

UCI 法を用いたコンクリート強度推定法の含水状態補正と現場への適用

Correction Method for the Water-Retaining Condition When Estimating the Strength of Concrete by the UCI Method

稲葉 洋平 関田 徹志

要 約

UCI 法を用いたコンクリート強度推定法は、UCI 法により測定された硬さが圧縮強度に比例することを利用して、強度推定を行う技術である。本技術は、反発度法などの既存技術に比べて高精度な強度推定ができる可能性があることから研究開発が進められてきたが、既往の強度推定式では、含水状態により強度推定値に誤差が生じることが確認された。そこで、含水状態が測定値に与える影響を実験的に検討し、誤差の補正が可能な方法を提案することで、精度の高い非破壊強度推定技術として第三者機関の証明を取得した。また、20 件を超える現場へ実適用し、本技術の妥当性や適用性を確認した。

目 次

- I. はじめに
- II. 含水状態の異なるコンクリートの強度推定実験
- III. 現場への適用
- IV. まとめ

I. はじめに

コンクリートの最も重要な物性として圧縮強度があり、建築物の施工においてはコンクリートの圧縮強度が設計基準強度を下回ることがないように管理する必要がある。コンクリートは一般的な工業製品とは異なり、固まる前の半製品の状態で工場から出荷される。圧縮強度の発現は締固めや養生などの施工条件に強く依存するため、可能であれば硬化後に現場で構造物そのものの強度を確認することが望ましい。

しかし、一般的に行われる構造体コンクリートの圧縮試験は、建築物からコア採取をする必要があり、躯体を傷めることにつながるため、好ましい試験方法とはいえない。そこで候補に挙がるのが非破壊試験であるが、推定精度や適用できる強度範囲などを考慮すると現状の非破壊試験では十分であるとは言えず、新たな技術の開発が望まれる。そこで本研究では、金属材料の硬さを調べるために行われている UCI (Ultrasonic Contact Impedance) 法を応用し、コンクリートの圧縮強度推定に用いる方法 (以下、UCI 強度推定法) の開発を行った。理論的、実験的な検討の結果¹⁾²⁾、本方法は圧縮強度および弾性係数について精度の高い推定が可能であるとの知見が得られた。一方で、養生条件 (封緘、気中) に

より、硬さと圧縮強度の相関である校正曲線が異なる可能性のあることが確認された。ここで養生条件の違いは主に含水状態の違いと考えている。

本研究では、コンクリートの含水状態が UCI 法による圧縮強度推定に与える影響について実験的に把握し、適切な補正を行うことにより、含水状態に関わらず強度推定する手法について検討する。また、本手法を現場へ適用した際に得られた知見についても報告する。

II. 含水状態の異なるコンクリートの強度推定実験

1. 技術的な問題点

既往の実験の結果²⁾、硬さと圧縮強度の相関である校正曲線が含水状態に影響される可能性があることが確認された。校正曲線がコンクリートの含水状態に影響されるということは、含水状態を変数として考慮する必要があることを示しているが、これには難点が2つある。1つ目は、コンクリートの含水状態ごとに校正曲線を作成することは手間がかかりすぎ、簡易な測定とはいえなくなる。2つ目は、原位置におけるコンクリートの含水状態を正確に把握する必要がある、その測定は技術的に困難なこと。

そこで直接的に含水状態を測定して補正する方法は採用せずに、ほかの間接的な手法を検討することとした。間接的な手法とは、含水状態が UCI 法の測定値に与える影響を実験的に把握し、その傾向を考慮したうえで、合理的な補正を行う手法である。これにより、含水状態を測定せずに補正できることを目指す。

キーワード: コンクリート, 非破壊試験, 圧縮強度, 弾性係数, 含水状態

Keywords: concrete, non-destructive testing, compressive strength, Young's modulus, water-retaining condition

2. 実験

(1) 実験概要

含水状態が UCI 法の測定値に与える影響を検討するために、材齢初期から含水状態の異なる試験体を多数作製し、その影響を把握する。試験体はΦ100×200mmの円柱供試体とし、打設後は封緘し雰囲気温度 20℃、相対湿度 60%の恒温恒湿室において養生した。それぞれの乾燥開始材齢の日に脱型を行い、載荷材齢までは同じ環境下で養生することで乾燥させた。実験要因と水準を Table 1 に示す。実験要因は、水セメント比(45,55,65%)、載荷材齢(1,3,7,14,28,56,91日)および乾燥開始材齢(1,3,7,14,28,56,91日)である。載荷材齢と乾燥開始材齢の組み合わせを変えることにより、異なる含水状態の試験体を多数作製できるようにした。

(2) 測定内容

測定項目は、硬さと強度物性とする。硬さは UCI 法によりビッカース硬さを測定し、強度物性に関しては圧縮試験(JIS A 1108, JIS A 1149 に準拠)により圧縮強度、弾性係数を測定する。UCI 法による硬さ試験では、鉄片を挟んで測定した値である HV_E と鉄片を挟まないで測定した値である HV_F の2種類の測定値を得る。なお、今後出てくる変数の記号一覧を Table 2 に示しておく。 $\gamma_0, \delta_0, \varepsilon_0, \kappa_0, \theta_0, \mu_0, E_0$ は定数である。

水セメント比ごとの試験体一覧を Table 3 に示す。載荷材齢、乾燥開始材齢について条件ごとに1本ずつとして28本、水セメント比3水準で計84本の試験体となる。載荷材齢と乾燥開始材齢が同じである表中の○で囲まれた数字は封緘養生であり、ほかは乾燥の影響を受けた気中養生である。

試験に用いた材料を Table 4 に、調合を Table 5 に示す。載荷材齢において圧縮試験および UCI 強度推定法を行い、それぞれ弾性係数および圧縮強度を得た。そして、これらの相関から、含水状態の影響が示す傾向を把握する。

(3) 圧縮試験結果

圧縮試験から得られた弾性係数($JIS E$)および圧縮強度($JIS F_c$)の結果を水セメント比ごとに Fig.3, Fig.4 に示す。凡例の数字は、乾燥開始材齢(日)を示す。また、点線で結んでいるのは封緘養生の結果を示し、それ以外は気中養生の結果を示している。

弾性係数の経時変化より、水セメント比が小さいほど、弾性係数は大きい傾向にある。同じ材齢で比較した場合、封緘養生が最も大きな弾性係数を示し、乾燥開始材齢が早いほど小さくなる傾向にある。また、異なる材齢で比較した場合、材齢が進むに従って、封緘養生の弾性係数は大きくなる傾向にあるが、気中養生の弾性係数は7日程度までの初期材齢を除いて小さくなる傾向にある。

圧縮試験の経時変化より、水セメント比が小さいほど、圧縮強度は大きい傾向にある。同じ材齢で比較した場合、封緘養生が最も大きな圧縮強度を示し、乾燥開始材齢が早いほど小さくなる傾向にある。また、異なる材齢で比較した場合、材齢が進むに従って、封緘養生の圧縮強度は大きくなる傾向にあるが、気中養生の圧縮強度は7日程度までの初期材齢を

Table 1 実験要因と水準
(Experimental Parameter)

実験要因	水準
水セメント比(%)	45,55,65
載荷材齢(日)	1,3,7,14,28,56,91
乾燥開始材齢(日)	1,3,7,14,28,56,91

Table 2 記号の一覧
(List of Symbols)

記号	意味
E	弾性係数
$JIS E$	JIS A 1149 で得られる弾性係数
$JIS F_c$	JIS A 1108 で得られる圧縮強度
HV	UCI試験機で測定され、実際の弾性係数を考慮したビッカース硬さ
HV_E	UCI試験機で鉄片を挟んで測定した際の測定値
HV_F	UCI試験機で鉄片を挟まないで測定した際の測定値

Table 3 試験体一覧
(Test Pieces)

		載荷材齢(日)						
		1	3	7	14	28	56	91
乾燥開始材齢(日)	1	①	1	1	1	1	1	1
	3	-	①	1	1	1	1	1
	7	-	-	①	1	1	1	1
	14	-	-	-	①	1	1	1
	28	-	-	-	-	①	1	1
	56	-	-	-	-	-	①	1
	91	-	-	-	-	-	-	①

Table 4 使用材料一覧
(Materials)

材料	水	セメント	細骨材	粗骨材
種類等	調布市	普通ポルトランドセメント 密度:3.16g/cm ³	八王子産砕砂 成田山砂 表乾密度:2.63g/cm ³ 吸水率:1.45% FM:2.71	八王子・秩父・青梅産砕砂 表乾密度:2.65g/cm ³ 吸水率:0.59% FM:6.54

Table 5 調合一覧
(Mix Proportion)

NO.	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位質量(kg/m ³)		
			水	セメント	細骨材 粗骨材
1	45.0	45.7	175	389	780 960
2	55.0	48.7	175	319	861 936
3	65.0	49.8	184	284	881 920

除いて同程度か若干小さくなる傾向にある。気中養生では水分不足により、強度が増進しなかったものと考えられる。

(4) UCI 法の結果

HV_E の結果を Fig.1 に示す。水セメント比が小さいほど、 HV_E の値は小さい傾向にある。同じ材齢で比較した場合、封緘養生が最も小さな値を示し、乾燥開始材齢が早いほど大きくなる傾向にある。また、異なる材齢で比較した場合、材齢が進むに従って封緘養生の HV_E の値は小さくなる傾向にあるが、気中養生の HV_E の値は初期材齢を除いて同程度か若干大きくなる傾向にある。

次に HV_F の結果を Fig.2 に示す。水セメント比に関わらず、 HV_F の値は同程度である。同じ材齢で比較した場合、封緘養生が小さな値を示し、気中養生は乾燥開始材齢に関わらず同程度の値となる傾向にある。また、異なる材齢で比較し

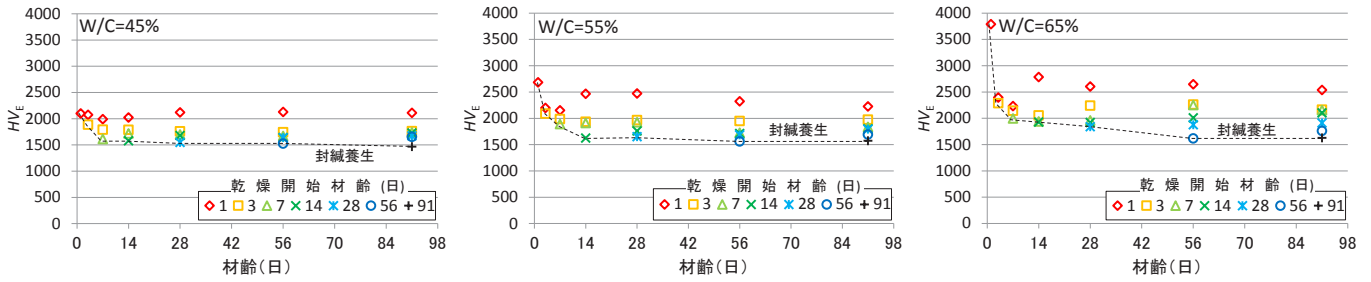


Fig.1 HV_E の経時変化
(Hysteresis of HV_E)

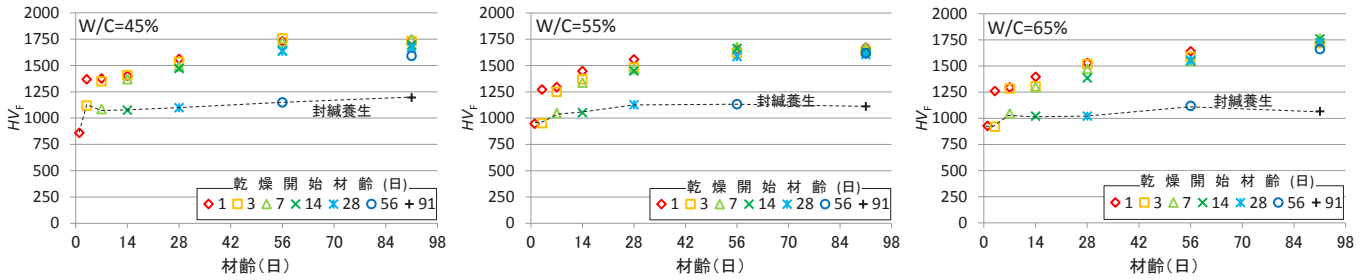


Fig.2 HV_F の経時変化
(Hysteresis of HV_F)

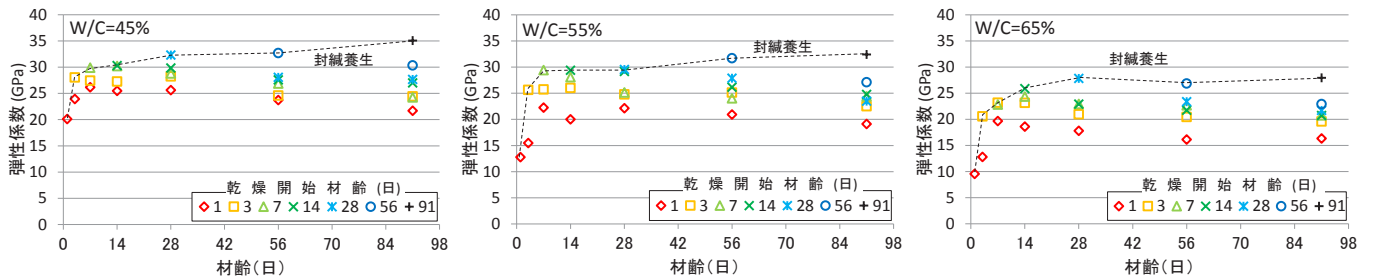


Fig.3 弾性係数 $1/sE$ の経時変化
(Hysteresis of $1/sE$)

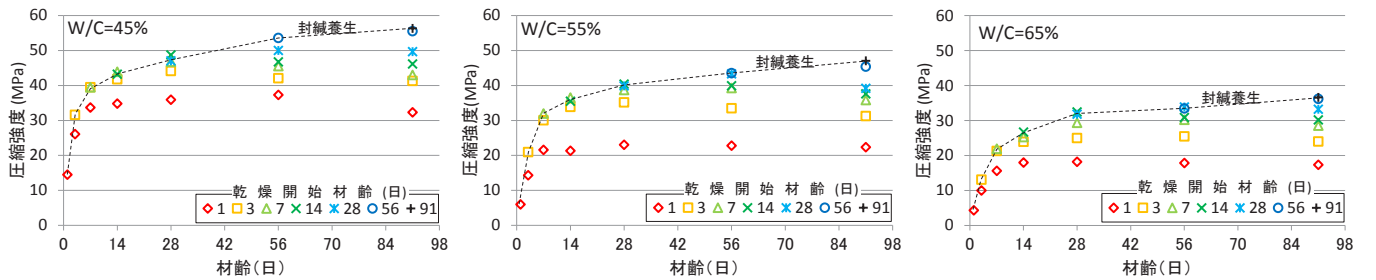


Fig.4 圧縮強度 $1/sFc$ の経時変化
(Hysteresis of $1/sFc$)

た場合、材齢が進むに従って、封緘養生の HV_F の値は若干大きくなる傾向にあり、気中養生の HV_F の値は大きくなる傾向にある。

HV_F の値で特徴的なことは、同じ材齢で比較した場合に、封緘養生の値と気中養生の値の2つにはっきりと分かれることである。このことから、含水状態により HV_F の値が大きく変化することが、校正曲線にずれが生じる主要要因であると推察される。

3. 考察

(1) 含水状態の分類

HV_F の値が含水状態に大きく影響されることから、乾燥材齢と HV_F の関係を Fig.5 に示す。ここで乾燥材齢とは、材齢から乾燥開始材齢を引いた材齢とし、実際に乾燥が進んだ材齢を示すものとする。Fig.5 より、含水状態を乾燥材齢により概ね3つ(湿潤, 中間, 乾燥)に分類できることから、この分類に基づいて含水状態ごとの補正方法を検討した。

(2) 弾性係数と HV_E の相関

UCI法による硬さ試験から HV_E と HV_F の値が測定された

ので、これらの値から弾性係数($JIS E$)と圧縮強度($JIS Fc$)との相関を把握する。計算式は既往の結果²⁾より(1)式、(2)式となっている。ただし、 $\gamma_0, \delta_0, \epsilon_0, \kappa_0, \theta_0, E_0$ は定数であり、(2)式の E には(1)式の $JIS E$ を入力する。

$$JIS E = \gamma_0 \frac{1}{\sqrt{HV_E - \epsilon_0}} - \delta_0 \quad (1)$$

$$JIS Fc = k_0 \times HV + \theta_0 = k_0 \times \left(HV_F \times \frac{E^2}{E_0^2} \right) + \theta_0 \quad (2)$$

UCI 強度推定法から得られた $1/\sqrt{HV_E - \epsilon_0}$ と圧縮試験から得られた $JIS E$ の相関を Fig.6 に示す。すべてのデータについて線形式で近似すると(3)式となる。これが、 HV_E から弾性係数 $JIS E$ を推定する近似式である。

$$JIS E = \frac{1450}{\sqrt{HV_E - 550}} - 14.8 \quad (3)$$

Fig.6 では乾燥による影響を確認するために乾燥材齢により分類している。 HV_E の影響を検討するために、y 切片である-14.8 を一定にした場合のそれぞれの近似曲線を示すと図中の式となる。乾燥材齢に関わらず傾きはほぼ同じであることから、弾性係数については含水状態による補正の必要性は低いと考えられる。言い換えれば、含水状態による弾性係数の変動は、 HV_E の変動に正しく反映されているということである。

(3) 圧縮強度と HV の相関

圧縮強度と HV の相関を Fig.7 に示す。すべてのデータについて線形式で近似すると以下の(4)式となる。これが、 HV から圧縮強度 $JIS Fc$ を推定する近似式である。

$$JIS Fc = 1.53HV + 2.8 = 1.53 \times \left(HV_F \times \frac{E^2}{E_0^2} \right) + 2.8 \quad (4)$$

Fig.7 では乾燥による影響を確認するために乾燥材齢により分類している。 HV_F の影響を検討するために、y 切片である+2.8 を一定にした場合のそれぞれの近似曲線を示すと図中の式となる。近似曲線の傾きは、湿潤 1.73、中間 1.58、乾燥 1.40 となっており、乾燥に伴い傾きが小さくなっていることから、圧縮強度については含水状態による補正を行う必要がある。これは言い換えれば、含水状態による圧縮強度の変動は HV_F の変動に正しく反映されていないということである。以上の検討から、主に補正が必要となるのは HV_F であることが確認できた。

(4) 含水状態の補正

乾燥に伴う硬さの変動と圧縮強度の変動のズレを補正するため、 HV の推定式 $HV = HV_F \times E^2/E_0^2$ の HV_F の項を $(HV_F + \mu_0)$ に変更し、(5)式とする。なお、 μ_0 を加えたことにより HV の値が大きくなり計算されるため、もともとのピッカース硬さ HV の指標とは異なった指標となっている。以降では区別するために \underline{HV} の記号で表すこととした。

$$\underline{HV} = (HV_F + \mu_0) \times \frac{E^2}{E_0^2} \quad (5)$$

定数である μ_0 を加えることで補正が可能となるのは、以下の理由による。なお、 HV と $JIS Fc$ は比例するものとし、

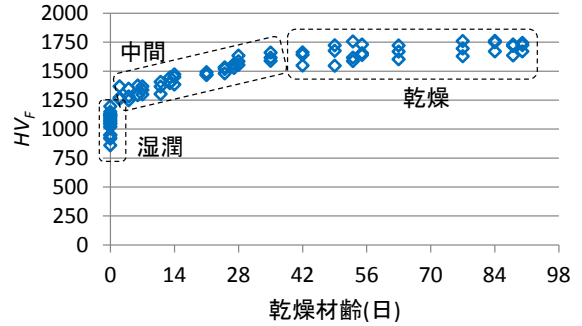


Fig.5 乾燥材齢と HV_F の関係
(Relation between HV_F and Drying Days)

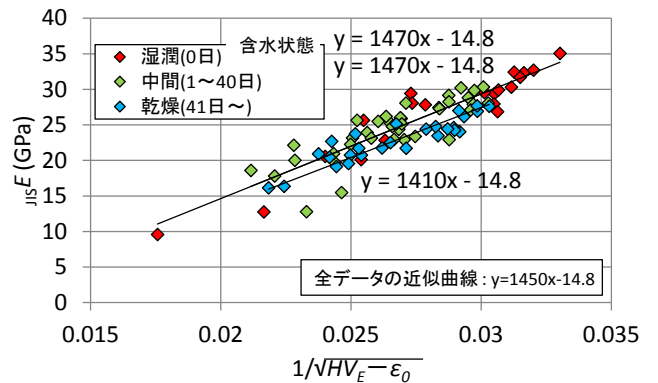


Fig.6 HV_E と弾性係数 $JIS E$ の相関
(Relation between HV_E and $JIS E$)

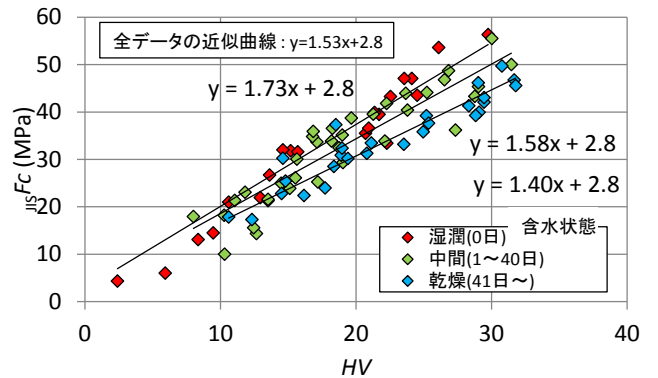


Fig.7 HV と圧縮強度 $JIS Fc$ の相関
(Relation between HV and $JIS Fc$)

分かりやすくするためにここでは $E^2/E_0^2=1$ とする。 HV と $JIS Fc$ の傾きが含水状態により異なる理由は、主に乾燥による HV_F の増加量と $JIS Fc$ の増加量にずれが生じるためである。例えば、湿潤、中間、乾燥の状態では、 HV が 1.0, 1.4, 1.8 であり、 $JIS Fc$ が 1.0, 1.2, 1.4 の場合である。この場合、 HV と $JIS Fc$ の傾きは含水状態により異なってしまふ(湿潤のときの傾きは $1.0/1.0=1.0$ 、乾燥のときの傾きは $1.4/1.8=0.78$)が、 HV_F に 1.0を加える補正を行うと、 \underline{HV} の値は 2.0, 2.4, 2.8 となるため、 \underline{HV} と $JIS Fc$ の傾きをそれぞれの含水状態において同じとすることができる(湿潤のときの傾きは $1.0/2.0=0.5$ 、乾燥のときの傾きも $1.4/2.8=0.5$)。

なお、この補正を行っても \underline{HV} と圧縮強度の比例関係は成

立する。以上、含水状態の測定をせずにその影響を補正する方法として、 HV_F の値に補正項を加える方法を提案した。

(5) 補正データと校正曲線

(5)式を用いて測定値の補正を行った結果を Fig.8 に示す。含水状態の補正值 μ_0 については、全データの相関係数が最も大きくなる値として 1000 を用いた。含水状態ごとの傾きは概ね一致しており、校正曲線を一本化することができている。すなわち、含水状態によっても変動してしまう HV_F に補正值 μ_0 を加え、含水状態に関わらず $\mu_{IS}Fc$ と $(HV_F + \mu_0)$ の増加量が比例するようにすることで、校正曲線の傾きのずれをなくし、一本化させている。なお、一般的に材料ごとに μ_0 の値は異なると考えられるため、 μ_0 の値の特性については今後のデータの蓄積を待たねばならないが、これまでのところコンクリートについては μ_0 の値を 1000 程度としておけば大きな誤差は生じていない。

以上より、含水率の補正を考慮した強度の推定式は式(6)となる。この推定式を用いることで、含水状態の測定をせずとも、含水状態により変化する HV_F の値を適切に補正でき、精度の高い強度推定が可能となった。

$$\mu_{IS}Fc = \frac{k_0}{E_0^2} \times (HV_F + \mu_0) \cdot \left(\gamma_0 \frac{1}{\sqrt{HV_E - \epsilon_0}} - \delta_0 \right)^2 + \theta_0 \quad (6)$$

III. 現場への適用

1. 建築技術性能の取得

これまでに行われた実験により、硬さと圧縮強度が比例関係にあること、含水状態の補正を簡易に行う手法を確立できたことから、現場への実適用を進めている。また、施主や監理者に対して本技術適用の許可を得やすくするため、本技術の妥当性を第三者機関に証明してもらうこととし、日本建築総合試験所の建築技術性能証明（第 17-01 号「UCI 法を用いたコンクリートの強度物性評価システム」）を取得した。本証明では、実験結果などから実部材に適用した際の 95%信頼限界は±10%程度とされている。これは検量線の把握が容易なためであり、反発度法に比べ高精度な測定手法であるとされている。性能証明の取得により、非破壊のコンクリート強度試験として反発度法、超音波法に加えて、UCI 強度推定法を選択することが可能となっている。

2. 従来技術との比較

従来技術である反発度法や超音波法との違いについて、以下に述べる。反発度法も超音波法も、コンクリートの弾性係数を推定することにより、間接的に圧縮強度を推定する技術であるが、弾性係数と圧縮強度は比例関係にはないため、ある程度の誤差が生じるのは避けられない。

一方で UCI 強度推定法は、硬さから圧縮強度を推定する手法である。UCI 強度推定法は非破壊に分類しているが、実際には目に見えない程度の破壊試験を行う試験である。硬さは、荷重値を破壊された面積（圧痕面積）で除した値であり、実

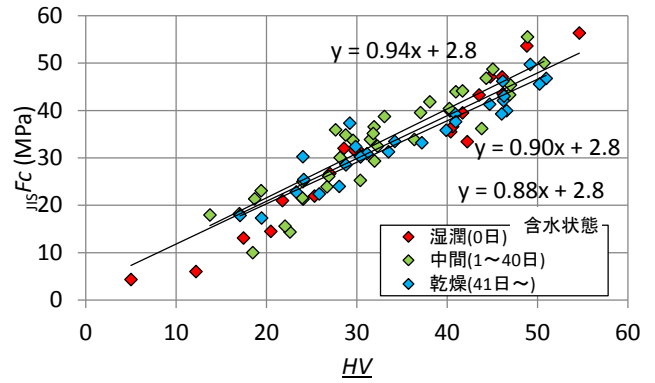


Fig.8 含水状態補正後の HV と $\mu_{IS}Fc$ の相関 (Relation between HV and $\mu_{IS}Fc$)

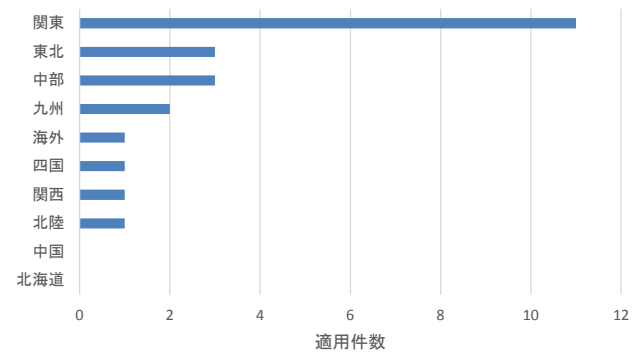


Fig.9 地域別件数 (Number of Application in Each Region)

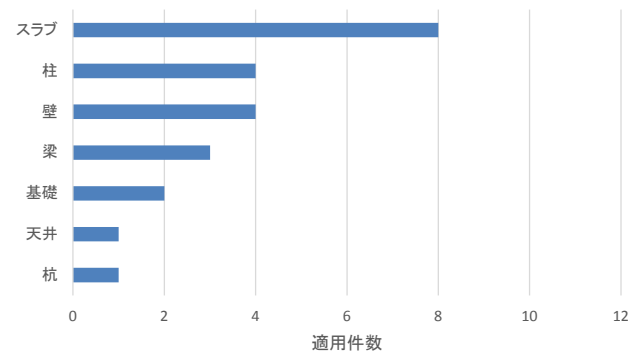


Fig.10 部材別件数 (Number of Application for Each Member)

験結果から圧縮強度と比例することが確認されている。すなわち、UCI 強度推定法は、圧縮強度を直接測定している手法に近く、従来の非破壊試験に比べ精度を高めることが比較的容易となっている。

3. 適用状況

現在までに現場への適用件数は 23 件となっており、実績は積みあがってきている。これまでの適用状況を、目的、地域、部材別に以下にまとめる。

測定の目的は、建て替えや補修、維持管理のための調査を目的としたものが 10 件、雨叩きや打ち継ぎ不良などの強度不足箇所の特定を目的としたものが 13 件である。調査が目

的の場合の UCI 強度推定法のニーズとしては、建物を損傷させず非破壊で調査したい、コア調査を行う前に簡易に現状を把握したい、鉄筋などの関係でコアが採取できない、試験片が小さい、といったものがある。また、強度不足箇所の特定が目的の場合のニーズとしては、雨叩きなどで強度不足を生じている範囲を知りたい、強度の分布を知りたい、といったものがある。

地域別 (Fig.9) にみると、関東地方 11 件、東北および中部地方 3 件ずつ、九州地方 2 件、北陸、関西、四国、海外 1 件ずつとなっており、ほぼ全国で測定を行っている。

部材別 (Fig.10) にみると、スラブ 8 件、柱および壁 4 件ずつ、梁 3 件、基礎 2 件、天井および杭 1 件ずつである。コアは、構造部材を避けるために、養生条件のよくない雑壁などから採取することが多く、このことが強度を小さく推定する原因の一つとなっている。本手法は非破壊試験であることから、構造部材を直接測定することが可能である。

なお、本手法を適切に運用するためには、以下の条件を満足する必要がある。①測定作業は、測定実績のある人が行う。②原則として、硬さと圧縮強度の相関 (検量線) を把握するためのテストピースが必要。③測定面は平滑であること。平滑でない場合はグラインダなどにより研磨を行う。④仕上げ

材などは除去すること。

IV. まとめ

UCI 法を用いたコンクリート強度推定法について、本論文のまとめを以下に示す。

- ①簡便で精度が高い測定を可能とするために、圧縮強度推定式について含水状態による補正方法を提案した。
- ②試験方法について第三者機関の証明を取得し、現場での使い勝手が向上した。
- ③現場適用件数は 20 件を超え、様々な現場に対応できることを確認した。

参考文献

- 1) 稲葉洋平, 閑田徹志, 親本俊憲; UCI 法によるコンクリートの圧縮強度推定に関する基礎的研究, 日本建築学会関東支部研究報告集 I, No.83, 2013.3, pp.181-184.
- 2) 稲葉洋平, 市之瀬敏勝, 閑田徹志; UCI 法によるコンクリートの圧縮強度推定に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.80, No.710, 2015.4, pp.519-526.

Correction Method for the Water-Retaining Condition When Estimating the Strength of Concrete by the UCI Method

Yohei Inaba and Tetsushi Kanda

Estimating the strength of concrete by the UCI method is a non-destructive, precise, in-situ testing method that uses hardness, which is proportional to the compressive strength of concrete. This testing method may be superior to conventional methods such as the rebound hammer method or ultrasonic method. Research has shown that the estimated value is not precise due to the water-retaining condition of concrete.

This study investigated the influence of the water-retaining condition of concrete on the measurement by the UCI method, and suggests a correction method. This correction is useful for estimating the strength of concrete by the UCI method on site and verifying performance by third-party organizations. Currently, the UCI method for measuring concrete strength is used at over 20 sites.