

圧縮および曲げ強度を 積算温度で 推定する実験 の最終報告

～ 1DAY PAVE による Maturity 則の検証～

里川 学 | Satokawa Manabu
信楽生コン

1. 経緯・概要

早期交通開放型コンクリート舗装（1DAY PAVE）が世に出て10年余り、研究開発期間をあわせると15年程が経過して新技術情報提供システム（NETIS）にも登録されているが、滋賀県内ではほとんど普及していないのが現状であり、県道におけるコンクリート舗装の割合も1%程度と非常に少ない。この認知度の低い技術を設計に組み込んでもらうことは容易ではない。こうした現状を認識したうえで、舗装分野に参入すべく1DAY PAVEをテーマに取り挙げた。アスファルトに対抗して1DAY PAVEを普及させるためには交通開放強度（3.5N/m²）発現時期を明確にする必要があると考え、交通開放時期をピンポイント

に探ることを目的とした積算温度と圧縮及び曲げ強度の相関性を検証する室内実験を実施した。その結果、酷暑期を除いた標準期、酷暑期および冬期において供試体の圧縮及び曲げ強度はMaturity則に従うことが検証でき、供試体の受ける積算温度で1DAY PAVEの曲げ強度を推定することが可能となった。また、構造体（舗装版）においてもMaturity則が適用できるか実施工による検証実験を行った。

2. コンクリート配合の検討と 練混ぜ時間の決定

室内実験及び最終実験を行った信楽生コンは、高速道路会社が発注する新名神高速道路工事においてW/C：

表-1 コンクリート配合

目標 スランブ (cm)	目標 空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)					
				W	C	S1 (山砂)	S2* (砕砂)	G1 (1505)	G2 (2010)
18 ± 2.5	4.5 ± 1.5	41.0	47.0	165	402	559	250	423	517
		38.0	46.1	165	434	540	241	423	517
		35.0	45.2	165	471	520	232	423	517
		32.0	43.8	165	516	493	220	423	517

* 石灰砕砂

練混ぜ方法：1/2S+C+1/2S → 空練り 15s → W+Ad. → 90s → G → 120s → 排出

ミキサ：可変式強制練りミキサ水平2軸形（公称 60L、50L 練）

試験項目：スランブ、空気量、コンクリート温度、環境温度履歴、模擬体温度履歴、供試体温度履歴、曲げ強度（10 × 10 × 40cm）、圧縮強度（10 φ × 20cm）

35%, 早強ポルトランドセメント, 高性能AE減水剤の配合実績があることに加え, 1 DAY PAVEがW/C:35%を中心に施工されていることから, 標準配合をW/C:35%とし, 酷暑期及び酷寒期を考慮してW/C:32%, W/C:38%およびW/C:41%の4配合を準備して実験に備えた。表-1にコンクリート配合と練混ぜ方法, 実験で使ったミキサおよび試験項目を示す。

3. 1 DAY PAVEの室内実験

3.1 実験概要

1 DAY PAVEはW/Cが小さく, 早強ポルトランドセメントを使用することにより水合が早い。温度上昇が早く発熱量の大きいコンクリートで曲げ強度を時間毎に追跡することで, その特性を的確に捉えることができると考えた。水和反応と発熱量及び強度発現は一連の現象であり, 表-2に示す4シーズンに区分して開放強度の発現時間を求めた。

3.2 模擬体, 供試体および外気温の計測

積算温度を測定するため, 曲げ供試体(100×100×400mm)と模擬体(W550×D450×t200mm)の中心部に熱電対をセットしてコンクリート温度と外気温の計測を行った。これは信楽生コンが標準化したものであり, 下面には環境温度の影響を極力避ける目的で押し出し発泡ポリスチレン30mmを敷いた。また, 模擬体と供試体にはラッピングフィルムを二重に覆い, その上から養生シートを二重に被せた。実験は4シーズンで標準期, 冬期, 酷暑期(試験室内で温度調整), 最後に酷寒期とした。図-1にW/C:35%の標準期の温度履歴の一例を示す。模擬体の寸法は実際の舗装版とほぼ同じ厚さであり, 舗装版の温度履歴を模擬できていると思われる。

3.3 実験結果(曲げ強度と積算温度との関係)

開放強度をピンポイントで探ることを第一の目的とした。3.5N/mm²(以下開放強度)は酷寒期を除けば24時間以

表-2 各シーズンの試験区分

W/C (%)	酷暑期	標準期	冬期	酷寒期
32	-	○	○	○
35	○	○	○	○
38	○	○	○	○
41	○	-	-	-

内に発現すると予想した。したがって, 強度試験は夜中から早朝にかかることになった。曲げ強度と積算温度には関連性があり, 開放強度近辺では積算温度と曲げ強度に直線の相関関係があったため, 対数近似式ではなく直線近似式(一次回帰式)で表すことにした。図-2~5に各水セメント比における供試体の積算温度と曲げ強度の関係を示す。なお, 積算温度は式(1)より求めた。

$$M = \sum (\theta + 10) \cdot \Delta t \quad \dots\dots\dots \text{式(1)}$$

ここに

M: 積算温度(°C・h)

Δt: 時間(h)

θ: Δt時間中の温度(°C)

図より, 酷寒期を除いて積算温度と曲げ強度の関係

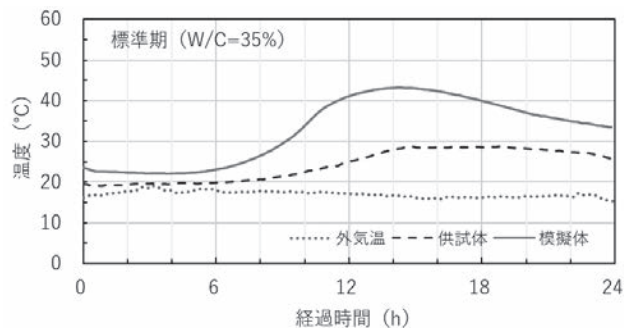


図-1 標準期の温度履歴(W/C:35%)

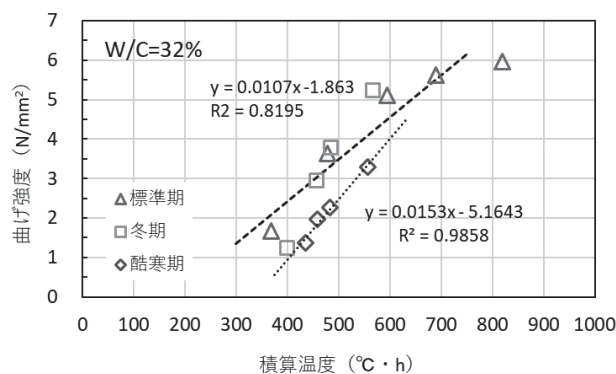


図-2 積算温度と曲げ強度(W/C=32%)

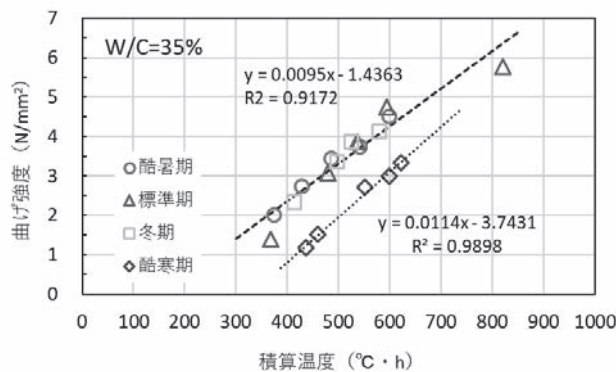


図-3 積算温度と曲げ強度(W/C=35%)

は、水セメント比毎に1本の直線近似式で表される。

図-6および図-7に各シーズンの水セメント比毎の直線近似式を示す。開放強度に到達する積算温度は、W/Cが小さいほど小さくなる傾向を示した。酷寒期だけが1

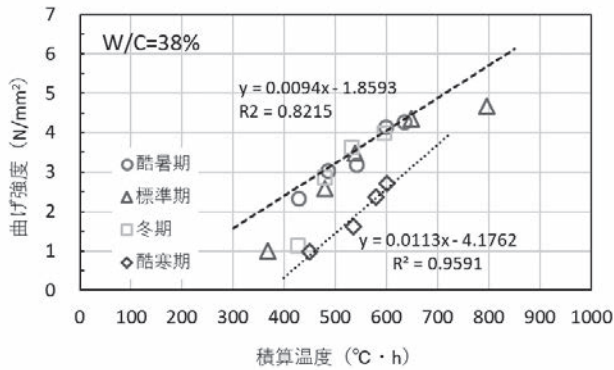


図-4 積算温度と曲げ強度 (W/C=38%)

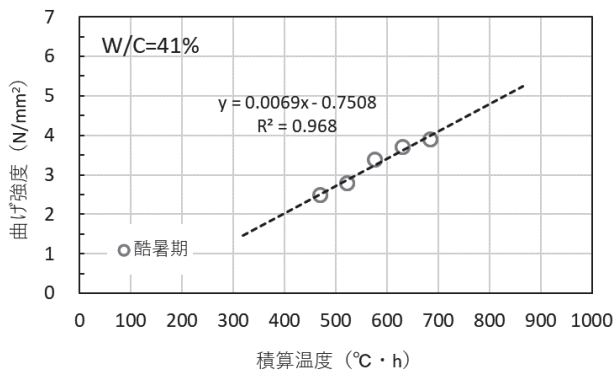


図-5 積算温度と曲げ強度 (W/C=41%)

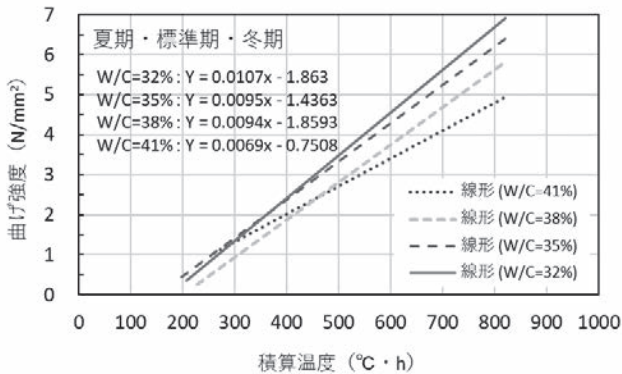


図-6 積算温度と曲げ強度 (3シーズン)

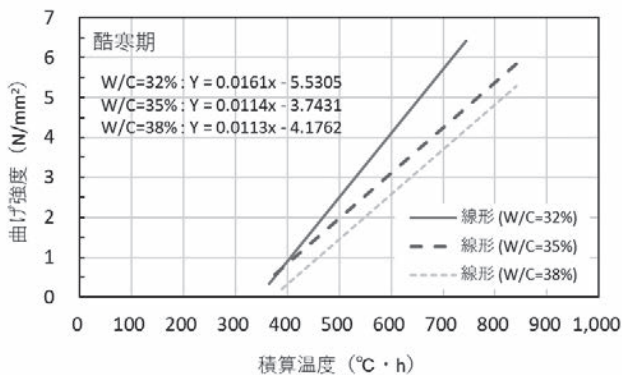


図-7 積算温度と曲げ強度 (酷寒期)

つの直線近似式で表せない理由は、酷寒期のX軸の切片が400°C・h程度と大きく、これは極低温のため水和反応が遅延したことに起因していると考えられる。

表-3に近似式より求めた開放強度に到達する積算温度と経過時間を示す。酷暑期、標準期および冬の3シーズンは全ての配合で24時間以内に開放強度に達しているが、酷寒期においては全ての配合で開放強度に到達しない結果となった。

図-8および図-9にW/C:35%の供試体の経過時間と積算温度の一例を示す。酷寒期の開放強度に到達するまでの経過時間は前記のとおり、30時間を超える結果となったが、実際の舗装版を模した模擬体の積算温度は24時間で到達しており、W/C:35%以下の配合条件であれば

表-3 3.5N/mm²到達までの値 (積算温度 (°C・h), カッコ内: 経過時間)

W/C (%)	酷暑期 (外気: 21 ~ 37°C)	標準期 (外気: 16 ~ 20°C)	冬期 (外気: 8 ~ 16°C)	酷寒期 (外気: 1 ~ 6°C)
32	-	501 (15.7h)	501 (17.5h)	566 (27.3h)
35	520 (11.4h)	520 (16.2h)	520 (18.5h)	635 (31.6h)
38	570 (12.7h)	570 (17.7h)	570 (21.3h)	679 (35.7h)
41	616 (13.7h)	-	-	-

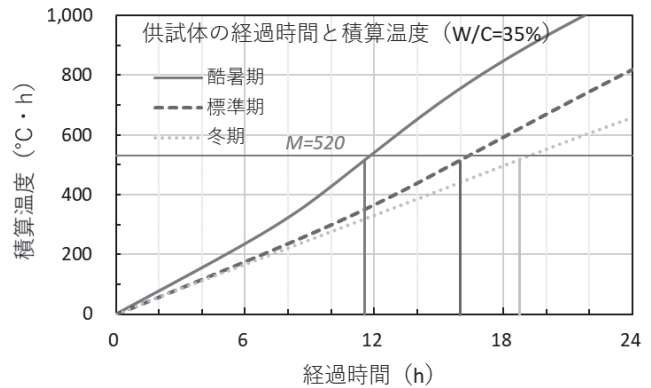


図-8 経過時間と積算温度 (3シーズン)

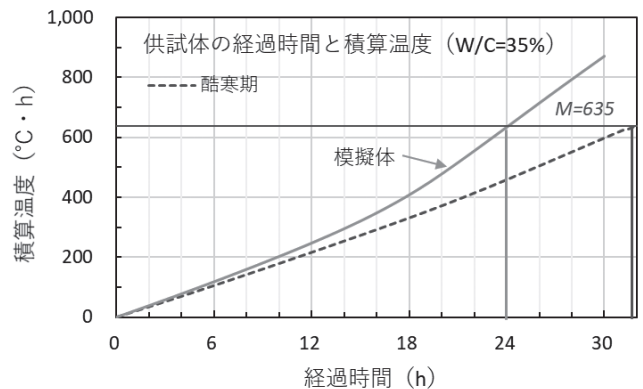


図-9 経過時間と積算温度 (酷寒期)

開放強度を満足するものと推定される。

図-10に曲げ強度供試体と同一条件で養生した圧縮強度と曲げ強度の関係を示す。精度を上げるため3シーズンと酷寒期を分けて示した。両者には高い相関があり、圧縮強度試験で通常管理が可能であると思われる。

4. 酷寒期の対策

酷寒期の実施については給熱などの対策を行わなければならない。寒中コンクリートになることから、養生条件など工夫が求められる。施工時期をずらすか、給熱養生等の措置をとって経過観察する。もしくは養生時間を24時間以上に延ばすことも考慮すべきである。

5. 構造体による最終実験

酷暑期、標準期、冬期の室内実験によってW/C：35%の場合、交通開放強度3.5N/mm²は積算温度520℃・hで発現することを突き止めた(図-3)。2023年10月10日に最終実験として、構造体から圧縮コアを採取し積算温度とコア圧縮強度の関係を調べ、構造体が積算温度520℃・hで交通開放強度3.5N/mm²を発現するか検証することにした。実験は寸法W2,500×D2,500×t250mmのコンクリート舗装版を作製し、熱電対による温度計測により積算温度の追跡を行った。400℃・h、500℃・h、600℃・hの3点を狙いコアを各3本ずつ採取、直ちに切断研磨した後、圧縮強度試験を行った。そして、すでに検証済みである曲げ強度との相関から結果を導くことにした。

図-11に標準期、W/C：35%配合における積算温度とコア圧縮強度の関係を示す。図より構造体における積算温度520℃・hでの圧縮強度は26.3N/mm²(図-10の関係式よりこのときの曲げ強度は約3.6N/mm²)となり、積算温度

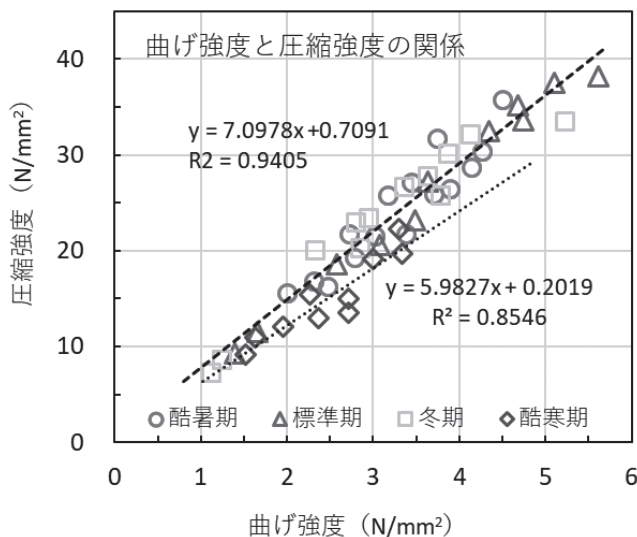


図-10 曲げ強度と圧縮強度の関係

520℃・hで曲げ強度は3.5N/mm²になるという過去の室内実験結果とほぼ一致することが確認できた。

図-12に熱電対による計測結果を示す。構造体の山型がいびつな理由は、コアの抜き取り作業時の散水による温度低下である。実際の最高温度はプラス5℃程度と考えられ、構造体の温度履歴が一番高いことになった。

また、構造体と模擬体、供試体の3.5N/mm²到達時間の違いを積算温度を用いて検証した。図-13に構造体と模擬体、供試体の経過時間と積算温度の関係を示す。標準期W/C：35%配合における3.5N/mm²到達時間は供試体が15.6時間、模擬体が12.2時間であった。さらに、構造体の場合は11.8時間と半日で交通開放できることが新たに確認

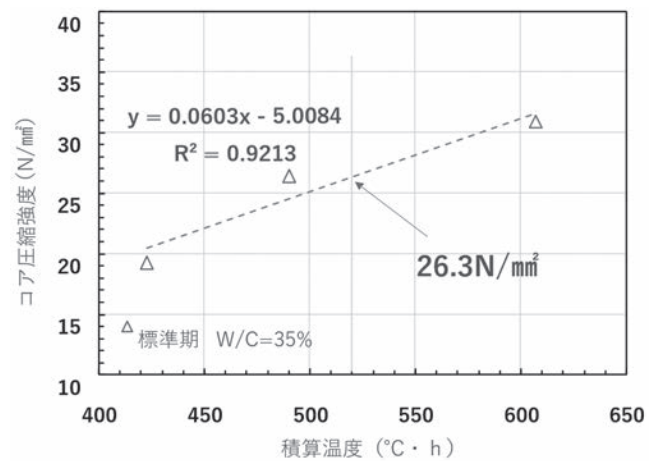


図-11 積算温度とコア圧縮強度の関係

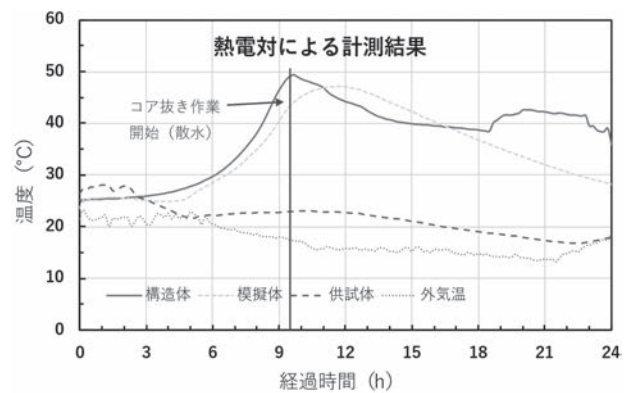


図-12 熱電対による計測結果

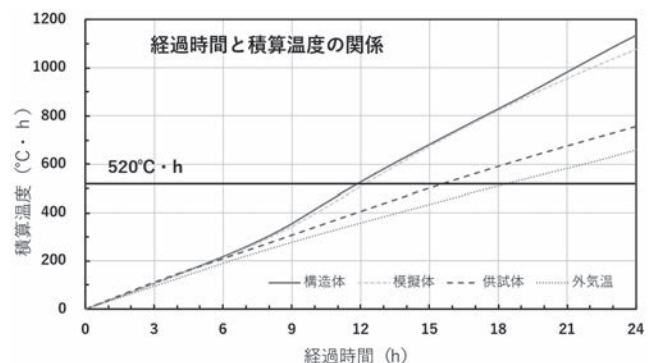


図-13 経過時間と積算温度(構造体)

できた。

6. ひび割れ照査結果

図-14に2023年10月10日に施工した版厚250mmのコンクリート版に対して行ったひび割れ照査の結果を示す。同図より、ひび割れ発生予測は打設から約13時間後となった。この結果は、1 DAY PAVEの開放直前(約24h)にカッター工を行おうとすると、すでにコンクリート版にひび割れが発生している可能性が高いことを示唆している。したがって1 DAY PAVEは通常のコンクリート舗装版より早めのカッター工を施す、もしくは打込み目地とすることが望ましいと考えられる。

7. まとめ

7.1 実験から得られた知見

1 DAY PAVEの4シーズンにおける室内実験および構造体による最終実験の結果から得られた知見は以下のとおりである。

(1) 標準期、酷暑期および冬期において、供試体の曲げ強度はMaturity則に従うことが確認され、供試体の受ける積算温度で1 DAY PAVEの曲げ強度を推定することが可能となった。

(2) データに基づく実施工実験の結果、W/C:35%の場合、積算温度が $520^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ のコア圧縮強度は $26.3\text{N}/\text{mm}^2$ (このときの曲げ強度は約 $3.6\text{N}/\text{mm}^2$)であり、室内実験の結果と合致することが検証できた。以上からMaturity則の根拠が明確になった。

7.2 積算温度(Maturity則)の利用方法

Maturity則により初期強度の推定が可能となれば建築や土木の脱型強度、トンネルの覆工コンクリートにおいてセントル(移動式鋼製型枠)の移動時期の決定、橋梁工事であればポストテンションにおける緊張強度(プレストレス)導入時期の根拠などに利用できる。

7.3 衰退する技術と進化する技術

「1 DAY PAVE(早期交通開放型コンクリート舗装)製造施工マニュアル第2版」において、1 DAY PAVEとは「特殊な結合材や混和材料等を使用せず、JIS A 5308(レディーミクストコンクリート)等に適合する汎用的な材料を用いたコンクリートを使用し、コンクリートの打込み後の養生期間が1日で交通開放可能なコンクリート舗装」と定義されており、これは第1版の定義と同じである。また、養生終了強度として「曲げ強度 $3.5\text{N}/\text{mm}^2$ 以上」と書か

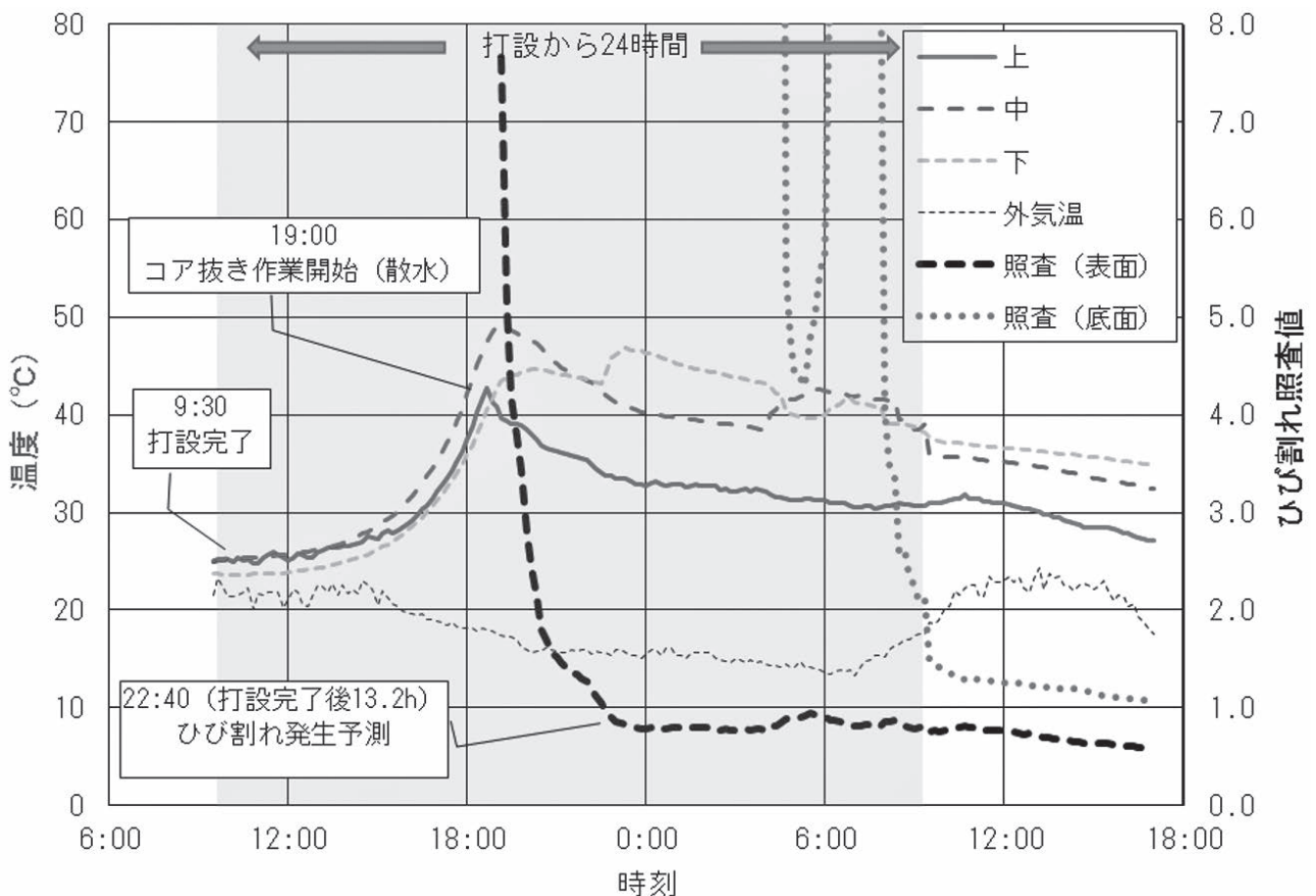


図-14 ひび割れ照査の結果

れている。この曖昧な定義（技術）では追隨する研究者が現れなく、商品開発から年月だけが経過して施工実績も伸びないため官公庁に認めていただけない。上記の理由から継承すべき技術者の育成ができないために衰退する。

これに対して、進化する技術とはその逆である。私は約23年前に大臣認定を鹿島建設と共同申請という形で取得した。このMCONを例に出すと、我々の認定取得後次々と申請者が増えて高強度・高流動コンクリートの礎を築いていった。進化する技術というのは必ず追隨する研究者や違う目線で研究する技術者が現れ、基準類等も新たに書き換えられていく。分野はどうであれ技術が進化するとはそういうものである。その結果、現在ではJIS規格に高強度が加えられることになった。

8. おわりに

滋賀工組において「スイカの話」と題して積算温度の説明をすることがあった。スイカがいつ熟すのか予測できなければそれを商品として売ることはできない。熟し過ぎてから店頭と並べても、熟してないものを店頭と並べても、顧客からクレームが返ってくるだけで商売にはならない。そのことから生産者は、何℃の気温が何日続いた（受熱温度履歴）から、もう少しで熟すだろうと予測を立て出荷時期を判断する。このように生産者が出荷時期の判断材料の手法として使っているのが「積算温度」である。即ち「積算温度」とは平均気温と日数の総和であり、植物や果実には品種毎に定数や目安となる積算温度が決まっています。桜の開花予測にも使われている。コンクリートは外部からの熱に加えて水和反応による自己熱も強度発現に影響を与えるため、今回の実験では外気温ではなくコンクリートの温度を測定し積算温度を算出した。

この実験では供試体の曲げ強度がMaturity則に従うということに加え様々なことが明確になった。省力化においては圧縮強度から曲げ強度を相関関係から推定できることを立証した。また、夏期と標準期において半日（12時間）で交通開放できることも証明できた。さらに、模擬体の寸法が実際の舗装版の温度履歴を模擬するのに十分であることも確認できた。

繰り返し申し上げるが交通開放強度3.5N/mm²がいつ発現するかの解明は最も大事なことである。「1 DAY PAVE」の1 DAY（1日）を HOUR（時間）、HOURLY（時間毎）もしくはHALF DAY（12時間）にネーミングを変更することは普及のきっかけになるかもしれない。

技術の進歩において空白期間（技術の停滞）は設計・施工技術者の育成にも影響を与える。「1 DAY PAVE」の難しい点は鉄網・鉄筋の配置や目地構造などの仕掛けにあり、舗装版の伸縮による挙動をいかにコントロールするかにかかっている。それを間違えればひび割れによって自慢の耐久性を早期に失うことになる。普及させるためには技術者の育成を急ぐ必要がある。

舗装コンクリートのLCCがアスファルトと比較して安価だと言いたいところだが、その根拠を示すデータ・実績があつてこそ証明できる。しかし、それは案外難しいことである。

セメント協会様には、この現状を分析して頂き開発当時の理念に立ち返って、行政に説明できる資料の提供やPR活動に努力されることを期待する。

謝辞

長期間において大変な実験を支えてくださった関係者の方々には心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 一般社団法人セメント協会：早期交通開放型コンクリート舗装 1DAY PAVE 製造施工マニュアル [第2版]，2022.3