

夏季における高強度の マスコンクリートの施工について

全国土木施工管理技士会連合会
第32回 最優秀論文賞

福留開発株式会社
横田 昭彦

平成30－31年度 五台山第5高架橋下部外第2工事



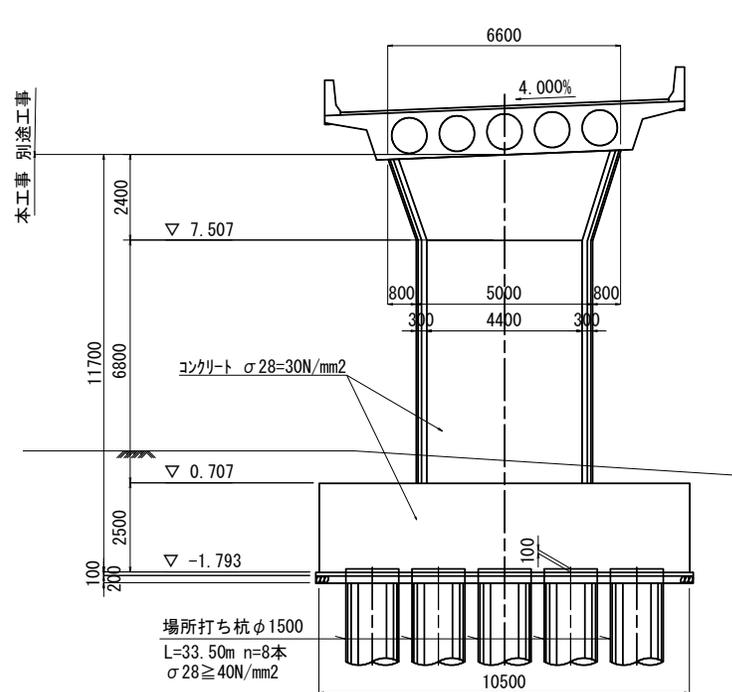
発注者 : 四国地方整備局
土佐国道事務所

工事場所 : 高知市五台山

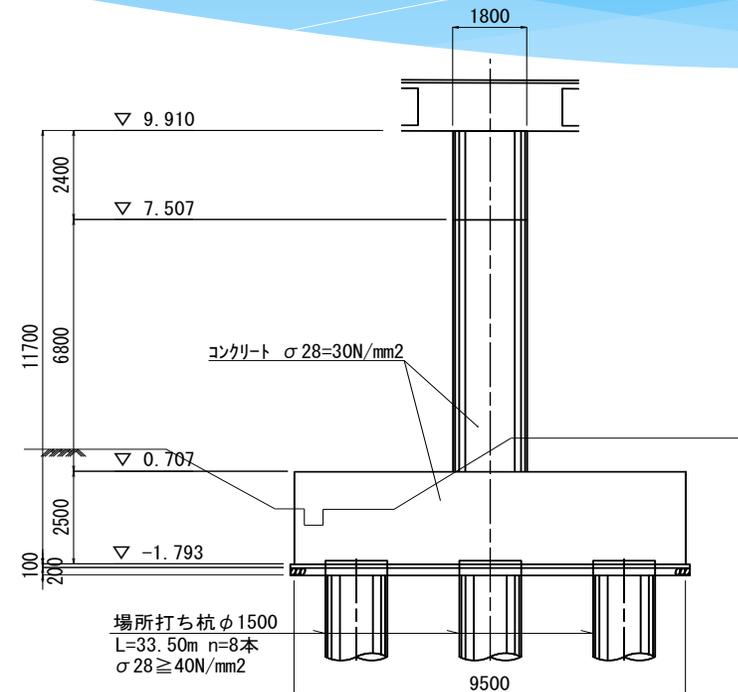
工期 : 平成31年1月26日～
令和元年10月31日

工事内容 : 橋脚下部工
(壁式橋脚) 2基
基礎杭 (場所打ち杭)
径1500 16本

五台山第5高架橋 5P4橋脚構造図



正面図



側面図

1.はじめに

高知南国道路は四国横断自動車道の高知インターと高知龍馬空港を直結させ、高速道路、港、空港を便利に結ぶネットワークとなり、高知県東部への南国安芸道路に接続する重要な路線であることから、早期の開通を目指して急ピッチで工事を進めている。

2.現場施工における問題点

- * 高知南国道路の早期開通に向け稼働している隣接工事や継続工事の発注などで工程の制約もあったが、準備工、基礎杭、仮締切工の施工期間を除くと橋脚の底版を含む躯体部の施工はマスコンクリートの施工に不利な夏季となった。また、基礎杭の鉄筋との相性と考えられるが、躯体部のコンクリートの規格は呼び強度が $30\text{N}/\text{mm}^2$ であった。
(参考：基礎杭の鉄筋の規格はSD490とし、鉄筋量を少なくしている。)

同じ呼び強度を有するJIS規格品のコンクリートでの事前の温度解析では、外気温30°Cの場合、コンクリートの内部温度は3日目で80°C程度まで上昇し、表面に発生する引張応力はその時のコンクリートが有する引張強度を大きく上回ることが予想され、水和熱に起因する内部拘束の温度ひび割れが発生する恐れがあった。そこで、温度ひび割れ対策を中心に品質に係る問題点として種々の検討を行った。

3. 現場での工夫と適用結果

- * 3-1 フライアッシュの活用
- * 3-2 応力解析と温度計測によるモニタリング
- * 3-3 養生の工夫
- * 3-4 表層部（かぶり部）の品質確保の工夫
- * 3-5 ブリーディング水の吸引

3-1 フライアッシュの活用

- * 高知県ではフライアッシュをセメントの代替（内割）として、水セメント比を水結合材比に読み替えてJIS規格を取得している生コン工場が多数ある。そのほとんどの工場がセメントの10%をフライアッシュに内割した配合で、JIS規格品として公共工事にも使用している。フライアッシュはポゾラン反応で硬化するが、ポゾラン反応はほとんど発熱しないという特徴がある。

- * このことを踏まえ、本工事ではコンクリートの水和熱をさらに低減させる方法として、JIS規格品よりも多いセメントの20%をフライアッシュに代替した配合で施工することを提案した。
- * まず、目標強度を得られる水結合材比を決定する試験練りをし、28日強度で目標強度35N/mm²を得られる水結合材比50.9%を決定し、比較できるように次の3つの配合を設定して同じ日に試験練りを実施した。

試験練りを実施した配合

- ① 水結合材比50.9%とし、フライアッシュを内割で20%使用した配合
- ② 呼び強度30N/mm²のフライアッシュを内割で10%使用した配合（JIS規格品）
- ③ 呼び強度30N/mm²のフライアッシュを使用しない配合（JIS規格品）

試験練り配合表

NO	配合	混和剤構成	水結合材比 %	単位水量 kg/m ³	単位C量 kg/m ³
①	30-12-20BB	FA20%	50.9	163	257
②	30-12-20BB	FA10%	47.8	164	309
③	30-12-20BB	FA無し	50.5	167	331

各配合の単位セメント量は

①257kg/m³、②309kg/m³、③331kg/m³

となっており、フライアッシュを20%

使用したものは使用しないものより

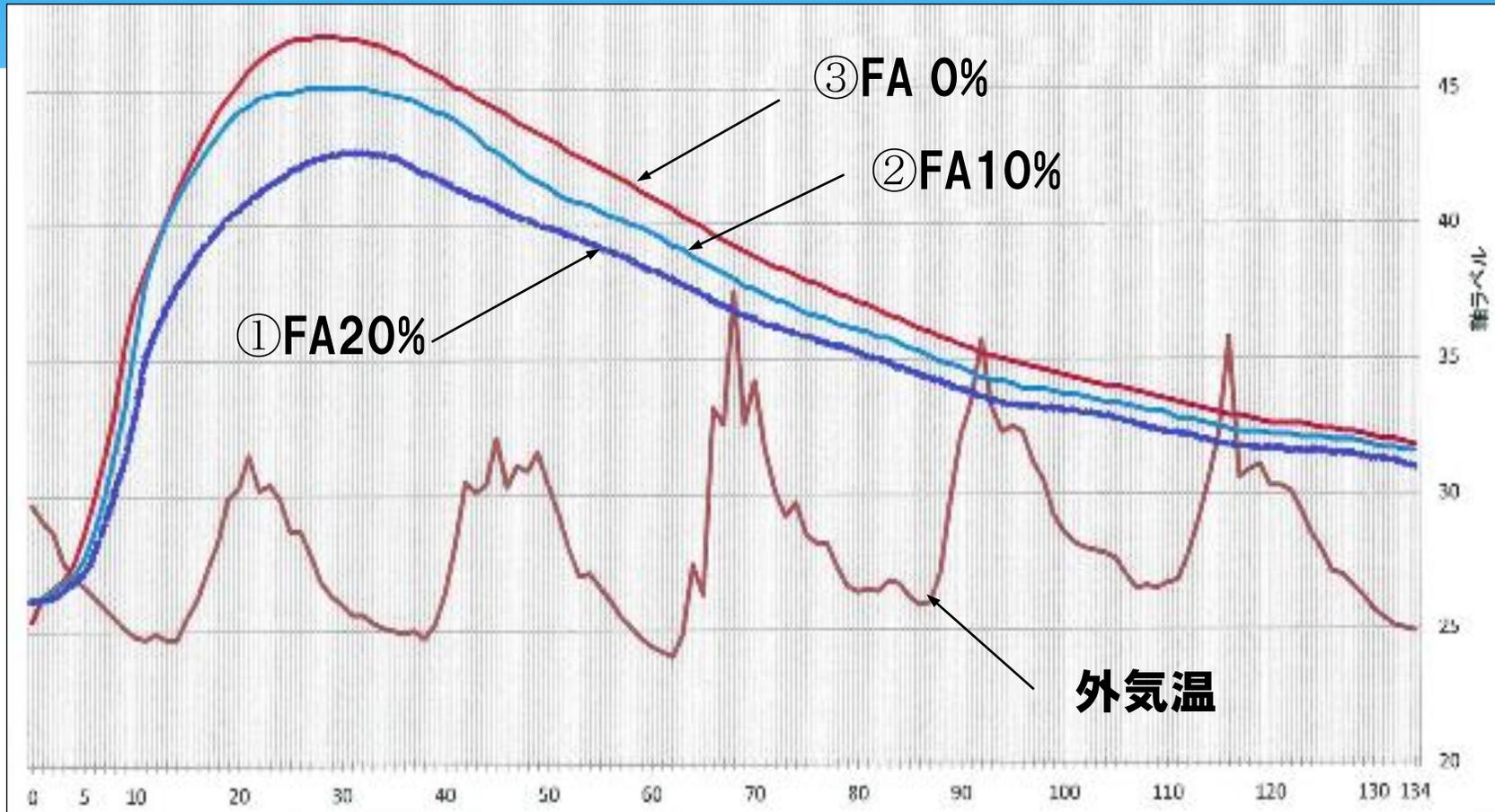
74kg/m³の単位セメント量を減少させる

ことができた。

各配合で圧縮強度用とは別にテストピースを作成し、発泡スチロールを利用した容器に入れて簡易断熱状態での温度測定を行った。



簡易断熱温度上昇の測定結果



最大温度上昇量は

①16.5°C、②18.9°C、③21.6°C

となり、フライアッシュを20%使用したものは使用しないものより約25%の低減ができた。

各配合の呼び強度が28日で発現することを確認し、フライアッシュを20%使用する配合を採用した。

3-2 応力解析と温度計測によるモニタリング

施工に先立ち簡易なプログラムでコンクリートの応力解析を行った。このプログラムは使用するコンクリートのセメントの種類や単位セメント量により、構造物の中心部から表面までの水和熱によるコンクリート温度上昇を解析し、表面付近に発生する引張応力を推定するもので、内部拘束による温度ひび割れの検討に使用している。

温度応力解析 (FA無し)

橋脚-底版 30-12-20BB(JIS品)	項目	経過			外気 温	表面温度		断熱温度上昇		相似因子 S	コンクリート温度										
	記号	時刻				T_0	Q	ΔT_{ad}	T												
	単位	日	日	時	°C	°C	°C	°C													
	表面からの位置 (mm)							1250	1125	1000	875	750	625	500	375	250	125	0			
条件	入力セル	0	0	8	28.4	29.8	0.0				30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
コンクリートの熱伝導率 λ_c	W/m·°C	2.7	0.08	0	10	31.6	32.7	5.0	4.96	0.531	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	34.9	34.6	32.7
コンクリートの比熱 c_c	J/kg·°C	1150	0.17	0	12	34.2	35.4	9.5	4.50	0.531	39.5	39.5	39.5	39.5	39.5	39.5	39.5	39.4	39.2	38.3	35.4
コンクリートの単位容積質量 ρ_c	kg/m³	2300	0.25	0	14	35.8	37.6	13.5	4.09	0.531	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	43.4	42.9	41.4	37.6
コンクリートの熱拡散率 h_c	m²/s	1.02E-06	0.33	0	16	35.8	39.5	17.3	3.71	0.531	47.3	47.3	47.3	47.3	47.3	47.2	47.2	46.9	46.1	44.0	39.5
			0.5	0	18	34.2	41.0	20.6	3.37	0.531	50.6	50.6	50.6	50.6	50.6	50.6	50.4	50.0	48.8	46.2	41.0
部材厚さ	m	2.5	0.5	0	20	31.6	42.1	23.7	3.06	0.531	53.7	53.7	53.7	53.7	53.7	53.6	53.3	52.7	51.2	48.0	42.1
スペースインターバル Δx	m	0.0625	0.58	0	22	28.4	43.0	26.5	2.78	0.531	56.5	56.5	56.5	56.5	56.4	56.3	55.9	55.0	53.2	49.5	43.0
			0.75	1	2	24.2	44.8	31.3	2.29	0.531	61.3	61.3	61.3	61.2	61.1	60.8	60.2	58.8	56.2	51.8	44.8
セメントの種類	高炉B種		0.83	1	4	24.2	45.8	33.4	2.08	0.531	63.4	63.4	63.3	63.3	63.1	62.7	61.9	60.3	57.4	52.7	45.8
1:普通 2:中庸熱 3:高炉B種	3		0.92	1	6	25.8	47.0	35.3	1.89	0.531	65.2	65.2	65.2	65.1	64.9	64.4	63.4	61.6	58.5	53.6	47.0
単位セメント量 C	kg/m³	331	1	1	8	28.4	48.3	37.0	1.72	0.531	66.9	66.9	66.9	66.8	66.5	65.9	64.7	62.7	59.4	54.6	48.3
28日コンクリート圧縮強度	N/mm²	39.6	1.08	1	10	31.6	49.5	38.5	1.56	0.531	68.5	68.5	68.4	68.2	67.9	67.2	65.9	63.7	60.3	55.5	49.5
			1.17	1	12	34.2	50.6	40.0	1.42	0.531	69.9	69.9	69.8	69.6	69.1	68.3	66.9	64.5	61.1	56.4	50.6
打込み時刻	時	8	1.25	1	14	35.8	51.5	41.2	1.29	0.531	71.1	71.1	71.0	70.7	70.2	69.3	67.7	65.3	61.8	57.2	51.5
打込み時のコンクリート温度	°C	30	1.42	1	18	34.2	52.4	43.5	2.23	0.266	73.2	73.2	73.1	72.7	72.0	70.9	69.2	66.6	63.0	58.3	52.4
			1.58	1	22	28.4	52.4	45.3	1.84	0.266	74.9	74.9	74.7	74.2	73.4	72.1	70.2	67.5	63.7	58.8	52.4
断熱温度上昇量 Q_∞	°C	53.93	1.75	2	2	24.2	52.5	46.8	1.51	0.266	76.3	76.2	76.0	75.4	74.5	73.0	71.0	68.1	64.1	59.0	52.5
断熱温度上昇の定数 a		0.13	1.92	2	6	25.8	53.4	48.1	1.25	0.266	77.3	77.2	76.9	76.3	75.2	73.7	71.4	68.4	64.3	59.2	53.4
断熱温度上昇の定数 b		10.9	2.08	2	10	31.6	54.8	49.1	1.03	0.266	78.1	78.0	77.6	76.9	75.8	74.1	71.7	68.5	64.5	59.8	54.8
温度上昇曲線の定数 g		0.0023	2.25	2	14	35.8	55.8	49.9	0.85	0.266	78.6	78.6	78.1	77.4	76.1	74.3	71.8	68.6	64.8	60.4	55.8
温度上昇曲線の定数 h		0.396	2.42	2	18	34.2	56.0	50.6	0.70	0.266	79.0	78.9	78.5	77.6	76.3	74.4	71.9	68.7	65.0	60.8	56.0
温度上昇曲線の定数 r		1.1573	2.58	2	22	28.4	55.4	51.2	0.58	0.266	79.2	79.1	78.7	77.7	76.3	74.4	71.9	68.8	65.0	60.7	55.4
			2.75	3	2	24.2	55.0	51.7	0.48	0.266	79.3	79.2	78.7	77.8	76.3	74.3	71.8	68.6	64.9	60.3	55.0
日平均気温	°C	30	2.92	3	6	25.8	55.4	52.1	0.39	0.266	79.3	79.2	78.7	77.8	76.3	74.3	71.8	68.6	64.9	60.3	55.4
日平均気温と日最低最高温度との差	°C	6	3.08	3	10	31.6	56.4	52.4	0.32	0.266	79.2	79.1	78.6	77.7	76.2	74.2	71.7	68.5	64.8	60.1	55.4
保温養生(型枠やシート)終了日	日	7	3.25	3	14	35.8	57.2	52.7	0.27	0.266	79.1	79.0	78.5	77.6	76.1	74.1	71.6	68.4	64.7	60.0	55.7
保温養生の断熱効果度		0.5	3.42	3	18	34.2	57.1	52.9	0.22	0.266	78.9	78.8	78.2	77.1	75.5	73.5	70.9	67.9	64.5	60.9	57.1
表面温度の気温変化に対する敏感度		0.15	3.58	3	22	28.4	56.3	53.1	0.18	0.266	78.6	78.5	77.9	76.8	75.3	73.2	70.7	67.7	64.4	60.7	56.3
断熱効果度 0.5...木製型枠のみ			3.75	4	2	24.2	55.7	53.2	0.15	0.266	78.3	78.2	77.6	76.5	74.9	72.9	70.4	67.5	64.1	60.2	55.7
0.6...木製型枠+シート	解析		3.92	4	6	25.8	56.0	53.4	0.12	0.266	78.0	77.9	77.3	76.2	74.6	72.6	70.1	67.2	63.8	60.0	56.0
			4.08	4	10	31.6	57.0	53.5	0.10	0.266	77.6	77.5	76.9	75.8	74.3	72.3	69.8	66.9	63.6	60.1	57.0
			4.25	4	14	35.8	57.6	53.5	0.08	0.266	77.3	77.1	76.6	75.5	73.9	71.9	69.5	66.7	63.6	60.5	57.6
			4.42	4	18	34.2	57.4	53.6	0.07	0.266	76.9	76.8	76.2	75.1	73.6	71.6	69.2	66.5	63.6	60.6	57.4

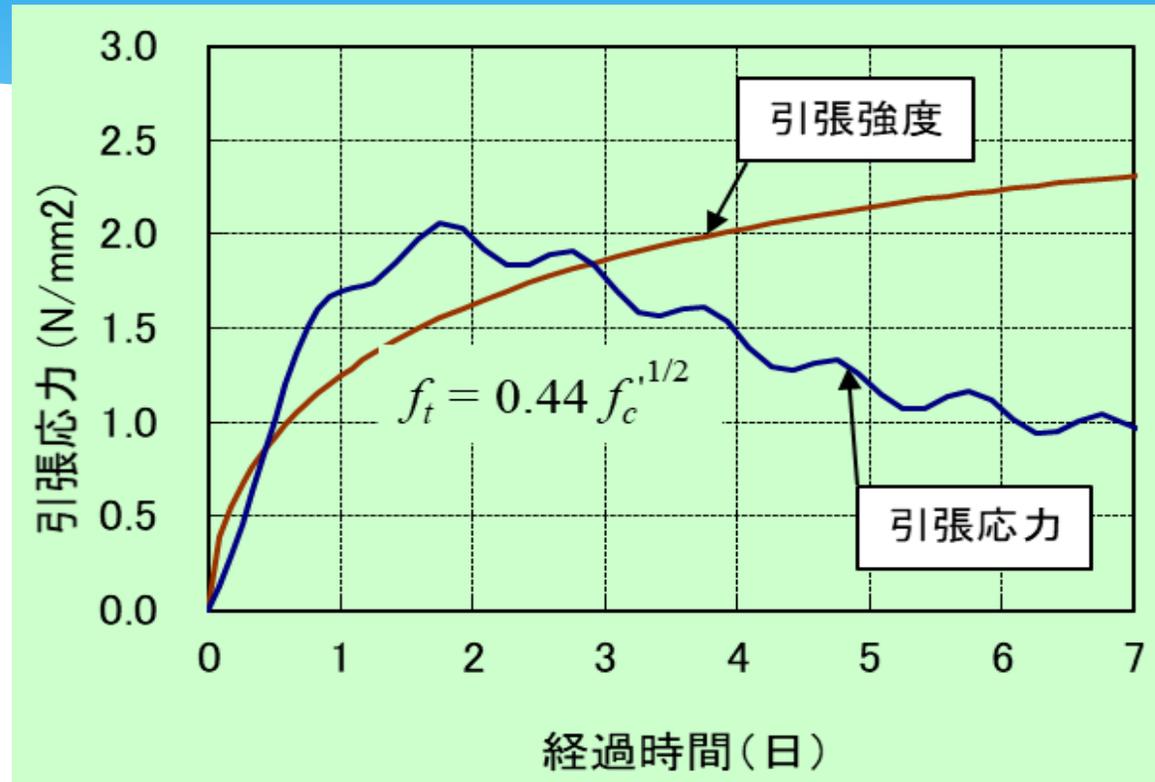
最大中心温度79.3°C

温度応力解析 (FA無し)

橋脚-底版 30-12-20BB (JIS品)	項目 記号 単位 表面からの位置 (mm)	経過 日	時刻 日 時	外気温 °C	表面温度 T ₀ °C	断熱温度上昇		f _c N/mm ²	f _t N/mm ²	拘束応力 N/mm ²													
						Q	ΔT _{ad}			0	125	250	375	500	625	750	875	1000	1125	1250			
						°C	°C																
条件	入力セル	0	0 8	28.4	29.8	0.0		0.0	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		0.08	0 10	31.6	32.7	5.0	4.96	0.8	0.39	0.13	0.01	-0	-0	-0	-0	-0	-0	-0	-0	-0	-0	-0	-0
コンクリートの熱伝導率 λ _c	W/m・°C	2.7	0 12	34.2	35.4	9.5	4.50	1.6	0.55	0.29	0.06	-0	-0	-0	-0	-0	-0	-0	-0	-0	-0	-0	-0
コンクリートの比熱 c _c	J/kg・°C	1150	0 14	35.8	37.6	13.5	4.09	2.3	0.67	0.46	0.13	0	-0	-0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
コンクリートの単位容積質量 ρ _c	kg/m ³	2300	0 16	35.8	39.5	17.3	3.71	3.0	0.77	0.64	0.22	0.03	-0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
コンクリートの熱拡散率 h _c	m ² /s	1.02E-06	0 18	34.2	41.0	20.6	3.37	3.7	0.85	0.83	0.31	0.06	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
			0.5	0 20	31.6	42.1	23.7	3.06	4.4	1.02	0.42	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
部材厚さ	m	2.5	0 22	28.4	43.0	26.5	2.78	5.1	0.99	1.21	0.53	0.14	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
スペースインターバル Δx	m	0.0625	0.67	1 0	25.8	43.9	29.0	2.52	5.7	1.05	1.37	0.64	0.2	-0	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
			0.75	1 2	24.2	44.8	31.3	2.29	6.3	1.11	1.51	0.75	0.26	-0	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3
セメントの種類	高炉B種	0.83	1 4	24.2	45.8	33.4	2.08	6.9	1.16	1.61	0.84	0.32	-0	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3
1:普通 2:中庸熱 3:高炉B種	3	0.92	1 6	25.8	47.0	35.3	1.89	7.5	1.21	1.67	0.92	0.37	0.02	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
単位セメント量 C	kg/m ³	331	1 1 8	28.4	48.3	37.0	1.72	8.1	1.25	1.7	0.98	0.43	0.06	-0.2	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
28日コンクリート圧縮強度	N/mm ²	39.6	1.08	1 10	31.6	49.5	38.5	1.56	8.6	1.29	1.71	1.03	0.48	0.09	-0.2	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
			1.17	1 12	34.2	50.6	40.0	1.42	9.1	1.33	1.72	1.06	0.52	0.12	-0.1	-0.3	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
打込み時刻	時	8	1.25	1 14	35.8	51.5	41.2	1.29	9.7	1.37	1.75	1.09	0.55	0.15	-0.1	-0.3	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
打込み時のコンクリート温度	°C	30	1.42	1 18	34.2	52.4	43.5	2.23	10.7	1.44	1.84	1.15	0.61	0.19	-0.1	-0.3	-0.5	-0.5	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6
			1.58	1 22	28.4	52.4	45.3	1.84	11.6	1.50	1.98	1.23	0.65	0.22	-0.1	-0.3	-0.5	-0.6	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7
断熱温度上昇量 Q _∞	°C	53.93	1.75	2 2	24.2	52.5	46.8	1.51	12.5	1.55	2.06	1.3	0.7	0.25	-0.1	-0.3	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7
断熱温度上昇の定数 a		0.13	1.92	2 6	25.8	53.4	48.1	1.25	13.3	1.61	2.03	1.35	0.76	0.28	-0.1	-0.3	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
断熱温度上昇の定数 b		10.9	2.08	2 10	31.6	54.8	49.1	1.03	14.1	1.65	1.92	1.34	0.79	0.33	-0	-0.3	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
温度上昇曲線の定数 g		0.0023	2.25	2 14	35.8	55.8	49.9	0.85	14.9	1.70													
温度上昇曲線の定数 h		0.396	2.42	2 18	34.2	56.0	50.6	0.70	15.6	1.74													
温度上昇曲線の定数 r		1.1573	2.58	2 22	28.4	55.4	51.2	0.58	16.3	1.78	1.89	1.29	0.79	0.37	0.01	-0.3	-0.5	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
			2.75	3 2	24.2	55.0	51.7	0.48	17.0	1.81	1.91	1.31	0.8	0.37	0.01	-0.3	-0.5	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
日平均気温	°C	30	2.92	3 6	25.8	55.4	52.1	0.39	17.6	1.85	1.83	1.3	0.81	0.38	0.02	-0.3	-0.5	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
日平均気温と日最低最高温度との差	°C	6	3.08	3 10	31.6	56.4	52.4	0.32	18.2	1.88	1.7	1.26	0.81	0.39	0.04	-0.2	-0.5	-0.6	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
保温養生(型枠やシート)終了日	日	7	3.25	3 14	35.8	57.2	52.7	0.27	18.8	1.91	1.59	1.2	0.79	0.4	0.06	-0.2	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
保温養生の断熱効果度		0.5	3.42	3 18	34.2	57.1	52.9	0.22	19.4	1.94	1.57	1.15	0.76	0.4	0.07	-0.2	-0.4	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
表面温度の気温変化に対する敏感度		0.15	3.58	3 22	28.4	56.3	53.1	0.18	19.9	1.96	1.61	1.13	0.74	0.38	0.06	-0.2	-0.4	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
断熱効果度 0.5…木製型枠のみ			3.75	4 2	24.2	55.7	53.2	0.15	20.4	1.99	1.62	1.14	0.72	0.37	0.06	-0.2	-0.4	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
0.6…木製型枠+シート	解析		3.92	4 6	25.8	56.0	53.4	0.12	20.9	2.01	1.54	1.12	0.72	0.36	0.06	-0.2	-0.4	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
			4.08	4 10	31.6	57.0	53.5	0.10	21.4	2.04	1.4	1.07	0.71	0.37	0.07	-0.2	-0.4	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7
			4.25	4 14	35.8	57.6	53.5	0.08	21.9	2.06	1.3	1.01	0.69	0.37	0.08	-0.2	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7
			4.42	4 18	34.2	57.4	53.6	0.07	22.3	2.08	1.28	0.96	0.65	0.36	0.08	-0.2	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7
			4.58	4 22	28.4	56.6	53.7	0.06	22.8	2.10	1.32	0.94	0.63	0.34	0.07	-0.2	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7

表面最大引張応力 2.06N/mm²

配合による応力解析（FA無し）



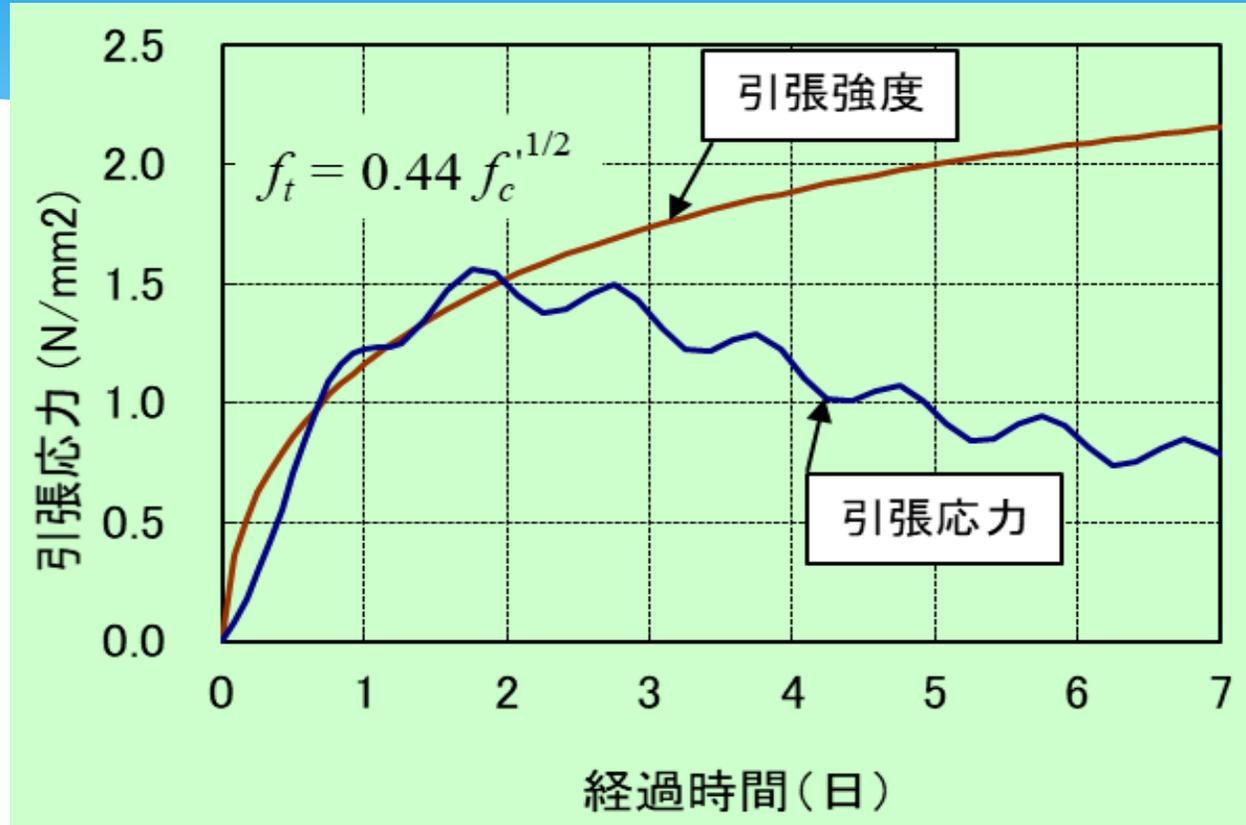
上図はフライアッシュを使用しない配合で、発生する引張応力が引張強度を大きく超えていることが判る。

温度応力解析 (FA20%)

橋脚-底版 30-12-20BB(FA20%)	項目	経過			外気 温 °C	表面温度			コンクリート温度														
	記号	入力セル	時刻			T_0 °C	断熱温度上昇			T °C													
	単位		日	日			時	Q °C	ΔT_{ad} °C														
	表面からの位置 (mm)		1250	1125			1000		875	750	625	500	375	250	125	0							
条件		0	0	8	28.4		29.8		0.0		30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
コンクリートの熱伝導率 λ_c	W/m·°C	2.7	0.08	0	10	31.6	32.0	3.5	3.50	33.5	33.5	33.5	33.5	33.5	33.5	33.5	33.5	33.5	33.5	33.5	33.5	33.3	32.0
コンクリートの比熱 c_c	J/kg·°C	1150	0.17	0	12	34.2	34.0	6.7	3.22	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.6	36.0	34.0
コンクリートの単位容積質量 ρ_c	kg/m³	2300	0.25	0	14	35.8	35.7	9.7	2.97	39.7	39.7	39.7	39.7	39.7	39.7	39.7	39.7	39.7	39.7	39.6	39.3	38.3	35.7
コンクリートの熱拡散率 h_c	m²/s	1.02E-06	0.33	0	16	35.8	37.1	12.4	2.73	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.4	42.2	41.6	40.2	37.1		
			0.5	0	20	31.6	38.9	17.3	2.32	47.3	47.3	47.3	47.3	47.2	47.2	47.2	47.0	46.6	45.5	43.3	38.9		
部材厚さ	m	2.5	0.58	0	22	28.4	39.5	19.4	2.14	49.4	49.4	49.4	49.4	49.4	49.3	49.0	48.4	47.1	44.4	39.5			
スペースインターバル Δx	m	0.0625	0.67	1	0	25.8	40.0	21.4	1.97	51.4	51.4	51.4	51.3	51.3	51.1	50.8	50.0	48.4	45.3	40.0			
			0.75	1	2	24.2	40.7	23.2	1.81	53.2	53.2	53.2	53.1	53.1	52.9	52.4	51.4	49.5	46.1	40.7			
セメントの種類		高炉B種	0.83	1	4	24.2	41.6	24.8	1.67	54.8	54.8	54.8	54.8	54.7	54.4	53.8	52.6	50.5	46.9	41.6			
1:普通 2:中庸熱 3:高炉B種		3	0.92	1	6	25.8	42.6	26.4	1.54	56.4	56.4	56.3	56.3	56.1	55.8	55.1	53.7	51.4	47.7	42.6			
単位セメント量 C	kg/m³	257	1	1	8	28.4	43.7	27.8	1.42	57.8	57.8	57.7	57.6	57.4	57.0	56.2	54.7	52.2	48.5	43.7			
28日コンクリート圧縮強度	N/mm²	34.5	1.08	1	10	31.6	44.8	29.1	1.30	59.1	59.1	59.0	58.9	58.6	58.1	57.2	55.5	52.9	49.3	44.8			
			1.17	1	12	34.2	45.8	30.3	1.20	60.2	60.2	60.2	60.0	59.7	59.1	58.0	56.3	53.7	50.1	45.8			
打込み時刻	時	8	1.25	1	14	35.8	46.6	31.4	1.11	61.3	61.3	61.2	61.0	60.7	60.0	58.8	57.0	54.3	50.8	46.6			
打込み時のコンクリート温度	°C	30	1.42	1	18	34.2	47.3	33.4	1.96	63.2	63.2	63.1	62.8	62.3	61.5	60.2	58.2	55.5	51.9	47.3			
			1.58	1	22	28.4	47.3	35.0	1.66	64.8	64.7	64.6	64.2	63.6	62.7	61.2	59.2	56.3	52.5	47.3			
断熱温度上昇量 Q_∞	°C	44.31	1.75	2	2	24.2	47.3	36.4	1.41	66.0	66.0	65.8	65.4	64.7	63.6	62.0	59.8	56.8	52.7	47.3			
断熱温度上昇の定数 a		0.13	1.92	2	6	25.8	48.2	37.6	1.19	67.1	67.0	66.8	66.3	65.5	64.3	62.6	60.2	57.0	52.9	48.2			
断熱温度上昇の定数 b		10.9	2.08	2	10	31.6	49.6	38.6	1.01	67.9	67.8	67.6	67.0	66.2	64.9	63.0	60.5	57.3	53.5	49.6			
温度上昇曲線の定数 g		0.0023	2.25	2	14	35.8	50.6	39.5	0.86	68.5	68.5	68.2	67.6	66.6	65.2	63.3	60.8	57.7	54.2	50.6			
温度上昇曲線の定数 h		0.396	2.42	2	18	34.2	50.8	40.2	0.73	69.0	69.0	68.6	68.0	66.9	65.5	63.5	61.0	58.0	54.7	50.8			
温度上昇曲線の定数 r		0.9871	2.58	2	22	28.4	50.2	40.9	0.62	69.4	69.3	68.9	68.2	67.1	65.6	63.6	61.2	58.2	54.6	50.2			
			2.75	3	2	24.2	49.8	41.4	0.52	69.6	69.5	69.1	68.4	67.3	65.7	63.7	61.2	58.1	54.4	49.8			
日平均気温	°C	30	2.92	3	6	25.8	50.3	41.8	0.45	69.7	69.7	69.2	68.5	67.3	65.7	63.7	61.1	58.0	54.3	50.3			
日平均気温と日最低最高温度との差	°C	6	3.08	3	10	31.6	51.3	42.2	0.38	69.8	69.7	69.3	68.5	67.3	65.7	63.6	61.0	57.9	54.6	51.3			
保温養生(型枠やシート)終了日	日	7	3.25	3	14	35.8	52.1	42.5	0.32	69.8	69.8	69.3	68.5	67.3	65.7	63.6	61.0	57.9	54.6	51.3			
保温養生の断熱効果度		0.5	3.42	3	18	34.2	52.0	42.8	0.27	69.7	69.7	69.2	68.4	67.2	65.6	63.5	60.9	57.8	54.5	51.2			
表面温度の気温変化に対する敏感度		0.15	3.58	3	22	28.4	51.3	43.0	0.23	69.6	69.6	69.1	68.3	67.1	65.5	63.4	60.8	57.7	54.4	51.1			
断熱効果度 0.5...木製型枠のみ			3.75	4	2	24.2	50.7	43.2	0.20	69.4	69.3	68.9	68.0	66.7	65.1	63.1	60.7	57.9	54.6	50.7			
0.6...木製型枠+シート	解析		3.92	4	6	25.8	51.1	43.4	0.17	69.2	69.2	68.7	67.8	66.6	64.9	62.9	60.5	57.7	54.4	51.1			
			4.08	4	10	31.6	52.0	43.5	0.14	69.0	68.9	68.4	67.6	66.3	64.7	62.7	60.3	57.5	54.6	52.0			
			4.25	4	14	35.8	52.7	43.6	0.12	68.8	68.7	68.2	67.3	66.1	64.5	62.4	60.1	57.5	55.0	52.7			

最大中心温度69.8°C

配合による応力解析（FA 20%）

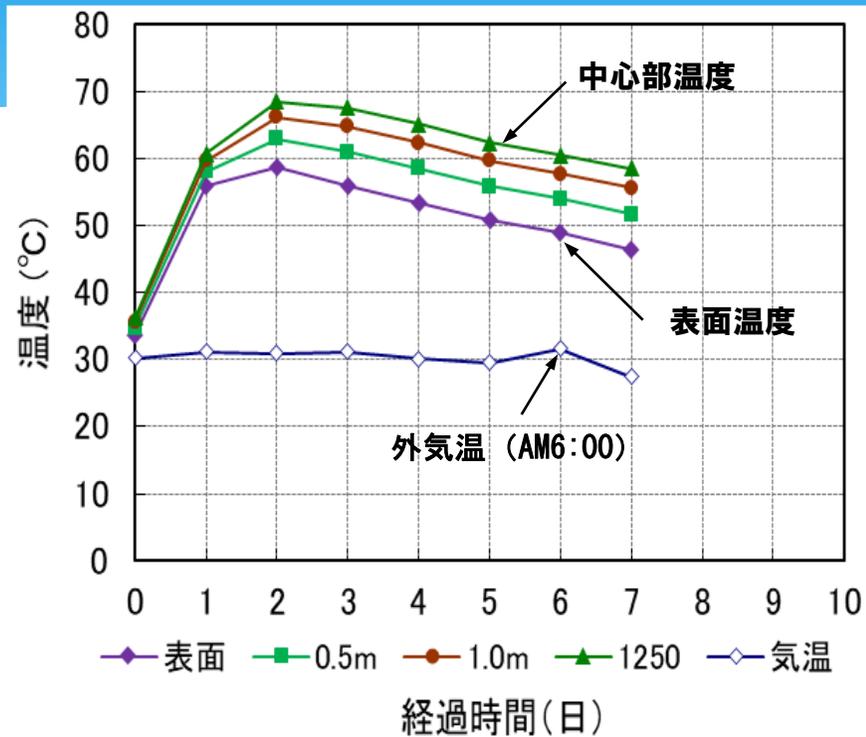


上図はフライアッシュを20%使用した配合で、発生する引張応力は引張強度とほぼ等しいことが判る。

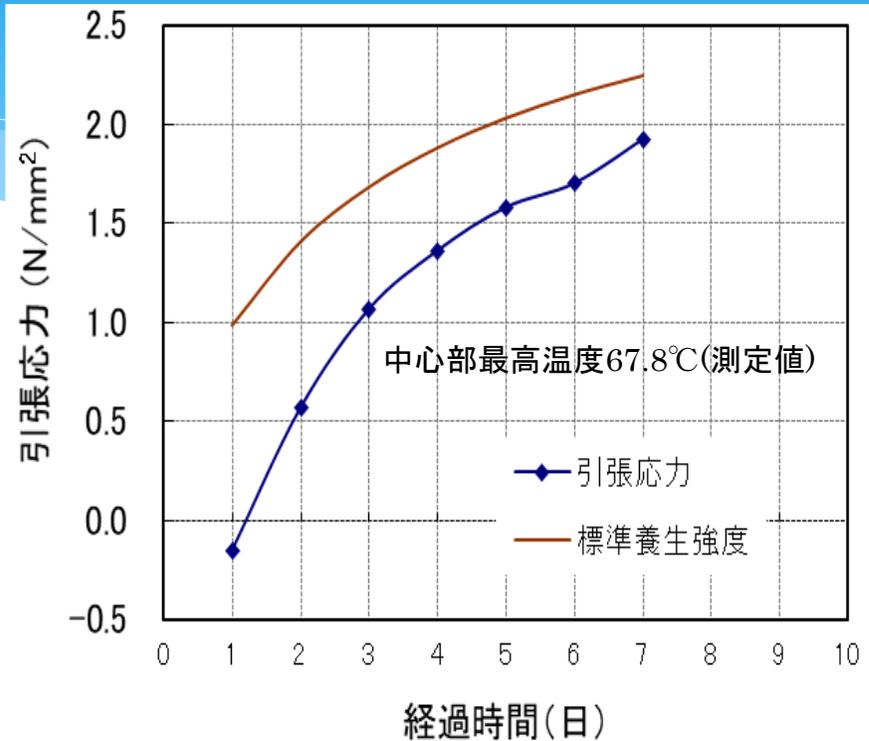
実際の施工においては、躯体中央部、型枠表面部、コンクリート天端に熱電対を設置し、外気温とともにコンクリート温度のモニタリングをした。応力解析の過程で算出された躯体中央部の最高温度は69.8℃であったのに対し、計測された最高温度は67.8℃であり、フライアッシュによる発熱はほとんどないことが立証された。

簡易な温度応力解析プログラムを改良し、測定したコンクリートの中心温度と表面温度からコンクリート内部の温度分布曲線を推定して、リアルタイムにコンクリート表面に発生している引張応力を逆算し、ひび割れ発生の危険性を予測した。この方法は、養生方法を変更する判断材料として利用でき、モニタリングは初期養生の目安として大変参考になった。

コンクリート温度測定結果



実測温度による応力解析



3-3 養生の工夫

応力解析ではコンクリート表面に発生する引張応力に対し、その時点での引張強度に余裕がなかったため、コンクリート表面を保温することにした。養生方法は冷水でコンクリートの内部温度を下げるとともに、コンクリート内部の熱を利用して表面を保温し、コンクリート中心部と表面の温度差を少なくして表面に発生する引張応力を小さくした。

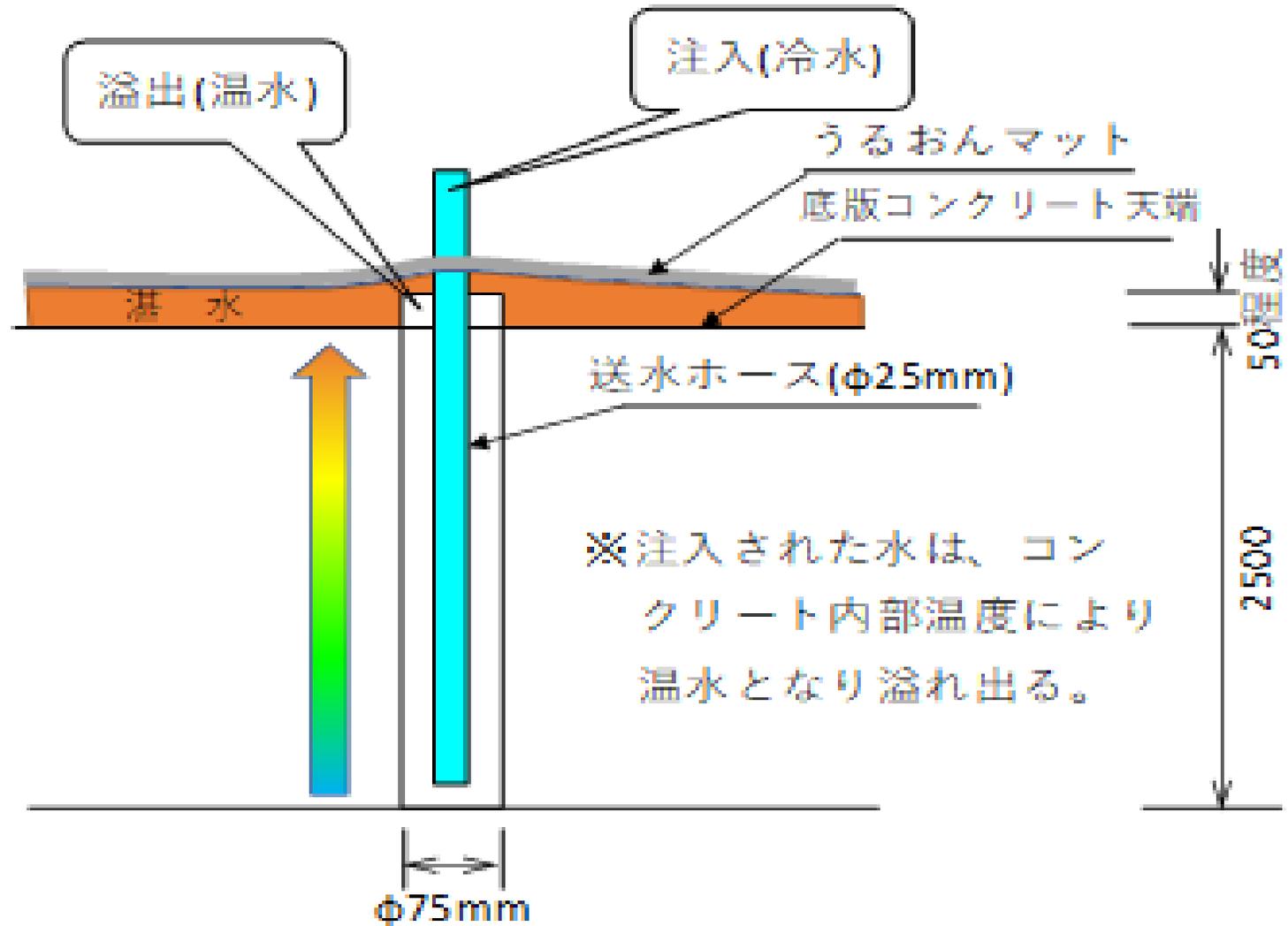
躯体足場でコンクリート中に入る単管パイプを保護するために設置するスパイラル管（φ75）を活用し、そのうちの12か所へ注入ホースを設置した。それぞれのスパイラル管内に冷水を注水すると、コンクリート内部で温められた冷水は温水となりスパイラル管よりコンクリート天端に溢れ出し、その温水を湛水することでコンクリート表面を保温した。

過去にも同じような養生方法を試したが、湛水の深さを大きくできないため温水の蒸発時に奪われる気化熱と外気の影響により湛水の温度はあまり高くできなかった事例がある。その時は応急処置として湛水上にビニールシートを敷設して温度の低下を防いだ。

過去の失敗事例を踏まえ湛水の上に保温効果のあるウレタン系の養生マットを敷設して湛水の蒸発と冷却を防いだ。その結果、コンクリート内部で温められた湛水の温度は42℃程度を保つことができた。

冷水の注入はコンクリート中心部の温度がピークとなった打設後3日までで中止し、その後は湛水のみで養生を行い、脱型時期の目安としてコンクリート中心部と表面の温度差が20°C程度となる時期とし、今回は打設後7日目にコンクリート内部温度の降下を確認して型枠を解体した。

湛水養生概要



湛水養生狀況



3-4 表層部（かぶり部）の品質確保の工夫

コンクリートの耐久性は表層部（かぶり部）の品質で決まると考えられる。すなわち、かぶり部の品質確保は構造物の長寿命化につながる。

本工事の橋脚の主筋はD38の太径鉄筋が用いられ、主筋中心部までのかぶりは160mmであり鉄筋と型枠の最小のあきは約100mmであった。そのため、鉄筋の内側からの棒状バイブレーターの締固めでは、振動がかぶり部に伝わりにくく締固め不足となり、豆板（ジャンカ）やコールドジョイント、沈みひび割れ等の初期欠陥を生じる恐れがあった。

通常、マスコンクリートでは太径の棒状バイブレーター（φ50mm）を50cm間隔で挿入して締固めを行うが、かぶり部で使用すると鉄筋や型枠に接触し、コンクリートの品質に悪影響を及ぼす恐れがある。今回の工事ではかぶり部の品質を確保するため小型の棒状バイブレーター（φ30mm）を使用し、30cm間隔で入念に締固めを行った。また、コンクリートのブリーディングによって発生する沈下ひび割れや面的な砂すじを防ぐため、打設を完了して1時間後にこの小型バイブレーターで再振動を行った。

小径バイブレーターによる締固め



30cm間隔を明示

3-5 ブリーディング水の吸引

1リフトのコンクリートの打設高さが高いと、コンクリートはブリーディングにより表面に水が浮いてくる。この水を除去せずに上層のコンクリートを打設すると、上層は単位水量の多いコンクリートになり、沈下ひび割れや砂すじなどの初期欠陥の原因となるとともに、強度や耐久性、水密性も極端に低下する。また、橋脚は1リフトの施工高さが高く、上部に鉄筋のある場合はひしゃくやスポンジも使用しにくいので除去は困難となる。

今回の工事ではブリーディング水をこまめに取りため、電動の真空吸引機（業務用掃除機）を使用して深い位置にあるブリーディング水も丁寧に吸引した

施工中に発生したブリーディング水



ブリーディング水処理状況



4 結果について

暑中時における高強度のマスコンクリートの施工にもかかわらず、フライアッシュを有効利用し、湛水養生や温度測定によるモニタリングを行うことにより温度ひび割れは発生しなかった。また、小型のバイブレーターでのかぶり部の締固めや、真空吸引機を用いたブリーディング水の吸引、打設速度の調整を行うことにより、表層部（かぶり部）は緻密性を確保した。フライアッシュの特徴として長期強度の伸びが大きく、長期間において表面の緻密性が改善されるので、品質の良い構造物となり長寿命化にも寄与できたと考える。

今回の工事は発注者より有害なひび割れに代表されるコンクリートの初期欠陥の抑制とコンクリートの品質向上を目的とした試行工事に指定された。施工中は日本コンクリート工学会四国支部の支援を受け、チェックシートを用いた施工状況の把握や表層目視評価、さらに表層の緻密さを調査する表面給水試験（SWAT）、表層透気試験（トレント法）を実施した。結果はいずれも良好で、品質向上試行工事の目的である

「有害なひび割れに代表される初期欠陥の抑制と、コンクリート表層品質の向上」については達成されたものと考ええる。

表面吸水試驗(SWAT)



簡易表層透氣試驗



表面吸水試験(SWAT)

注水完了から 600 秒時点での吸水速度	良	一般	劣
p_{600} (ml/m ² /s)	0.25 以下	0.25 を超えて 0.5 以下	0.5 を超える もの

測定結果 max 0.05

簡易表層透気試験

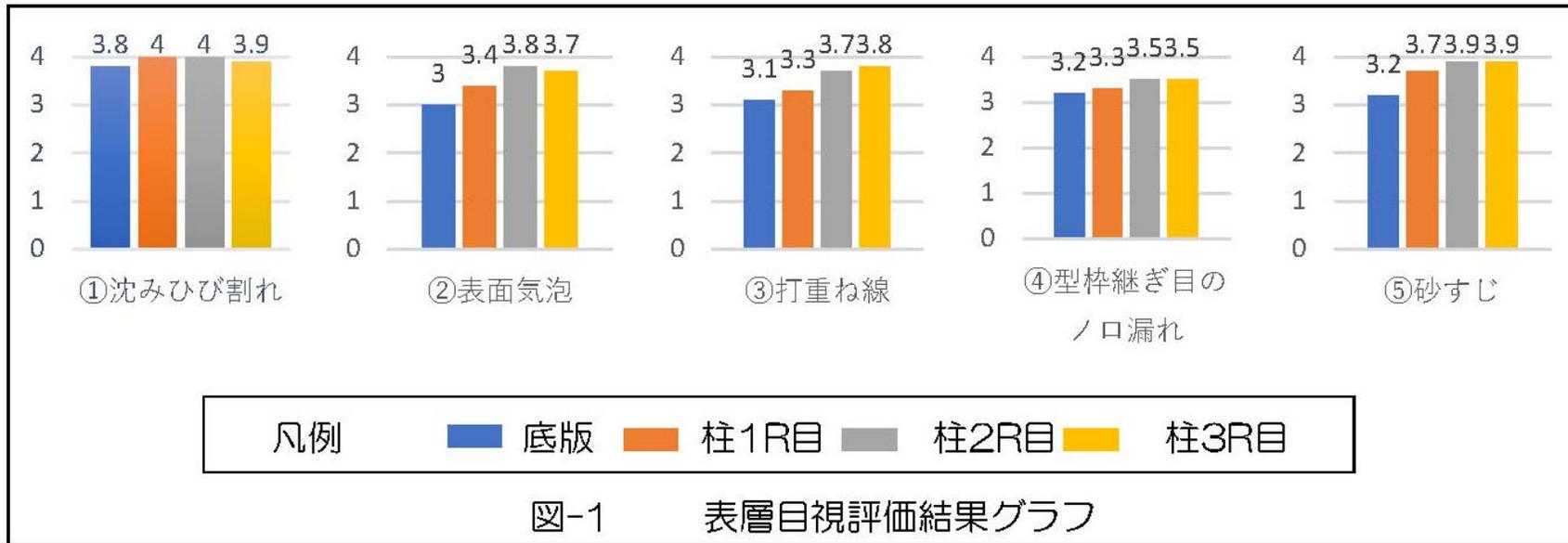
表層透気係数	優	良	一般	劣	極劣
kT ($\times 10^{-16}$ m ²)	0.001~0.01	0.01~0.1	0.1~1	1~10	10~100

測定結果 max 0.035

表層目視評価シート

評価基準 評価項目	一般的に「良好」とされる範囲				不適合 -
	4点	3点	2点	1点	
(1) 沈みひび割れ	 <p>・ビーム近傍にも沈みひび割れがない。</p>	 <p>・目視調査範囲のビームの概ね1/5以上に沈みひび割れが発生 ・ビーム直径の3倍以上の長さの沈みひび割れが発生</p>	 <p>・目視調査範囲のビームの概ね1/2以上に沈みひび割れが発生 ・ビーム直径の4倍以上の長さの沈みひび割れが発生</p>	 <p>・2点の状態よりも劣る</p>	構造物のオーナーから不具合と判定される状況で補修を要するもの
(2) 表面気泡	 <p>・5mm以下の気泡がほとんどない (目安:概ね50個以下/m²)</p>	 <p>・5mm以下の気泡が認められる (目安:概ね50個以上/m²)</p>	 <p>・10mm以下の気泡が認められる (目安:概ね50個以上/m²)</p>	 <p>・2点の状態よりも劣る</p>	
(3) 打重ね線	 <p>・近傍では打重ね線が認められるものの、約10m離れた遠方からは認められない</p>	 <p>・約10m離れた遠方から、打重ね線が認められる</p>	 <p>・約10m離れた遠方から、打重ね線がはっきりと認められる</p>	 <p>・2点の状態よりも劣る</p>	
(4) 型枠継ぎ目のノロ漏れ	 <p>・調査対象範囲にノロ漏れがほとんど認められない</p>	 <p>・調査対象範囲の概ね1/10以上にノロ漏れが認められる</p>	 <p>・調査対象範囲の概ね1/5以上にノロ漏れが認められる</p>	 <p>・2点の状態よりも劣る</p>	
(5) 砂すじ	 <p>・調査対象範囲に砂すじがほとんど認められない</p>	 <p>・調査対象範囲の概ね1/10以上に砂すじが認められる</p>	 <p>・調査対象範囲の概ね1/5以上に砂すじが認められる</p>	 <p>・2点の状態よりも劣る</p>	

表層目視評価結果



問題点としては、フライアッシュコンクリートの試験練りは、水結合材比を決定するための試験練りと、決定された配合で強度の確認をする試験練りの2種類を行ったことから、準備等を含めて2ヶ月半あまりの時間を要した。今後の使用にあたっては、工事の工程を踏まえて注意が必要であることと、フライアッシュを活用したコンクリートが早期にJIS整備されることが望まれる。

ご清聴ありがとうございました