

プレテンション方式充実スラブ桁の製作

大阪支店	技術部	馬渡宣宏
大阪支店	PC 工事部	諸山勝雄
技術本部	開発技術部	阪上徳行

概要: 品質の確保や現場での省力化から、プレキャスト工法による施工が多くなってきている。しかし、製作機材の改良により、製作される部材も大型化し、これまでは問題とならなかった温度応力に起因したひび割れが課題となり、このひび割れ抑制策を講じる必要性ができた。そこで、本研究では、プレテンション方式大断面充実スラブ桁製作に最適な蒸気養生設定を実験および解析的に検討した。その結果、脱枠後に直ちに保温養生を開始し、製品表面と外気温度との差が 15℃以下まで実施することがよりひび割れ抑制に効果的であることなどが明らかになった。

Key Words: マスコンクリート、温度ひび割れ、充実スラブ桁、プレテンション方式

1. はじめに

近年、品質の向上や工期短縮から工場にて製作されたプレキャスト製品を用いて構造物を構築するケースが多くなってきている。また、大型アバットの出現により、以前では現場製作もしくはプレキャストブロック工法によるものが、プレテンション方式にて製作が可能になった。関西国際空港 2 期島アンダーパス上部工事に用いられている主桁は航空機荷重 LA-0 (総質量 6664kN, 脚荷重 1557kN, 輪荷重 389kN) に対応する充実断面であり、製作時のひび割れを防ぐ目的でパイプクーリングを行う構造となっていた。その理由として、主桁断面が充実で 1.0m×0.64m と大きくプレテンション桁であるため、富配合コンクリート使用による温度上昇が大きく、脱枠時の急激な温度差によるひび割れの発生が危惧されたためである。しかし、通常パイプクーリングは打設後のコンクリート温度上昇抑制のために行われており、早期強度 (脱枠・緊張強度) を得るために蒸気保温養生を行うプレテンション桁の製作方法としては、相反する養生方法である。パイプクーリングを行い、強度発現材齢を長くする方法もあるが、製作日数の増加が懸念される。

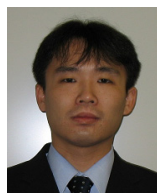
そこで、本研究は、桁のひび割れ抑制を実施するために、養生方法をパラメータとした試験を行い、パイプクーリングに代わる桁製作の養生方法の検討を行った。また、プレテンション導入時に生じる桁端部の引張応力の補強方法の検討についても実施した。



馬渡宣宏



諸山勝雄



阪上徳行

3.2.2 供試体寸法

供試体寸法は、断面形状を図-2に示す実桁と同一とし、桁長を2mとした。片側に厚さ100mm発泡スチロールを配置し、桁端部を模擬した。供試体寸法を図-2に示す。

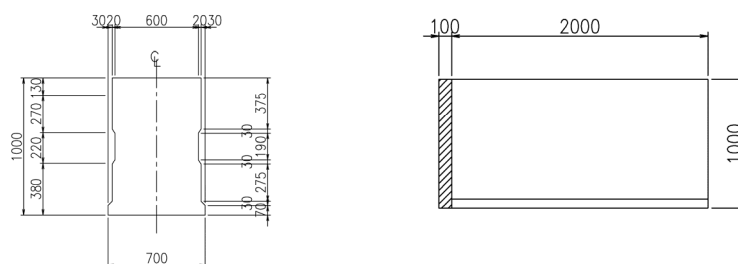


図-2 供試体寸法

3.2.3 養生条件

打設後3時間後からの温度上昇時間・最高温度・最高温度保持時間・温度下降時間、および養生マット+散水養生の有無に変化を付ける。養生マット+散水養生の方法として、打設完了後1時間後より養生マットを敷設し、散水養生を行った。試験に用いた養生条件を表-2および図-3に示す。

表-2 養生条件一覧表

シリーズ	1	1	2	2	2
Type	①	②	③	④	⑤
養生マット 散水養生	無し	無し	有り	有り	有り
積算温度	595°C _h	493°C _h	493°C _h	280°C _h	408°C _h
シリーズ	3	4	4	5	5
Type	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
養生マット 散水養生	有り	有り	有り	有り	有り
積算温度	450°C _h	490°C _h	420°C _h	460°C _h	455°C _h

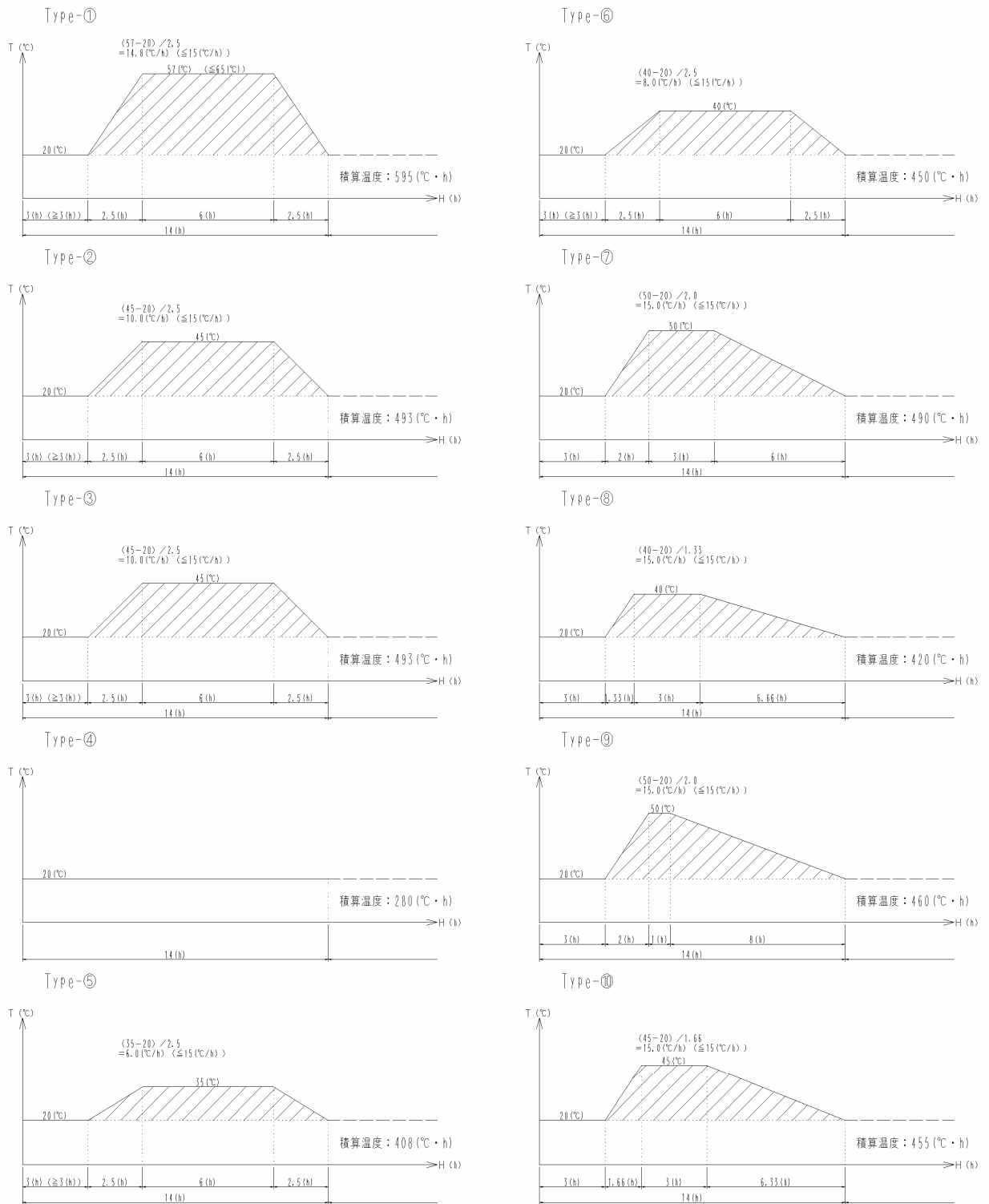


図-3 養生履歴図

3.3 試験内容と結果

養生履歴の変化による試験結果を表-3に示す。

表-3 試験結果一覧表

シリーズ	1	1	2	2	2
Type	①	②	③	④	⑤
強度発現	13h	13h	13h	40h	22.5h
ひび割れ幅	0.04	0.15	0.04	無し	(0.04以下)
シリーズ	3	4	4	5	5
Type	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
緊張強度発現	13h	13.5h	18.5h	14h	14h
ひび割れ幅	(0.04以下)	0.04	無し	(0.04以下)	(0.04以下)

3.3.1 導入時強度の検討

材齢 13 時間から 30 分ピッチで圧縮強度を行い、圧縮強度 30N/mm²以上となる材齢を把握した。表-3 試験結果一覧表より積算温度は、養生履歴⑥程度である 450℃h を確保する必要があることが明らかになった。

3.3.2 ひび割れ発生状況

養生履歴タイプ①②③⑦において、ひび割れが発生した。この、ひび割れが発生した養生履歴の中でも、上下面のひび割れについて、養生履歴①で発生が少なく、側面については、養生履歴タイプ③が最も少ない結果となった。

3.3.3 実験結果と温度応力解析との比較によるひび割れ指数の設定

所定の性能を満足した上下面について養生履歴タイプ①、側面について養生タイプ②について再現解析を実施した。

図-4 に試験桁の温度解析結果を示す。解析条件として、圧縮強度は Type-⑥における実測値とし、引張強度はコンクリート示方書 4.2.5 により設定した。材齢は有効材齢とし、収縮ひずみを考慮して解析を行った。試験結果と解析結果から、解析結果によるひび割れ指数を上下面で 1.10 以上、側面で 1.00 以上とすることにより、所定の性能を満足することが判明した。このことから、以降の実施工モデルの養生方法の解析的検討では、このひび割れ指数を目標に養生方法を検討した。

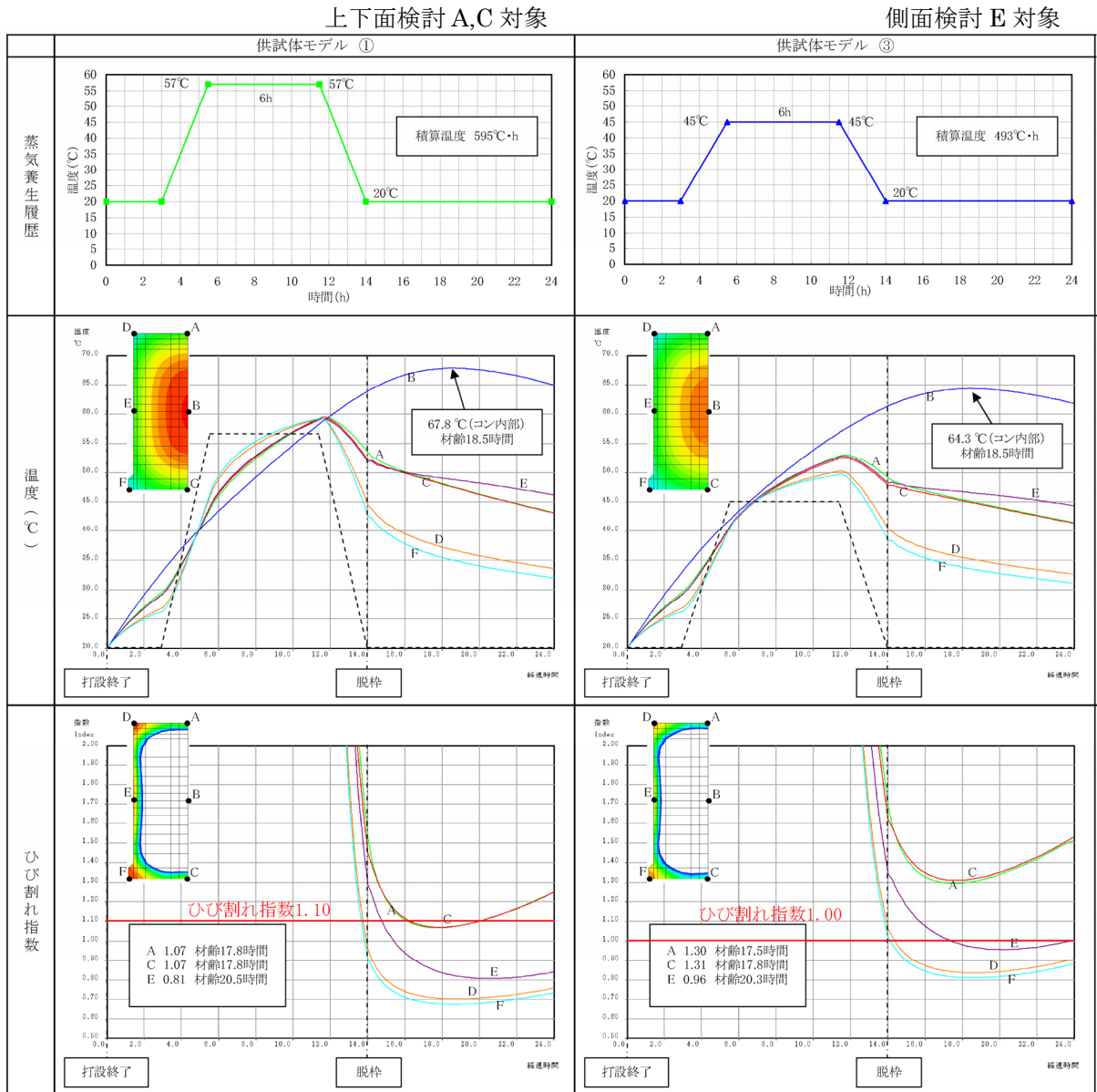


図-4 試験桁温度解析結果

4. 実施工モデルの養生方法検討

4.1 実施工モデルの解析

4.1.1 解析モデル

実施工モデルは、桁高 1m、桁長 15.36mの充実断面を、橋軸方向、橋軸直角方向の対称性を考慮した 1/4モデルとする。図-5に実施工モデルを示す。

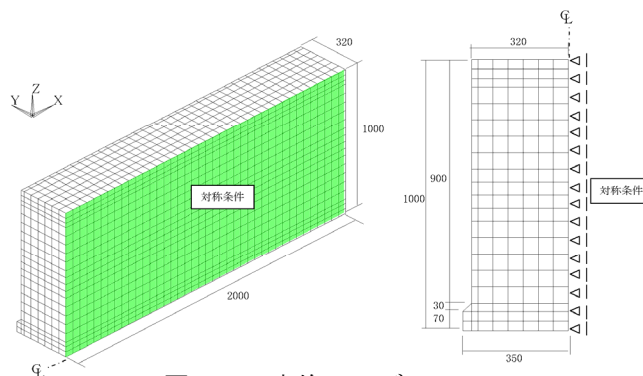


図-5 実施工モデル

4.1.2 検討養生条件

表-4に解析ケースを示す。初期養生試験で行った養生履歴を用い、緊張力導入強度発現時間を確保するために積算温度は、450°C hを確保する養生パターンとした。気象条件（コンクリート温度および外気温）については、主桁製作時期にあわせた場合を想定して設定した。

表-4 解析ケース

解析ケース名 ¹⁾	養生条件					脱枠時期	外気温	C o n 打設温度
	最高温度	維持時間	養生時間 (積算温度)	養生後の 外気温	保温養生時間			
46.5-14h-A	46.5°C	6 h	14 h (450°C h)	20°C一定	0h ²⁾	材齢 14 h	5°C	10°C
46.5-14h-B				20°C一定	4h			
46.5-14h-C				25°C一定	10h			
40°C-16h-A	40°C	6 h	16 h (445°C h)	5°C一定	0h	材齢 16 h	5°C	10°C
40°C-16h-B				5°C一定	4h			
40°C-16h-C				10°C一定	10h			
55°C-14h-A	55°C	3 h	14 h (455°C h)	5°C一定	0h	材齢 14 h	5°C	10°C
55°C-14h-B				5°C一定	4h			
55°C-14h-C				10°C一定	10h			

注 1) 解析ケース名は蒸気養生最高温-脱枠時間を示す

注 2) 保温養生は脱枠後に「発泡スチロール+養生シート」の養生方法を示す

4.1.3 解析結果

表-5に解析結果を示す。解析ケース 40°C-16h-Cにおいて、先の初期養生試験にて設定したひび割れ指数目標値、主桁側面 1.00 以上、主桁上下面 1.10 以上を満足した。

表-5 実施工モデル温度解析結果

解析ケース名	最高温度	養生後の 外気温	保温養生 生時間	ひび割れ指数 解析結果		判定結果 ¹⁾	
				側面	上下面	側面	上下面
46.5-14h-A	46.5℃	20℃一定	0h	0.87	1.02	×	×
46.5-14h-B		20℃一定	4h	0.87	1.05	×	×
46.5-14h-C		25℃一定	10h	0.96	1.13	×	○
40℃-16h-A	40℃	5℃一定	0h	0.93	1.06	×	×
40℃-16h-B		5℃一定	4h	0.94	1.12	×	○
40℃-16h-C		10℃一定	10h	1.03	1.18	○	○
55℃-14h-A	55℃	5℃一定	0h	0.85	1.00	×	×
55℃-14h-B		5℃一定	4h	0.86	1.03	×	×
55℃-14h-C		10℃一定	10h	0.94	1.10	×	○

注1) ひび割れ指数目標値：主桁側面 1.00 以上，主桁上下面 1.10 以上

4.2 実験による検証

4.2.1 実験概要

(1) 養生条件

実際に主桁製作時と同等の外気温である冬期に供試体を作製し、40℃-16h-Cの養生履歴について検証実験を行う。なお、緊張力導入後における以下の養生方法の違いによるひび割れの発生確認するため、40℃-16h-A 40℃-16h-B も実験を行う。

40℃-16h-A：打設完了後 16 時間後に脱枠し，そのまま外気に晒す。

40℃-16h-B：打設完了後 16 時間後に脱枠し，速やかに発泡スチロール+養生シートで断熱養生を 4h 行う。

40℃-16h-C：打設完了後 16 時間後に脱枠し，速やかに発泡スチロール+養生シートで断熱養生を 24h 行う。（断熱養生時間は，実施工上の都合により延長した。）

図-6 および写真-1 に発泡スチロール+養生シート養生状況を示す。

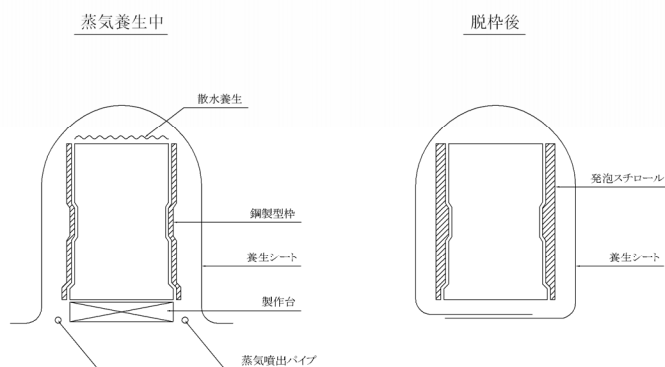


図-6 主桁養生図



写真-1 養生状況

(2) 供試体寸法

供試体寸法は、断面形状を実桁と同一とし、桁長は 5m とした。図-7 に供試体寸法を示す。供試体は桁端部を模擬して、片側は伸縮装置設置のための切欠きを設けた。

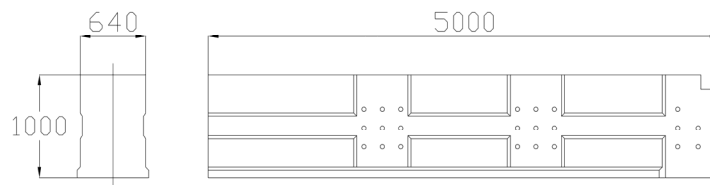


図-7 供試体寸法

4.2.2 試験結果および考察

図-8 にひび割れ発生状況を示す。

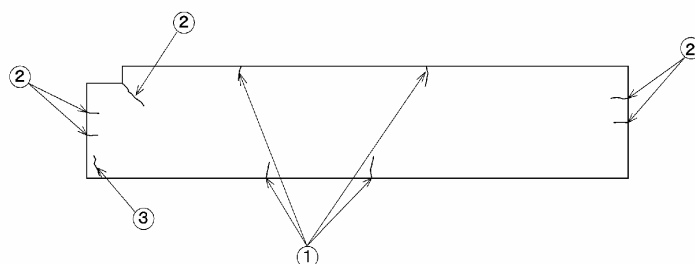


図-8 ひび割れ発生図

40°C-16h-A に①のびび割れが発生し、②については全ての養生履歴で発生した。③については養生シート端部の桁にひび割れが発生した。

図中の①では温度応力、②ではプレストレスおよび③では養生不足に起因してひび割れが発生したと考えられる。①によるひび割れは断熱養生による保温時間を長くすることにより抑制することができ、本試験では 24 時間とした場合にひび割れが発生しない結果を得た。③によるひび割れは桁端部でシート内温度が確保できず、コンクリート温度の降温速度が速くなったことによりひび割れが生じたと考えられる。このため、桁端においては、シートを 2 重にするなどとして保温効果を高める工夫が必要であると考えられる。②については次章で検討を行う。

5. 桁端部補強

5.1 FEM解析

ここでは、実施工モデル実験においてプレストレスに起因してひび割れ発生したため、その影響要因を明確にするため、実施工桁の鋼材配置にて FEM 解析を実施した。

図-9 に解析結果を示す。桁端部で 2.1N/mm^2 、伸縮切欠部で 4.5N/mm^2 の引張応力が発生している。実施工モデルの実験のプレストレス導入時のコンクリート引張強度は 2.85N/mm^2 であり、伸縮切欠部に発生する引張強度より小さいため、ひび割れが発生すると考えられる。

伸縮切欠部に生ずる引張応力は P C 鋼材位置に集中していることから、切欠部に配置した P C 鋼材の位置を主桁側面付近から断面中央部に平行移動して発生応力を検討した。伸縮切欠部付近の P C 鋼材位置を変更し、FEM 解析を行った結果を図-10 に示す。

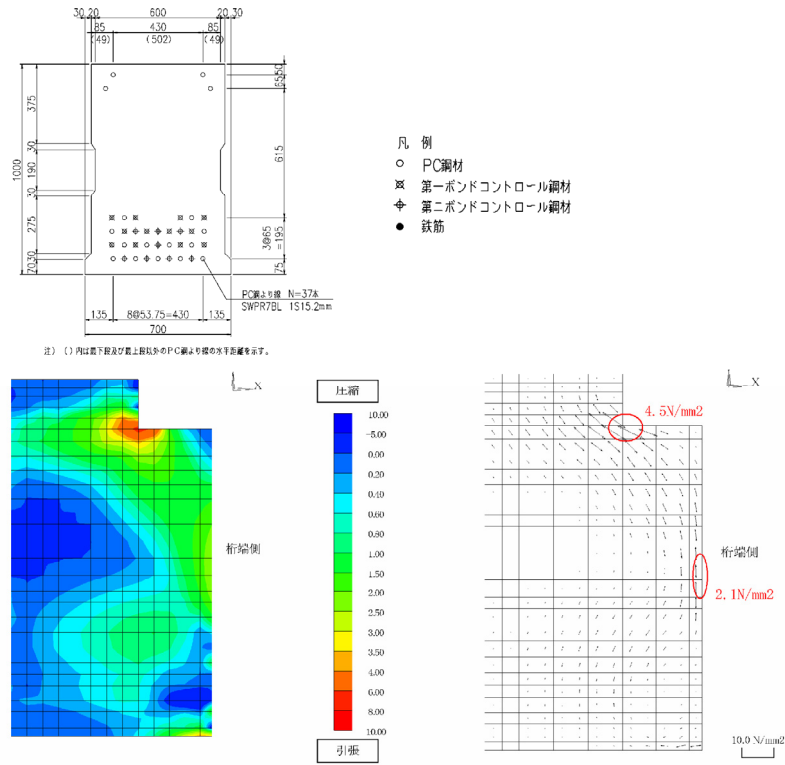


図-9 実施工桁FEM解析結果

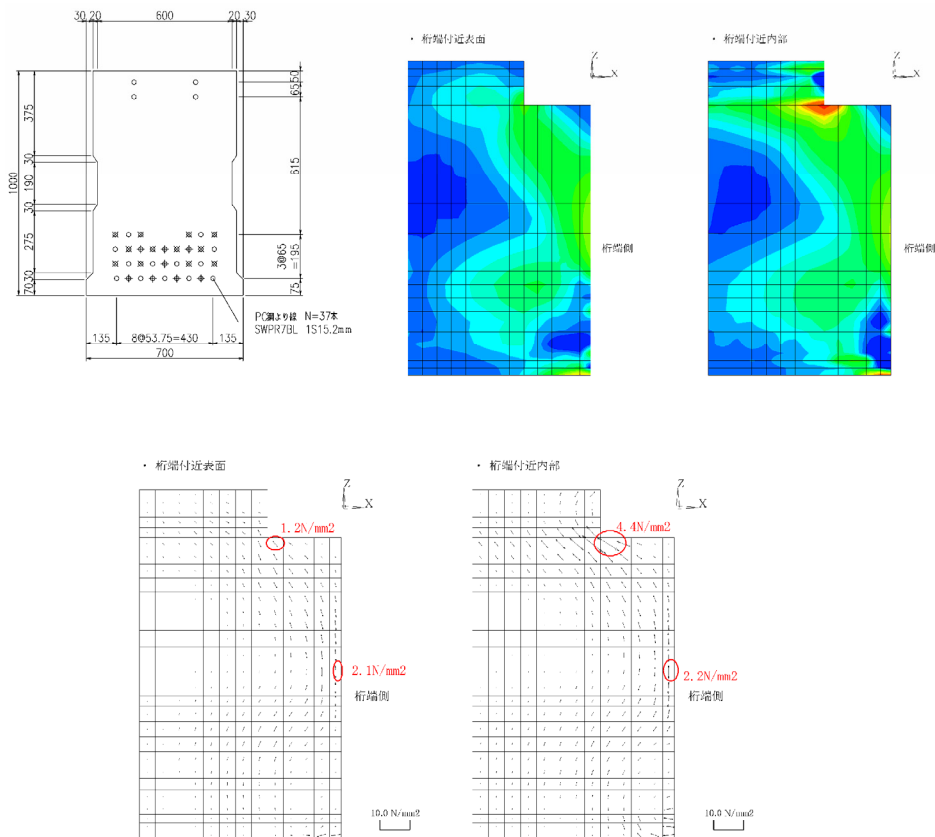


図-10 鋼材位置変更後、実施工桁FEM解析結果

桁端部は 2N/mm^2 程度、伸縮切欠部は側面で 1.2N/mm^2 、主桁内部で 4.4N/mm^2 の引張応力が発生する結果となり、伸縮切欠部の発生応力は大幅に低減できた。

しかし、主桁内部には 4.4N/mm^2 の引張応力が発生しているため、補強筋を配置してひび割れ幅の制御を行う。このPC鋼材配置にてひび割れの確認実験を行う。

5.2 目標とする温度応力設定

桁に発生する応力は温度応力およびプレストレスによる応力との合成応力と考えられる。ここでは、温度応力の許容値と保温養生時間の検討を行う。

図-11に引張応力度とコンクリート温度の関係を示す。材齢2日の引張強度は 3.4N/mm^2 であり、プレストレスおよび温度差による合計引張応力が 3.4N/mm^2 以下とする必要がある。プレストレス起因した引張応力度は桁端部で 2N/mm^2 であるため、温度応力に起因した引張応力は、 1.0N/mm^2 以下に制御する必要がある。

打設後 3.5 日で温度差が 15°C となり発生応力が 1.0N/mm^2 となる。実験結果からも打設後 4.0 日で温度差が 15°C となっており、解析結果は妥当であると考えられる。以上から、打設後 4 日まで断熱養生することがひび割れ抑制に効果的であると考えられる。

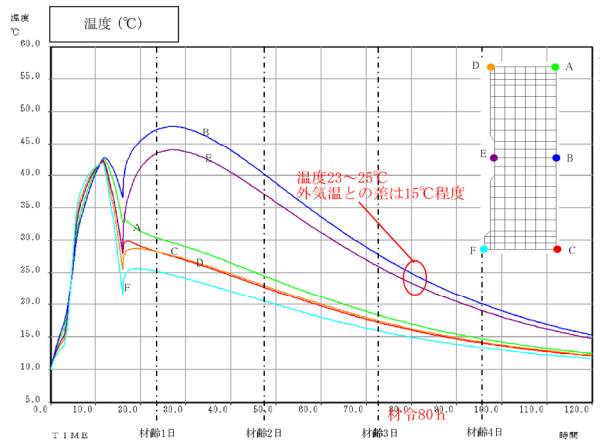
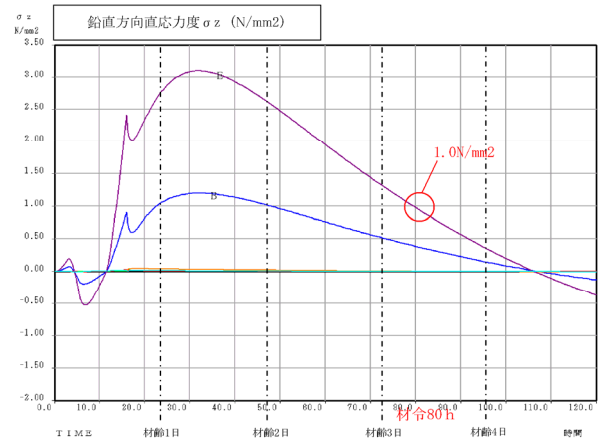


図-11 材齢-温度応力(上図)
材齢-コンクリート温度図(下図)

6. 決定した養生方法とPC鋼材位置とした確認試験

6.1 実験概要

これまでの検証結果をふまえて、初期養生と断熱養生および端部補強の効果を確認するために確認実験を実施した。

6.1.1 養生方法

養生方法は、初期養生方法は全タイプ統一とし、保温養生を緊張力導入時・以後 24h, 48h, 96h に撤去する 4 タイプとした。また、計算上内部補強筋量を必要鉄筋量と必要鉄筋量の 2 倍では効果に違いは出ないのだが、実際に違いがでるかも確認を行う。試験桁のタイプを表-6に示す。

表-6 試験桁仕様

Type	Type-A	Type-B	Type-C	Type-D
補強筋量	FEM 解析量×2 倍	FEM 解析量	FEM 解析量	FEM 解析量×2 倍
養生撤去時期	緊張力導入時	脱枠後 24h	脱枠後 48h	脱枠後 96h

6.1.2 供試体寸法

供試体寸法は、図-7に示す実施工モデルと同一とした。

6.2 実験結果および考察

実験の結果、適正な補強筋を配置することにより、早期に養生を撤去した場合でも、発生したひび割れは前回までの試験結果より大幅に小さくなった。また、プレストレス力による引張応力と温度応力の合成応力がコンクリート引張応力度以下になると想定される脱枠後 48h 以上の試験桁については、完全にひび割れをなくすることは出来なかったが、発生したひび割れは目視困難な幅であり実験の妥当性が証明された。また、補強筋量の違いによる効果は確認できなかったため、必要以上に補強筋を配置しても効果は期待出来ないと判断できる。

7. まとめ

温度ひび割れの発生が危惧されるコンクリート構造物を製作する際には以下に示す項目について検討を行う必要がある。

- 1) 打設後、初期のコンクリートは、温度差による影響を受けやすい。現場条件に合わせてコンクリート自体の温度上昇を防ぎ、外気温との温度差を少なくするか、コンクリートの温度上昇の後、コンクリートと外気とを遮断し、温度差を発生させない工夫が必要である。
- 2) FEM等による応力の解析および温度解析を行い、温度による温度応力とプレストレス力による応力との合成引張応力の検証が必要である。
- 3) 日常の品質管理において、プレストレス導入時の割裂試験および温度差測定より、保温養生期間を決定することが大切である。

謝辞

本橋の実験では、ひび割れの無い充実断面プレテンション桁を製作する事を目的としてきた。その中で、滋賀・水島工場の方々に、これまで積み重ねて来た主桁製作の技術・知識・姿勢と多岐に渡りご支援をいただいている。これら関係各位に、心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会・コンクリート標準示方書