるほか、充填解析の入力作業を効率的に行え、さらに充填解析結果をアーカイブ化して残すことが可能に

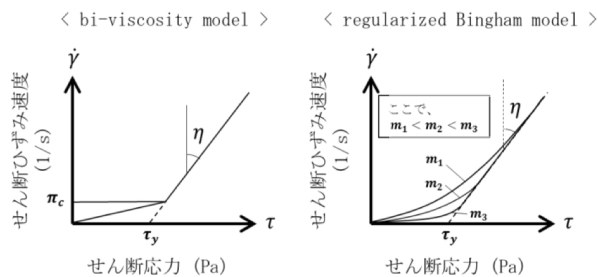


図-3.1 ビンガムモデルの近似

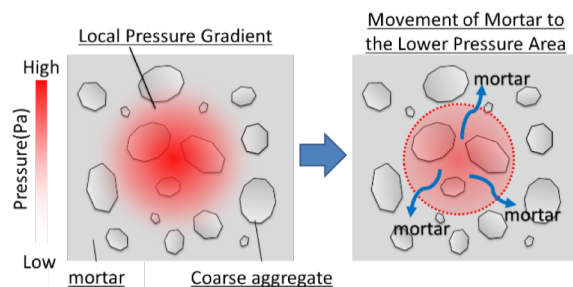


図-3.2 内部圧力差を駆動力とする材料分離モデル¹⁴⁾

なる。したがって、BIM(CIM)と流動解析を援用した充填シミュレーションは、コンクリート工事の合理化や、施工側のみならず設計側との情報共有も可能となり、より良いコンクリート構造物を造るためのPDCAサイクルのツールとして用いることが期待される。

表-3.1 にはシミュレーション WG 担当の報告書目次(案)を示す。

3.1 流動モデルに関する調査

フレッシュコンクリートの流動に関する性質をモデル化する際には、コンクリートを巨視的に捉えて空間的に微分可能な物質とみなす連続体モデルと、フレッシュコンクリートを粗骨材とマトリックスモルタルで構成される複合材料と捉え、粗骨材の接触やマトリックスモルタルの変形をそれぞれの力学モデルで扱う非連続体モデル(不連続体と呼ぶ場合もある)に分類される。以下に、連続体モデルおよび非連続体モデルの概要を各々示す。

(1) 連続体モデルの概要

フレッシュコンクリートは、ある一定以上の応力状態で流動し、それ以下の応力状態の場合は停止する特徴を有する。この特徴を持つ流体を表す代表的な連続体モデルとしてビンガムモデルがあり、多くの研究においてフレッシュコンクリートの流動特性をビンガムモデルで表すことを試みている⁶⁾。

ビンガムモデルではせん断応力が降伏値を超えるまでひずみ速度がゼロであるため応力が不定となる問題が生じる。そこで、コンピュータを用いた数値解析においては、この問題を避けるために bi-viscosity model⁷⁾や

regularized Bingham model⁸⁾(図-3.1 参照)と呼ばれるビンガムモデルを近似したモデルが用いられている。これらのモデルでは、流動しないコンクリートを非常に粘性の高い流体として扱うところに特徴がある。

一方、フレッシュコンクリートに特有な複雑な挙動を表現するためにはビンガムモデルでは不十分であるとして、内部摩擦係数を導入して圧力依存性を考慮したモデル⁹⁾や、流動曲線の軟化や硬化特性を考慮可能な非ビンガムモデル¹⁰⁾、さらにはチクソトロピーモデル¹¹⁾やダイラタンシーモデル¹²⁾および複数の影響要因を考慮可能なモデル¹³⁾なども提案されている。

フレッシュコンクリートは複合材料のため材料分離が発生する可能性を有する材料である。この材料分離は、連続体モデルでは取扱いにくい現象であるが、フレッシュコンクリート内部の圧力差を駆動力として粗骨材とモルタルの割合が変化し、粗骨材の局所的な偏在化と流動特性の変化を表す連続体モデル¹⁴⁾も最近提案されている(図-3.2 参照)。

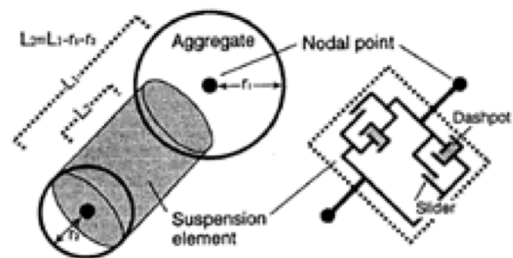


図-3.3 非連続体モデルの要素節点モデル¹⁵⁾

(2) 非連続体モデルの概要

非連続体モデル^{15),16)}では、その多くがフレッシュコンクリートを粗骨材とマトリックスモルタルからなる二相材料でモデル化し、粗骨材の接触やマトリックスモルタル部分の粘塑性変形をバネ、ダッシュポット、スライダ等の力学モデルの組合せでその運動を表すところに特徴がある(図-3.3 参照)。

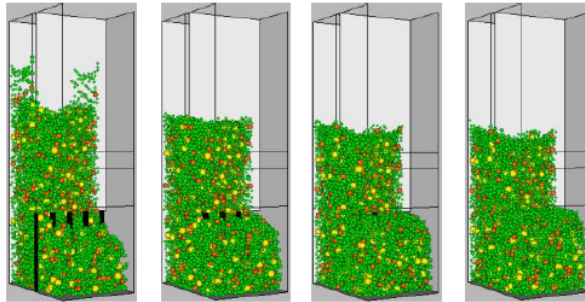
非連続体モデルは、粗骨材同士の接触や分離も容易に扱えるので、材料分離や閉塞問題などコンクリートの局所的な欠陥の発生を解析的に再現することが期待される。また最近、粗骨材の運動を非連続体、モルタルの運動を連続体として捉え相互の運動を連成するモデル¹⁷⁾も報告され、鉄筋周りで生じる粗骨材による閉塞を再現することが試みられている。

3.2 流動解析手法に関する調査

流動解析手法は、前節で示した連続体モデルに基づいて定式化された構成則を用いる有限要素法や差分法、粒子法、メッシュレス法と、非連続体モデルに基づく要素節点モデルによる粘塑性サスペンション要素法や個別要

表－3.2 流動解析手法の分類

連続体モデルに基づく解析手法				非連続体モデルに基づく解析手法
有限要素法		差分法	粒子法	粘塑性サスペンション要素法
物体の分割	空間の分割		メッシュレス法	
粘塑性有限要素法	粘塑性空間要素法	MAC法	SPH法	個別要素法
粘塑性有限要素法	マーカー粒子粘塑性有限要素法	VOF法	フリーメッシュ法	
	オイラー型有限要素法			粒状体流体連成解析 [VOF法(連続体)+個別要素法(非連続体)]



図－3.4 配筋条件別の粗骨材モデルの流動解析結果¹⁷⁾

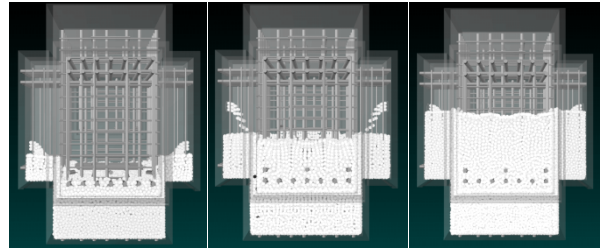
素法に大別される。これらの分類を表－3.2 に示す。なお、ここでは、非連続体と連続体を連成する解析法は非連続体モデルに基づく解析手法としてまとめた。

有限要素法で物体を分割する解析法とフリーメッシュ法はスランプ程度の変形しか対応できず、コンクリートの充填解析手法としては不十分であるが、その他の解析法は充填解析に対応できるものと考えられる。特に越塚によって開発された粒子法の一つである MPS 法¹⁸⁾は、有限要素法や差分法の様に要素やセルを必要とせず、大変形問題や流体の分離なども扱うことができ、フレッシュコンクリートの流動解析手法として利点が多い。この MPS 法の特性を生かした解析として、鉄筋周りにおける材料分離解析やパイプレータによる加速度伝播解析¹⁹⁾等が行われている。

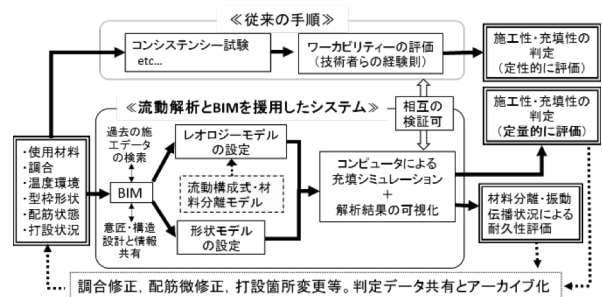
また、粗骨材の運動を個別要素法、マトリックスモルタルの運動を VOF 法で解き、互いの力学的なやりとりを連成する粒状体・流体連成解析も行われており、加振ボックス充填試験を対象に流動解析結果と実験結果を比較し検討している¹⁷⁾。図－3.4 に配筋条件別のコンクリート中の粗骨材モデルの 8 秒後の鉄筋間通過後の状態を示す。無筋に比べて鉄筋が増えるほど充填性が悪くなることが確認される。

3.3 BIM(CIM)と流動解析を援用したフレッシュコンクリートの充填シミュレーションの試み

コンクリート施工でもその利用拡大が期待されている BIM(CIM)は 3 次元形状・位置データに属性データを組み合わせ、調査、設計、施工、維持管理の一連のワークフローを効率的に行うシステムである。この BIM(CIM)の利用は設計と施工間の情報共有をより強固なものとし、



図－3.5 BIM と MPS 法による充填シミュレーション



図－3.6 BIM(CIM)と流動解析を援用したコンクリート充填解析システムの概要²¹⁾

過密配筋部位における鉄筋の配筋照査などにも有効に活用することが期待されている²⁰⁾。

この BIM(CIM)で作成した 3 次元の配筋データを用いて、過密配筋部位のコンクリートの充填シミュレーションに活用できれば、コンクリート工事の合理化に寄与するものと考えられる。

図－3.5 には BIM と MPS 法を援用したコンクリート充填シミュレーション²¹⁾の一例として柱梁接合部のコンクリート充填シミュレーション結果を示す。図は左から右に打込みが進んでいる状態を示している。解析対象としたコンクリートは、スランプフロー65cm の高流動コンクリート（降伏値 50Pa、塑性粘度 300Pa・s）であり、bi-viscosity model を用いて解析を行った。なお、コンクリートの打込みは、左右の梁の両端部より行っている。

この程度の配筋密度であれば、高流動コンクリートを用いる事により、柱梁接合にコンクリートが容易に充填されていることが確認できる。ここで、BIM ソフトウェアは、Vectorworks2015 を使用し、MPS 法流体解析ソフトウェアはプロメテック社の Particleworks を使用した。

コンクリート充填シミュレーションでは、閉塞や材料分離の確認、スランプタイプの普通コンクリートのパイプレータによる充填状況や締固め状態の確認を行うことが期待される。前節で示した様にこれらの解析手法の開発も進んでいるが、その検証は十分ではなく、今後の研究展開が望まれる。

今後の研究開発により、コンクリートの流動モデルお

よび流動解析手法の信頼性が上がれば、BIM(CIM)と併せて充填シミュレーションに援用することにより、従来の経験則に基づく定性的な施工性および充填性の判断から、定量的かつ可視化された施工性および充填性の判断が可能となる（図-3.6 参照）。

BIM(CIM)の利用は、コンクリート工事に関する情報を一元化することや、流動解析の際の部材の形状・位置情報や材料のパラメータ入力情報を簡素化することもできるほか、充填解析結果をアーカイブ化して残すことも可能である。これらコンクリート工事に関する情報は施工側のみならず設計側でも共有可能であるため、BIM(CIM)と流動解析を援用したコンクリート充填解析システムは、より良いコンクリート構造物を造るためのPDCAサイクルのツールとして用いることが期待できる。

4. 試験法規格化 WG における検討

試験法規格化 WG の活動の目的は、施工におけるPDCAのうちの「C：Check」にあたる試験方法の手法の構築である。そこで本WGでは、JCI-TC 074 A 委員会（品質試験方法と施工時諸特性との相関性評価研究委員会、委員長：綾野克紀）での活動成果を踏まえ、(1) 新たなフレッシュコンクリート試験方法の評価および規準案の作成、(2) JCI-TC 074 A 委員会において実施した現場実験の追跡調査を実施した。

(1)では、土木構造物向けのフレッシュコンクリートの試験方法として「スランブ試験後の平板叩きによるコンクリートの簡易変形試験方法」を検討し、規準化に向けて必要な情報を収集・整理するとともに、規準案を作成した。また、建築構造物向けのフレッシュコンクリートの試験方法として「傾斜フロー試験」、「円筒貫入計試験」、「加振変形試験」について共通試験を実施した。さらに、これらの検討と並行して、フレッシュコンクリートの試験方法に要求される機能や性能、試験方法の位置付け、評価対象とする性能、適用範囲、最終的に担保する性能などの明確化について議論するとともに、主としてワーカビリティを評価するための試験方法の変遷に関する情報の整理を行った。

(2)では、JCI-TC 074 A 委員会にて実施された施工実験供試体について、暴露7年経過後の物性の評価を行った。

本報告では、主として(1)の内容について報告する。

4.1 フレッシュコンクリートの試験方法

コンクリートのワーカビリティ試験は、1930年代にはコンシステンシーを評価するスランブ試験、フロー試験、落下試験の3種類が規定されていたが、これらの内、1950年代にスランブ試験のみがJIS化された。その後、時代の変遷とともに種々の試験方法がJISや土木学会基準等として規準化され、例えば、コンシステンシーを評

表-4.1 WG3 目次（案）

3. 確実な施工のための PDCA サイクルに必要とされる試験の現場実験
3.1 はじめに
3.1.1 本章の構成
3.1.2 フレッシュコンクリートの試験方法に要求される機能・性能（WG の議論より）
3.1.3 本 WG であらたに対象とした試験方法について
3.2 JCI-TC074A 委員会における現場実験の概要と追跡調査
3.2.1 現場実験の概要
3.2.2 追跡調査
3.3 本委員会 で新たに評価したフレッシュコンクリート試験方法の概要
3.3.1 スランブ試験後の平板叩きによるコンクリートの簡易変形試験方法（案）
3.3.2 傾斜フロー試験
3.3.3 円筒貫入計試験
3.3.4 加振変形試験
3.4 各試験方法によるフレッシュコンクリートの特性評価
3.4.1 実験概要
3.4.2 実験結果
3.4.3 各種試験方法の比較
3.4.5 硬化後のコンクリート物性と各種試験の結果の比較
3.5 まとめ
【規準】
スランブ試験後の平板叩きによるコンクリートの簡易変形試験方法（案）および同解説
【資料編】
X.1 はじめに
X.2 締固め完了エネルギー評価試験
X.3 傾斜フロー試験
X.4 円筒貫入計試験
X.5 加振変形試験

価する試験方法だけでも8種類もの試験方法が規準化されるに至っている。委員会報告書では、このような試験方法の変遷の整理に加え、スランブ試験が多用されるようになった経緯も記述した。

その上で、試験方法に要求される機能・性能としては、「誰でも容易に試験と計測が可能であり、試験に必要な時間も短時間である」、「特殊な試験装置や器具を必要とせず、施工現場でも容易に実施できる」、「定量的な数値で評価・判定できる」、「計測結果を目視によっても確認できる」、「試験装置が故障しない／しにくい」等が要件

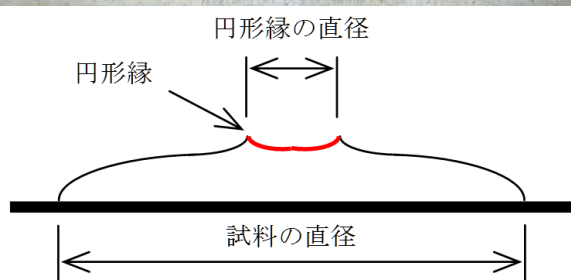


図-4.1 円形縁が有るとき試料の例

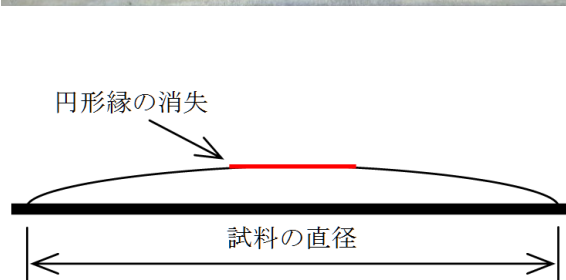


図-4.2 円形縁がないときの試料の例

であるとの議論がなされた。これらを最も満足する試験方法は現状ではスランプ試験になる。

骨材や化学混和剤の種類が少なかった時代には、材料分離抵抗性などのフレッシュコンクリートの性質に影響する要因が少なかったことで、スランプ試験により求められたコンシステンシーにより、ワーカビリティの間接的な評価が可能であった。しかし、良質な骨材が枯渇化したことや多種多様な混和材の利用促進など、コンクリート用材料が多様化したことに加え、化学混和剤の多機能化により、スランプ試験だけでコンクリートのワーカビリティを評価することが難しくなっている。

そこで本 WG では、JCI-TC074A の評価結果から、締固め、充填性を評価する試験として、平板を叩くことでスランプ試験後の試料を変形させる試験に着目し、その試験（スランプ試験後の平板叩きによるコンクリートの簡易変形試験方法（試案））の JCI 規準化を目指した。なお、この試験の適用範囲は土木構造物向けの配合であったため、建築配合向けの試験方法として、傾斜フロー試験、円筒貫入計、加振変形試験を新たに検討対象として加えて評価を行った。

4.2 スランプ試験後の平板叩きによるコンクリートの簡易変形試験方法（試案）

現場では、スランプ試験の後、スランプ試験用の平板を叩き、コンクリートの変形状態を観察することでコンクリートの材料分離抵抗性を判断することが多い。平板を叩くことは、コンクリートに振動を与えて締め固めさせることに相当するが、どこまで叩けば締固め完了と同

等の状態になるか、何を持って材料分離抵抗性を評価するかは定量化されていない。

本試験方法（試案）の検討に際しては、「ある容積の無筋の容器内において、フレッシュコンクリートが振動による締固めによって配合上の理論密度あるいはそれに相当する密度に達した状態」を「締固め完了」と定義し、さらに、「締固め完了に必要なエネルギー」を「締固め完了エネルギー」と定義した。そして、スランプ試験用の平板を叩くことで簡易に締固め完了エネルギーに相当する振動をスランプ試験直後の試料に与え、その時の試料の状態に基づいて、振動による締固め時のフレッシュコンクリートの一体性を簡易に確認することを目指した。また、粘性が大きく材料分離がし難い配合においては、さらに平板を叩くことで締固め完了エネルギー相当以上の振動を与え、その時の試料の状態変化の観察ならびに試料の寸法から粘性の程度を複数の試料で相对比较することを目指した。

本試験方法（試案）の具体的手順は委員会報告書（2016 年 9 月発刊予定）に譲るが、おおよその手順は次に記述する通りである。

- 1) スランプ試験の要領でスランプコーンに試料を詰め、コテなどを使用してコンクリートの上面を丁寧にならす。
- 2) フェノールフタレイン溶液を噴霧してコンクリートの上面を赤紫色に着色する。この着色した部分を着色面とする。
- 3) スランプ試験の要領でスランプコーンを静かに鉛

直に引き上げる。この時、スランプを測定する。

- 4) 木づち（槌）でスランプ試験用の平板を叩き続け、その振動によってコンクリートを試料の直径が 450 mm および 550 mm になるまで変形させる。なお、試料の直径が 450～550 mm になるように平板を叩くことで、試料に締固め完了エネルギーに相当する振動をおおよそ与えることができる^{22),23),24)}。
- 5) その後、図-4.1 あるいは図-4.2 示すように着色面の円周上の円形縁の有無を観察し、円形縁の直径を測定する。このとき、試料の直径も測定する。

なお、委員会報告書には、制定の趣旨と経緯、審議中に特に問題となった事項、適用範囲に関する補足事項、使用用途についての補足、規定要素の根拠について示すとともに、本試験方法（試案）の応用的な活用事例、ならびに、配合選定フローの例も示している。また、試験方法を試案化するにあたっては、スランプ試験用の平板の支持方法が試験結果に及ぼす影響について議論になり、確認実験を実施した。結果として、平板の支持方法は試験結果に大きな影響は及ぼし難いことが確認され、試験結果の信頼性をより確実にするための注意事項も抽出でき、それらを試案内に示すこととした。

4.3 建築配合向けの試験方法の評価

建築配合向けの試験方法として、傾斜フロー試験²⁵⁾、円筒貫入計試験²⁶⁾、加振変形試験²⁷⁾を新たに検討した。共通試験では、目標スランプ 18cm および 21cm、細骨材の粗粒率、細骨材率、単位水量および化学混和剤を調整することで、標準的な配合、それよりも高粘性あるいは粗々しいフレッシュ性状のコンクリートを用意した。結果としては、例えば、傾斜フロー試験においては、同じスランプの配合においても測定結果である見掛けの降伏値： τ_y は配合毎に異なる値で得ることができることを確認し、同一スランプであっても異なるフレッシュ性状を有するコンクリートを評価できる試験方法であることを示した。

4.4 JCI-TC074A 委員会における現場実験の追跡調査

本委員会の前身である JCI-TC074A (品質試験方法と施工時諸特性との相関性評価研究委員会、委員長：綾野克紀) では、設計時に設定された性能と同じコンクリートが実際に施工されているかどうか、また、施工の確実性を確認することを目的として、次のような実験を実施している。

シリーズ I：材料・配（調）合の選定時にフレッシュコンクリートの特性を評価するのに有効と考えられる試験方法を抽出し、2 種類のスランプに対しそれぞれ標準的なもの、粘性の高いもの、粗々しいというフレッシュ特性を持つコンクリートに適用し、有効性を評価した。

シリーズ II：上記のフレッシュ性状の異なるコンクリー

トにて柱供試体および壁供試体を作製し、打込み、締固め・脱型・養生の一連の施工条件を変化させたときのコンクリートの品質変化を、各種の試験方法によって検出することができるかどうか検討した。

本 WG では、シリーズ II で作製し、約 7 年間屋外に暴露されていた供試体に対して追跡調査を実施した。調査項目は、テストハンマー強度、コア試料による圧縮強度、中性化深さ、塩分浸透深さ、表面透気係数、表面吸水試験、導電率である。

試験結果のうち中性化深さを例にして説明すると、スランプ 8 cm で作製した柱状供試体では、中性化深さの平均値は標準的および粘性の高いコンクリートではそれぞれ 8.1 mm、7.0 mm でほぼ同等であり、粗々しいコンクリートで 11.6 mm と最も大きくなった。一方、中性化深さの変動係数は標準的なコンクリートが粗々しいおよび高粘性のコンクリートよりも小さくなった。スランプ 18 cm のコンクリートで作製した壁供試体についても同様の傾向が認められた。

これらの結果より、同一スランプであっても、フレッシュ性状が異なると、硬化後のコンクリートの平均的な品質ならびにそのばらつきが変化することが示唆された。

5. おわりに

本委員会では、コンクリートの品質確保を確実に行うために必要な PDCA サイクルのあるべき骨格と、P、D、C、A の各段階の内容を明確にすることによって、PDCA サイクルを回すことの意義をあらためて認識することの重要性をとりまとめている。本委員会で提案した PDCA サイクルの特徴としては、コンクリート工事全体の PDCA サイクルとコンクリート施工の PDCA サイクルを階層構造にすることにより、コンクリートを打設しながら PDCA サイクルを回すことも明確にしたことが挙げられる。また、PDCA サイクルのスパイラルアップがさらに進むことも視野に入れ、コンクリートの流動性や充填性に関する最新の解析技術や新しく開発されているコンクリートの評価技術なども P、D、C、A の適当な段階で積極的に取り入れている。本委員会の成果により、PDCA サイクルを回すことで終わることなく、PDCA サイクルのスパイラルアップによりコンクリートの確実な施工の実現に結び付けば幸いである。

参考文献

- 1) 細田暁，二宮純，田村隆弘，林和彦：ひび割れ抑制システムによるコンクリート構造物のひび割れ低減と表層品質の向上，土木学会論文集 E2，Vol.70，No.4，pp.336-355，2014
- 2) 日本コンクリート工学会 品質試験方法と実施工

- 時諸特性との相関性評価研究委員会：施工の確実性を判定するためのコンクリートの試験方法とその適用性に関する研究報告書，2009.7
- 3) 谷川恭雄，森博嗣：コンクリートの「施工設計法」の確立をめざして，セメント・コンクリート，No.501，pp.11-20，1988.11
 - 4) 武藤正樹：BIM（Building Information Modeling）の現状と建築研究所のBIM関連研究の取組み，建材試験センター，建材試験情報6，2012
 - 5) 一般財団法人日本建設情報総合センター，<http://www.cals.jacic.or.jp/CIM/index.html>
 - 6) 森博嗣，谷川恭雄：フレッシュコンクリートの各種コンシステンシー試験方法に関するレオロジー的考察，日本建築学会構造系論文報告集，No.377，pp.16-26，1987.7
 - 7) 山田義智，大城武，梶田佳寛：フレッシュコンクリート流動解析へのMAC法の適用，コンクリート工学年次論文集，Vol.20，No.1，pp.131-136，1998
 - 8) T. C. Papamastasiou, Flows of materials yield, J. Rheol., Vol.31, pp.385-404, 1986
 - 9) 森博嗣，谷川恭雄：フレッシュコンクリートの構成則に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，No.396，pp.9-16，1989.2
 - 10) 山田義智，大城武：フレッシュコンクリートの粘塑性構成式とその流動特性に関する解析的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.855-860，2002
 - 11) 山田義智，赤嶺糸織，伊波咲子，浦野真次／コンクリートのレオロジー定数推定に関する基礎的研究，セメント・コンクリート論文集，Vol.66，pp.661-668，2013
 - 12) 三島直生，畑中重光：ダイラタンシーの影響を考慮できるフレッシュモルタルの粘塑性流動モデルの定式化に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（材料施工），pp.219-220，2012.9
 - 13) 李柱国：フレッシュコンクリートのレオロジーモデルおよび試験法に関する研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.80，No.710，pp.527-537，2015.4
 - 14) 上原義己，山田義智，崎原康平，浦野真次：MPS法を用いた材料分離シミュレーションに関する基礎的研究，セメント・コンクリート論文集，Vol.69，pp.711-717，2016.3
 - 15) 森博嗣，渡辺健治，梅本宗宏，谷川恭雄：二相モデルを用いたフレッシュコンクリートの流動解析手法，日本建築学会構造系論文報告集，No.427，pp.11-21，1991.9
 - 16) 鍋田克己，町田篤彦，岩下和義，佐々木尊廣：個別要素法を用いたフレッシュコンクリートの流動シミュレーション，コンクリート工学年次論文集，Vol.16，No.1，pp.479-484，1994
 - 17) 原勝哉，橋本親典，渡辺健，石丸啓輔：粒状体・流体連成解析によるフレッシュコンクリートの充填評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.1384-1389，2014
 - 18) 越塚誠一：粒子法入門，丸善出版，pp.11-13，2014
 - 19) 上原義己，山田義智，崎原康平，浦野真次：MPS法によるフレッシュコンクリートの材料分離および振動伝播解析，日本建築学会九州支部研究報告，CD-ROM，2015.3
 - 20) 土木学会：鉄筋コンクリート構造物の設計システム - Back to the Future II - ，pp. VI42-45 ，2014.7
 - 21) 山田義智，上原義己，崎原康平：BIMと粒子法を援用したコンクリート充填シミュレーションの試み，日本建築学会九州支部研究報告，No.55，pp.161-164，2016.3
 - 22) 梁俊，丸屋剛，坂本淳：コンクリートの分離抵抗性の簡易な定量評価方法の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1074-1079，2012.7
 - 23) 梁俊，國府勝郎，宇治公隆，上野敦：フレッシュコンクリートの締固め性試験法に関する研究，土木学会論文集 Vol. 62，No. 2，pp.416-427，2006.6
 - 24) 梁俊，宇治公隆，上野敦：タンピング試験におけるワーカビリティの簡易評価方法の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1221-1226，2004.7
 - 25) Hideyuki Kajita, Yoshihiro Masuda, Hiroyuki Sasakura and Yoshihisa Nakata: EXPERIMENTAL EVALUATION OF WORKABILITY FOR FRESH CONCRETE BY USING THE INCLINED FLOW TEST APPARATUS (EVALUATION OF FLOWABILITY FOR FRESH CONCRETE, MORTAR, CEMENT PASTE AND WATER), Proceedings of the 12th Japan・Korea Joint Symposium on Building Materials & Construction, Vol. 12, pp. 305-310, July. 2015
 - 26) 松田敏，佐藤孝一，石田良平：円筒貫入計による高流動コンクリートのコンシステンシー評価に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集 材料・施工分冊，pp.511-512，1994.4
 - 27) NEXCO 試験方法：中流動覆工コンクリートの加振変形および充填性試験方法（JHS 733-2008）