

プレグラウト PC 鋼材の硬化特性検証

青木 圭一^{*1}・益子 博志^{*2}・渡辺 浩良^{*3}・名取 耕一朗^{*4}

1. はじめに

プレストレストコンクリート橋における PC 鋼材の防食、コンクリートとの一体性において、PC グラウトは重要な要素である。しかし、過去において、その機能が十分に働かず、損傷が生じた事例が報告されている。その解決策の一つとして、開発・適用されたのが、プレグラウト PC 鋼材である¹⁾。

プレグラウト PC 鋼材が橋梁に初めて適用されたのは、1992 年山陽自動車道木門田（きもんでん）橋で、それ以降、数多くの橋梁、建築物に採用されている。当初は床版のような薄肉部材への適用が多く、また、コンクリート打設後、速やかな緊張が可能な部材への適用が主であった。

しかし、近年、橋軸方向への適用や、比較的マッシュな部材へも適用事例が増加し、これに伴い樹脂材料も改良が重ねられ、湿気硬化型エポキシ樹脂を用いたプレグラウト PC 鋼材が採用されるに至っている。本材料が開発・採用されたのは、2001 年頃であり、実構造物に採用されすでに 5 年が経過している。

そこで、これまで実施している湿気硬化型エポキシ樹脂の硬化試験と、実構造物へ適用したプレグラウト PC 鋼材の硬化確認結果を比較し、硬化特性について検証を行ったので、以下に報告する。

2. プレグラウト PC 鋼材の概要

プレグラウト PC 鋼材は、PC 鋼材の外側に樹脂グラウトを塗布し、さらにその外側にポリエチレンシースを配置したもので、あらかじめ工場において一体化して成型加工した製品である。従来工法のように、施工時に鋼材とシースを別べつに配置した後にはグラウトを注入するといった作業が不要であるとともに、グラウト不良などの人為的なミスを防ぐことができる。また、緊張後一定期間を経た後にはエポキシ樹脂が硬化するため、高い長期防錆性能を有するものである。

従来のプレグラウト PC 鋼材は、コンクリート打設後の水和による発熱等の温度によって、硬化剤が活性化するという硬化メカニズムをもつ「熱硬化型」エポキシ樹脂を使用していた。この樹脂の硬化速度は、与えられる温度履歴により、大きく左右されるため、温度履歴が異なる施工部位ごとに、最大 7～8 種類の樹脂を使い分ける必要があ

った。また、高温部位、たとえば最高温度が 90℃を超えるような部位への適用、とくにマスコン部位を含む橋梁の柱頭部や橋軸方向などへのプレストレス付与には適用が難しい状況であった。

そこで、この弱点を補い水和熱による温度依存性を軽減した材料である「湿気硬化型」と呼ばれるプレグラウト樹脂が開発された。この樹脂の硬化メカニズムは、ポリエチレンシースがごく微量の分子状の水分を透過させることに着目し、その水分と反応して活性化する硬化剤（ケチミン）を利用していることである（図 - 1）。すなわち、① コンクリート中の湿気が水分子としてシース内に浸透、② エポキシ樹脂中のケチミンが水と反応して活性化、③ 過剰の水分を酸化カルシウムが不可逆的に吸収、④ 活性化したケチミンがエポキシ樹脂と反応して硬化が進行、といった 4 つの反応から成り立っている。この中で、①、② の反応の温度依存性が比較的小さいことや、②、③ の反応が競争反応であることから、全体の硬化速度の温度依存性が、熱硬化型に比べて減じられている。

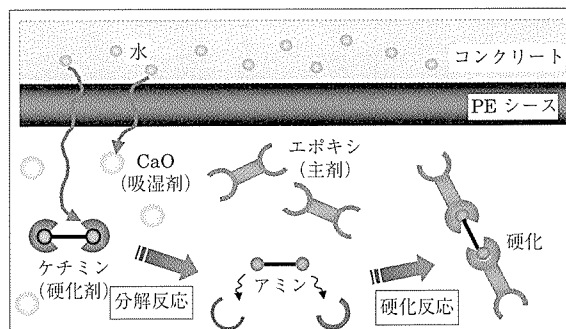


図 - 1 湿気硬化型プレグラウト鋼材の硬化メカニズム

この硬化速度の温度依存性の減少により、従来使えなかった 95℃を超える超高温領域、すなわちマスコン部位、マスコン部位を含む橋梁の柱頭部や橋軸方向などへのプレグラウト鋼材適用の道が開かれた。

一方、硬化完了時期に関しては、高～中温域での確認は多数得られていたが、低温域においては、硬化完了まで数年を要することが障害となり、構造物への採用時点において、実際の硬化完了時期に関する検証ではなくシミュレーションによる確認の代用に留まり、実環境での確認は得ら

^{*1} Keiichi AOKI：中日本高速道路（株）横浜支社 富士工事事務所 構造工事長

^{*2} Hiroshi MASHIKO：三井住友建設（株）土木管理本部 土木技術部長

^{*3} Hiroyoshi WATANABE：（株）ピーエス三菱 東北支店 土木統括部技術部 設計グループリーダー

^{*4} Koichiro NATORI：住友電工スチールワイヤー（株）PC 海外部

れていなかった。

本報告では湿気硬化型プレグラウト PC 鋼材適用開始から約 5 年が経過した現在、これまでに得られた実構造物環境で完全硬化した事例を中心に、その硬化特性に関して改めて検証を行ったので、その結果について以下に詳述する。

なお、4.4 で詳述するが、本報告では硬化の指標として、一応の付着応力が得られる樹脂硬度 20 D（ここに、D は Shore D 硬度）到達時を「硬化完了」と表現し実用上の硬化完了とする。一方、樹脂の硬化が完全に終了して樹脂硬度 70 ～ 80 D が発現する時点を、「最終硬度到達」として、前者と区別して表記する。

3. 樹脂硬化特性試験

湿気硬化型エポキシ樹脂開発時における最優先課題は、マスコン等の高い温度履歴を受けるケースにおいても十分な緊張可能期間を確保することであった。緊張可能期間を延ばすことは、結果として硬化完了までの時間が延びることを意味する。硬化時間の確認のため、実験室レベルでの硬化確認試験を多数行ったが、ここでは典型的な床版での温度履歴を与えた試験と硬化時期の予測のための試験について述べることにする。

3.1 床版温度履歴での硬化試験

硬化確認試験は、直径 20 mm × 高さ 45 mm（肉厚 2 mm）の蓋付きプラスチック製容器に樹脂を封入し、容器ごと恒温槽に入れて温度履歴を付与し、適切な時間経過後に樹脂粘度を計測することで行った。温度履歴は典型的な床版の温度履歴として、表 - 1 に示すものを与えることとした。なお、恒温槽の設備仕様上の温度精度は ± 2 °C である。

試験結果を図 - 2 に示す。なお、予備試験において一定温度下において粘度の対数と経過時間には近似的に直線関係があること、また、換算を行うことで、硬度もこの直線

表 - 1 温度履歴

温度	時間
25 °C → 60 °C	12 h
60 °C 一定	12 h
60 °C → T °C	54 h
T °C 一定	試験終了まで

T : 35, 25 °C

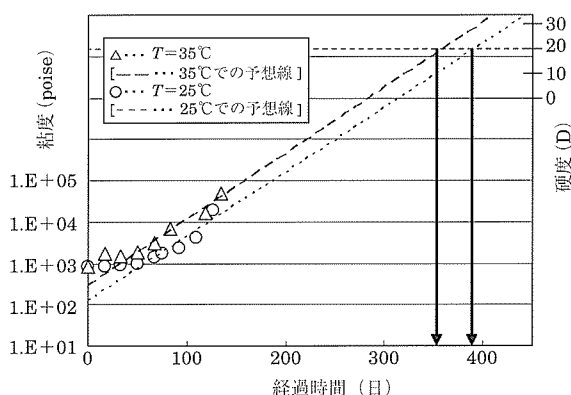


図 - 2 床版温度履歴での硬化確認試験結果

上にプロットできる知見が得られていたことから、図中には、この関係を利用して外挿した硬化進行の予想直線を含わせて示した。

図 - 2 より時間経過とともに常温下でも硬化が進行していることが分かる。また、60 °C → 25 °C 一定のケースでも、ほぼ 400 日程度で硬化完了すなわち硬度 20 D に到達することが予想された。

3.2 硬化予測方法

60 °C → 25 °C 一定の条件下で硬化完了までに 400 日程度要するため、より低温下での硬化には、数年（2 ～ 3 年）が必要であることが予想された。そこで、比較的低温における硬化完了時期については、まずは硬化予測を行い、その結果を代用することとし、後述する各種実部材試験の結果をそれに加味して予測精度向上を狙うこととした。

ここで化学反応は一般的に、化学反応の速度と温度との間に一定の関係（(1) 式）が存在することが知られており、これをアレニウスの関係と呼ぶ。エポキシ樹脂の硬化反応も化学反応であるため、この関係に従うとして良い。そこで、樹脂が受けた温度履歴が分かれば、硬化の予測を、この関係に基づいて行うことができる。一方、湿気硬化型エポキシ樹脂は、図 - 1 に示したように、硬化反応が、温度および外部からの水分浸透に影響を受けるため、水分による加速の取扱いが必要になる。

湿気硬化型に関する硬化予測方法の概要を以下に示す。

- i) 実温度履歴を有限個 (n 個) に時分割し、各分割時間をアレニウス式 (式 (1)) により、90 °C 時間に換算する (式 (2))。

$$1/\tau_{t,i} = \exp(\alpha/T_i + \beta) \quad (1)$$

T_i : i 番目の温度 (K)

$\tau_{t,i}$: i 番目の温度一定での硬化時間 (hr)

α, β : 樹脂のアレニウスパラメーター

$$\tau_i = \tau \cdot (\tau_{90} / \tau_{t,i}) \quad (2)$$

τ_i : 90 °C 時間に換算後の i 番目の分割時間

τ : 分割時間

τ_{90} : 90 °C での硬化時間

- ii) 各分割時間の水分による加速率を計算する。

$$AC_i = AA_{T_i} \cdot W_i + BB_{T_i} \quad (3)$$

$$W_i = \sum_{k=1}^i \left\{ P_n \cdot \exp(-\varepsilon/T_k) \cdot S \cdot \tau \cdot \Delta Q_{T_k} \right\} / L \quad (4)$$

AA, BB : 加速パラメーター

W_i : i 番目時間までの積算水分量

P_0 : 基準透湿率 (シース PE の固有値)

ε : 透湿パラメーター ()

S : 単位長さあたりのシース表面積

ΔQ_{T_k} : 温度 T_k でのシース内外の水蒸気分圧差

L : シース厚み

- iii) 水分加速の影響を i) に加味する。

$$\tau'_i = \tau_i / AC_i \quad (5)$$

iv) 90℃での硬化曲線（時間 - 粘度曲線：(6)）を τ_i に応じて変形し、実温度履歴での硬化曲線(7)を作成する。

$$\log \rho_i = \sum_{k=1}^i \left\{ \tau_i (\log \rho_x - \gamma) / \tau_{90} \right\} + \gamma \quad (6)$$

$$\log \rho_i^{REAL} = \sum_{k=1}^i \left\{ \tau_i (\log \rho_x - \gamma) / \tau_{90} \right\} + \gamma \quad (7)$$

ρ_i : 90℃での*i*番目の分割時間時点の粘度

ρ_x : 硬化完了時の換算粘度

γ : 初期粘度

$\log \rho_i^{REAL}$: 実温度履歴での*i*番目の分割時間時点の予測粘度

以上、式(7)によって、硬化の経時的な進行状況を予測することが可能である。

なお、アレニウスパラメーターの決定は、プラスチック製密閉容器に封入した樹脂を恒温槽にて一定温度で加温し、各温度での硬化完了時間を求め、それをアレニウスプロットにまとめることで行った。図-3に得られたアレニウスプロットを示す。

図-3より、本州平均気温（16℃）での硬化完了には、約1.5年、また寒冷地である北海道平均気温（5℃）での硬化完了には、約2年必要であることが分かった。

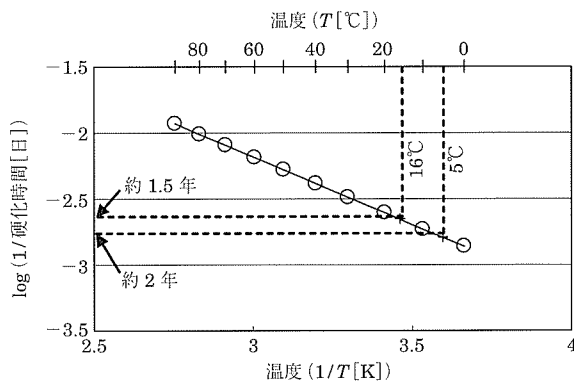


図-3 湿気硬化型樹脂の硬化に関するアレニウスプロット

4. 高温状態における硬化特性試験

種々の実験室レベルでの樹脂硬化試験において、夏期打設のマスコンのような高温履歴下においても緊張可能であることが確認されていたが、実際の施工現場において、同様の性能が得られるかどうかを確認するため、マスブロック供試体による確認試験を実施した。以下、本試験で検討した、高温履歴を受けた際の硬化時間について述べる。なお、緊張可能日数等の詳細検討については、既報²⁾を参照されたい。

4.1 マスブロック供試体の概要

マスブロック供試体は、柱頭部等のマスコンを想定した1m角のブロックとし、40℃の簡易恒温室内に配置した。ただし、水和発熱による温度上昇を夏期打設のマスコンと

同等にするため周囲を300mm厚の断熱材で覆った。供試体の概要およびプレグラウトPC鋼材配置状況を図-4に示す。

各ブロックとも28.6mmφプレグラウトPC鋼材を4本ずつ配置し、鋼材端部はキャップをかぶせ、端部からの放熱、湿気の流入を防止した。

また、湿気硬化型プレグラウト樹脂としては、A配合、およびB配合の2種類について評価した。A配合は2006年現在、製品として市場に供されているものであり、B配合に比べてより高温への適用性が高い物である。なお、B配合は、A配合に比べて適用可能温度域が狭いため、現在のところ実用化には至っていない。

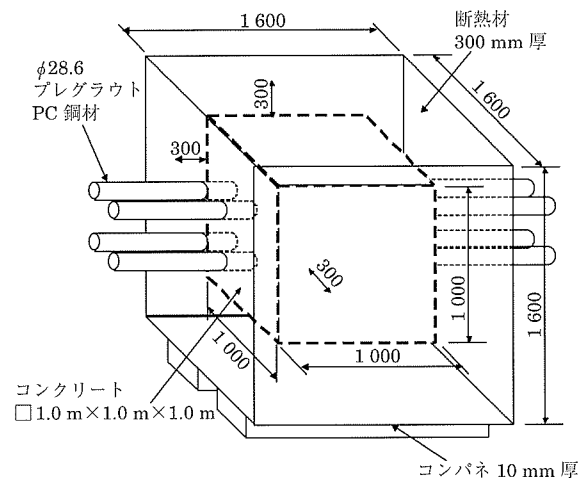


図-4 マスブロック供試体の概要

4.2 温度履歴

水和発熱によってエポキシ樹脂が受ける温度履歴としては、セメント種類による違いを考慮し、タイプⅠ（早強）、タイプⅡ（普通）、タイプⅢ（中庸熱）の3種類を想定した。各タイプの供試体における打設後約1箇月間のマスブロック中心温度の実測値（供試体埋込熱電対にて測定）を図-5に示す。

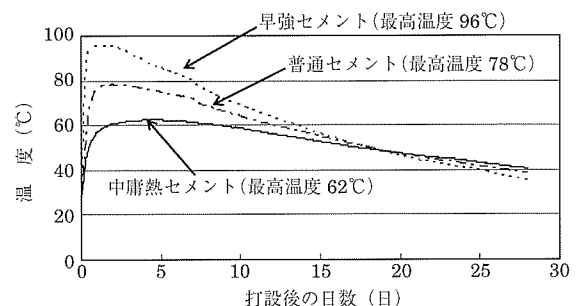


図-5 供試体温度履歴

タイプⅠは最高温度96℃、タイプⅡが最高温度78℃、タイプⅢで最高温度62℃であった。なお、水和発熱がほぼ完了し、コンクリート内部温度が常温まで低下した後は、断熱材をはがし、常温常湿にて供試体を保管した。

4.3 硬化状況の確認

硬化状況の評価は、コンクリート打設後 349 日後に実施した。すでに緊張不可能な程度に樹脂粘度が上昇していることが確認されてから半年以上が経過していたため、樹脂硬度による評価を行った。手順としては、まずプレグラウト PC 鋼材を側面からのコア抜き（ ϕ 100 mm）により取り出し、表面の PE シースをはく離した。次いでプレグラウト樹脂の表面硬度を JIS K7215 準拠の方法にて評価した。評価結果を表 - 2 に示す。

表 - 2 プレグラウト樹脂硬度測定結果

タイプ	樹脂配合	測定個数	Shore D 硬度		
			平均値	最小	最大
I	A	10	79	73	87
	B	10	79	74	86
II	A	10	14	7	25
	B	10	52	37	64
III	A	10	1	0	5
	B	10	2	0	7

表 - 2 より、A 配合、B 配合とも、いずれのタイプにおいても、硬度測定が可能な状態、すなわち固体状態にまで硬化が進行していることが分かった。とくにタイプ I では、最終硬度到達まで硬化が進行していた。

一方、タイプ II、III では、いまだ最終硬度までは到達していないことが分かった。しかし、すでに樹脂自体は流動性をほぼ失った状態にまで硬化しているため、コンクリートと鋼材との間に十分な付着が存在することが期待された。これより、引抜き試験により、コンクリートとの付着応力度の測定を試みた。

4.4 付着応力度評価

付着応力度の評価は、片端にジャッキおよびロードセルをセットし、ジャッキにて鋼材を引き抜く際の最大引抜き力を測定した後、図 - 6 に示す式により付着応力度を求めた。測定結果を表 - 3 に示す。

$$\text{付着応力度 (N/mm}^2\text{)} = \frac{\{\text{最大引き抜き荷重 (N)}\}}{\{\text{PC 鋼より線の周長 (127.7 mm)} \times \text{有効長 (875 mm)}\}}$$

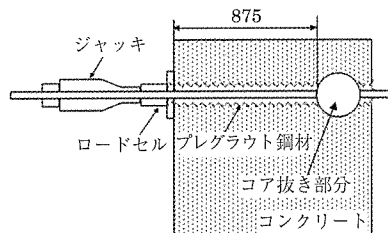


図 - 6 引抜き試験概要

ここで、コンクリート標準示方書（土木学会）³⁾ によれば、コンクリートの設計基準強度が 40 N/mm² の場合の異形鉄筋の許容付着応力度は 2.0 N/mm² としている。

また、F. Leonhardt 著「プレストレストコンクリート」⁴⁾ によれば、PC 鋼材においても付着強度を 2.0 N/mm² 程度と

表 - 3 引抜き試験結果

タイプ	樹脂配合	最大引抜き荷重 (kN)	付着応力度 (N/mm ²)	Shore D 硬度 (平均値)
I	A	388	3.5	79
	B	472	4.2	79
II	A	427	3.8	14
	B	428	3.8	52
III	A	17	0.2	1
	B	49	0.4	2

している。よって、付着強度が 2.0 N/mm² に到達すれば、機能上の観点から見て、硬化状態に到達したと見なせる。この観点からタイプ I、II については、樹脂配合によらず、機能を満足していることが分かった。一方、タイプ III については、付着がはじめてはいるが、この時点では不十分な付着状態であることが分かった。

付着応力度と Shore D 硬度の関係を図 - 7 に示す。図 - 7 より、硬度 5 D 程度あれば、十分な付着応力度を発現でき、硬化完了と見なせることが分かる。また、硬度 14 ~ 20 D 程度で、付着応力度は飽和することも分かった。以上に基づき、湿気硬化型プレグラウト樹脂の硬化判定は硬度測定により行うこととし、硬度測定の誤差を考慮して、Shore D 硬度で 20 D 以上を硬化完了とすることとした。

なお、その後タイプ III においても、打設 430 日経過後には、硬度 20 D 到達が確認されている。

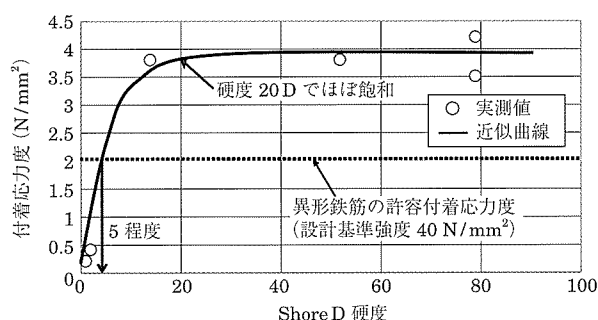


図 - 7 付着応力度と Shore D 硬度の関係

5. 寒冷地における硬化特性試験

本試験は、寒冷地での使用を想定し、北海道小樽市郊外の銭函地区に供試体を設置した（写真 - 1：以下、北海道供試体と呼ぶ）。試験実施の目的は、緊張可能日数および硬化日数の確認である。表 - 4 に供試体の略歴を示す。

5.1 供試体の概要

供試体は、床版部を想定して、厚さ 0.3 m、長さ 10 m、幅 1.5 m の板状とした。供試体の概要およびプレグラウト PC 鋼材の配置図を図 - 8 に示す。各ブロックには試験目的に応じて、28.6 ϕ の各種プレグラウト鋼材を配置した。ブロックの種類および配置したプレグラウト PC 鋼材の種類を表 - 5 に示す。なお、コンクリートには早強セメントを使用した。

表 - 4 供試体の略歴

'99 / 12	供試体作製	高温ブロック：最高温度 95℃ 中温ブロック：最高温度 70℃
'01 / 02 (1 年 2 箇月後)	第一回硬化確認	(緊張伝達測定：伝達なし)
'03 / 03 (3 年 4 箇月後)	第二回硬化確認試験	(コア抜きサンプルの硬度測定：硬度 0 確認)
'04 / 04 (4 年 5 箇月後)	第三回硬化確認試験	(コア抜きサンプルの硬度測定：本文参照)
'04 / 11 (5 年後)	第四回硬化確認試験	(コア抜きサンプルの硬度測定：本文参照)

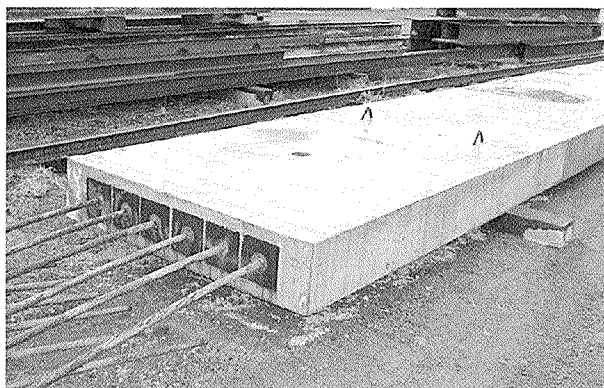


写真 - 1 北海道供試体外観

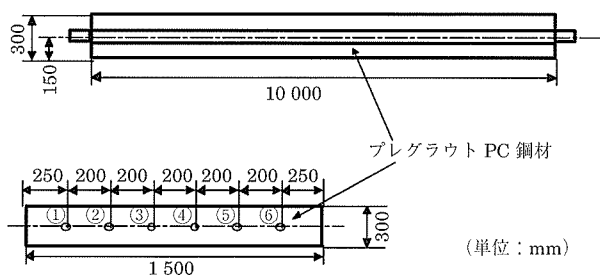


図 - 8 北海道供試体形状

表 - 5 ブロック種類と配置したプレグラウト鋼材の種類

ブロック No.	ブロック 種類	①	②	③	④	⑤	⑥
1	高温	B	熱	熱	B	B	B
2	高温	B	B	A	A	A	A
3	中温	A	A	B	B	熱	熱

注：A ……湿気硬化型 A 配合
 B ……湿気硬化型 B 配合
 熱 ……熱硬化型（超高温型）
 ブロック種類 …… 5.2 参照

5.2 温度履歴

実橋でのコンクリートの水和発熱による温度上昇を考慮して、使用部位に応じ、柱頭部床版部位を想定した高温ブロック（max 96℃）、通常床版部位を想定した中温ブロック（max 70℃）、張出し床版部位を想定した低温ブロック（max 50℃）の3種類の温度履歴を変えたコンクリートブロックを作製した。当初樹脂はコンクリート温度に合わせて、A 配合、B 配合および C 配合（B 配合よりもさらに硬

化の早いタイプ）の3種類の湿気硬化型プレグラウト PC 鋼材を使い分けることを前提としていたため、低温ブロックには、B 配合および C 配合の2種類のみを配置した。しかし、現在普及している湿気硬化型樹脂は A 配合であるため、以下、高温ブロックおよび中温ブロックのみについて記述する。

供試体作製が、冬季に行われたため、高温ブロック、中温ブロックとも、打設後の水和発熱のみでは所望の温度に達しないため、コンクリート打設後、供試体を蒸気養生することで、上記温度履歴を付与した。またこの際、供試体内のプレグラウト PC 鋼材表面に熱電対（T.C.）を配置して、その温度を測定し、温調および温度計測に使用した。図 - 9 に熱電対配置図、図 - 10 に温度計測結果を示す。

蒸気養生終了後は、供試体を屋外にて保管したため、その後の温度履歴は、小樽市の外気温と同じ温度とみなした。供試体作製からの小樽市気温（月平均）を図 - 11 に示す。

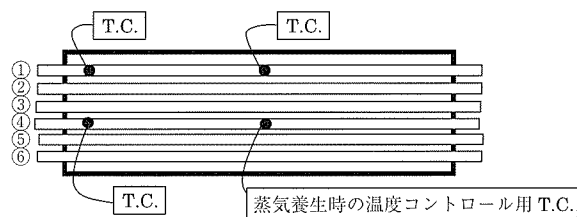


図 - 9 供試体中の熱電対（T.C.）配置状況

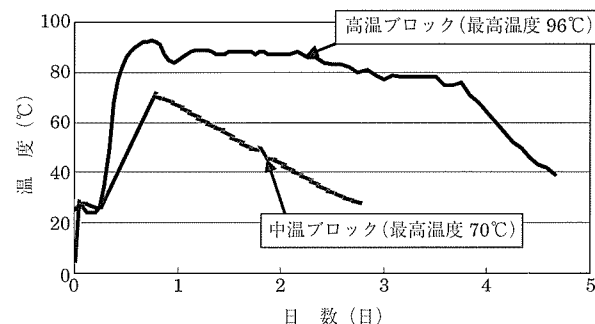


図 - 10 打設直後のコンクリート温度

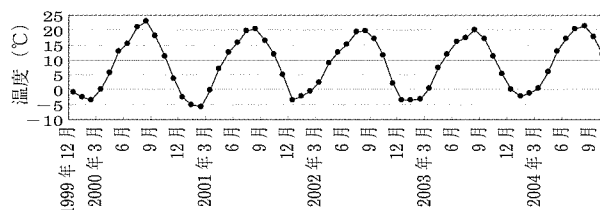


図 - 11 小樽地方の月平均気温

5.3 硬化状況の確認

硬化確認は、信頼性を重視して、供試体からのコア抜きにより鋼材を取り出し、樹脂自体の粘度もしくは硬度を測定する方法で硬化の進行状況確認を行った。コア抜きにより採取したサンプルは、 $\phi 100 \text{ mm} \times H 300 \text{ mm}$ で、ほぼ中央にプレグラウト PC 鋼材を包含する。またコア抜きは、供試体の中央すなわち供試体端末から 5 m の位置で鉛直方向（部材厚さ方向）とした。サンプリング時期は、2003 年 3 月（供試体作製から 3 年 4 箇月経過後）、2004 年 4 月（供試体作製から 4 年 5 箇月経過後）および 2004 年 11 月（供試体作製から 5 年経過後）である。3 回とも、目視や感触ですでに粘度測定ができない状態まで硬化が進行していることを確認したため、硬度測定（JIS K7215 準拠）により硬化状態を評価した。表 - 6 に測定結果を示す。



写真-2 打設後 4.4 年経過後のサンプル

表 - 6 北海道供試体の樹脂硬度（Shore D 硬度）調査結果（A 配合のみ表記）

調査時期	温度パターン (ブロック)	測定 個数	Shore D 硬度		
			平均	最低	最高
2003 年 3 月 (打設 3 年 4 箇月後)	高温ブロック	10	0 ~ 5		
2004 年 4 月 (打設 4 年 5 箇月後)	高温ブロック	27	32	19	53
	中温ブロック	27	25	14	39
2004 年 11 月 (打設 5 年後)	高温ブロック	5	67	64	69
	中温ブロック	5	52	50	55

表 - 6 によれば、コンクリート打設から約 3.5 年（高温、中温とも硬度 0 D）から約 4.4 年（高温：32 D，中温：25 D）の間に、硬度 20 D に到達していることが分かる。

ここで前述のように、樹脂の硬化進行状況を時間に対する樹脂の粘度の対数、および樹脂硬度のプロットがほぼリニアな関係になることを利用して、硬度 20 D 到達時期をさらに絞り込んだものが図 - 12 である。図中、ピンクが高温ブロックを、青が中温ブロックを示し、おのおの点が実測値を、線が点に基づいた近似直線を示している。このプロットによれば、北海道においても、マスコンを模擬した温度条件でコンクリート打設から約 3.6 年、床版部を模擬した温度条件でも約 3.9 年経過後には硬化完了（硬度 20 D）

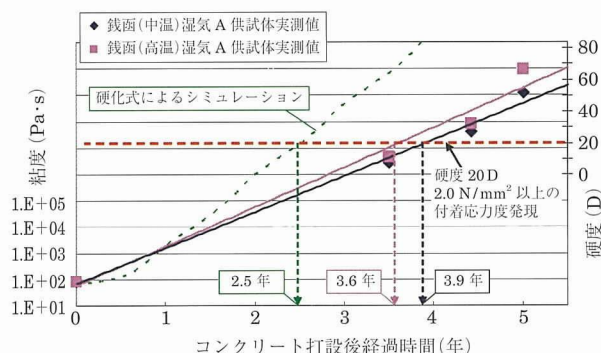


図 - 12 北海道供試体の現行湿気硬化型プレグラウト PC 樹脂硬化進行状況

に達していたことが分かる。一方、同じく図 - 12 の緑の破線のプロットは、実験を開始した当初に硬化の予測式を用いて推定した硬化進行のシミュレーション結果である。当初、高温ブロック、中温ブロックともほぼ 2.5 年程度で硬度 20 D まで到達するとの結果を得ていたが、実際には、1 年から 1 年半程度硬化が遅れたことが分かる。

6. 薄肉部材における硬化特性試験

2001 年 7 月、施工技術総合研究所（静岡県富士市）において、実物大の鋼橋の PC 床版横締め湿気硬化型プレグラウト PC 鋼より線を埋込んだ試験（以下、富士供試体と呼ぶ）が開始された。なお、富士供試体では、本来の試験目的は硬化試験では無かったため、試験完了時の供試体解体後から、硬化確認を行っている。表 - 7 に供試体の略歴を示す。

表 - 7 富士供試体の略歴

'01 / 07	供試体作製	支間中央：打設後最高温度 52 ~ 66 °C 主桁上：打設後最高温度 57 ~ 70 °C
'03 / 10 (約 2 年 3 箇月後)	供試体解体 樹脂粘度測定	樹脂粘度 240 000 Pa・s (その後鋼材のみ 19 °C 恒温室にて保管)
'04 / 12 (約 3 年 6 箇月後)	樹脂硬度測定	樹脂硬度 30 D 到達確認

6.1 供試体の概要

コンクリート部材厚は、支間最薄部で 360 mm，主桁上で 530 mm，張出端部で 260 mm である。また、鋼材長は約 17 m である。

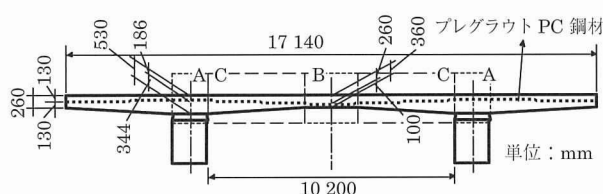


図 - 13 富士供試体の概要

なお、コンクリート内部温度測定用の熱電対は、支間中央、主桁上のそれぞれに配置している。

6.2 温度履歴

コンクリート打設後の富士供試体のコンクリート温度の実測結果を図 - 14 に示す。

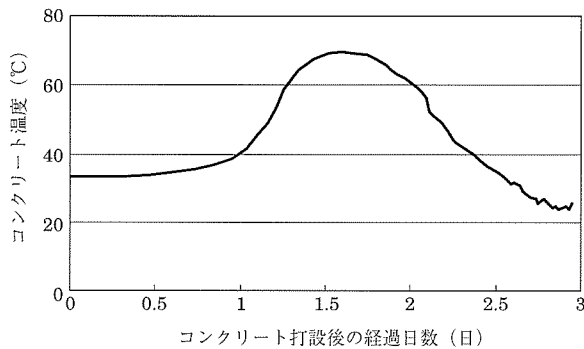


図 - 14 打設後のコンクリート温度

なお、打設後の最高温度は、支間中央部において 52 ～ 66℃、主桁上においては、57 ～ 70℃であり、いずれの部位においてもほぼ 3 ～ 4 日以内に外気温まで低下した。

6.3 硬化状況の確認

2003 年 10 月（打設後 2 年 3 箇月後）に、供試体を解体し、解体後の供試体からプレグラウト PC 鋼材をサンプル採取した。採取直後の状況は、樹脂に流動性が残っている状態であったため、粘度測定により硬化進行状況を確認した。表 - 8 に粘度測定結果を示す。

表 - 8 富士供試体打設 2 年 3 ヶ月後の樹脂粘度測定結果

測定サンプル名	平均 (Pa・s)	部位 *
1 - 1	29 700	主桁上 (A)
1 - 2	15 650	支間中央 (B)
1 - 3	21 800	支間中央 (B)
1 - 4	16 900	主桁上 (A)
鋼材 1 平均	21 013	—
2 - 1	16 850	支間 (C)
2 - 2	24 550	支間 (C)
2 - 3	22 600	支間中央 (B)
2 - 4	56 550	支間 (C)
2 - 5	24 000	主桁上 (A)
鋼材 2 平均	28 910	—
3 - 1	23 650	支間 (C)
3 - 2	17 250	支間中央 (B)
3 - 3	20 000	支間 (C)
3 - 4	18 700	主桁上 (A)
鋼材 3 平均	19 900	—

* 部位の記号 (A, B, C) は図 - 13 参照

打設後 2 年 3 箇月経過後の時点で、いまだ硬化完了に至っていないことが判明したため、鋼材を 19℃恒温室において静置し、常温での硬化進行を継続させた。

その後、2004 年 12 月（打設 3 年 6 箇月後）に、再度樹脂硬化状況を判断すべく、PE シースを剥離したところ、樹脂がすでに固化していることが判明したため、Shore D 硬度測定による樹脂硬化進行状況の確認を行った。表 - 9 に硬度測定結果を示す。

表 - 9 に示したように、打設 3 年 6 箇月経過後には、既に樹脂硬度は平均 30 D まで到達しており、硬化完了（硬度 20 D）を上回っていた。樹脂の硬化進行状況を経過時間に対して、樹脂の粘度の対数、および樹脂硬度をプロットしたものを図 - 15 に示す。

図 - 15 より、富士供試体においては、コンクリート打設後 3 年 5 箇月程度で硬化完了に至ったことが分かる。なお、本供試体においては、打設 2 年 3 箇月後から 19℃恒温室にて保管した。これによる硬化の影響が懸念されたが、一般的にコンクリート中の湿度は 80 % Rh 程度あるのに対し、恒温室内ではほぼ 60 % Rh 程度に保たれるため、コンクリートから取り出して保管したことによって硬化が加速されていないと判断した。

表 - 9 富士供試体打設 3 年 6 箇月後の樹脂硬度測定結果

測定サンプル名	Shore D 硬度					平均
3 - 3	25	35	30	20	15	25
3 - 1	30	45	45	35	25	36
2 - 3	25	28	30			28
全平均						30

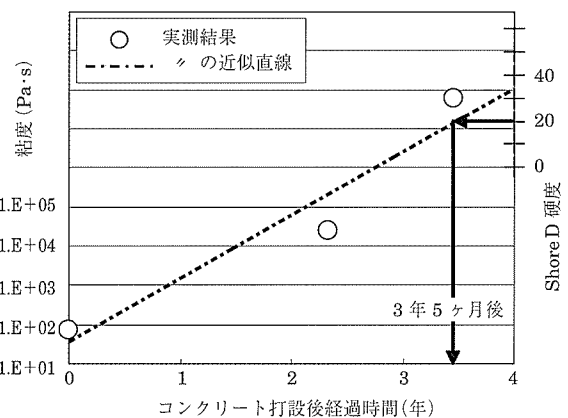


図 - 15 富士供試体の硬化進行状況

7. マッシュブな部材での硬化特性試験

2000 年 3 月 3 日、静岡県浜松市内において、実大 PC 箱桁供試体にプレグラウト PC 鋼材を埋め込んだ硬化実験を開始した（以下、浜松供試体と呼ぶ）。湿気硬化型は、2 ～ 3 種類の樹脂配合を、適用部位に応じて使い分けすることを想定し、本実験は、現行湿気硬化型標準配合（A 配合）および B 配合について硬化性能を評価することを目的とした。表 - 10 に供試体の略歴を示す。

表 - 10 浜松供試体の略歴

'00/03	供試体作製	横締め方向端部：56.8℃ 横締め方向中央部：64.1℃
'00/10 (7 箇月後)	緊張力伝達試験	B 配合で緊張不可
'01/07 (1 年 4 箇月後)	緊張力伝達試験	A 配合で緊張不可
'05/12 (5 年 9 箇月後)	樹脂硬度測定	樹脂硬度 74 ～ 84D (完全硬化確認)

橋軸方向には、A 配合および B 配合を用いたプレグラウト鋼材を、また横締め方向には、B 配合を用いたプレグラウト鋼材のみを配置した。表 - 11 に配置されたプレグラウト鋼材の諸元をそれぞれ示す。

7.1 供試体の概要

供試体は、実物大の PC 箱桁柱頭部とし、橋軸方向および横締め方向に表 - 11 のプレグラウト鋼材をそれぞれ配置して製作した。供試体全景を写真 - 3 に、プレグラウト鋼材の配置概略図を図 - 16 に示す。

表 - 11 浜松供試体に配置したプレグラウト PC 鋼材の諸元

配置方向	樹脂配合	鋼材のコンクリート内埋込長	本数	鋼材径 (mm)
橋軸方向	湿気型 (A 配合)	2.8 m	2 本	28.6
	湿気型 (B 配合)		2 本	28.6
横締め方向	湿気型 (B 配合)	10 m	4 本	28.6

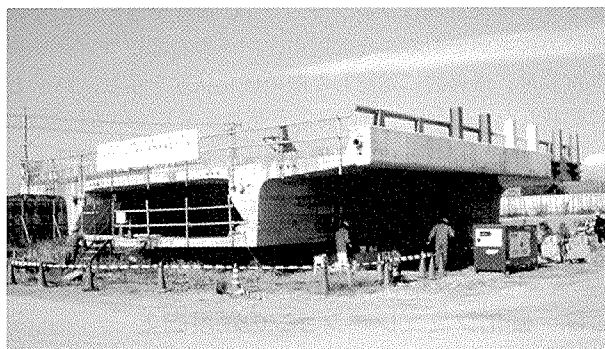


写真 - 3 浜松供試体全景

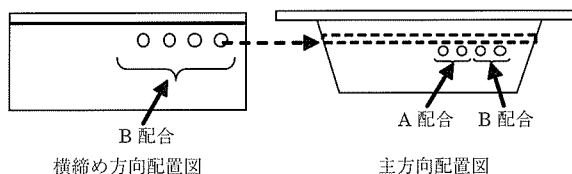


図 - 16 浜松供試体におけるプレグラウト鋼材の配置略図

7.2 温度履歴

コンクリート打設後の浜松供試体の横締め方向ケーブル周辺のコンクリート温度の解析結果（（社）日本コンクリート工学協会「マスコンクリートの温度応力計算用パソコンプログラム」による）を図 - 17 に示す。なお、図中、ケーブル中央部は横締め方向中央部、端部は横締め方向端部の解析値を示す。中央部で最大 64.1℃、端部で最大 56.8℃となっており、このサイズのコンクリート構造物の平均的な温度値であると考えている。一方、橋軸方向に配置したプレグラウト PC 鋼材の周辺温度は、横締め方向に配置した鋼材温度よりも温度が低かったため、詳述は省略する。

なお、コンクリートの水和発熱が終了したのちにプレグラウト PC 鋼材が受ける温度履歴は、ほぼ外気温と一致すると考えられるため、図 - 18 に浜松地方の 2000 年 3 月から 2005 年 12 月の月平均気温（気象庁発表）を示す。平均

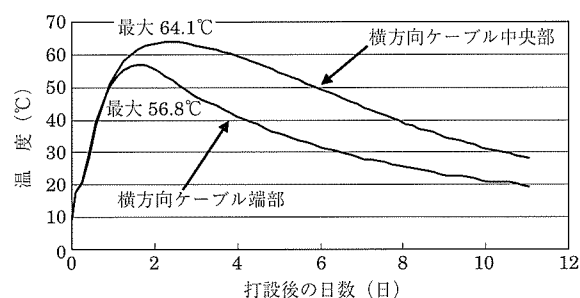


図 - 17 打設直後のコンクリート温度

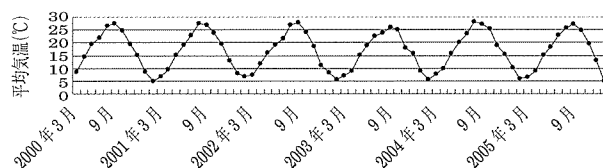


図 - 18 浜松地方の月平均気温

温度は、16.9℃となり、本州の平均気温 16℃とほぼ一致している。

7.3 硬化進行状況の確認

実部材中のエポキシ樹脂の硬化確認方法は、非破壊的なものから破壊試験まで、いくつか知られている。本実験では、コンクリート打設後の比較的初期においては、緊張可能期間を測定するため、繰り返し非破壊的な測定が可能な緊張力伝達すなわち鋼材伸長時の摩擦係数測定により評価を実施している。図 - 19 に評価方法の概略図を、図 - 20 に評価結果を示す。図中、（ ）内は摩擦係数を示す。なお荷重伝達率は固定端荷重 / 緊張端荷重とし、摩擦係数は 28.6φ PC 鋼材の引張荷重の 70% まで緊張力を導入した際

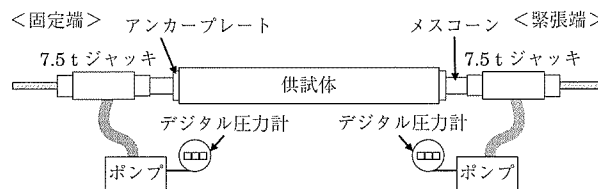


図 - 19 緊張力伝達測定試験の概略図

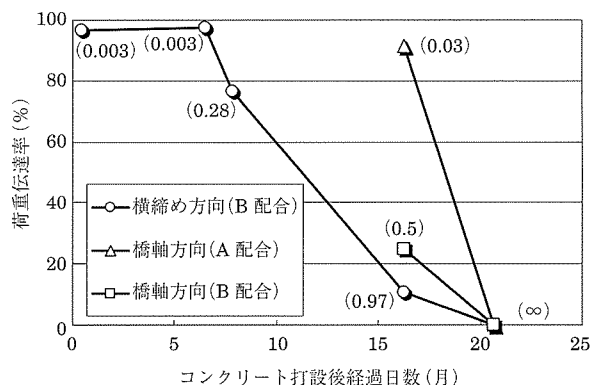


図 - 20 緊張力伝達試験による硬化進行状況確認結果

の緊張側と固定側の圧力差に基づいて計算した。

図 - 20 より横締め方向に配置した B 配合では、打設 6 箇月後までは緊張可能であり、打設 7 箇月以降は摩擦係数値が大きく上昇し、緊張が難しい状態にまで硬化することが分かった。また、橋軸方向に配置した B 配合および橋軸方向に配置した A 配合は、16 箇月後には緊張可能ではない状態にまで硬化が進行していることが確認できた。

また、いずれの配合、配置方向においても、打設 20 箇月後の時点で、固定側にまったく緊張力が伝達しないことが確認されており、硬化反応が継続していることが確認できた。

7.4 最終硬化状況の確認

2005 年 12 月に供試体を解体し、プレグラウト PC 鋼材のみ取り出し、硬化状況の調査を実施した。横締め方向に関しては、床版上面から距離が近いこともあり、解体開始前に床版上面からコア抜きによってサンプル鋼材を取り出して評価することとした。橋軸方向については供試体側面から 10 m のコア抜きが必要になり、コア抜きによるサンプル採取は困難と判断されたため、解体時に鋼材表面をはつり出して評価することとした。なお、はつり出しが簡便であることや、打設時の温度が比較的低いため、もっとも硬化進行が遅いことを考慮して、橋軸方向ケーブルの端部付近にて硬化確認を行うこととした。

また評価方法としては、すでに 5 年 9 箇月が経過しており、ほぼ完全に固体化していることが予想されたため、Shore D 硬度によって行うこととした。測定状況を写真 - 4 および 5 に、測定結果を表 - 12 に示す。なお、写真 - 5 右の樹脂の一部欠損は、はつり出し時の損傷によるものである。

表 - 12 に示したとおり、いずれの樹脂においても、平均硬度で 80 D を超えており、最終硬度に到達していることが分かった。ここで、平均硬度 70 D ～ 80 D において、プレグラウト PC 鋼材の樹脂の仕様値である圧縮強度 70 N/mm² を超えることが既知である。よって、本調査により湿気硬

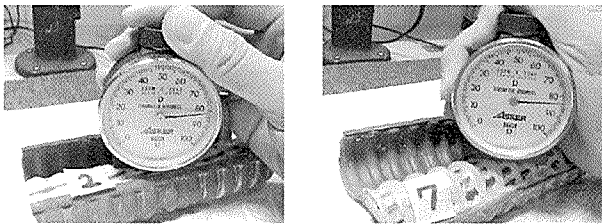


写真 - 4 コア抜きサンプル（横締め方向配置）の硬度測定

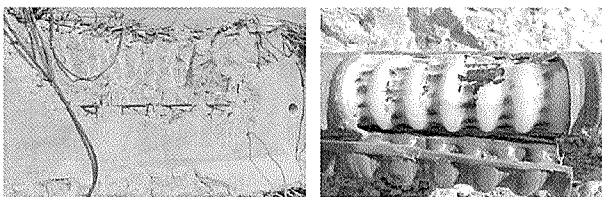


写真 - 5 橋軸方向ケーブルはつり出し状況と現行湿気硬化型（A 配合）の硬化状況

表 - 12 浜松供試体の硬化確認結果

配置方向	樹脂配合	平均硬度	最大値	最小値	測定 <i>n</i> 数
橋軸	湿気硬化型 (A 配合)	84.3	87	80	10
	湿気硬化型 (B 配合)	80.6	78	84	10
横締め	湿気硬化型 (B 配合)	80.6	86	74	20

化型プレグラウト樹脂が、床版として一般的なケースであっても 5 年 9 箇月以前に最終硬度に到達することを実大供試体において確認できた。

8. その他の硬化確認事例

最後にこれまでに得られた実部材を用いて行った現行湿気硬化型プレグラウト樹脂（A 配合）の硬化確認事例の一覧を図 - 21 に示す。詳細については割愛するが、すべてコンクリート部材内にプレグラウト PC 鋼材を埋め込んだ状態での確認例である。なお図中、バーの右端がコンクリート打設後、最終的に確認した際の硬化状態を示し、バー上に記載した数値が確認時の材齢と年月を示している。

図より、比較的短期間に硬化完了に至ったマスブロック供試体（No. ①～④）を除き、コンクリート打設後最高温度が 45℃～96℃の供試体（No. ⑤～⑨）において、ほぼ 3 年から 4 年以内に硬化が完了していたことが確認できた。

9. 硬化シミュレーションの精度向上

最後に、湿気硬化型プレグラウト PC 鋼材の硬化パラメーターの精度向上について述べる。

今回、これまで述べてきた種々の硬化確認実験結果に基づき、上記シミュレーションの精度向上を狙い、パラメーター調整を行っている。詳細は割愛するが、その結果の一例として富士供試体の例を図 - 22 に示す。実際の硬化進行状況と、シミュレーション結果とがほぼ一致していることが分かる。現在、さらなる予測精度向上のため、パラメーターの最適化を実施中である。

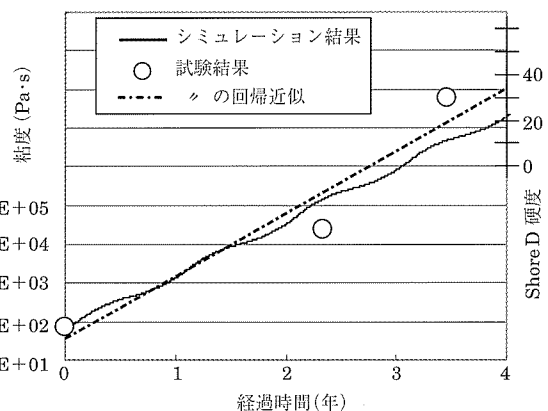
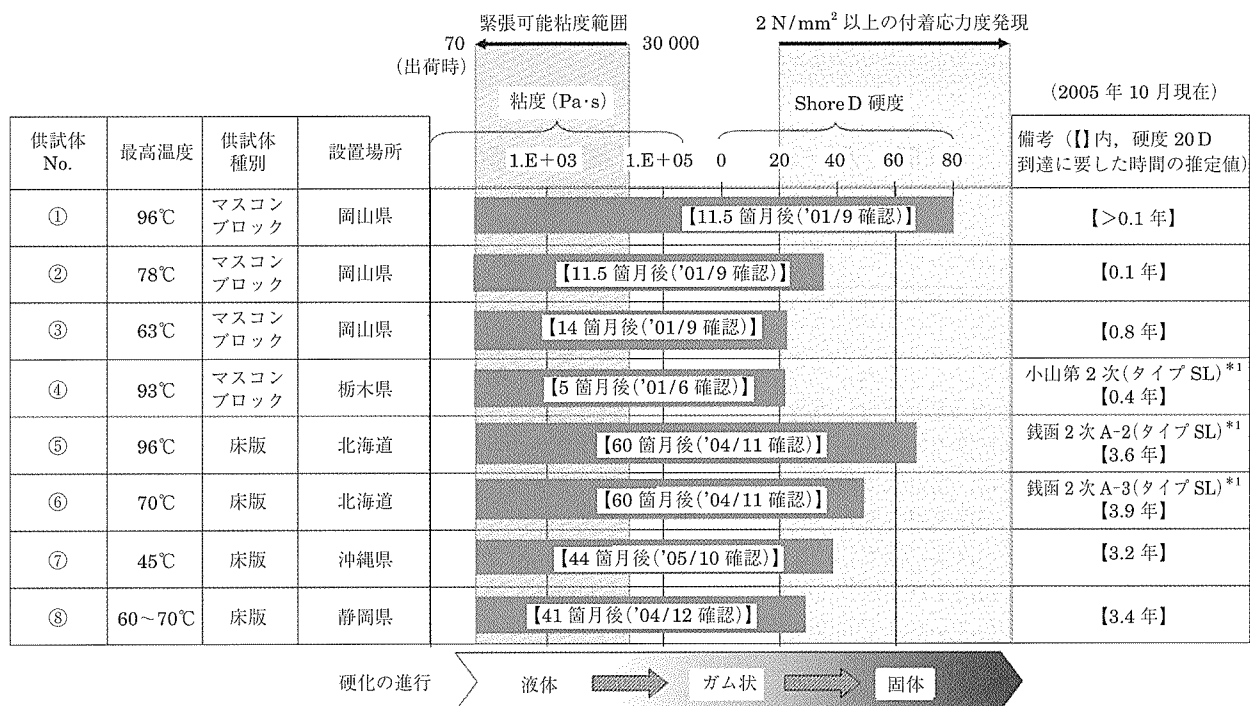


図 - 22 パラメーター調整後のシミュレーション結果と実測結果との比較（富士供試体）



*1… (財) 高速道路技術センター発行「PC 橋の耐久性向上に関する設計・施工マニュアル」中記載の名称
 ・【】内は、コンクリート打設から硬化状態を確認までの概算日数(および確認年月)

図 - 21 コンクリート中に埋設された実部材での湿気硬化型プレグラウト PC 鋼材の硬化確認試験一覧

10. ま と め

湿気硬化型プレグラウト PC 鋼材硬化状況の確認試験を行い、湿気硬化型プレグラウト樹脂が、実橋と同様の環境にさらされた実部材においても硬化が進行することを確認した。まとめを以下に示す。

マスブロック供試体において、約 1 年～1 年 6 箇月で硬化完了することが確認できた。硬度 20 D を硬化完了とすることで、付着性能を満足することを確認した。

北海道供試体については、供試体作製から 4 年 5 箇月後に、コンクリート打設後最高温度 96℃、70℃の供試体で、各々 32 D (96℃)、25 D (70℃) までの硬化進行を確認した。これにより寒冷地の実橋においても十分硬化が進行することを示唆する結果が得られた。

浜松、富士供試体については、一般的な床版を想定した実大供試体においても、十分に硬化が進行することが確認

でき、浜松供試体においては、自然環境のみでも最終硬度に到達することを確認することができた。

これら樹脂硬化試験の結果を反映させることにより、シミュレーションパラメーターの調整を行い、ほぼ実際の硬化進行状況を予測できる式を得ることができた。

参 考 文 献

- 1) 白濱, 大西, 名取: プレグラウト PC 鋼より線の開発, プレストレストコンクリート, Vol.48, No.2, pp.68 - 72, Mar. 2006
- 2) 青木, 大中, 橋川, 中村: プレグラウト PC 鋼材の適用性に関する研究, プレストレストコンクリート, Vol.43, No.3, pp.55 - 61, May 2001
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書, 付録 1[構造性能照査編], 2002 年版
- 4) Leonhardt, F., レオンハルトのコンクリート講座「プレストレストコンクリート」(1983), P37, 鹿島出版会

【2007 年 3 月 29 日受付】