

橋梁床版横締め用プレグラウトPC鋼材のコンクリート温度に対する影響検討

山下 哲志* 近江 重正** 藤井 誠剛**

要約 : プレストレストコンクリート橋梁上部工では、過去にPC鋼材のグラウト不良によるPC鋼材の腐食事例が発生している。グラウト不良を抜本的に改善するための新工法として、グラウト不要のPC鋼材であるプレグラウトPC鋼材が開発され適用事例が増えている。

このプレグラウトPC鋼材はエポキシ樹脂で覆われており、樹脂の硬化時間は温度に影響される。また温度に影響を受けた後の、PC鋼材の見掛けのヤング係数や摩擦係数にも変化が現れることが予想された。これらのファクターはPC構造物の緊張に深く関連するものであり、これから適用が増えていくであろうプレグラウトPC鋼材に関するデータの収集は急務であると考えられる。

そこで、実際の構造物にてコンクリート、プレグラウトPC鋼材温度を計測しFEM温度解析との比較を行い、また温度履歴を受けたプレグラウトPC鋼材の見掛けのヤング係数、摩擦係数を測定した結果、以下のことがわかった。

- 1) FEM温度解析はコンクリートまたはプレグラウトPC鋼材の温度履歴を十分に予測することができる。
- 2) FEM温度解析により、適切なプレグラウトPC鋼材の樹脂タイプを選定することができる。
- 3) いったん60℃程度の高温にさらされたプレグラウトPC鋼材の樹脂は、少なくとも5日間経過後には硬化を始め、それに伴ってPC鋼材の見掛けのヤング係数も増大する。

キーワード : PC橋梁, プレグラウトPC鋼材, 見掛けのヤング係数, 摩擦係数, FEM温度解析

目次 :	1. はじめに	5. FEM温度解析
	2. 実験概要	6. 実験結果
	3. プレグラウトPC鋼材およびコンクリート	7. まとめ
	4. 試験緊張	8. おわりに

1. はじめに

近年、PC橋梁においてその使用が標準となりつつあるプレグラウトPC鋼材は、表面が遅延硬化型のエポキシ樹脂およびポリエチレンシースで覆われており、その樹脂が硬化することによってコンクリートとの一体化を図ることができるグラウト不要のPC鋼材である。ただし、この樹脂は温度に非常に敏感で、あまり長時間高温にさらされると硬化をはじめてしまうといった性質を持っている。樹脂には硬化完了時間に合わせて6～7種類のタイプが用意されているが、それに伴って硬化を始めるまでの可使時間(=緊張可能時間)も異なる。したがって、コンクリート打設による温度上昇が各タイプの樹脂に与える影響は大きく、場合によっては樹脂の硬化による緊張不能を起こしかねない。しかし、あらかじめコンクリートの温度履歴が把握できれば、樹脂の硬化のタイミングを予測することができ、どのタイプの樹脂を使うのが最も効果的かということ判断することも可能となる。

そこで、我々はコンクリート温度履歴についてはFEM解析を行い予測することとした。また、PC鋼材の可

*生産技術本部 土木技術設計部 **名古屋支店 土木部

使時間内にも樹脂の硬化がある程度進むことが予想されたため、樹脂の硬化によるプレグラウトPC鋼材の見掛けのヤング係数、摩擦係数の経時変化を測定したので以下に報告する。

2. 実験概要

実験は当社施工のPC橋梁建設現場(東名阪自動車道上社ジャンクションPC上部工)において行った。本橋梁の構造は2主桁であり、プレグラウトPC鋼材は床版部の横締め用として適用されている。図1にプレグラウトPC鋼材の配置および温度計測点を示す。プレグラウトPC鋼材は主桁上部に配置されるが、現場のコンクリート打設は全断面一括で行われ、主桁部、床版部と2回に分割する打設方法に比べコンクリート温度の影響は大きいと考えられる。また支点横桁部においては2000mm×2000mm×5900mmの横桁上部に配置されることとなり、こちらは主桁上部のプレグラウトPC鋼材よりもさらにその影響が大きいことが予想された。

コンクリート温度は、主桁断面中央付近(測点4・5)および横桁断面中央付近(測点9)において計測するも

のとした。またプレグラウトPC鋼材の温度は、東桁部、中央部、西桁部を測点とし、主桁上部に配置されるもの（測点1・2・3）、横桁上部に配置されるもの（測点6・7・8）それぞれについて計測を行った。

3. プレグラウトPC鋼材およびコンクリート

3.1 プレグラウトPC鋼材の諸元

プレグラウトPC鋼材の諸元を表1に示す。これらの値を標準とし、実験結果と比較してコンクリート温度が樹脂に与える影響について考察する。

表1 プレグラウトPC鋼材の諸元

鋼材規格	IS28.6 (19本より線)
見掛けのヤング係数 E_p	191kN/mm ²
摩擦係数 μ (角度による摩擦係数)	0.1 (1/rad)
摩擦係数 λ (長さによる摩擦係数)	0.003 (1/m)

3.2 プレグラウトPC鋼材の可使時間（可使余裕度）

図2にプレグラウトPC鋼材の可使時間（緊張可能時間）を示す¹⁾。実際のプレグラウトPC鋼材の可使時間は温度×日数の累加で表され、コンクリート温度の経時変化に伴い順次変化していく。例えばプレグラウトPC鋼材タイプHを使用し、平均温度が80℃で1日、60℃で2日、40℃で4日という経時変化をしたとする。それぞれの温度における可使時間は図2より、80℃で3.5日、60℃で25日、40℃で150日であるから、その可使余裕度は、

$$1/3.5 + 2/25 + 4/150 + \dots \approx 0.39$$

と表すことができ、算出した結果が1以下であれば、緊張可能と考えて良い。

3.3 コンクリートの配合

使用したコンクリートの配合を表2に示す。初期段階において強度の発現が必要なため、早強セメントを使用する。 $\sigma_{ck} = 36\text{N/mm}^2$ に対するセメント量が404kgf/m³と、一般的な構造物に比べ多い。また、本来、通常の保証材齢28日の早強コンクリートを使用する予定であったが、強度の発現が遅れるとプレグラウトPC鋼材の樹脂の硬化が進んでしまうのではないかと懸念から、急遽保証材齢7日の配合に変更した。若干セメント量が増え、さらなる温度上昇も考えられたが、強度発現の早さ、経過時間が樹脂に与える影響を考慮し決断に至った。

4. 試験緊張

コンクリート温度の樹脂の硬化に対する影響については、試験緊張によるPC鋼材の伸び量の変化で評価するものとした。試験緊張とは、PC鋼材両端に緊張ジャッキ、ポンプをそれぞれ配備しPC鋼材を試験的に緊張

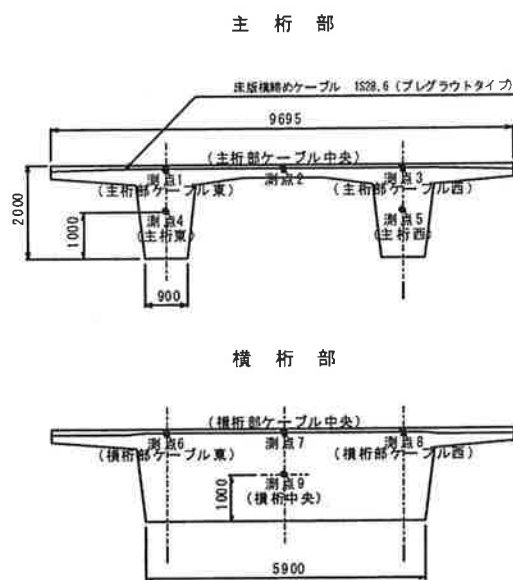


図1 プレグラウトPC鋼材の配置および温度計測点

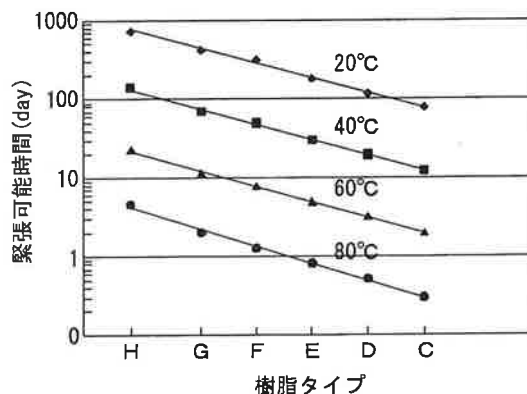


図2 プレグラウトPC鋼材の緊張可能時間

表2 コンクリート配合

水セメント比 (%)		40.5
細骨材率 (%)		37.0
単位量 (kg/m ³)	水	164
	セメント	404
	細骨材	627
	粗骨材	1084
	混和剤(マイクロエア202)	4.05

することで、緊張圧力の損失、PC鋼材の伸び量が得られ、その結果PC鋼材の見掛けのヤング係数と摩擦係数が算出できるものである。樹脂の硬化が始まればPC鋼材の伸びを拘束することとなり、見掛けのヤング係数、摩擦係数ともに増大することが予想される。

本実験では2回の計測時期があったが、1回目の計測時には本設ケーブルにて試験緊張を行ったために、試験緊張データとしては満足するものが得られなかった。2回目の計測時にはあらかじめデータ測定用のダミーケーブルを配置しておき、仮に樹脂が硬化して緊張不能になっても本体構造に影響を及ぼさないようにして行ったため、データ量も多く信頼できるものとなった。

5. FEM温度解析

5.1 解析手法および解析モデル

温度解析は2次元有限要素法を用いて行なった。解析モデルは図3および図4に示すようなメッシュである。主桁部、横桁部とも厳密には対称ではないが、コンクリートの発熱に及ぼす影響はほとんどないと考えられるので1/2モデルとして計算を行なった。

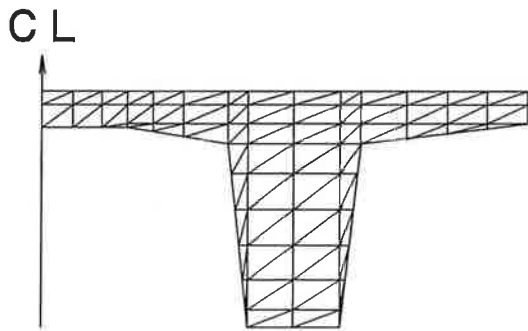


図3 主桁部メッシュ図

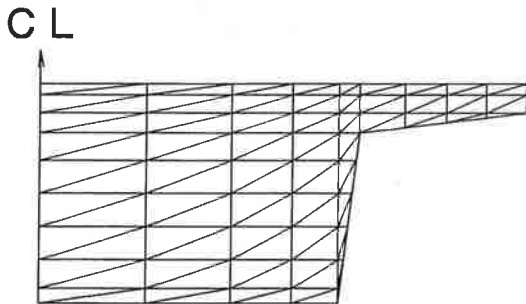


図4 横桁部メッシュ図

5.2 コンクリートの発熱特性

コンクリートは、硬化する際にセメントの水和反応に起因して発熱するが、コンクリートの発熱特性は、一般

に断熱温度上昇式と呼ばれる次式によって定義される。

$$Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-\gamma t})$$

Q(t) : 材令 t 日における断熱温度上昇量 (°C)

Q_∞ : 終局断熱温度上昇量 (°C)

γ : 温度上昇速度に関する実験定数

t : 材令 (日)

この式のパラメーターQ_∞およびγは、コンクリートの打設温度、セメントの種類、単位セメント量から決定される。今回の解析では、コンクリート標準示方書-施工編²⁾を基に上記パラメーターを表3のように仮定した。

表3 早強セメントの断熱温度パラメーター

	第1回目	第2回目
打設日	99/10/2	99/11/3
打設温度 (°C)	29.0	21.0
Q _∞ (°C)	62.72	64.32
γ	2.223	1.941

6. 実験結果

図5および図6に第1回目の実験結果を示す。

コンクリートおよびプレグラウトケーブルの温度履歴に関しては、実測データとFEM解析の値はほぼ同様なラインを描いている。したがって、温度履歴に関してはFEM解析が妥当であるとの評価ができる。また桁内部（主桁中央および横桁中央）に関しては最高温度が90°Cに達しているのに対し、桁上部に配置されたプレグラウトPC鋼材に関しては約70°Cであることが判明した。なお、測点1と3、測点4と5のように左右対称断面の同位置にある測点は、FEM解析結果はもとより、実測データにおいてもその温度履歴はほぼ同一なものとなった

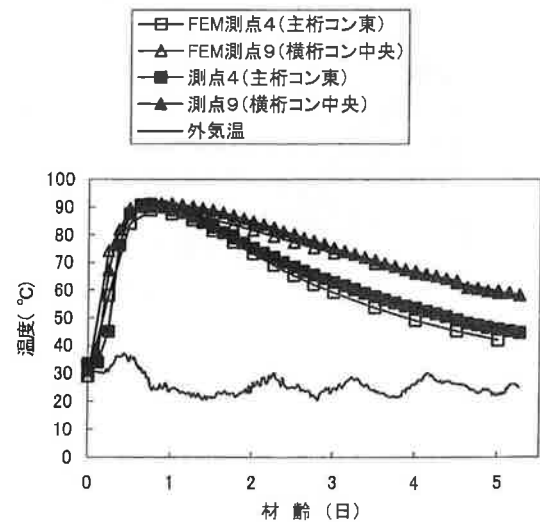


図5 コンクリート温度履歴

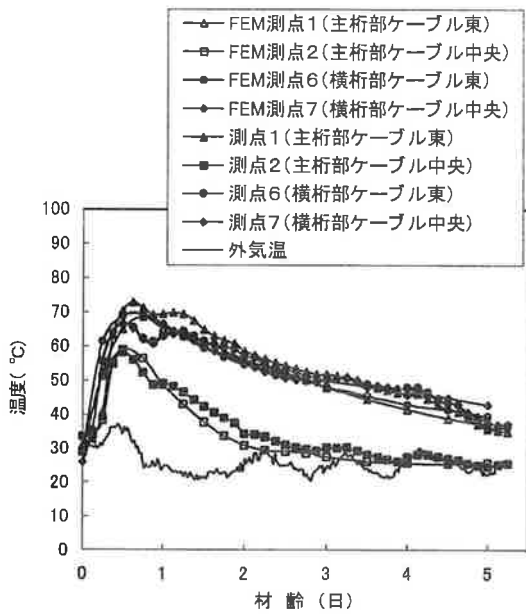


図6 プレグラウトPC鋼材温度履歴

ため、どちらか一方のデータのみ示している。グラフ上、測点2の温度が他に比べて低いのは、図1に示したようにこの部分は主桁と主桁に挟まれた中央床版部であり、部材厚も300mmと薄いからである。

次に図7に、第2回目の実験結果を示す。

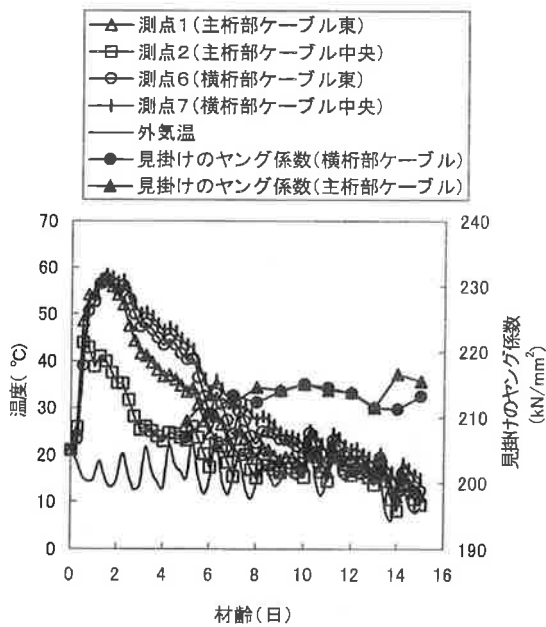


図7 ケーブル温度履歴および見掛けのヤング係数

コンクリート打設時期が11月ということもあって、プレグラウトPC鋼材の最高温度が60°C程度となっている。なお、グラフが煩雑になるためFEM温度解析結果

は省略している。材齢5日目より始めた試験緊張のデータを重ね合わせると、材齢11日目から13日目にかけていったん見掛けのヤング係数が小さくなるものの最終的には主桁部ケーブルにおいては215kN/mm²となっており、材齢5日目の204kN/mm²に比べると約5%程度の増大が見られる。これは樹脂の硬化に少なくとも5日目から影響が出始めたことを示しており、それに伴ってPC鋼材の伸びが拘束され見掛けのヤング係数の増大につながったものと言える。

また、3.1で示したプレグラウトPC鋼材のヤング係数の標準値191kN/mm²に比べ、実験結果のほうが全体的に大きいことがわかる。これはプレグラウトPC鋼材が設置された時点から直射日光の影響を受け、少なからず樹脂の硬化が進行したこと、さらにコンクリート打設によって一時的にはあるが高温状態にさらされたことが原因であると考えられる。

第2回目の実験にはダミーケーブルを使用したこともあり、施工に支障を来さない範囲でできるだけ多くのデータ採取を試みた。そのなかで、図7には示していないが材齢100日目の実験結果においては、見掛けのヤング係数が204kN/mm²であり、材齢初期段階の値に近づいている。これは、材齢初期においてはコンクリート温度が高く樹脂の硬化に影響を与えたものの、その後のコンクリート温度の低下、季節の変動による外気温の低下に伴い樹脂の硬化が抑制されたものと考えられる。ただし、いったん硬化を始めた樹脂とPC鋼材との付着が切れ、まだ樹脂の硬化が促進されていない材齢初期の段階に戻ったとも考えられるため、この部分については引き続き研究が必要である。

図8に第2回目の実験結果のうち、摩擦係数測定結果を示す。

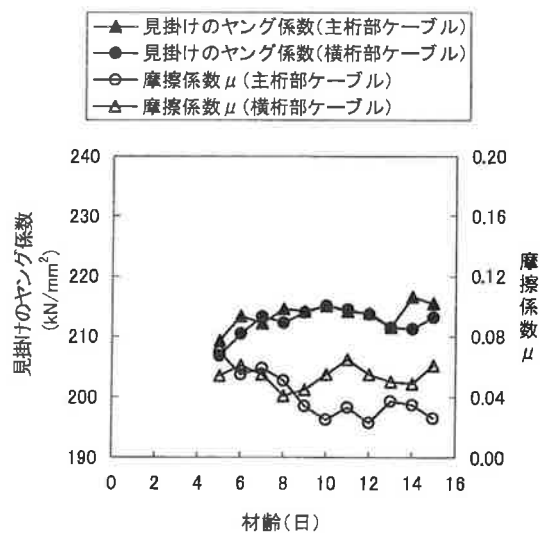


図8 見掛けのヤング係数および摩擦係数

図からわかるように当初の予想とは反して摩擦係数の増大は見られない。これは、プレグラウトPC鋼材の配置角度が小さいこと、また見掛けのヤング係数に比べPC鋼材の伸び量算出に与える影響が小さいことによるものだと考えられる。一般に床版横締めを使用されるプレグラウトPC鋼材の配置はほぼ直線的なものが多く、摩擦係数の変動がPC鋼材の伸び量に与える影響は無視できるほど小さい。むしろ見掛けのヤング係数によって伸び量を算定、または管理したほうが実施工に合致する場合が多い。しかし、あくまでも配置角度の小さい床版横締めに限ってこの考えが適用できるのであって、今後主流となるであろう主ケーブルへのプレグラウトPC鋼材の適用に際しては十分配慮する必要がある。

表3に第2回目に用いたプレグラウトPC鋼材のうち、最高到達温度を示した横桁部ケーブル中央の温度履歴をもとにその可使余裕度を示す。通常考えられる範囲として10日までの可使余裕度を計算すると0.111<1となり、緊張に関しては全く問題ないと言える。しかし注目すべきは、図7に示したヤング係数の増大のほうである。これはたとえ可使時間内で緊張可能であったとしても、見掛けのヤング係数の増大を考慮しておかなければ、確実なプレストレスを導入することができないことを示唆している。仮に5%の見掛けのヤング係数増大を知らぬままプレストレスの導入を行ったとすると、オーバーストレスという構造に悪影響を及ぼす結果を招くことになる。

表3 ケーブルの可使余裕度

日数	日平均 ケーブル温度 (°C)	可使時間 (日)	可使余裕度
1	38.4	180	0.006
2	57.1	30	0.033
3	54.3	40	0.025
4	49.0	60	0.017
5	45.7	90	0.011
6	39.1	150	0.007
7	33.3	250	0.004
8	29.4	300	0.003
9	26.9	400	0.003
10	23.8	500	0.002
計			0.111

7. まとめ

以上のような実験結果から次のようなことがわかった。

- ① FEM温度解析は、コンクリートまたはプレグラウトPC鋼材の温度履歴を十分に予測することができる。
- ② FEM温度解析を行い、その結果からプレグラウトPC鋼材の可使余裕度を計算することで、適切な樹脂タイプを選定することが可能である。
- ③ いったん60°C程度の高温にさらされたプレグラウトPC鋼材の樹脂は、少なくとも5日間経過後には硬化を始め、それに伴ってPC鋼材の見掛けのヤング係数も増大する。

8. おわりに

一般的にプレグラウトPC鋼材を適用するにあたっては、エポキシ樹脂がコンクリート温度によって硬化を促進される前に緊張を行うことができるかどうかを判断することが重要であるとされている。しかし同時に過大に安全側に評価した樹脂タイプを使用することは、供用開始後にもコンクリートとPC鋼材に付着がない状態が続くこととなり構造に悪影響を及ぼしかねない。

したがって、今後はプレグラウトPC鋼材温度履歴をFEM解析によって把握し、その結果をもとに可使余裕度を計算することで最も適切な樹脂タイプを選定していく必要がある。また、樹脂の硬化促進に伴うPC鋼材の見掛けのヤング係数増大についても、確実な根拠を基に適切な緊張管理を行うことができるよう研究を続けていく予定である。

参考文献

- 1) 神鋼鋼線工業(株)プレグラウトPC鋼材カタログ
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書「平成8年制定」施工編，pp.185-186，1996年3月

A Study on the effect of Temperature on the Pre-Grouted PC Strands for Bridge Slab

T.Yamashita, S.Oomi, S.Fujii

Pre-Grouted PC Strands is widely employed in order to prevent the failure of cement grout work.

The strand is coated by delayed hardening type epoxy, which is under the influence of the temperature of the concrete. Young's modulus and friction modulus will vary hour by hour after the casting of concrete under the hydration temperature.

The authors measure the hydration temperature of concrete, the Young's modulus and the friction modulus of pre-grout PC strands at the construction site of the prestressed concrete bridge. The temperature analysis data before the construction is verified by the measurement data.

It is found that after five days of the casting of concrete the epoxy starts to set, and the Young's modulus and the friction modulus increases.