

コンクリート受入検査時の強度推定

Estimation of Strength during Acceptance Testing of Ready Mixed Concrete

親 本 俊 憲 里 山 公 治 鈴 木 勝 也¹⁾

要 約

近年、東南アジア市場の重要性は高まりつつあるが、コンクリート工事に関しては、骨材が露天保管されているなどの理由から単位水量の変動が大きい可能性があり、また、一般に管理技術者の品質管理レベルの差が大きいという課題がある。本稿では、現場でのコンクリートの受入検査時に、コンクリートの電気伝導率を測定することで、迅速にコンクリート強度の推定を行う手法を提案した。室内実験の結果から、提案した手法の推定精度は対象国や使用する材料の違いなどに関わらず、おおむね $5\sim 6\text{N/mm}^2$ の範囲に収まることを確認した。また、東南アジアの実現場での試行結果から、受入検査時の推定値は実測値 $\pm 13.4\text{N/mm}^2$ の範囲に分布しており、本手法は調合管理強度から大きく外れる強度のコンクリートをスクリーニングする目的での利用に適すると考えられた。

目 次

- I. はじめに
- II. 強度推定方法の概要
- III. 室内実験結果
- IV. 現場試適用結果
- V. おわりに

I. はじめに

近年、東南アジアは目覚ましい経済発展を続けており、当社においても同地域における工事の重要性が年々高まっている。一方、現地の生コン工場では、骨材が露天で保管されることが多い上に、骨材の表面水率の管理が適切に行われないうことがあり、コンクリートの単位水量が大きく変動する可能性がある。また、現地の管理技術者の技術レベルは様々であり、一般に日本と比べてコンクリートの品質管理レベルは低いといった課題もある。これらのことはコンクリートの強度不足など重大な品質事故につながる危険性を有しており、コンクリートの品質を受入検査時に確認する管理体制の整備と管理手法の構築を進める必要がある。

コンクリートの品質の中でも、圧縮強度は最も重要な管理

項目の一つであるが、コンクリートの受入れ時に圧縮強度を推定する方法は確立されていない。フレッシュコンクリートから圧縮強度を求める方法としては、例えば、急結剤を用いて急速にセメントの水和を進ませたのち圧縮強度試験に供する方法がある¹⁾。しかし、この方法を受入検査時に実施するには、硬化までの時間がかかりすぎるという問題があると同時に、圧縮強度試験機を現場に用意する必要がある。このほかに、コンクリートの水セメント比を単位容積質量と空気量から推定する方法²⁾³⁾もあるが、単位セメント量は調合設計どおりに用いられていることが前提であり、単位セメント量の変動した場合には推定が困難である。コンクリートの電気抵抗から水セメント比を推定する方法も提案されている⁴⁾が、限られた室内実験の結果しかなく、実工事での適用性は不明である。

本研究では、コンクリートの受入検査時に誰もが簡単に使用できる機器を用いてコンクリートの電気伝導率を測定することで、迅速にコンクリート強度の推定を行う技術を開発した。本稿では、強度推定方法の概要と室内実験を通じた精度の確認、および東南アジアでのコンクリート工事に試適用した結果について述べる。

1) 東北支店 Tohoku Branch

キーワード : コンクリート, 受入検査, 電気伝導率, 圧縮強度推定, 東南アジア

Keywords : concrete, acceptance test, electrical conductivity, estimation of compressive strength, Southeast Asia

II. 強度推定方法の概要

1. 調合推定方法

一般に、コンクリートの圧縮強度はセメント水比 (C/W) により決まることから、コンクリートの受入検査時に強度推定を行うためには、フレッシュコンクリートを使って単位セメント量と単位水量を推定する必要がある。そこで本研究では、フレッシュコンクリートの電気伝導率と単位容積質量を使い、単位セメント量や単位水量などの推定を行った。

電解液の電気伝導率 κ (S/m) は、イオン濃度 c (mol/m³) と、イオン 1 mol/m³ あたりの電気伝導率であるモル電気伝導率 Λ (S m²/mol) の積で表される⁵⁾。上記の関係は溶液中の現象を説明したものであるが、コンクリートの電気伝導率にも同様に適用できると仮定した。

今、コンクリートの電気伝導率を式1で表す。

$$EC = \alpha \cdot c \cdot \Lambda = f(C, W, M) \quad (1)$$

ここで、EC：コンクリートの電気伝導率 (S/m)、C：単位セメント量 (kg/m³)、W：単位水量 (kg/m³)、M：細・粗骨材に混和材を加えた単位容積質量 (kg/m³) を示す。 α はフレッシュコンクリート中でのイオンの「移動のしやすさ」を表す無次元定数と考え、イオン間の相互作用や溶液の粘性などのほか、骨材の単位容積質量や実積率など、使用する材料や調合に関係する値と考えた⁶⁾。なお、フレッシュコンクリート中にはNa⁺やK⁺、OH⁻など各種イオンが存在し、それぞれの濃度やモル電気伝導率は異なる⁷⁾が、本稿では簡単のため個別のイオンは考えず、1種類の仮想的なイオンとして扱うこととした。また、東南アジアで使用されるコンクリートにはフライアッシュが含まれる場合が多いが、フライアッシュはセメントに比べて反応が遅いため、受入検査時の電気伝導率には影響しないと仮定し、骨材の一種として扱うこととした。

C, W, M の値は、式1と以下に示す式2、式3の連立式を解くことにより求めた。

$$UW = W + C + M \quad (2)$$

$$1m^3 = W/d_W + C/d_C + M/d_M + Air \quad (3)$$

ここで、UW：コンクリートの単位容積質量 (kg/m³)、 d_x ：材料 x の密度 (g/cm³)、Air：空気量を示す。また、 $d_M = \sum d_i \cdot UW_i / UW$ (i ：細・粗骨材および混和材の種類を表す) で計算した。

2. 電気伝導率と各構成材料の単位容積質量の関係

本稿では、 α 、 c 、 Λ がそれぞれ M, C, W と相関が高い指標と仮定した。イオン濃度 c は W, M を一定とした場合は C と正の相関があり、 c が増加するとモル電気伝導率 Λ は減少することから、 Λ は C, M を一定とした場合は W と正の相

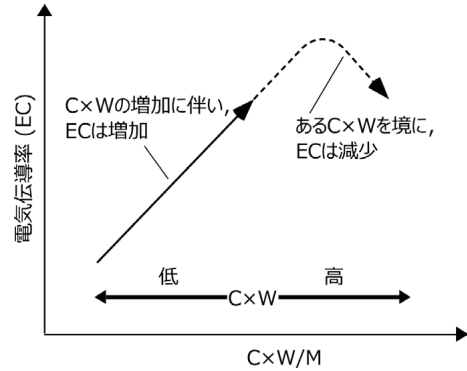


Fig.1 C, W, M と電気伝導率の関係
(Outline of Relationship between C, W, M and Electrical Conductivity)



Photo 1 電気伝導率の測定方法
(Measurement Method of Electrical Conductivity)

関があると考えた。定数 α は、イオンの移動の障害となる骨材や混和材の単位容積質量 M と負の相関があると考えた。

Fig.1 は C, W, M および EC の関係を示したものである。横軸は単位セメント量と単位水量の積から骨材・混和材の単位量を除いた値 (以下、CxW/M) で表した。M を一定とすると、普通強度のコンクリートのように、C が小さく W が大きい場合はイオンの移動は円滑であるため CxW と EC は比例関係にあると考えられる。一方、高強度コンクリートのように C が大きく W が小さい場合は c の増加に比べて Λ の減少が顕著となるため、やがて EC が減少に転じ、上に凸な曲線を描くことが予想される。なお、CxW/M と EC の関係式を理論的に構築することは現象が複雑なため困難であり、両者の関係は試練りなどに併せて実験的に求める必要がある。

3. 強度推定方法

フレッシュコンクリートの調合推定では、式1～式3に示すようにフライアッシュは受入検査時の電気伝導率には影響しないと考えたが、硬化後のコンクリートの圧縮強度の推定では結合材としてのフライアッシュの単位量も考慮する必要がある。一般に、フライアッシュなどの混和材を用いたコンクリートの圧縮強度は結合材水比 (B/W ; B は単位結合材量) の1次式で表されるが、フライアッシュの結合材とし

ての強度発現性能はポルトランドセメントと異なる。そこで、「セメント有効係数」を導入して圧縮強度に対するフライアッシュの貢献度を表す考え方が⁸⁾。本研究でも上記の考え方を参考に、式4に示すように圧縮強度の推定ではポルトランドセメントとフライアッシュを分けて考えた。

$$s_t = a_1 \cdot C/W + a_2 \cdot FA/W + b \quad (4)$$

ここで、 s_t は材齢 t における圧縮強度 (N/mm^2)、 FA はフライアッシュの単位容積質量 (kg/m^3) を表す。 a_1, a_2, b は圧縮強度試験で得られた s_t と、 C, FA, W の推定値の関係を直線近似したときの定数である。なお、式1~式3では C, W のみを推定しており、 FA は不明のままである。そこで、 FA は計画調合の値から C の推定値を引いた値とした。この時、単位セメント量の推定誤差より、計算上は FA が 0 未満となる場合があるが、この場合は FA を 0 と仮定した。

4. 電気伝導率の測定方法

フレッシュコンクリートの電気伝導率の測定は、土壌の含水率や電気伝導率を求める際に用いられる TDR (Time Domain Reflectometry) 法と呼ばれる方法により行った。TDR 法は、土壌中に埋設した金属ロッドに電気パルスを与え、その伝達速度から土壌の誘電率を求めるとともに、誘電率および電気パルスの入力波と土壌からの反射波の電圧比より電気伝導率を計算する方法である⁹⁾。本研究では、フレッシュコンクリートの電気伝導率の測定に、Photo 1 に示す IMKO 社製の SONO-WZ を使用した。フレッシュコンクリートをプラスチック製のバケツに入れ、SONO-WZ のロッドの先端をコンクリートに所定の深さまで差し込んだ後、電気伝導率の表示値が安定するまで静置して数値を読んだ。この作業を 5 回繰り返した後、5 回の平均値を電気伝導率として記録した。

5. 圧縮強度推定フロー

Fig.2 に本研究で提案した圧縮強度推定のフローを示す。現場で使用する生コン工場のコンクリートに対し、あらかじめ試練りなどに併せて各使用材料の単位容積質量とコンクリートの電気伝導率の関係を式1より求め、式2および式3を使い C, W, M の値を計算した。これらの値から式4を使い結合材水比と圧縮強度の関係式を導いた。

現場での受入検査では、コンクリートの電気伝導率と単位容積質量を測定して、あらかじめ求めた式1、式2および式3を使って C, W, M を推定し、セメント水比 (混和材を用いる場合は結合材水比) から式4の圧縮強度推定式を使って圧縮強度の推定を行った。

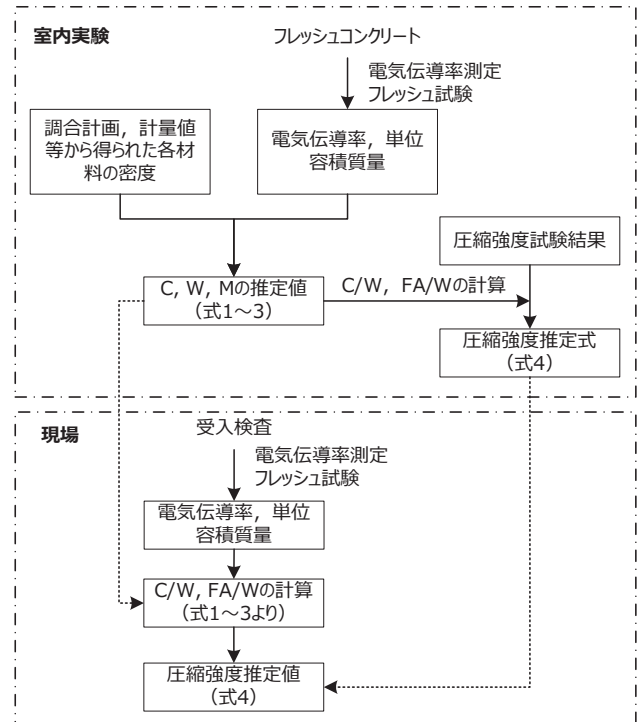


Fig.2 圧縮強度推定のフロー (Compressive Strength Estimation Flow)

Table 1 使用材料 (Materials)

対象国	記号	種別	メーカー・産地	密度 (g/cm^3)
インド	IU	普通ポルトランドセメント	Ultratech	3.15
		フライアッシュ	Ultratech	2.27
	IH	普通ポルトランドセメント	Ultratech	3.15
		フライアッシュ	Hindustan	2.15
		混和剤	減水剤 (ポリカルボン酸系)	-
インドネシア	NS	普通ポルトランドセメント	Suruya	3.08
		フライアッシュ	Suruya	2.65
	NP	普通ポルトランドセメント	Pioneer	3.11
		フライアッシュ	Pioneer	2.35
		混和剤	減水剤 (ナフレンスルホン酸系)	-
タイ	TL	普通ポルトランドセメント	C-PAC	3.13
		フライアッシュ	Lampang	2.43
	TR	普通ポルトランドセメント	Siam City Cement	3.03
		フライアッシュ	Ravong	2.16
		混和剤	減水剤 (ナフレンスルホン酸系)	-
共通 (日本)		細骨材	玄界灘産海砂	2.57
		粗骨材	古賀市谷山産砕石	2.72
		水	福岡市上水道水	1.00

Table 2 調合計画の例 (インドネシア) (Example of Mix Proportion using Indonesian Materials)

対象国	記号	結合材 銘柄	FA内割 置換 (%)	水結合 材比 (%)	単位量 (kg/m^3)					
					W	C	FA	S	G	
インドネシア	NS60-S20	C, FAとも Suruya	0	60	170	283	0	836	1069	
					50	170	340	0	788	1069
					45	170	378	0	756	1069
					60	160	214	53	867	1069
					50	160	256	64	822	1069
					45	160	285	71	791	1069
	NS60-S30	C, FAとも Suruya	30	60	160	187	80	864	1069	
					50	160	224	96	817	1069
					45	160	249	107	786	1069
					45	160	249	107	786	1069

水:W, 普通ポルトランドセメント:C, フライアッシュ:FA, 細骨材:S, 粗骨材:G

III. 室内実験結果

1. 実験要因・水準

本手法の主な適用先である東南アジアのコンクリートを

対象にした強度推定精度を確認するため、現地の普通ポルトランドセメントとフライアッシュを使用し、日本国内の試験室でコンクリートの練混ぜと電気伝導率などの測定および

圧縮強度試験を行った。実験には、東南アジア3カ国（インド、インドネシア、タイ）の普通ポルトランドセメント5銘柄とフライアッシュ6銘柄を使用した。水結合材比は45, 50, 60%の3水準、フライアッシュを用いる場合はセメントの内割置換とし、置換率は20, 30%とした。

2. 使用材料・調合

Table 1 に使用材料を、Table 2 に普通ポルトランドセメントとフライアッシュにインドネシアの材料を用いた場合の調合計画の例を示す。粗骨材、細骨材および上水道水は日本国内のものを用いた。スランプの目標値は12±2.5cmで、空気量は東南アジアでは一般的に行われる目標値を定めなかったこととした。

3. C, W, Mと電気伝導率の関係

Table 3 にコンクリートのフレッシュ試験と電気伝導率などの測定結果を、Fig.3 に室内実験の結果から得られたC, W, Mと電気伝導率の関係を示す。インドの混和材を用いた実験では、IUのデータ数が2つと少なかったため、IUとIHの実験結果をまとめてIとして示した。実験に用いたコンクリートの結合材水比の範囲は45~60%であり、この範囲では電気伝導率とC×W/Mの関係は直線近似されることを確認した。

4. 強度推定結果

Fig.4 に、Fig.3 の関係と式2、式3および式4を使って計算した材齢28日の圧縮強度の推定値を横軸に、実強度を縦軸に示す。Fig.4より、本研究で提案した手法を用いることで、対象国、フライアッシュの有無、水結合材比および圧縮強度に関わらず、推定値は実測値の95%信頼区間（全データのうち95%が含まれる範囲）で±5.2N/mm²の範囲に分布することが確認できた。室内実験では、使用された各材料の密度や単位量が調合計画どおりと考えることができるため、本稿のII章で述べた種々の仮定のもとでの圧縮強度の推定精度はおおむね5~6N/mm²といえる。

IV. 現場試適用結果

1. 試適用した現場および生コン工場の概要

本手法を、東南アジアの現場におけるコンクリート工事で試適用した。当該現場は熱帯気候に位置しており、H工場およびT工場の2つの生コン工場からレディーミクストコンクリートを購入した。H工場ではA社およびS社の2種類のセメントを、T工場ではS社のセメントを使用した。なお、セメント銘柄S社はH工場とT工場で共通である。両工場は現場からアジテータ車で道路状況にもよるが30~60分程度の位置にあり、骨材ヤードに屋根を設置するなど、比較的材料管理が行き届いた工場との印象を持った。

2. 使用材料・調合

H工場およびT工場を対象に、C×W/MとECの関係、および各材料の推定値と28日圧縮強度の関係を実験的に求め

Table 3 フレッシュ試験結果の例（インドネシア）
(Example of Fresh Test Results using Materials of Indonesia)

記号	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)	電気伝導率 (dS/m)	コンクリート温度 (°C)
NS60	12.0	1.8	2396	13.1	30.0
NS50	14.0	1.5	2421	14.1	30.4
NS45	13.0	1.8	2410	13.9	31.0
NS60-S20	10.5	1.5	2399	9.4	29.5
NS50-S20	13.0	1.5	2409	12.4	29.5
NS45-S20	14.5	1.2	2421	15.0	30.5
NS60-S30	14.0	0.7	2394	11.2	29.0
NS50-S30	15.0	0.9	2402	11.8	29.0
NS45-S30	14.0	0.8	2405	11.3	29.4

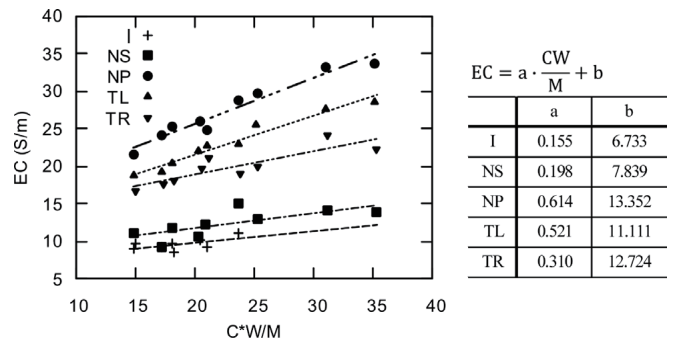


Fig.3 C, W, Mと電気伝導率の関係
(Relationship between C, W, and M and Electrical Conductivity)

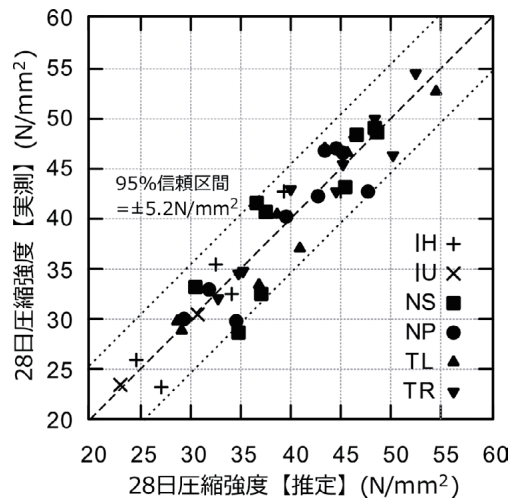


Fig.4 室内実験結果
(Results of Laboratory Experiments)

た。実験は、各工場に併設された試験室にて行い、練りミキサーを使った試し練りに併せて実施した。両工場の調合管理強度に相当するグレード別の調合計画と使用材料をTable 4に示す。当該現場では、圧縮強度用試験体を150mmの立方体により作製しており、推定値は立方体での圧縮強度を示している。なお、試適用に使われたコンクリートには、フライアッシュなどの混和材は使用されなかった。

3. C, W, M と EC の関係

Fig.5 に C×W/M と EC の関係を示す。G25, G40, G55 の順に横軸に示す C×W/M は大きくなるが、EC は G25 よりも G40 が大きくなる一方、G55 では G40 よりも小さくなる例が見られた。圧縮強度が高い低水結合材比のコンクリートでは、単位セメント量が大きくなり、逆に単位水量は小さくなるが、この場合はフレッシュコンクリート中のイオン濃度の上昇よりも、低水結合材比によるモル電気伝導率の低下の影響が顕著に表れたと考えられる。工場別に見ると、H 工場では、セメント銘柄が異なる場合でも C×W/M と EC は比較的近い関係にある。一方、H 工場と T 工場を比較すると、同じ S 社のセメントを使っても C×W/M と EC の関係は大きく異なることが確認できた。セメント銘柄の違いよりも骨材の種類や調合の違いのほうが EC に与える影響は大きいと予想される。

4. 現場試適用結果

Fig.6 に現場での強度推定の流れを示す。受入検査時には、フレッシュ試験と並行して電気伝導率の測定と圧縮強度の計算・確認を行っており、計算結果が出るまでには約 10 分程度を要した。なお、これらの作業は全て現地技術者により行われた。

Fig.7 に現場に納入されたコンクリートを使って 28 日圧縮強度を推定した結果を横軸に、実際の 28 日圧縮強度を縦軸に示す。試適用時には、Table 4 に示した HS のコンクリートは使用されなかった。Fig.7 は様々な部位に適用されたコンクリートの圧縮強度結果を集めたものであり、調合管理強度の範囲は 35~55N/mm² であった。推定値の 95%信頼区間を計算すると、実測値の±13.4N/mm² の範囲に分布しており、II の室内実験結果で得られた±5.2N/mm² に比べると 8.2N/mm² ほど分布が大きくなる結果となった。分布が大きくなった要因としては、注水から受入検査までの時間、温湿度環境、および同一産地でも採取場所の違いにより使用した骨材の単位容積質量などが変動したことが考えられる。これらの要因ごとに細かくデータを取得して強度推定に反映させることで推定精度を向上できる可能性も考えられるが、提案

した強度推定手法は、現段階では圧縮強度そのものを代替することは難しく、調合管理強度から大きく外れる強度のコンクリートを除外するスクリーニング目的での使用が適すると思われる。

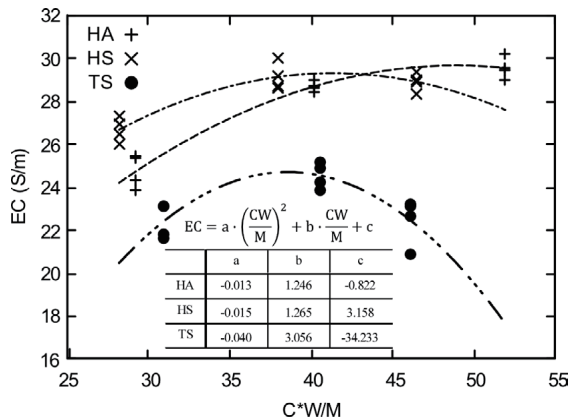


Fig.5 C, W, M と電気伝導率の関係 (Relationship between C, W, and M and Electrical Conductivity)

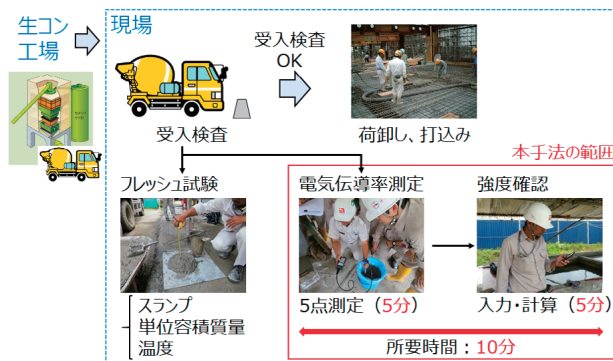


Fig.6 現場での強度推定の流れ (Estimation Flow of Compressive Strength)

Table 4 調合計画 (Mix Proportions)

生コン工場	セメント銘柄	記号	圧縮強度のグレード	単位量 (kg/m ³)*			
				W	C	S	G
H工場	A社	HA	G25	179	320	859	1097
			G40	175	430	836	1037
			G55	163	570	720	1070
	S社	HS	G25	179	310	868	1097
			G40	175	410	852	1037
			G55	170	500	760	1070
T工場	S社	TS	G25	165	350	865	1000
			G40	175	420	730	1085
			G55	160	510	690	1080

* 使用材料 (括弧内は密度 g/cm³)
 H社 C:OPC(3.15), S:川砂(2.60), G:砕石(2.75)
 T社 C:OPC(3.15), S:天然砂(2.60-2.62), G:砕石(2.60-2.62)

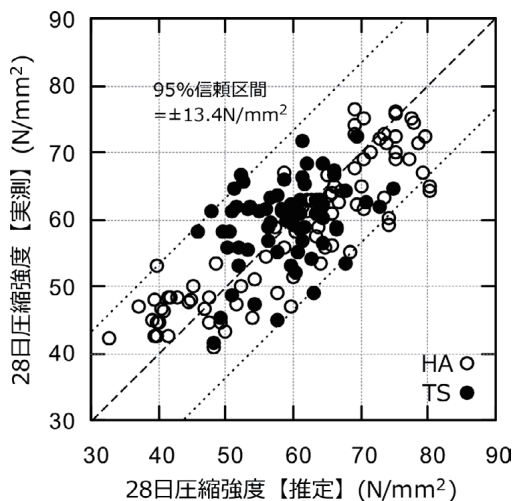


Fig.7 現場試適用結果 (Results of Field Trial Test)

V. おわりに

本稿では、主に東南アジアでのコンクリート工事を対象に、コンクリートの受入検査時に圧縮強度を推定する手法を提案するとともに、室内実験を通して、普通ポルトランドセメントおよびその一部をフライアッシュで置換したセメントを用いて推定精度の検証を行った。また、東南アジアでの実際のコンクリート工事を対象に本手法の推定精度を検証した。検証の結果、下記の事項が明らかとなった。

- a. インド、インドネシアおよびタイ現地の普通ポルトランドセメントおよびフライアッシュを用いた室内実験を通して、対象国、フライアッシュの有無、水結合材比および圧縮強度に関わらず、推定値は実測値 $\pm 5.2\text{N/mm}^2$ の範囲に分布することを確認した。提案した手法の推定精度は、本稿で検討した範囲内ではおおむね $5\sim 6\text{N/mm}^2$ になると考えられる。
- b. 東南アジアの現場におけるコンクリート工事で試適用を行い、コンクリートの調合基準強度 $35\sim 55\text{N/mm}^2$ では、推定値は実測値 $\pm 13.4\text{N/mm}^2$ の範囲に分布することを確認した。提案した推定手法の使用対象としては、圧縮強度の代替は現時点では困難で、調合管理強度にもとづくスクリーニング目的が適すると考えられた。
- c. セメント水比が小さい調合では、 $C\times W/M$ と電気伝導率は線形関係を示すが、セメント水比が大きい調合では、上に凸な二次曲線となることが確認された。モル電気伝導率の低下が主な原因と考えられる。

今後は、実際のコンクリート工事での適用によりデータの蓄積を進めるとともに、推定精度の向上に向けた検討を重ねる予定である。

参考文献

- 1) 池田尚治；コンクリート強度即時判定方法の実用化に関する研究，土木学会論文集，No.266，1977，pp.123-134.
- 2) 若松岳ほか；フレッシュコンクリートにおける水セメント比の簡易推定方法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，1997，pp.391-396.
- 3) 中村博之ほか；フレッシュコンクリートの空気量と単位容積質量の測定結果による配合推定方法の適用，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.2，2001，pp.325-330.
- 4) Mancio M. et al.；Instantaneous In-Situ Determination of Water-Cement Ratio of Fresh Concrete, ACI Materials Journal, Vol.107, No.6, 2010.11, pp.586-592.
- 5) 渡辺正ほか；基礎化学コース，電気化学，丸善，2001，pp.121-134.
- 6) 横関康祐ほか；水和反応と温度依存性を考慮したセメント系材料のイオン拡散係数予測モデル，土木学会論文集，Vol.725, No.58, 2003.2, pp.131-142.
- 7) 丸屋剛ほか；結合材の種類が細孔溶液中の各種イオン濃度に及ぼす影響に関する研究，大成建設技術研究所報，Vol.23, 1990.12, pp.191-200.
- 8) 小川由布子ほか；強度発現性状に対するフライアッシュの結合材としての性能評価法の提案，セメント・コンクリート論文集，Vol.64, No.1, 2010, pp.131-138.
- 9) 井上光弘；塩水を含んだ砂に対する誘電率水分計の測定精度の評価，水文・水資源学会誌，第11巻6号，1998，pp.555-564.

Estimation of Strength during Acceptance Testing of Ready Mixed Concrete

Toshinori Oyamoto, Koji Satoyama and Katsuya Suzuki¹⁾

Although the importance of the Southeast Asian market has been increasing in recent years, there are issues related to concrete work, such as the possibility of large fluctuations in unit water due to the open-air storage of aggregate, and generally large differences in the quality control level of engineers.

In this paper, a method for quickly estimating the strength of concrete is proposed that involves measuring the electrical conductivity of concrete at the time of an acceptance inspection at a site.

The results of laboratory experiments show that the accuracy of the proposed method is generally within the range of 5 to 6 N/mm^2 regardless of the country and materials used, and the results of in-situ trial in Southeast Asia show that the estimated values are distributed within $\pm 13.4 \text{ N/mm}^2$ of the measured values. The method was found to be suitable for screening purposes to exclude concrete with extremely low strength.