

超微破壊でのコンクリート品質分析による 社会インフラの維持管理の合理化

所属：東京大学生産技術研究所

助成対象者：酒井雄也

概要

コンクリートの圧縮強度を超微破壊で推定することを最終目的として、まずセメントペーストの圧縮強度とドリル掘削粉の諸性状の相関を検討したところ、供試体強度と掘削粉の空隙量に高い相関があることを確認した。次にコンクリートを対象に、過去の文献を用いて同様の検討を実施した結果、対象の水セメント比の情報があれば、掘削粉の水和度をパラメータとしたモデルにより、強度を予測できる可能性を示した。中性化深さと塩化物イオン浸透深さの超微破壊での測定手法として、直径 0.6 mm のファイバースコープを使用して、直径が 1 から 2 mm のドリル孔を観察する方法を検討し、提案手法により中性化深さと塩化物イオン浸透深さを高精度で測定可能なことを確認した。

abstract

The correlation between compressive strength of cement paste specimens and various properties of drilling powder was examined to develop ultra-semi-destructive estimation of compressive strength of concrete. It was confirmed that there is a good correlation between cement paste specimen strength and pore volume of drilling powder. Similar studies on mortar and concrete specimens showed that their compressive strength can be estimated using hydration degree and water to cement ration. As an ultra-semi-destructive inspection of neutralization depth and chloride ion penetration depth, a method by observing a drill hole with a diameter of 1 to 2 mm using a fiberscope with a diameter of 0.6 mm was studied. It was confirmed that the neutralization depth and the chloride ion penetration depth can be measured by the proposed method with high accuracy.

研究内容

背景

我が国では、高度経済成長期に大量に建設されたコンクリート構造物の供用年数が 50 年に近づいており、これらの合理的かつ効率的な維持管理が必要とされているが、そのためにはコンクリートの力学的特性や耐久性を適切に把握する必要がある。これらを評価するには、コアサンプルを採取して試験するのが確実である。しかし、例えば、圧縮強度試験や塩化物イオン浸透深さ測定に用いるコアサンプルは直径 10 cm と比較的大きく、資産価値の低下や鉄筋の破断リスク¹⁾などが問題となり困難な場合がある。重要文化財に指定されるコンクリート構造物も年々増加しており、これらの検査ではコアサンプルを採取することは困難である。そこで、コアサンプルの試験によらない方法として非破壊試験や微破壊試験が検討されている。例えば圧縮強度の評価の場合、非破壊試験としては、反発硬度や超音波伝播時間に基づく推定方法が検討されているが、精度の面で課題が残っている²⁾。また、コンクリート表面に仕上げ材がある場合、試験前にそれを除去する必要があるため、外装として仕上げ材を施した建築物では実施が難しい。一方、微破壊試験としては、直径 2.5 cm の小径コア圧縮強度に基づく推定方法³⁾が検討されているが、重要建築物の検査等では損傷を最小限に抑えることが要求されるため、さらに損傷を抑制することが望ましい。

目的

本研究では、コンクリート構造物の力学的特性と耐久性の評価を、超微破壊での試料採取およびその分析により実現することを目的とする。具体的には、直径が数 mm 以下のドリルを用いてコンクリートから採取した粉末およびドリル孔を対象に分析を行うことによりこれを実現する。

本研究の達成は、新設から既設まで、幅広い構造物の耐久性評価や劣化進行予測を可能とし、また、業務や研究の大幅な効率化、省力化を実現することで、少子高齢化に伴い人員や経費がより一層削減される中で、確実な社会インフラの維持に貢献するものである。

結果

超微破壊による中性化深さ測定、塩分浸透深さ測定、圧縮強度推定について成果が得られたため、下記に報告する。

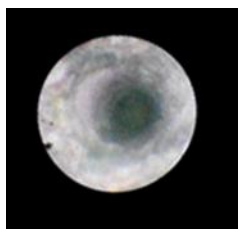
(1)超微破壊での中性化深さ・塩分浸透深さ測定

(1-1)測定方法の概要

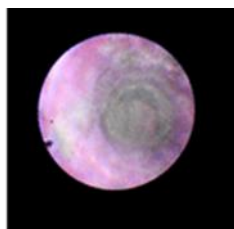
直径が 1 mm または 2 mm のドリル孔を直径 0.6 mm のファイバースコープで観察することにより中性化深さと塩分浸透深さを測定する方法を検討した。コンクリート供試体やモルタル供試体をドリルで削孔し、指示薬(フェノールフタレイン溶液もしくは硝酸銀溶液)を噴霧し、ドリル孔壁面を呈色させた。ドリル孔壁面の呈色状況をファイバースコープで観察することにより、中性化深さや塩分浸透深さを測定するというものである。ファイバースコープで呈色状況を確認するには、鮮明な呈色が必要であり、そのための適切な乾燥方法についても検討した。詳細は本助成に関わる成果物の中で報告しているが、中性化深さに関しては削孔と孔内の洗浄後、ドライヤーで 10 分程度乾かすか、24 時間以上放置して乾燥させた後に指示薬を噴霧することで、鮮明な呈色が得られることを確認している。

(1-2)ファイバースコープを使用した中性化深さ・塩化物イオン浸透深さ測定の精度検証

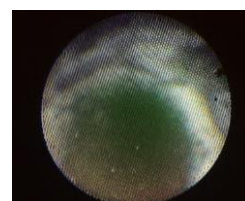
コンクリート供試体やモルタル供試体に対し、直径 1 mm または 2 mm の穴を複数穿孔し、ドリル孔をブラシで洗浄し、ドリル孔内に指示薬を噴霧した。そして、ファイバースコープを使用してドリル孔壁面の呈色状況を観察した。図 1 にフェノールフタレイン溶液を噴霧したドリル孔壁面をファイバースコープで観察した際の (a)非呈色部と (b) 呈色部の様子を、図 2 に硝酸銀溶液によるドリル孔内の (a)非呈色部と (b) 呈色部の様子を示す。ドリル孔壁面で図 1、図 2 ような非呈色部と呈色部の境界が確認された際のファイバースコープの挿入深さから、中性化深さまたは塩化物イオン浸透深さを求めた。その後、ドリル孔に沿って供試体を切断し、断面にフェノールフタレイン溶液または硝酸銀溶液を噴霧して各ドリル孔位置での中性化深さまたは塩化物イオン浸透深さをノギスで測定し、ファイバースコープによる結果との比較を行った。図 3 に、(a)中性化深さと(b)塩化物イオン浸透深さについて、ファイバースコープを使用して測定した値と、切断面においてノギスで測



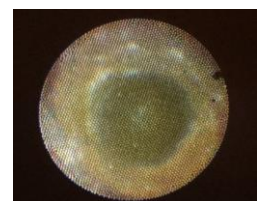
(a) 非呈色部



(b) 呈色部



(a) 非呈色部

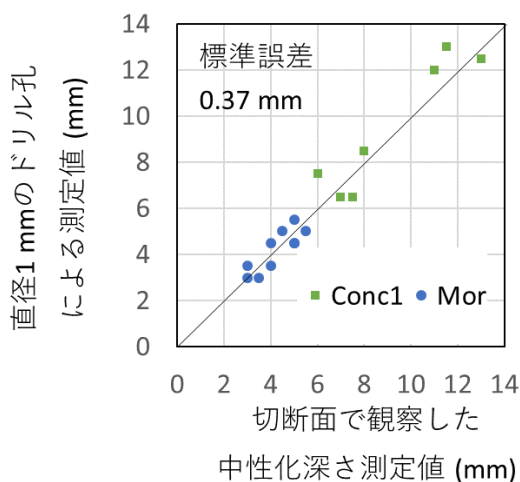


(b) 呈色部

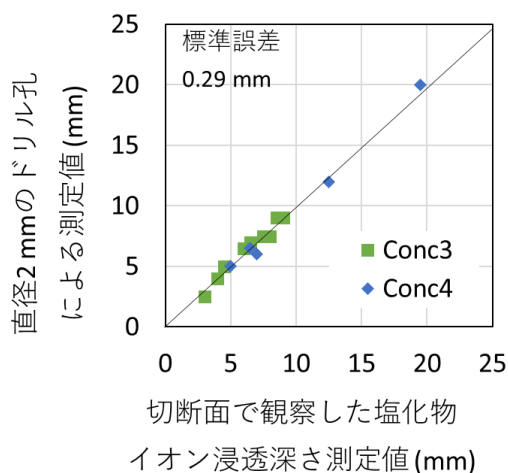
図 1 ファイバースコープで観察した削孔壁面のフェノールフタレイン溶液による呈色

図 2 ファイバースコープで観察したドリル削孔壁面の硝酸銀溶液による呈色

定した値の比較を示す。ファイバースコープを用いて高い精度で中性化深さや塩化物イオン浸透深さを測定できることを確認した。



(a) 中性化深さ



(b) 塩化物イオン浸透深さ

図3 ファイバースコープによる測定値と切断面における測定値の比較

(2) 圧縮強度推定

(2-1) 概要

本研究では、コンクリート（セメントペーストと骨材の混合材料）供試体の圧縮強度を超音波で推定することを最終目標として、セメントペースト供試体を使用して供試体の圧縮強度と、同一条件で作製した供試体から採取したドリル掘削粉の諸性状を比較した。ドリル掘削粉の諸性状として検討した項目は代表的な掘削粉粒子1粒の圧縮強度、ドリル掘削粉のヘリウム真密度、結合水量、粒度分布、空隙量である。以下では、これらの中から、セメントペースト供試体の圧縮強度と最も高い相関が見られたドリル掘削粉の空隙量に関する結果を示す。またコンクリートに関しては、過去に報告された文献値を用いて、粉体からの圧縮強度推定の可否を検討した。

(2-2) セメントペースト供試体の圧縮強度とドリル掘削粉の空隙量の関係

まず、水セメント比や養生条件を変えたセメントペースト供試体を作製した。供試体寸法は直径5 cm、高さ10 cmである。使用したセメントは普通ポルトランドセメントであり、密度 3.15 g/cm^3 、比表面積 $3380 \text{ cm}^2/\text{g}$ である。供試体は各条件で6本ずつ作製し、3本は圧縮強度試験用、3本はドリル掘削粉採取用とした。28日間所定の養生を行ったのち、圧縮試験用の3本は、飽水処理後に圧縮強度試験を実施した。粉末採取用の3本については、養生終了時に表面から1 cmの深さまで掘削し、ドリル掘削粉を採取した。そして、水銀圧入ポロシメトリーにより掘削粉の空隙構造測定を実施した。

図4には供試体の圧縮強度と掘削粉の空隙量の関係を示す。グラフ中の数字(30~70)はセメントペーストの水セメント比を表す。図4より、水セメント比によらず、また養生方法によらず、供試体の圧縮強度と掘削粉の空隙量には強い相関関係が見られた。この結果は、微小なドリル掘削粉においても、セメントペースト供試体の強度に対して支配的な空隙の情報が残存していることを示唆するものである。

(2-3)コンクリートの各種性状と圧縮強度との関係

過去に報告された文献⁴⁾を用いて、コンクリート粉末から入手可能な情報から、圧縮強度を推測する方法を検討した。検討の結果、セメントと水の比率(C/W)と結合水量(CBW)から圧縮強度 f'_c を推測する以下のようなモデルを構築した。

$$f'_c = \left(a_1 \cdot \frac{C}{W} + a_2 \right) \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-a_3 \left(\frac{CBW}{CBW_\infty}\right)^{a_4}\right) \right\}$$

ここで、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 は定数であり、それぞれ64、-70、2.1、2.6とした。測定された圧縮強度と、上記モデルにより計算された圧縮強度との関係を図5に示す。中庸熟と早強セメントが使われたコンクリートの結果であるが、良好に対応していることが確認できる。よって、セメントと水の比率がわかれば、コンクリート粉末の結合水量を測定することで、供試体の圧縮強度を求めることは可能であると考えられる。

今後の予定

ファイバースコープを使用した中性化深さ測定と塩化物イオン浸透深さ測定に関しては、実構造物大の供試体や教養終了後の実構造物を対象に測定を行い、実用化に向けた検証を進める。圧縮強度推定については、これまでの検討の中でセメントペーストの強度がドリル掘削粉の空隙量から推定可能なことを確認している。また過去の文献に報告されている情報を用いて、コンクリート粉末から得られる情報から、コンクリート供試体の圧縮

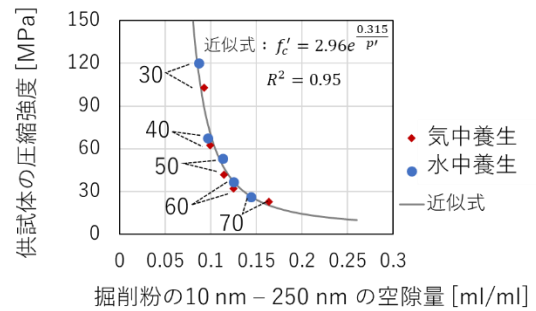


図4 セメントペースト供試体の圧縮強度と掘削粉の空隙量の関係

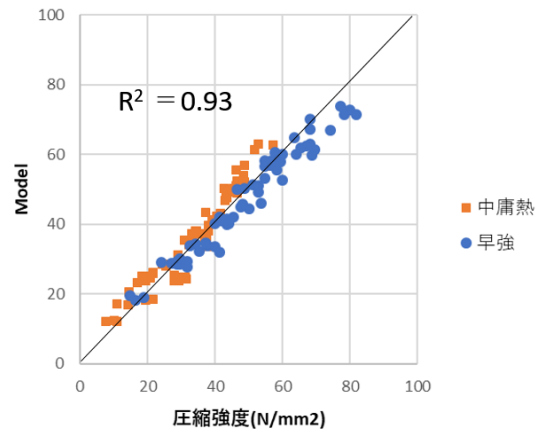


図5 コンクリート供試体の圧縮強度の実験値と予測値との比較

強度を予測するためのモデルを構築した。2種類のセメントを用いたコンクリートに対してその適用性を確認したが、今後はより様々な配合条件で作成し、また様々な条件で養生したコンクリートへの適用性を確認する。また、体積変化特性や凍結融解抵抗性についても現在、セメントペーストを対象に実験を進めており、ドリル掘削粉から得られる情報を基に供試体の挙動を評価する方法を検討していく。

参考文献

- 1) 陣内浩 et al. : 高強度コンクリートの圧縮強度推定における反発度法の適用性に関する基礎的研究,日本建築学会構造系論文集,Vol. 78, No. 683,pp. 9-16,2013
- 2) Breyse, D. : Nondestructive Evaluation Of Concrete Strength : An Historical Review And A New Perspective By Combining NDT Methods,Construction and Building Materials,Vol. 33,pp. 139-163,2012
- 3) 若林信太郎 et al. : 小径コアによる構造体コンクリート強度の推定方法に関する研究 (その1 小径コア供試体の圧縮試験結果) ,日本建築学会構造系論文集,No. 555,pp. 1-8,May 2002
- 4) 関 慎吾ら : セメントの水和進行率から求まるコンクリートの有効セメント水比と圧縮強度との関係について、土木学会論文、Vol. 146、pp. 38-46、1967
- 5) M.T. Hasholt et al.: Mechanical properties of concrete with SAP Part 1: Development of compressive strength, international RILEM conference on use of superabsorbent polymers and other new additives in concrete, Denmark, 2010

本助成に関わる成果物

[論文発表]

田中俊成, 酒井雄也 : セメントペーストの強度とドリル掘削粉の諸性状との相関に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 41, 2019 (採録決定済)

田中俊成, 酒井雄也 : 直径 1 mm のドリル孔による中性化深さの測定手法の開発, 高速道路と自動車, Vol. 62, No. 3, pp. 21-27, 2019

[口頭発表]

Shunsei Tanaka, Yuya Sakai: Development and verification of neutralization depth and chloride ion penetration depth measurement method using fibrescope, The 5th International Conference in Sustainable Construction Materials and Technologies (SCMT5), London, UK, July. 14-17, 2019 (CD-ROM)

[ポスター発表]

Shunsei Tanaka, Yuya Sakai: Study on correlation of compressive strength of cementitious material based on the hydration degree measured by drilling powder, International Conference on Civil, Architecture and Marine Engineering, Osaka, Japan, April. 22-23, 2019

[その他]

田中俊成, 酒井雄也 : 極細ファイバースコープによる中性化深さ測定に関する検討, 生産研究, Vol. 71, No. 1, pp. 111-114, 2019