

論文 輝度計を用いたドライミックスコンクリートの含水量測定方法に関する研究

平間 昭信^{*1}・岩城 圭介^{*2}・築地 功^{*3}・矢島 哲司^{*4}

要旨：本研究は、乾式吹付け方式におけるドライミックスの含水量を輝度計により、リアルタイムにかつ、簡易に測定する方法について検討したものである。室内実験において、照度や測定距離などの測定条件を選定し、ドライミックスコンクリートの含水量と相対輝度との関係を得た。その後、検討した測定方法を実トンネルで試行し、その適用性について検証を行った。その結果、従来の測定方法である JIS A 1111「細骨材の表面水率測定方法」による測定値とほぼ同一の測定値が得られることを確認し、ドライミックスコンクリートの含水量測定方法として適用可能であることが示された。

キーワード：吹付けコンクリート，乾式吹付け工法，表面水率，輝度計

1. はじめに

1960年代に NATM とともに吹付けコンクリートが導入され、40 余年が経過している。吹付けコンクリートが導入されてから 10 年程度は乾式吹付け工法が主流であった。しかし、乾式吹付け方式は、ノズルマンがノズル近傍にて骨材表面水率や吹付け面の状態により水量調整を行うことから品質変動が大きいことや、粉じん、はね返りが多いことなどの理由から湿式吹付け方式に移行し、現在では、山岳トンネルにおける吹付け方式の 90%以上が湿式吹付け方式となっている¹⁾。

乾式吹付け方式については、上述した短所を有する反面、初期強度の発現が良好である、長距離圧送が可能である、機械・ホースの清掃が容易であり洗浄水を必要としないなどの長所を有している。また、近年では、粉じんやはね返りについても、水添加方法の改善や粉じん低減剤、液体急結剤の使用などにより改善されている。しかし、湿式吹付け方式では、骨材表面水率の補正は製造プラントで実施されており、ス

ランプ試験などによるフレッシュコンクリートの管理が可能であるのに対して、乾式吹付け方式については、骨材の表面水の補正方法などは導入当初のままであり、ノズルマンの技量に起因する品質変動については改善されていないのが実状である。

本研究は、施工位置近傍において、リアルタイムに骨材表面水率を測定し、添加水量を補正することにより、乾式吹付け方式における品質変動を改善できると考え、その測定方法として、輝度計を用いたドライミックスの含水量測定方法について検討したものである。

2. 輝度計を用いたドライミックスコンクリートの含水量測定方法²⁾

2.1 輝度と含水量の関係について

一般に粉体の物質は、粒子自体の色や形状により明るさが違うことが知られている。図 - 1 に示すように通常、粉体表面に光が当たると拡散反射が起こるが、本研究ではこれを相対輝度として測定した。粉体に水を加えると、一部の

*1 飛島建設（株） 防災 R&D センター技術研究所第三研究室 室長（正会員）

*2 飛島建設（株） 防災 R&D センター技術研究所第三研究室 主任研究員（正会員）

*3 飛島建設（株） 名古屋支店道公天生作業所 副所長

*4 芝浦工業大学 工学部建設系土木工学科 教授 工博（正会員）

粒子表面の水分で全反射して拡散反射の量が減少する。更に水分量が増加すると入射光が水分との界面で鏡面反射を起こし、これらの現象によって輝度の低下が生じると考えられている²⁾。

この現象に着目して、既往の研究³⁾では、細骨材とセメントとの「から練り」中に輝度を測定し、相対輝度と表面水に高い相関性を得られたことから、本練り時の水の投入前に細骨材の表面水を管理できる可能性を示している。

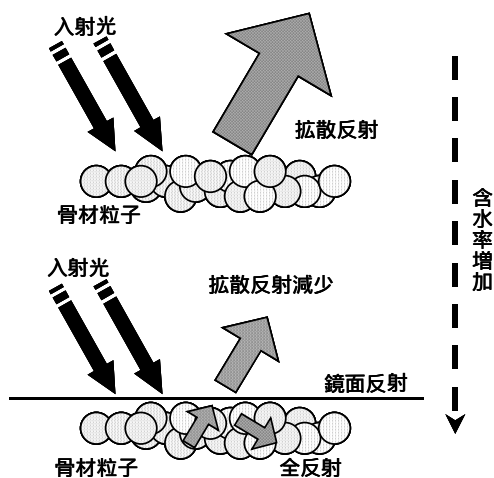


図 - 1 輝度低下の概念図

2.2 輝度計について

本研究で使用した輝度計は、市販されているものであり、その性能について表 - 1 に示す。なお、本研究での相対輝度とは、白色校正板の値を 100% として、それに対する試料の比率を示したものである。

表 - 1 輝度計の性能

項目	性能
測定角	1°
光学系	一眼レフ方式、対物レンズ f=85 mm
測定距離	∞ ~ 1,014 mm
最小測定径	14.4 mm
輝度測定範囲	FAST : 0.001 ~ 299,900 cd/m ² SLOW : 0.001 ~ 299,900 cd/m ²
測定精度	測定値の ± 2%
温度誤差	表示値の ± 3% (20 基準, 0 ~ 40)

3. 室内実験による試験方法

輝度計を用いたドライミックスの含水量測定方法を確立するために、室内実験を実施した。

3.1 実験概要

(1) 使用材料および配合

使用材料を表 - 2 に、配合を表 - 3 に示す。

表 - 2 使用材料

材料種別	記号	名称または産地、諸元
セメント	C	普通ポルトランドセメント、 密度 3.15 g/cm ³
細骨材	S	庄川産川砂、表乾密度 2.60 g/cm ³ 、 粗粒率 2.83、吸水率 1.49 %
粗骨材	G	庄川産川砂利、表乾密度 2.62 g/cm ³ Gmax 10mm、吸水率 1.04 %
水	W	水道水
繊維	F	ポリプロチレン繊維、 密度 0.91 g/cm ³ 、繊維長 32 mm

表 - 3 配合

W/C (%)	s/a (%)	繊維 混入率 (vol%)	単位量 (kg/m ³)			
			W	C	S	G
45	80	1.0	203	450	1277	322

(2) 輝度の測定方法

輝度の測定は、図 - 2 に示すような方法により、1 秒間隔で 60 秒間測定を行った。なお、測定ポイントに対して、外部からの光の影響を排除するために測定は暗室で実施した。

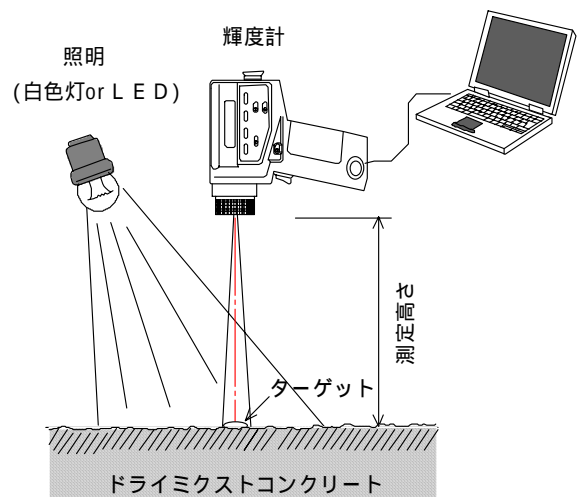


図 - 2 輝度の測定方法

(3) ドライミクストコンクリートの練混ぜ

練混ぜは恒温恒湿室（20℃，80%）において，50ℓ強制練りミキサを用い，セメント，細骨材および粗骨材を投入後 120 秒間練り混ぜた後に繊維を投入し，さらに 60 秒間練混ぜを行った。

3.2 測定条件に関する検討

ドライミクストコンクリートの含水量と相対輝度の関係を求めるに際し，測定条件による影響を把握するために実験を実施した。なお，この実験では，練り混ぜたドライミクストコンクリートを容器に 5 kg 採取して，相対輝度の測定を実施した。

(1) 測定距離の影響

使用した輝度計の測定距離は，表 - 1 に示したように，1,014 mm 以上（測定径 14.4mm）である。しかし，実施工においては，対象面との測定距離の変動や，その距離を確保できない場合が想定される。そこで，測定距離を 30 cm，60 cm，120 cm とし，測定距離の違いによる測定径の変化が相対輝度に及ぼす影響について検討した。

検討した表面水率の範囲においては，図 - 3 に示すように，測定距離の変化，すなわち，測定径が変化しても，ほぼ同様の相対輝度を示している。このことから，検討した測定距離の範囲においては，測定距離が相対輝度に及ぼす影響はないと判断し，現場適用で測定距離を今回の検討範囲 30 cm～120cm とすることとした。

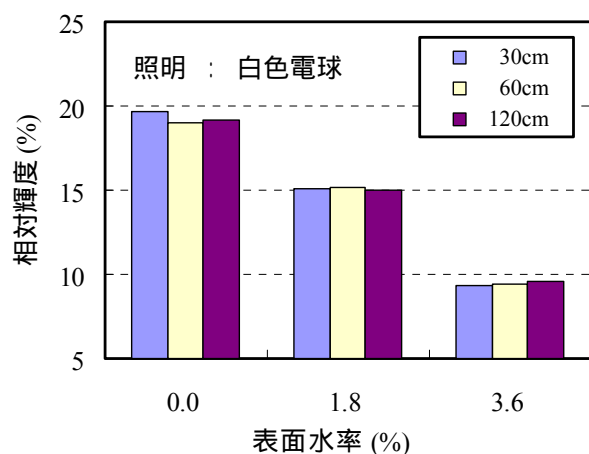


図 - 3 相対輝度に及ぼす測定距離の影響

(2) 照度の影響

測定点ポイントにおける照度が相対輝度に及ぼす影響を把握する目的で，光源として白色電球(150W)と白色 LED (Light Emitting Diode) を用いて，相対輝度の測定を行った。なお，測定距離は 30 cm，90 cm，120 cm とした。

図 - 4 に測定距離 30 cm の結果を示す。図に示すように，白色 LED，白色電球ともに同様な相対輝度を示した。検討した 90 cm，120 cm においても同様な結果であった。本研究における相対輝度は，白色校正板の値を 100%として，それに対する比率であることから，測定ポイントでの照度の影響が排除されたものと考えられる。なお，測定距離 30 cm において測定ポイントでの照度は白色 LED が 344 lx，白色電球が 1,792 lx であった。

この検討において，光源の違いによる照度の影響がないことが確認されたことから，安全性，耐久性に優れている LED を光源として適用することとした。

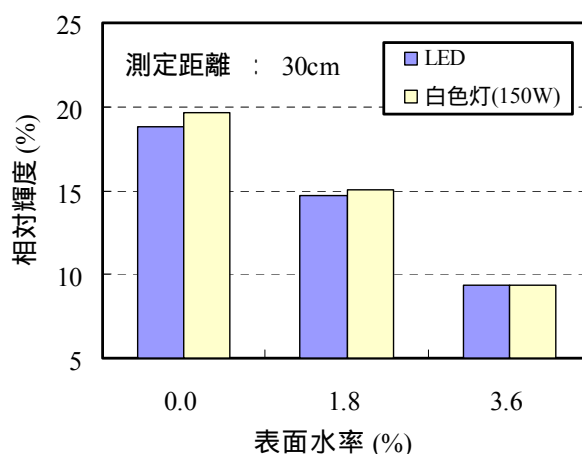


図 - 4 相対輝度に及ぼす照度の影響

3.3 施工要因に関する検討

3.2 の検討で選定した測定方法により，繊維の有無，経時変化を実験要因とし，ドライミクストコンクリートの表面水率と相対輝度の関係について検討を行った。なお，この実験での相対輝度の測定は練混ぜ中，ミキサ内のドライミクストコンクリートで行い，経時変化については

所定の練混ぜを行った後，容器に排出した試料について測定した。

(1) 適用範囲の検討

吹付けコンクリートでは，支保耐力の向上や剥落防止対策として，繊維を用いることがある。繊維混入による相対輝度への影響を把握する目的で，白色のポリプロピレン繊維を用いて，表面水率と相対輝度との関係について検討を行った。

表面水率と相対輝度の関係を図 - 5 に示す。図に示すように，繊維混入の有無に関係なく，表面水率 6 %程度までは相対輝度と表面水率には直線関係を示している。しかし，表面水率が 6 %を超えた場合では，表面水率が増加しても相対輝度がほとんど変化しない傾向であったことから，この試験方法では測定可能な表面水率の範囲があることも明らかとなった。

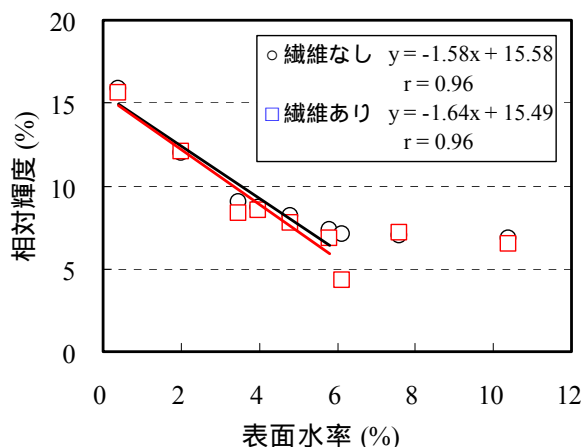


図 - 5 表面水率と相対輝度の関係
(繊維の有無)

(2) 経時変化

乾式吹付け工法は，湿式吹付け方式に比べて，長時間の練り置きが可能である特徴があるため，骨材の表面水の程度にもよるが，2 時間程度までの練り置きが想定される¹⁾。ドライミクストコンクリートは，セメントと表面水を有した骨材を混合したものであることから，表面水の程度によっては，セメントに吸水される程度が異なり，相対輝度への影響が予想される。そこで，経過時間を実験要因として，練混ぜから 2 時間まで

の相対輝度の経時変化について検討した。

各経過時間における表面水率と相対輝度の関係を図 - 6 に示す。図に示すように，いずれの表面水率においても，経過時間が相対輝度に及ぼす影響については，認められない結果であり，経過時間によるドライミクストコンクリートの相対輝度は，ほとんど変化しないことを確認した。なお，図中の近似式は，経過時間 120 分における表面水率 6%以下について求めたものである。

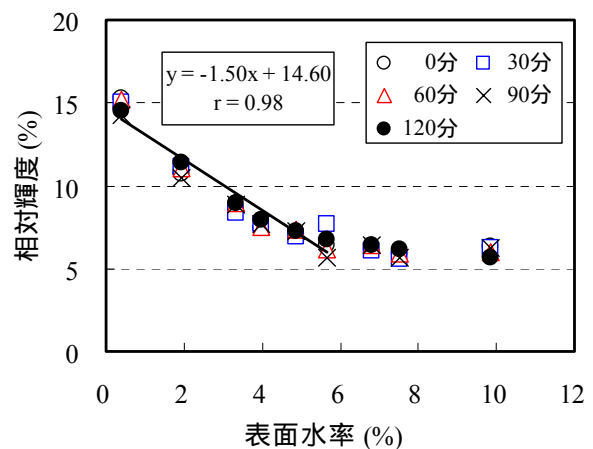


図 - 6 表面水率と相対輝度の関係 (経時変化)

4. 飛驒トンネル避難坑での適用性検討

本手法の実用化に向けた検討を行う目的で，乾式吹付け方式を適用していた飛驒トンネル避難坑において，実施工での測定を行った。

4.1 概要

(1) 使用材料

水以外 (坑内湧水) の使用材料は，表 - 1 に示した材料と同様である。

(2) 輝度の測定方法

測定は材料供給のベルトコンベア上で行うこととし，測定ポイントに照明以外の光を遮断するために暗室 (写真 - 1 参照) を作り，測定距離を 45 cm とし，光源に白色 LED (写真 - 2 参照) を用いた条件下で実施した。なお，測定間隔は 5 秒毎に 1 回の連続測定とした。

測定した相対輝度から表面水率への換算は，練混ぜから吹付け終了までに約 1.5 時間を要し

たことから，図 - 6 に示した換算式を用いた。
 なお，細骨材の表面水率は，併せて，JIS A 1111
 「細骨材の表面水率試験方法」により測定した。



写真 - 1 現場での測定状況



写真 - 2 暗室内の LED による照射光

4.2 現場適用性の検討

図 - 7 は，8 車（1 車 3.6 m^3 ）を連続施工時における 5 秒毎に相対輝度を測定し，表面水率に換算した結果を示したものである。JIS A 1111 により測定した 1 車目の表面水率は 4.3 % であり，輝度計による測定データは大きくばらついている結果となっている。測定データのばらつきは，ドライミクストコンクリートが途切れた時にベルトコンベア（黒色：表面水率としては高い値）を測定したことなどが影響したものと考えられる。そこで，図 - 8（一例として，1 車目）に示すように，測定データの分布を求めたところ正規分布であったことから，平均値 $\pm 1\sigma$ の範囲外のデータを排除することとした。今後は，測定

データの蓄積により，ばらつきの要因と考えられたベルトコンベアなどの測定データを排除するための「しきい値」を求めるなどの検討により，異常値を排除する予定である。

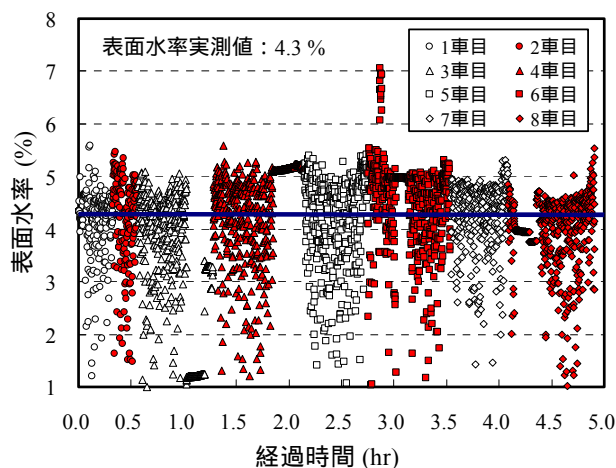


図 - 7 表面水率測定結果

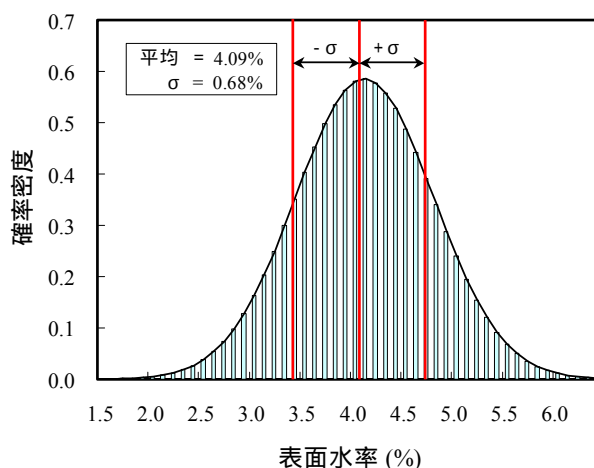


図 - 8 測定データの分布の一例（1 車目）

検討した輝度計を用いたドライミクストコンクリートの含水量測定方法は，施工位置近傍での測定により，リアルタイムに測定することを目的とした。このことから，3 分間のデータ（ $N=36$ ）について，平均値 $\pm 1\sigma$ の範囲外のデータを排除し平均値を求めた。その結果を図 - 9 に示す。図に示すように，輝度計による測定値は，JIS A 1111 により測定した 1 車目の表面水率 4.3 % と，ほぼ同等の値を示していることから，ドライミクストコンクリートの含水量測定方法としての適用が可能であると考えられる。

なお、3車目の1%近傍の測定値、4車目の5%近傍の測定値については、吹付け作業が中断していた時の値であり、繊維およびベルトコンベアを測定した値であると推察される。

写真 - 3 は、測定した表面水率から添加する水量を算出し、ノズルマンの近傍においてモニターにて表示している状況である。これにより、ノズルマンは、モニターの数値に基づき水量を調整することが可能であり、ノズルマンの技量に起因する品質変動を低減することが可能となると考えられる。

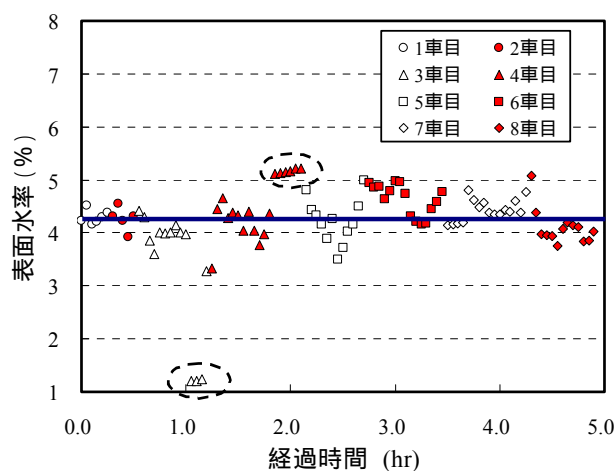


図 - 9 3 分間ごとの表面水率測定結果



写真 - 3 添加水量の表示状況

5. まとめ

今回の研究における知見を以下に示す。

- (1) 試料との測定距離、ターゲットでの照度が相対輝度に及ぼす影響がないことが確認された。このことは、本研究における相対輝度は、白色校正板の値を 100 % として、それに

対する比率であることから、これらの影響が排除されたものと考えられる。

- (2) 表面水率 6%程度までは相対輝度と表面水率には高い相関性が確認されたことから、表面水率測定の可能性が見出せた。
- (3) 繊維混入有無、および練混ぜ後からの経過時間は、ドライミクストコンクリートの相対輝度には影響しないことが確認された。
- (4) 表面水率の実測値と輝度計による測定値は概ね一致した結果であったことから、輝度計を用いたドライミクストコンクリートの含水量測定方法として適用可能であると考えられる。

今後は、多くの配合や骨材種類などについて検討を進めるとともに、検討した測定方法で得られる表面水率を適切に補正することによる吹付けコンクリートの品質変動への効果について把握する予定である。

謝辞：本研究の実験およびデータ解析では、NEXCO 中日本高速道路（株）清見工事事務所飛驒工事区をはじめとし、飛鳥建設・鉄建建設共同企業体、および、芝浦工業大学工学部建設系土木工学科の卒論生高木潤一氏、中島聖氏など、多くの方々にご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本トンネル技術協会：現場技術者のための吹付けコンクリート・ロックボルト，2005.3
- 2) 日本色彩学会：色彩工学ハンドブック [第 2 版]，東京大学出版会，pp.222-223，1984.4
- 3) 勝木太，佐々木英人，矢島哲司：輝度計を用いたフレッシュコンクリート中の水分量推定の試み，セメント・コンクリート，No.703，pp.12-18，2005.9