

◇論文◇

温度センサRFIDタグを用いた養生管理システムの開発と
目地切削時期判定への適用Development of a Concrete Curing Management System
Using Temperature-sensing RFID Tag and Its Application
to Optimal Determination of Timing of Early-entry Sawing住 吉 裕次郎*, 野 中 潔*,
岸 良 竜**, 池 田 茜***SUMIYOSHI, Yujiro*; NONAKA, Kiyoshi*;
KISHIRA, Ryo*; IKEDA, Akane***

要 旨

コンクリートの養生温度は強度発現に大きく影響するため、養生時のコンクリート温度測定を施工時の品質管理に活用する試みがこれまでなされてきた。一般にコンクリート温度の測定には熱電対などの有線センサが使用されるが、実工事では配線作業の負担等の理由により、有線センサによる測定は困難な場合が多い。そこで著者らは、配線を必要とせず近距離無線通信で温度履歴を計測・取得可能な温度センサ RFID タグを用いた養生管理システムを開発した。コンクリート版体中に本システムを適用し、打設直後からの温度測定結果を有線センサと比較した結果、温度センサ RFID タグは有線センサと同等の測温精度を有することを確認した。さらに、本システムをコンクリート舗装工における初期目地切削の実施時期判定に適用した結果、温度センサ RFID タグの測定結果から算出できる積算温度を用いることで、目地切削時期を判定することが可能となり、舗装工事現場における施工の省力化・効率化に貢献できると考えられた。

キーワード：温度センサ, RFIDタグ, 養生管理, 積算温度, コンクリート舗装, 初期目地切削

* 研究開発本部 新規技術研究所 建設マテリアルグループ
Construction Materials Group, New Technology Research Laboratory, Research & Development Division

** 研究開発本部 新規技術研究所 建設マテリアルグループ リーダー
Manager, Construction Materials Group, New Technology Research Laboratory, Research & Development Division

*** 日本道路株式会社 関西技術センター
Kansai Technology Center, THE NIPPON ROAD CO., LTD.

ABSTRACT

Since curing temperature significantly affects the strength development of concrete, monitoring of concrete temperature during curing has been widely studied as a useful means for quality control. Wired sensors such as thermocouples are commonly used to measure concrete temperature; however, measurement using wired sensors is often impractical due to the burden of wiring work.

To address this issue, a curing monitoring system has been developed using a temperature-sensing RFID tag to measure the temperature history of concrete through short range wireless communication without wiring.

In this study the system was applied to concrete slabs, and temperature measurements obtained immediately after casting were compared with those measured by wired sensors. The results showed that the temperature-sensing RFID tags provide temperature measurement accuracy equivalent to that of wired sensors. Furthermore, the system was also applied to the determination of the optimal timing of early-entry sawing in concrete pavement construction. The maturity calculated from the measured temperature history accurately captured the temperature evolution required for maturity evaluation and enabled rational decision-making for early-entry sawing timing. These findings indicate that the proposed system has strong potential to improve construction efficiency and enhance quality control, especially in paving works requiring strict timing management under practical field conditions without increasing installation complexity.

Keywords : *Temperature sensor, RFID tag, Curing management, Maturity, Concrete pavement, Early-entry sawing*

1. はじめに

従来から、建設現場における施工管理の省力化や工程の標準化を目的に、コンクリートの養生温度に基づき強度推定を行う試みが建築、土木の両分野で広く行われてきた。土木学会の「2023年制定コンクリート標準示方書(施工編)」では、積算温度を使用した寒中コンクリートの強度推定方法が示されている¹⁾。また、近年では、せき板を取り外す際の具体的な実施方法を定めた「せき板の取り外しに係わる積算温度を用いた管理要領(案)」²⁾が建築研究所より提案されている。

打込み後のコンクリート温度を経時的に取得する方法としては、対象部材に熱電対を埋設して直接測定する方法と、現場養生した供試体の温度測定により間接的に推定する方法がある。前者では、配線作業に手間を要することや、施工後も配線が版体に残存する点が課題である。一方、後者では、供試体の温度に基づく間接的な評価であり、対象部材そのものの温度を直接把握しているわけではないという課

題がある。

これらの課題に対し、近距離無線通信の一種であるRFID(Radio Frequency IDentification)技術を活用し、連続的に温度測定が可能で、かつ無線によるデータ取得を実現した温度センサ RFID タグ(以下、温度タグ)を用いた養生管理システムを開発した³⁾。本報では、本システムの概要を示すと同時に、コンクリート舗装工事の施工管理における初期目地切削時期の判定を対象として、本システムの適用性について検討した結果を報告する。

2. 温度タグの概要

2.1 システムの概要

開発した温度タグの概要をTable 1に、模式図をFig. 1に示す。温度タグは、外装がABS樹脂製で、温度測定を行うサーミスタ、シート状電池、RFIDで無線通信を行うためのアンテナが内蔵されている。また、金属と接触した場合の通信性能低下を防ぐため、電磁波吸収材を内蔵し、さらに表面が平滑でな

Table 1 Overview of the Temperature Sensor RFID Tag
(温度タグの概要)

Frequency Band	UHF
Dimensions	W100 × H60 × T4.7 mm
Temperature Range	-40~+85 °C
Data Logging Capacity	4,800 points (50 Days at 15-Minute Intervals)

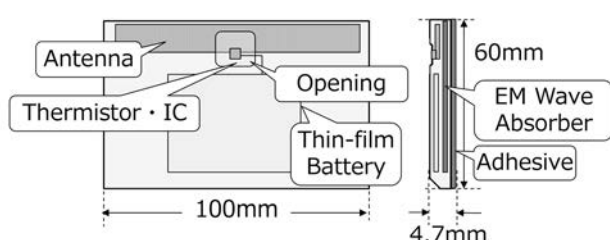


Fig.1 Schematic of the Temperature Sensor RFID Tag
(温度タグの模式図)

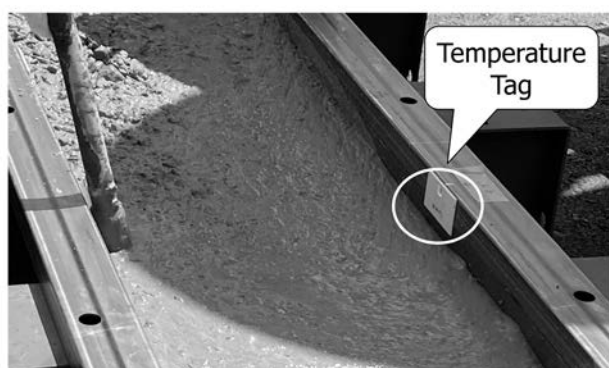


Fig.2 Mounting of the Temperature Tag
(温度タグ設置の様子)

い型枠にも強固に貼り付けるための接着材を有している。温度タグは、コンクリートの打込み前に、型枠側面の上端に合わせた位置に貼り付けて使用する (Fig. 2)。

本システムの機器構成を Fig. 3 に示す。温度タグはリーダライタと呼ばれる機器により制御され、一定間隔で温度を自動測定 (ロギング) する。温度は自動でメモリに蓄積され、リーダライタによる読取り時にまとめて専用アプリ内に取得される。取得した温度から中間指標となる積算温度または有効材齢を算出し、強度推定を行うことができる。

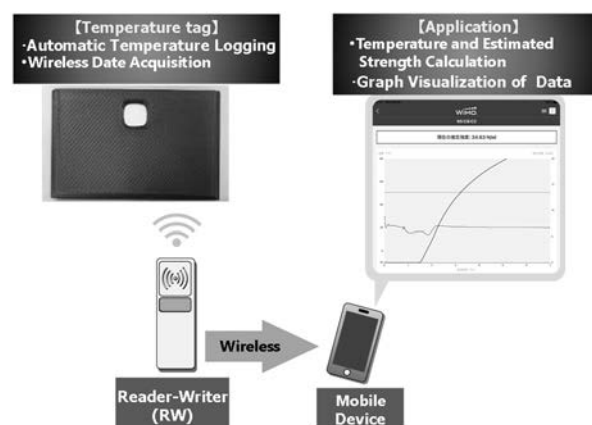


Fig.3 System Configuration
(本システムの機器構成)

2.2 温度タグの測温性能

2.2.1 室内試験による測定精度の検証

温度タグの測温精度を検証するため、恒温槽を用いた室内検証を実施した。検証の概要を Table 2 に示す。Fig. 4 に示すとおり恒温槽内にクラス 1 の T 型熱電対および温度タグ (10 枚) を設置し、測定間隔を 60 秒としてそれぞれ温度測定を行った。环境温度は、-15~55°C の範囲内で恒温槽内を昇降温させ、10°C 刻みの 8 段階で評価した。各センサの測定値は、

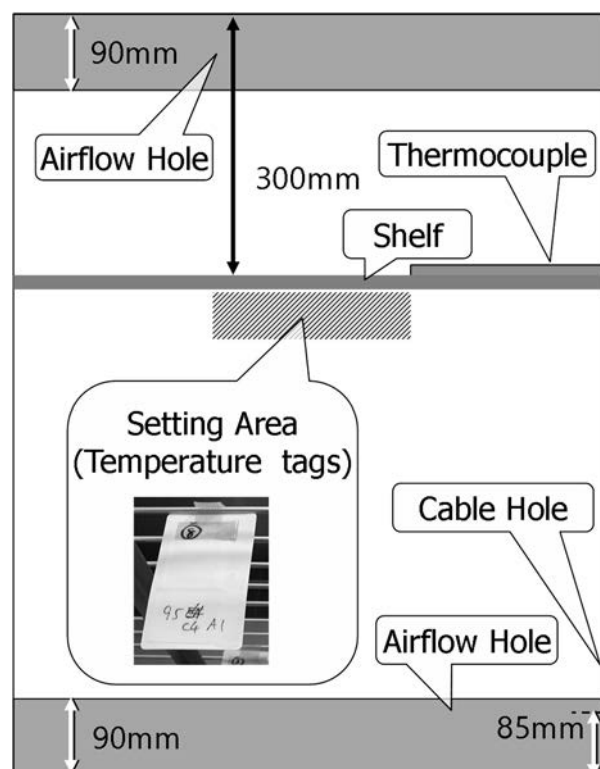


Fig.4 Setting of Indoor Performance Test
(センサ設置の様子)

Table 2 Overview of Indoor Performance Test (室内検証の概要)

Chamber Temperature	-15, -5, 5, 15, 25, 35, 45, 55 °C(8 Levels)
Measurement Duration	50 min at each temperature
Measurement interval	60 s
Measurement Conditions	Placed in a Chamber
Targets	・Thermocouple (Type T, Class 1) ・Temperature Tags 10 pcs
Resolution	・0.1 °C (Thermocouple) ・0.25 °C (Temperature Tag)

槽内の環境温度が安定したとみなせる設定温度に到達後 30 分経過時点から数えて 10 点の測定値を平均した値を用い、各温度における熱電対と温度タグの測温性能を比較した。

温度タグと熱電対の測定温度の関係を Fig. 5 に示す。-15～55℃の区間において温度タグと熱電対の測定値の差は最大 0.7℃にとどまった。

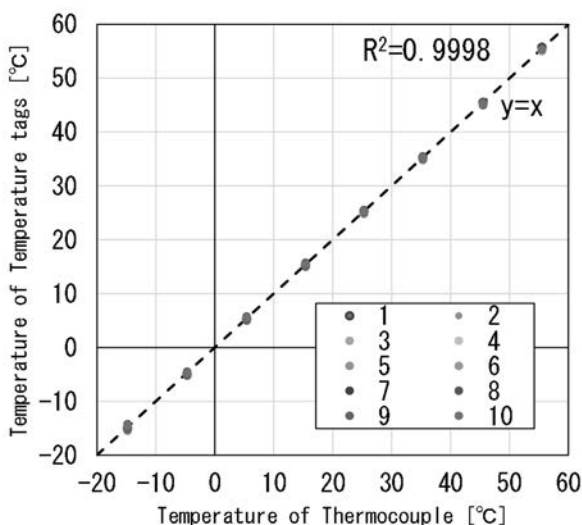


Fig.5 Relationship Between Thermocouple and Temperature Tags (熱電対と温度タグの測定温度の関係)

2.2.2 コンクリートの温度測定

2.2.2.1 検証概要

本検証では、温度タグによるコンクリート温度の測定精度を検証した。本実験の概要を Table 3 に示す。温度タグは、W3500×D5000×H250 mm のコンクリートの中心部に埋設深さ 20mm となるように埋設した。また比較のため、クラス 1 の T 型熱電対を温度タグの測温部に沿わせて設置し、ポータブルデータロガーを用いて測定した。測定間隔は各センサともに 15 分間隔とし、温度タグのロギングおよびデータロガーのインターバル測定を事前に開始した上で、コンクリートを打設した。なお、コンクリートは W/C=42.9 %の舗装コンクリートを用いた。打設完了後、材齢 24 時間まで湿潤状態でのシート養生を行った。測定は、標準期(平均気温 17.8℃) および冬期(平均気温 3.2℃) に実施した。

熱電対および温度タグは、それぞれ独立した時刻で温度データを取得しているため、熱電対の記録時間を基準とし、温度タグの測定結果を時間方向に線形補間することで、同一時刻における温度を推定した。

Table 3 Overview of In Concrete Performance Test (コンクリート中での検証の概要)

Dimensions	W3500×D5000×H250 mm
Sensor Spot	Center of Plate (Burial depth : 20 mm)
Measurement interval	15 min
Targets	・Thermocouple (Type T, Class 1) ・Temperature Tags 10 pcs
Measurement Term	24 hours after concrete casting.

2.2.2.2 検証結果

Fig. 6 および **Fig. 7** に、測定結果を示す。温度タグの測温開始点は設置した温度タグとコンクリートが接触した時刻とした。標準期および冬期ともに、打設後一定期間水和反応によりコンクリート温度が上昇し、その後放熱などの影響で徐々にコンクリート温度が低下した。温度タグの測定温度と熱電対との温度差の関係を **Fig. 8** に示す。測定の全期間にわたり、温度タグと熱電対の温度の乖離は概ね 1°C 未満であった。この結果から、温度タグは精度よくコンクリート温度を測定できると考えた。

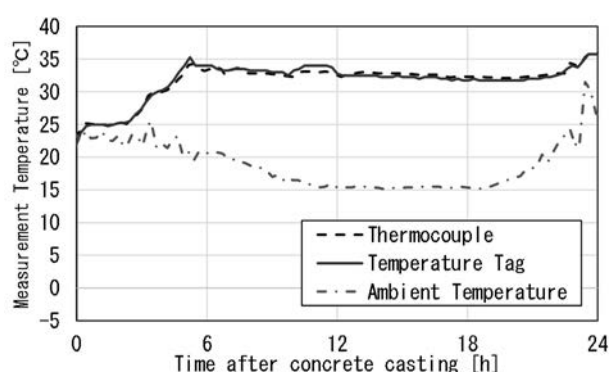


Fig. 6 Measurement Temperature (Normal Condition)
(測温結果 (標準期))

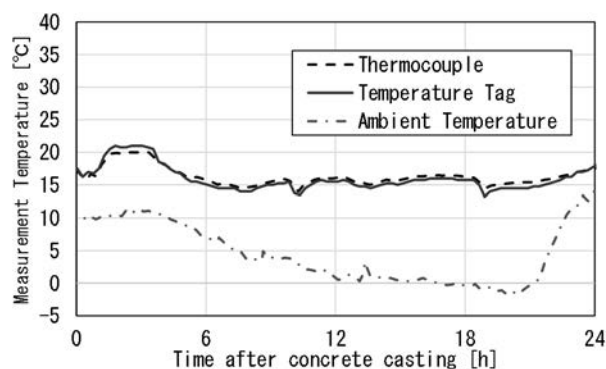


Fig. 7 Measurement Temperature (Cold Condition)
(測温結果 (冬期))

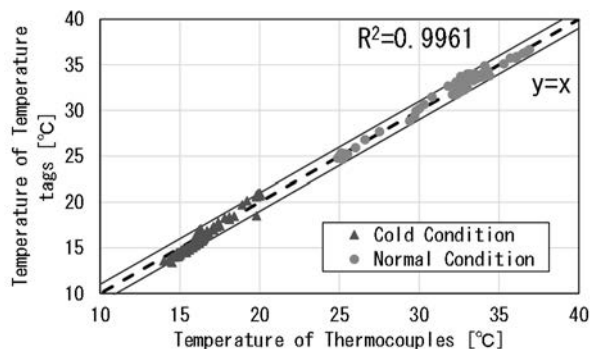


Fig. 8 Relationship Between Thermocouple and Temperature Tags
(熱電対と温度タグの測定温度の関係)

3. コンクリート舗装の目地切削時期の判定への適用

3.1 背景・目的

コンクリート舗装の施工では、コンクリートの乾燥収縮や温度変化に伴うひび割れの発生を防ぐために、コンクリート表面に一定間隔で横（横断方向）収縮目地を切削する。横収縮目地は、一般にひび割れ誘導を目的とした初期目地、目地材を充填するための整形を目的とした本目地の2段階があり、それぞれカット機械により切削される。このうち、初期目地切削作業の実施判断は、熟練の職人が気温、版体の温度感触などに基づいて経験的に判断しており、現場関係者、カット作業者は好適な切削時期に達するまで長時間現場で待機することが多かった。

初期目地切削時期について、推定圧縮強度と積算温度の間に相関があることが報告されている⁴⁾。この知見を踏まえ、コンクリート舗装工事に温度タグを適用し、打込みから脱型まで継続的に積算温度を測定し、初期目地切削に適した積算温度の範囲を評価した。

3.2 実施概要

3.2.1 工事概要

対象は、山口県内の国道のアスファルト舗装をコンクリート舗装に打換える工事である。使用したコンクリートの配合条件は、曲げ強度 $4.5\text{N}/\text{mm}^2$ 、スランプ 6.5cm 、粗骨材最大寸法 40mm で、普通ポルトランドセメントを使用した。打換え区間は施工延長 100m のうち、下り車線2車線（各車線幅 3.9m ）を対象とした。横収縮目地は各車線で約 10m ごとに8箇所設けられ、そのうち、打込み目地の2箇所を除く6箇所で初期目地切削を行った (**Fig. 9**)。コンクリートの打込みは目地位置で区切った区間ごとに交差点方面側から順にスライドしながら実施した。打込みから初期目地切削までの工程を **Fig. 10** に示す。

温度タグは各切削目地位置から縦断方向に 15cm ずらした位置に中心を合わせ、タグの上端を鋼製型枠の上端に合わせ、接着材で貼付けた。設置位置が型枠の上端であるため、温度タグは **Fig. 10** の③二層目のコンクリートと接触することとなる。目地の寸法を **Table 4** に示す。このうち、温度タグによる目地切削時期の判定の検討を行ったのは、横方向の初期目地である。

コンクリートの打込みは車線ごと2日間に分けて行い、両日ともに外気温は日中で $10\sim 15^{\circ}\text{C}$ 、夜間で

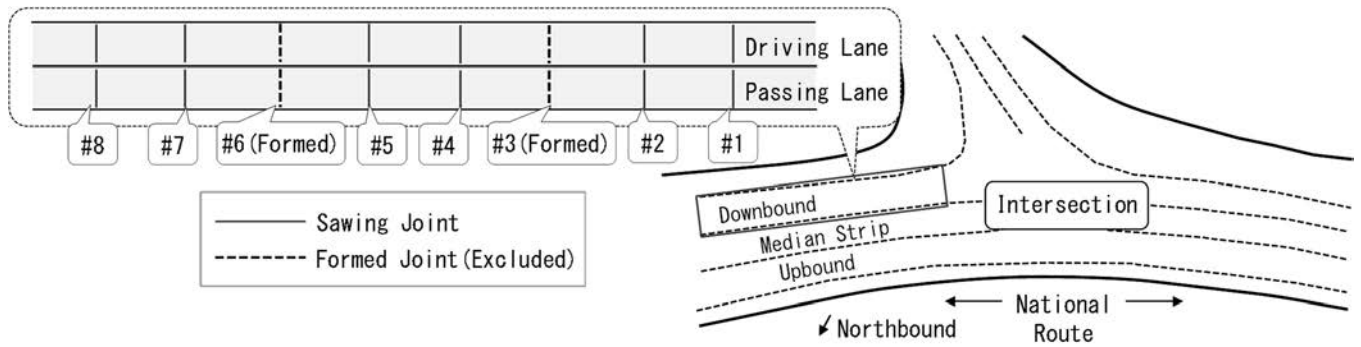


Fig.9 Construction Site Overview and Joint Cutting Locations
(現場概要と目地切削位置)

0～5℃程度であった。風速は、追越車線の打込み時で約 5 m/s, 走行車線の打込み時で約 3m/s であった。打込みの翌日に初期目地切削を行ったのち、材齢 3 日時点で脱型した。両車線の脱型終了後に、横目地（本目地）、縦目地の切削、目地材の充填を行った。

3.2.2 積算温度の計算と目地切削の判断

積算温度 M ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$) は式(1)により計算した。

$$M = \sum (T_i - (-10)) \Delta t \quad (1)$$

ここで、 T_i は温度タグに記録された温度 ($^{\circ}\text{C}$)、 Δt は1つ前のデータとの測定時刻の差 (h) である。「-10」は温度 T_i に対する温度の補正項で、寒中コンクリートの採暖養生期間の評価¹⁾など、積算温度の計算で一般的に用いられる。計算の起点は温度タグ設置位置周辺の打込みが完了した時刻とした。目地切削の判断については、予備検討⁵⁾から 400～450 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$ を切削時期の目安として、この範囲の前後で目地切削を行い、切削時の積算温度と目地切削の欠けの有無、作業性の比較を行った。

3.3 結果

3.3.1 温度履歴

Fig. 11 に追越車線-#8 における打込みから初期目地切削までの気温変化、コンクリート温度変化と積算温度の経時変化の結果を示す。右端でコンクリート温度および積算温度のグラフが途切れている位置が初期目地切削を行った時刻である。また、グラフの横軸の起点はそれぞれの温度タグ設置位置付近の打込みが完了した時間、初期目地切削までは、コンクリート温度は外気温より高く推移することがわかる。

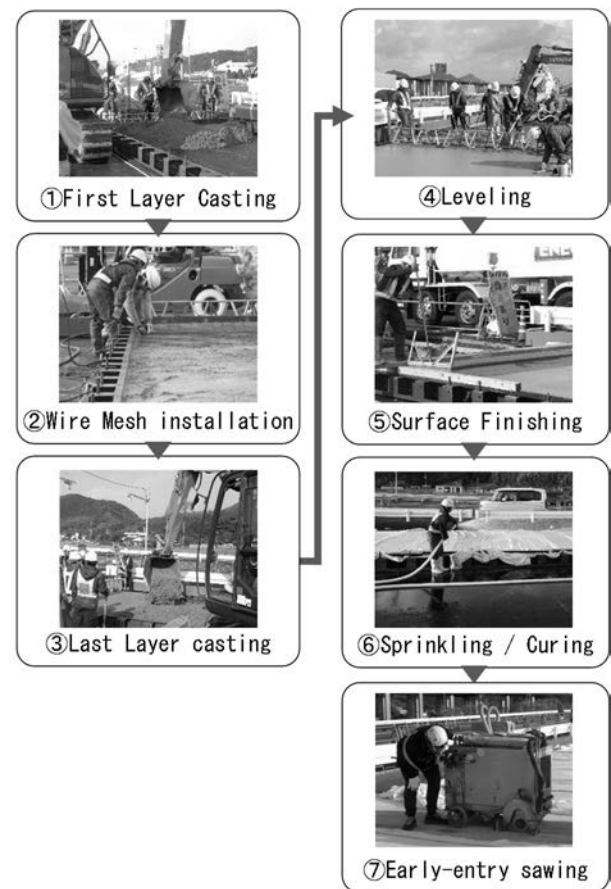


Fig.10 Construction Procedure
(施工工程)

Table 4 Type of Joint
(目地の寸法)

Type	Dimensions[mm]	
	Width	Depth
Transverse Joint(Initial)	6	70
Transverse Joint(Final)	10	70
Longitudinal Joint(Final)	10	40

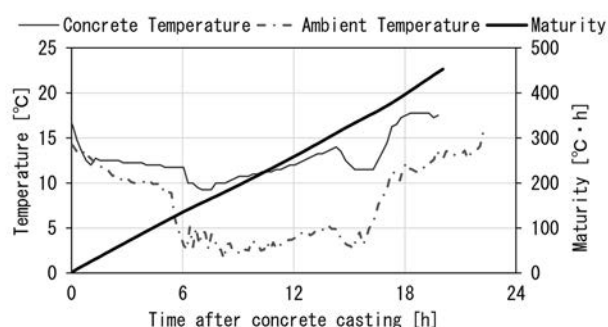


Fig.11 Measurement Temperature and Maturity(Passing-#8)
(温度履歴 追越車線-#8)

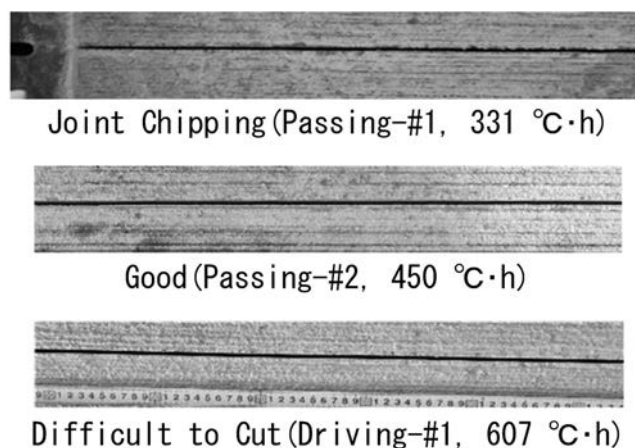


Fig.12 Typical Appearance After Early-entry sawing
(目地切削後の外観の例)

3.3.2 積算温度と目地切削結果の関係

Table 5に切削位置ごとの施工結果を, Fig. 12に初期目地切削時の目地外観の例を示す. 切削結果は, 「良好 (Good)」に加えて「目地欠けあり (Joint Chipping)」, 「少し目地欠けあり (Slight joint Chipping)」, 「目地切削が困難 (Difficult to Cut)」の4段階にて, 熟練の職人が現場で評価した. 「目地欠けあり」, 「少し目地欠けあり」は切削時期が早く, 目地切削作業に伴って目地に角欠けが生じたことを意味する. 特に, 欠け長さ (ひと続きの欠けの横断方向の長さ) が 10mm 以上の欠けが見られた場合は「目地欠けあり」, 10mm 未満の欠けが見られた場合は「少し目地欠けあり」とした. 一般的に, 角欠け

の程度は最終的な目地幅に収まる範囲であれば, 本目地切削時の整形により除去できるが, 角欠けがさらに大きくなると美観が損なわれたり, 目地材の充填後, 欠け部分が劣化因子の進入経路となる恐れがある. 「目地切削が困難」は, 角欠けはないものの版体の強度発現が目地切削に適した以上に進行しており, 目地切削の作業性が低下したことを意味する.

追越-#5 と走行-#7 は切削時の材齢はほぼ同じで, 打込み時刻も大きく離れていないが, 走行-#7 が良好な切削結果であったのに対し追越-#5 では切削のタイミングが早く, 少しの目地欠けが見られた. これは走行車線の打込み日の方が風が弱く, 水和熱の放熱が抑えられたことでコンクリートの硬化が進ん

Table 5 Operation time, Age, Maturity and Early-entry sawing Result
(作業時間, 材齢, 積算温度および目地切削結果)

Lane	Number	Transportation Time[min]	Age [h]	Maturity [°C·h]	Result
Passing	#1	64	12.1	331	Joint Chipping
	#2	68	18.6	450	Good
	#4	35	17.8	425	Joint Chipping
	#5	14	19.1	452	Slight Joint Chipping
	#7	20	20.2	484	Good
	#8	53	19.9	449	Slight Joint Chipping
Driving	#1	36	22.3	607	Difficult to Cut
	#2	52	21.6	557	Difficult to Cut
	#4	46	20.4	522	Good
	#5	46	20.2	512	Good
	#7	27	19.2	477	Good
	#8	31	18.5	467	Slight Joint Chipping

だためと考えられる。また、**Fig. 12** で示した追越-#2 と追越-#8 に関しては、同日中の打設で、ほぼ同じ積算温度での目地切削を行ったが、切削時の材齢は1時間以上異なっていた。午後に打設した追越-#8 は午前中に打設した追越-#2 よりも全体的にコンクリート温度が低く推移し、同じ積算温度に達するまでに長い時間を要したためである。加えて、追越-#8 の方が追越-#2 より材齢が長いにも関わらず、追越-#2 が良好な切削結果であったのに対し追越-#8 においては若干の欠けが見られた。このように、同時期、気温が同程度の条件での施工であっても、風速などの条件、あるいは昼夜の温度差などによって目地ごとにコンクリートの硬化の程度には差が生じ、例えば材齢を目地切削時期の一元的な指標として扱うことは難しい。

これを踏まえ、**Fig. 13** に、**Table 5** から積算温度と目地切削結果を抜粋して図示した。積算温度と目地切削結果の間には明確な傾向が認められ、積算温度が $450^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ 未満の場合は切削時期が早いことによる角欠けが見られ、 $550^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ 以上の場合は切削時期が遅いことにより作業性が低下したと判定された。積算温度が概ね $450\sim 550^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ で切削すると、角欠けが少なくかつ作業性の低下も起こらず、最も良好に初期目地の切削を行うことができた。

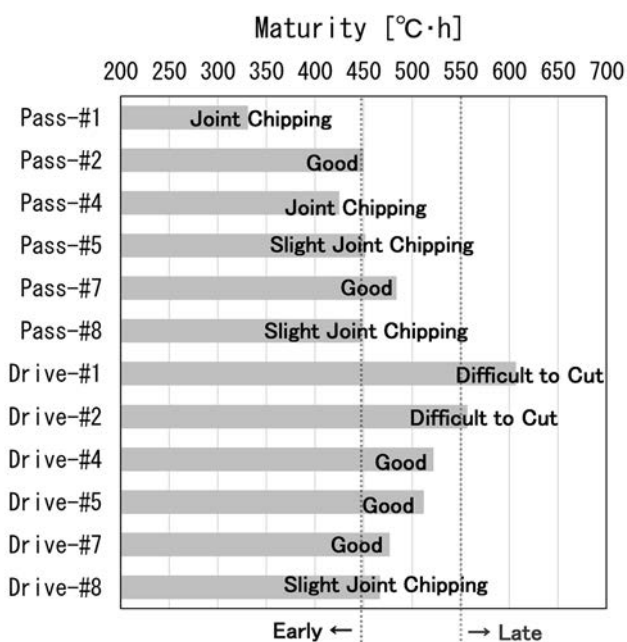


Fig.13 Relationship Between Maturity and Early-entry sawing Result
(積算温度と目地切削結果)

以上より、積算温度と目地切削結果の間には明確な傾向が認められた。本研究における積算温度は、型枠上面に設置した温度タグから求めたものである。一方、舗装コンクリート版内の温度は、版厚や型枠の材質、養生マットの種類など、境界条件の影響を受け、測定位置により温度が異なる。目地切削時期の判定という目的に対し、合理的な测温位置の検証を今後行う必要がある。また、目地切削に好適な積算温度域は、周辺の気象環境やコンクリート配合など、様々な因子に影響を受けると考えられる。今後、目地切削時期について積算温度で判定する際の信頼度を高めるために、実現場での検証によるデータの拡充や運用ノウハウの蓄積を行っていく必要があると考える。

3.3.3 温度タグの設置と撤去

今回、温度タグは、コンクリート版体への影響を最小とするために鋼製型枠の内側に貼り付けて使用した。**Fig. 14** に、温度タグ近傍の打込みから縦目地切削までの手順の模式図(平面図)を示す。温度タグは接着材を介して鋼製型枠に貼り付け、型枠とタグ表面に離型剤を塗布した。脱型時、温度タグは版体から容易に除去することができた。この時、版体側にはタグの厚み相当(4.7mm)の凹部が生じた

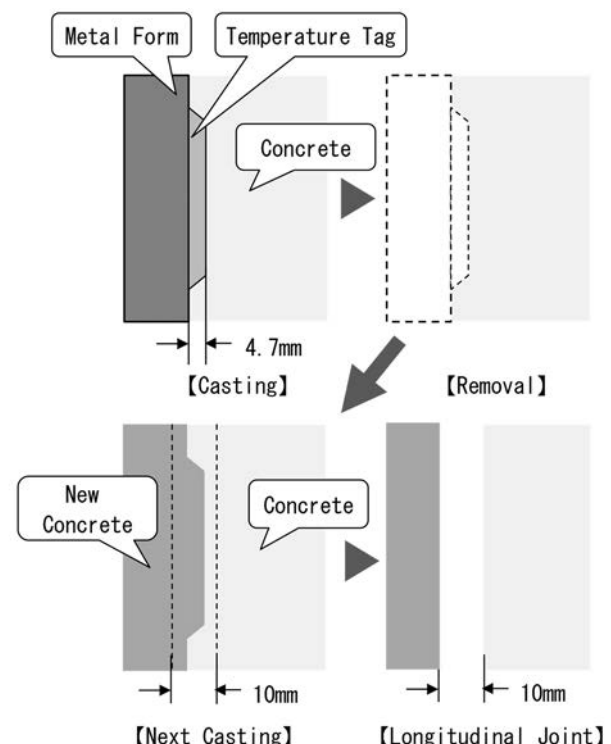


Fig.14 Setting of Temperature Tag for Metal Form
(温度タグの設置方法および撤去方法)

(Fig. 15) が、縦目地切削幅 10mm の半分以下であったため、縦目地の切削によって凹部は完全に削り取られた (Fig. 16)。したがって、本報の方法で温度タグを設置することによるコンクリート舗装の品質および出来形に及ぼす影響は小さいと考えられる。

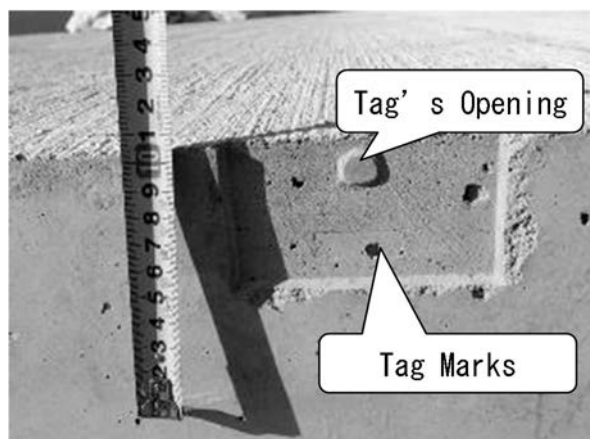


Fig.15 Tag Marks when Removal of Metal Form (Passing-#8)
(脱型時の温度タグ跡 (追越-#8))

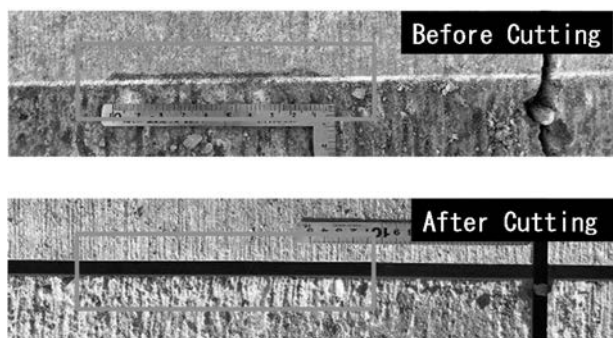


Fig.16 Removal of Tag Marks by Joint Cutting (Passing-#8)
(温度タグ跡の切削による削り取り (追越-#8))

4. ま と め

本報では、温度タグを用いたコンクリートの養生管理システムを開発した。室内検証およびコンクリートを用いた検証により、熱電対と比較し、温度タグの測温性能を確認した。また、本システムをコンクリート舗装打換え工事に適用し、鋼製型枠への貼付による設置・撤去方法も含めた初期目地切削時期の判定への適用性を検討した。得られた知見を以下に示す。

(1) 室内試験による測温精度の検証では、温度タグの測温結果は、熱電対の結果とおおむね一致した。

- (2) コンクリートを用いた測温精度の検証では、季節に関わらずコンクリートの養生時温度を安定して測定可能で、熱電対との温度差はおおよそ $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 未満であった。
- (3) 温度タグで測定した温度から計算した積算温度と初期目地の目地美観、切削作業の作業性の間には明確な傾向が認められた。
- (4) 本検討ではおおよそ $450\sim 550^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ の積算温度範囲が目地切削に好適だった。一方、好適な積算温度範囲は使用するコンクリート配合などの因子により変化する可能性があり、好適な範囲を事前に予測するには更なるデータの蓄積が必要である。
- (5) 鋼製型枠の内側にタグを貼り付けて使用することで、タグを脱型と共に除去することができた。タグの厚みは縦目地切削幅の半分以下であり、縦目地切削後によりタグ跡に由来する凹部は削り取られた。

本検討の結果、温度タグを用いた養生管理システムをコンクリート舗装工事に適用することで、そこから計算される積算温度を好適な目地切削作業の指標として活用できると考えられた。今後、本システムの実用化に向け、実現場での有効性検証や高精度化のためのデータ蓄積を行う。

参 考 文 献

- 1) 土木学会. 2023 年制定コンクリート標準示方書 [施工編]. 2023, p. 143-144
- 2) 棚野博之, 鹿毛忠継, 宮内博之ほか. 型わくの取り外しに関する管理基準の検討“第Ⅱ編 せき板の取り外しに係わる積算温度を用いた管理要領(案)”. 建築研究資料. 2016, (168), p. 234-238.
- 3) 野中 潔, 江里口 玲, 梅津基宏ほか. 温度センサ付RFIDタグを活用したコンクリート内部温度の非接触計測および養生状況の評価. 土木学会年次学術講演会講演概要集. 2022, 77, eVI-479.
- 4) 常松直志, 中原大磯, 加藤 学. コンクリート舗装の初期硬化特性と目地切削時期の関係について. 舗装. 2016, 51(9), p. 19-22.
- 5) 住吉裕次郎, 星 健太, 小池耕太郎ほか. 温度センサ付きRFIDタグを用いたコンクリート舗装における目地切削時期の判定. 土木学会年次学術講演会講演概要集. 2023, 78, eVI-106.