

# 夏季における中庸熱ポルトランドセメント配合と普通ポルトランドセメント配合の特性比較(実機練り)

(北信ブロック)  
長水支部  
長水生コン事業協同組合 技術部会

1. 研究の背景と目的
  - 1.1 セメントの特徴・特性
  - 1.2 着目点
2. 実施概要
  - 2.1 配合
  - 2.2 試験項目
  - 2.3 試験方法
3. 試験結果
4. 考察
5. まとめと今後の課題

### 1. 研究の背景と目的

温度ひび割れの原因の一つである、水和発熱によるコンクリート温度の上昇をできるだけ抑制するためには、低熱ポルトランドセメントおよび中庸熱ポルトランドセメントなどの低発熱型セメントの使用が有効とされている。このうち、市場での流通性、供給面などの事情からは中庸熱ポルトランドセメントの使用が選択されているようだが、土木工事だけでなく、建築工事の分野でも使用されてきている。また、当協組内でも中庸熱ポルトランドセメントを標準化した工場が出始めている。

今回、このセメントの特性に注目し、中庸熱ポルトランドセメントを使用した配合のコンクリート(以下、中庸熱配合)の特性は、普通ポルトランドセメントを使用した配合のコンクリート(以下、普通配合)とどのような違いがあるのかを比較するため、研究を行った。同時に、外気温の高い夏季にはどれくらい特性の差がでるのかという点にも着目して実施した。

#### 1.1 セメントの特徴・特性

それぞれのセメントの特徴を表-1に示す。

表-1 普通ポルトランドセメントおよび中庸熱ポルトランドセメントの特徴

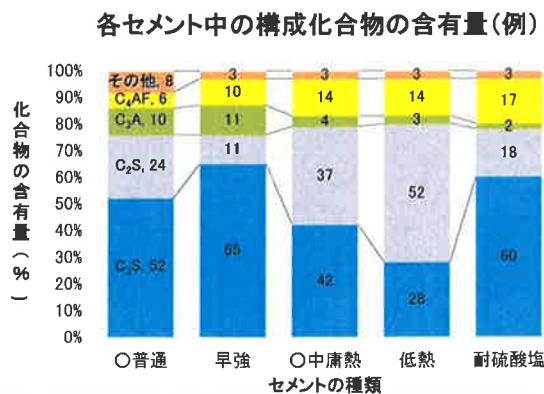
普通ポルトランドセメント	工事用または製品用として最も多く使用される、一般的なセメント
中庸熱ポルトランドセメント	水和熱を低減するためにC <sub>3</sub> SとC <sub>3</sub> Aを減じ、C <sub>2</sub> Sを多くしてあり、ダムなどマスコンクリートに使用される。普通ポルトランドセメントに比べて、初期強度は小さいが、長期強度が大きい。耐硫酸性や化学抵抗性が大きい。また、混和剤の吸着量が少ないため、流動性が向上するなどの優れた特性をもっているといわれる。

普通ポルトランドセメントと中庸熱ポルトランドセメントの構成化合物を比較した場合、中庸熱ポルトランドセメントは、硬化速度及び水和熱が高くなる、ケイ酸三カルシウム(C<sub>3</sub>S)及びアルミン酸三カルシウム(C<sub>3</sub>A)の上限値が規定されている。また、長期強度に寄与する、ケイ酸二カルシウム(C<sub>2</sub>S)が、低熱ポルトランドセメントほどではないが多く含まれている。セメント中の構成化合物について、表-2はその特性を、また、図-1はその含有量の一例を示したものである。

表-2 セメント中の構成化合物の特性

名称	略号	水和速度	強度	水和熱	収縮	化学抵抗性
けい酸三カルシウム	C <sub>3</sub> S	比較的速い	28日以内の早期	中	中	中
けい酸二カルシウム	C <sub>2</sub> S	遅い	28日以後の長期	小	小	大
アルミン酸三カルシウム	C <sub>3</sub> A	非常に速い	1日以内の早期	大	大	小
鉄アルミン酸四カルシウム	C <sub>4</sub> AF	かなり速い	ほとんど寄与しない	小	小	中

図-1 セメント中の構成化合物の含有量



## 1.2 着目点

本研究の実施にあたり、中庸熱配合について着目した点を表-3に示す。

表-3 本研究の着目点

- ① 中庸熱配合は普通配合に比べてスランプロスが緩やかというが、どの程度違うのか？
- ② 中庸熱配合は普通配合に比べて水和熱が低いというが、どの程度違うのか？
- ③ 中庸熱配合は普通配合に比べて初期強度が小さいというが、どの程度違うのか？
- ④ 中庸熱配合は普通配合に比べて長期強度の伸びは大きいというが、どの程度増進するのか？

## 2. 実施概要

普通配合及び中庸熱配合の特性比較を実機練りにて行った。実施時期は7月～9月とした。配合はW/C40%、50%の普通配合及び中庸熱配合をそれぞれ製造し、4種類とした。

フレッシュコンクリートは、製造後トラックアジテータに積み込んだ直後から60分後まで、20分毎の経時変化について室内で試験を行った。その後屋外で1<sup>m</sup>模擬体に打設し、温度履歴を計測した。また、同時に採取した供試体及び後日採取した模擬体のコアについて圧縮強度試験を行った。

### 2.1 配合

#### 1) コンクリートの配合水準

コンクリートの配合水準及び実施工場を表-4に示す。

表-4 配合水準

実施工場	W/C (%)	セメントの種類
株式会社本久 長野生コン工場	40	N (普通ポルトランドセメント)
		M (中庸熱ポルトランドセメント)
信州生コン株式会社 大橋工場	50	N (普通ポルトランドセメント)
		M (中庸熱ポルトランドセメント)

#### 2) 単位量

配合の単位量及び目標強度を表-5に示す。

表-5 配合の単位量及び目標強度

No.	配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						目標強度(N/mm <sup>2</sup> ) (材齢28日・標準)
				C-N	C-M	W	S1	G1	AD1	
①	W/C40-18-25N	40.0	42.1	445		178	694	970	4.895	46.3
②	W/C40-18-25M		42.5		440	176	707	970	4.840	39.3
No.	配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						目標強度(N/mm <sup>2</sup> ) (材齢28日・標準)
				C-N	C-M	W	S2	G2	AD2	
③	W/C50-18-25N	50.0	46.6	344		172	813	947	3.780	33.0
④	W/C50-18-25M		47.2		336	168	834	947	3.700	25.0

## 3) 使用材料

使用材料を表-6に示す。

表-6 使用材料

原材料	記号	種類	銘柄または産地
セメント	C-N	普通ポルトランドセメント	太平洋セメント㈱
	C-M	中庸熱ポルトランドセメント	太平洋セメント㈱
練混ぜ水	W	地下水	—
細骨材	S1	砂	犀川・千曲川水系(合流地点)
	S2	砂	犀川水系
粗骨材	G1	砂利	犀川・千曲川水系(合流地点)
	G2	砂利	犀川水系
混和剤	AD1	AE減水剤標準形I種	マスターポリヒード15Sc
	AD2	AE減水剤標準形I種	フローリックSV

## 2.2 試験項目

- 1) フレッシュコンクリートの経時変化を測定(スランプ、空気量、試料温度)
- 2) 1m<sup>3</sup>模擬体内部の温度履歴を計測(中心部および端部)
- 3) 供試体の圧縮強度試験(標準水中、現場水中、簡易断熱)
- 4) 1m<sup>3</sup>模擬体コアの圧縮強度試験(中心部、隅角部)

供試体の環境及び試験材齢を表-7に示す。

表-7 供試体環境及び試験材齢の一覧

供試体環境及び材齢	3日	7日	28日	56日
標準水中	○	○	○	○
現場水中	○	○	○	○
簡易断熱	-	-	○	○
模擬体コア(中心部)	-	-	○	○
模擬体コア(隅角部)	-	-	○	○

## 2.3 試験方法

- 1) フレッシュ及び硬化コンクリートの試験について、項目及び方法を表-8に示す。

表-8 コンクリート試験の実施項目及び試験方法

実施項目	試験方法	実施時期
フレッシュコンクリート	試料採取	JIS A 1115
	スランプ	JIS A 1101
	空気量	JIS A 1128
	試料温度	JIS A 1156
	供試体作成	JIS A 1132
硬化コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108

製造直後、20分後、40分後、60分後

製造から40分後

表-7による

2) 模擬体の温度計測位置および温度計測方法

使用した1m<sup>3</sup>模擬体および簡易断熱養生槽の概略図を図-2および図-3に示す。模擬体は、図-2に示すように、中心部および隅角部(端部)の各1点に温度センサ(TPE樹脂被覆センサ)を設置した。また、簡易断熱試験体は、図-3に示す位置の試験体中心部に温度センサを設置した。なお、各工場において、日射の当たらない位置に温度センサを設置し、外気温度の計測を行った。

コンクリートの温度計測は、計測温度が外気温と同程度となる時期(材齢約9日)まで実施し、温度計測には、温度データロガー(TR-71U:テイアンドデイ社製)を用いた。

図-2 模擬体概略図

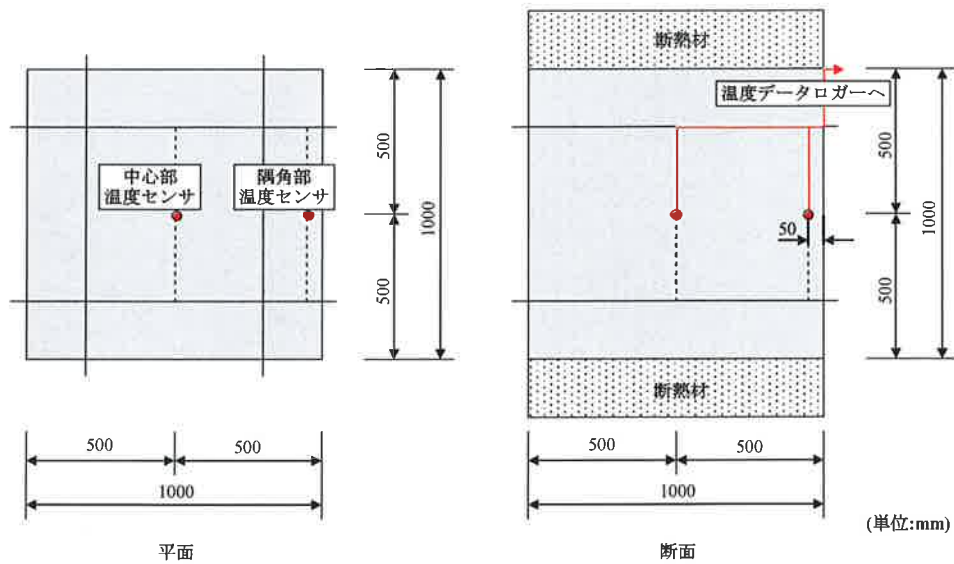
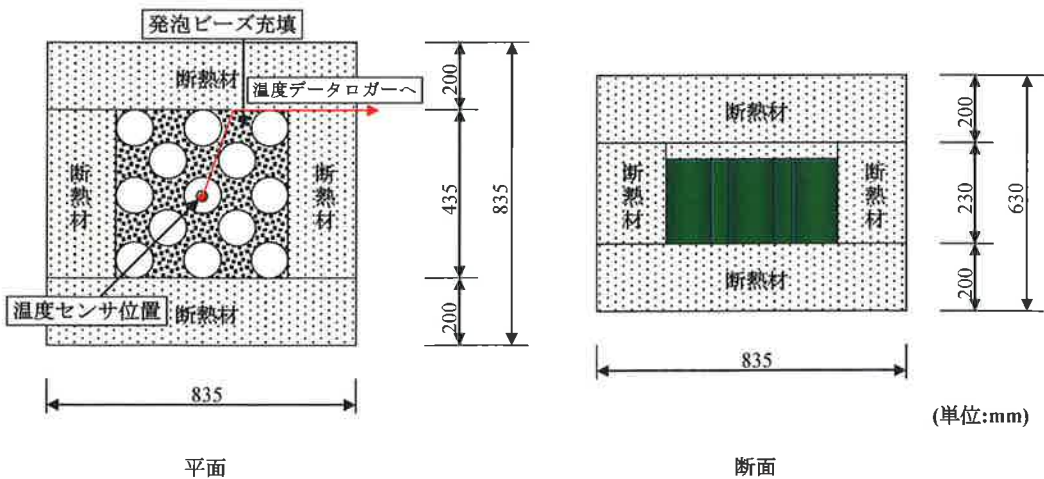


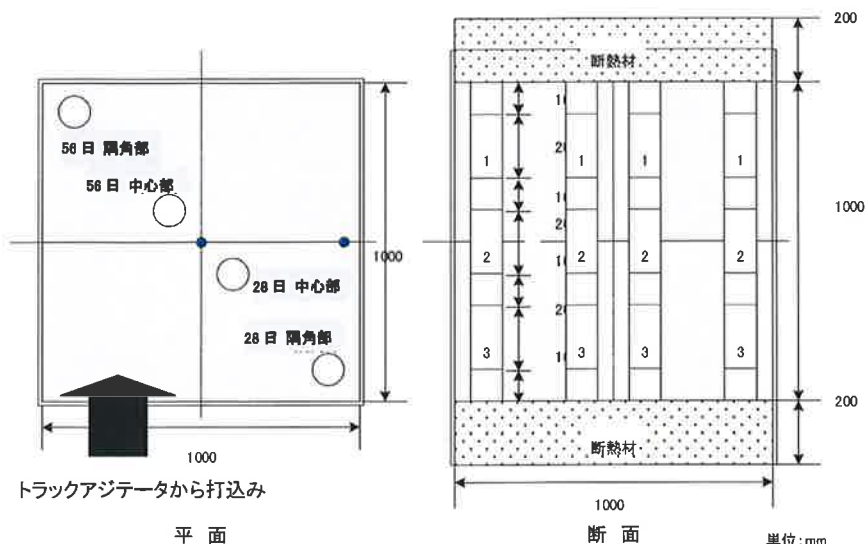
図-3 簡易断熱養生槽概略図



3) 模擬体からのコア採取位置

模擬体からのコア採取位置を図-4に示す。コアは材齢 28 日及び 56 日で圧縮強度試験を行うため、それぞれ試験の数日前にコアの抜き取りを行い、両端面を研磨した。

図-4 模擬体からのコア採取位置



3. 試験結果

それぞれの試験結果と試験状況写真を以下に示す。

1) フレッシュコンクリートの経時変化試験結果を表-9に示す。

表-9 フレッシュコンクリートの経時変化

No.	W/C (%)	セメントの種類	経時 (分後)	スランプ (cm)	空気量 (%)	試料温度 (°C)	気温 (°C)
①	40	N	直後	20.0	4.7	25	25
			20	19.5	4.7	26	25
			40	18.0	5.1	26	26
			60	15.0	4.3	26	27
②		M	直後	20.0	5.1	24	28
			20	20.0	5.3	26	28
			40	19.5	5.7	26	29
			60	18.5	5.1	27	30
③	50	N	直後	19.0	4.7	28	31
			20	18.5	4.6	29	31
			40	17.0	4.8	30	32
			60	14.5	4.0	31	32
④		M	直後	19.5	5.1	26	32
			20	18.5	4.6	28	31
			40	18.0	4.5	29	30
			60	16.5	4.4	29	30



2) 1m<sup>3</sup>模擬体内部(中心部及び端部)の温度計測結果を表-10及び図-5～図-8に、温度上昇量を図-9～図-12に示す。

表-10 温度計測結果一覧

No.	W/C (%)	セメントの種類	温度計測位置		最高温度 (°C)	温度上昇量 (°C)
①	40	N	模擬体	中心部	73.7	47.6
				端部	59.7	33.6
			簡易断熱試験体	66.7	40.4	
②	40	M	模擬体	中心部	59.5	32.8
				端部	49.5	22.5
			簡易断熱試験体	54.4	28.0	
③	50	N	模擬体	中心部	66.3	35.9
				端部	57.0	26.3
			簡易断熱試験体	59.7	30.1	
④	50	M	模擬体	中心部	54.2	24.4
				端部	47.1	17.0
			簡易断熱試験体	49.5	20.7	

図-5 温度計測結果 No.①

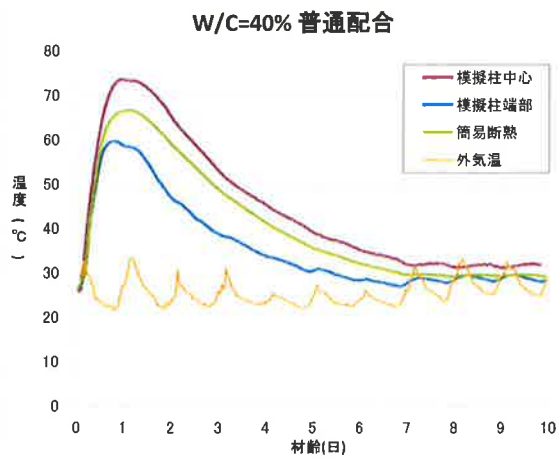


図-6 温度計測結果 No.②

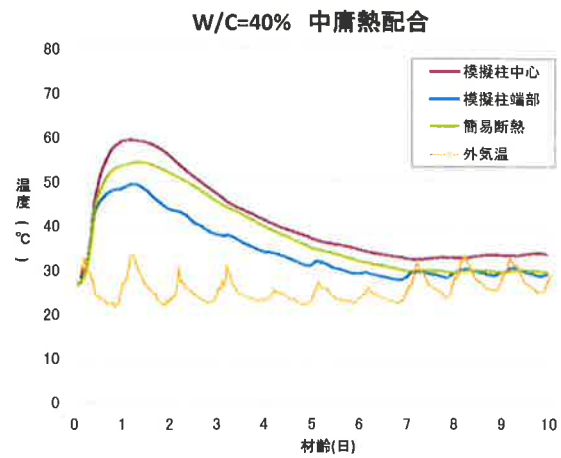


図-7 温度計測結果 No.③

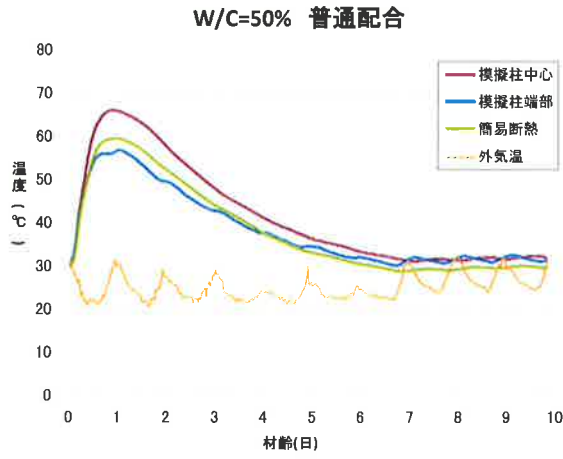


図-8 温度計測結果 No.④

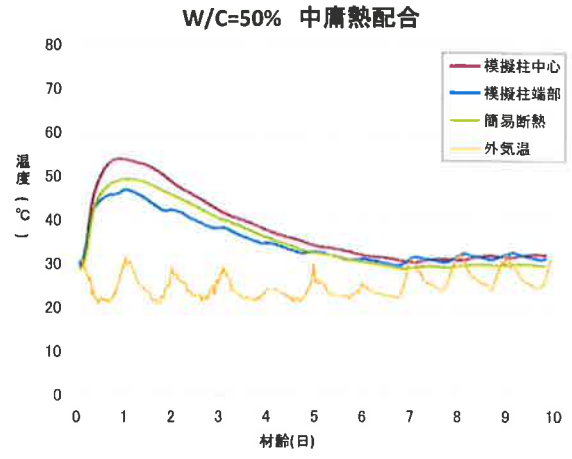


図-9 温度上昇量 No.① (W/C=40% 普通配合)

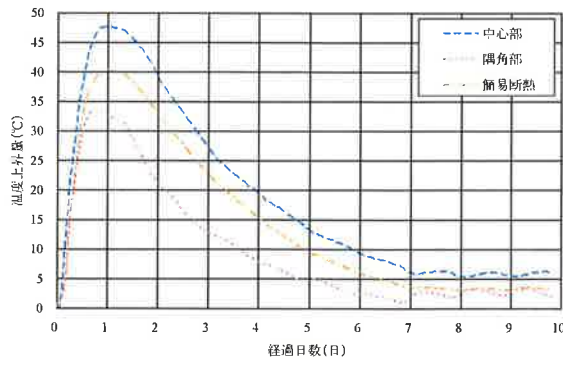


図-10 温度上昇量 No.② (W/C=40% 中庸熱配合)

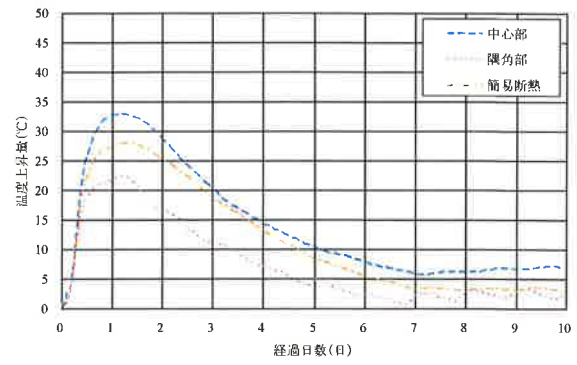


図-11 温度上昇量 No.③ (W/C=50% 普通配合)

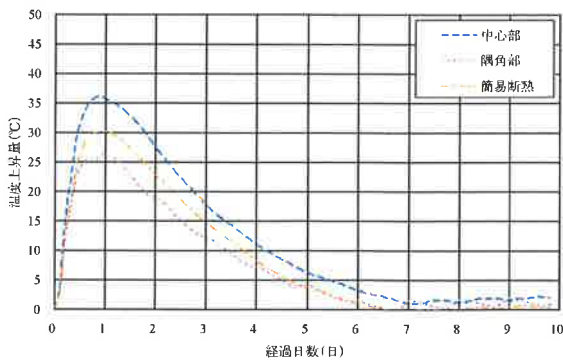
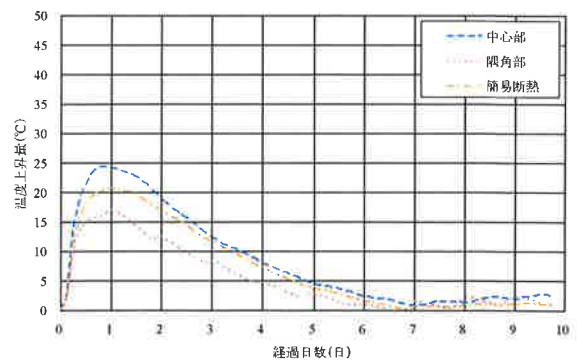


図-12 温度上昇量 No.④ (W/C=50% 中庸熱配合)





3) 供試体及び模擬体コアの圧縮強度試験結果を表-11に示す。

簡易断熱試験体及び模擬体については内部温度の計測を主体にしていたため、影響が及ばないように約10日間は型枠内で打設時の状態を保ち、初期材齢での試験は行わなかった。

表-11 圧縮強度試験結果一覧

No.	W/C (%)	セメントの種類	材齢 (日)	圧縮強度試験 (N/mm <sup>2</sup> )					
				供試体環境			模擬体コア		
				標準水中	現場水中	簡易断熱	中心部	隅角部	
①	40	N	3	28.4	29.4	—	—	—	
			7	38.3	39.0	—	—	—	
			28	46.7	47.4	38.0	40.5	40.0	
			56	51.2	49.9	41.6	46.9	49.1	
②		40	M	3	15.3	16.1	—	—	—
				7	22.1	23.6	—	—	—
				28	40.6	43.4	38.5	41.4	39.4
				56	48.7	48.2	43.4	50.6	51.0
③	50		N	3	17.8	18.5	—	—	—
				7	25.7	25.0	—	—	—
				28	33.7	34.2	25.3	30.3	29.5
				56	37.5	37.1	29.5	35.4	33.6
④		50	M	3	8.83	9.08	—	—	—
				7	14.2	15.3	—	—	—
				28	28.6	32.1	27.1	30.8	30.0
				56	36.2	38.2	31.0	37.6	36.8



4. 考察

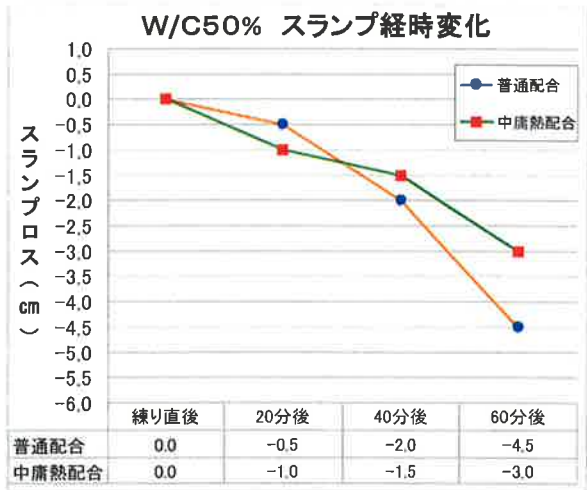
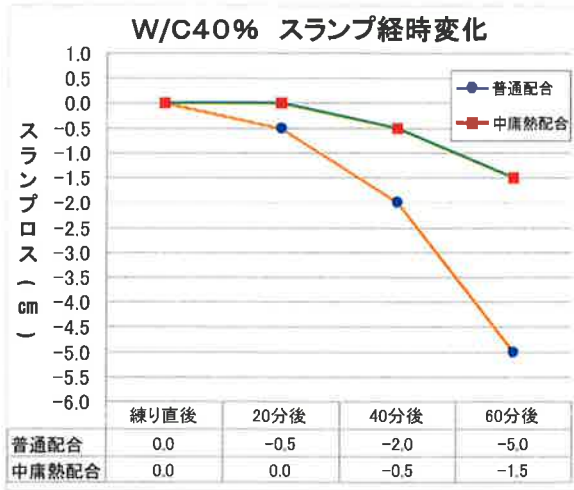
表-3に示した着目点に沿って、結果について考察した。

① 中庸熱配合は普通配合に比べてスランプロスが緩やかというが、どの程度違うのか？

スランプロスの比較を図-13及び図-14に示す。練り直後のスランプロスを0cmとしたとき、60分後のスランプロスを見ると W/C40%の場合、普通配合は-5.0cm であるのに対し、中庸熱配合は-1.5cmであった。同様にW/C50%の場合、普通配合-4.5cmに対し、中庸熱配合は-3.0cmであった。この結果からみると、中庸熱配合の方がスランプロスは緩やかであった。

図-13 W/C40% スランプ経時変化

図-14 W/C50% スランプ経時変化



② 中庸熱配合は普通配合に比べて水和熱が低いというが、どの程度違うのか？

コンクリート打設後の温度上昇量の比較を表-12に示す。温度上昇量は、普通配合と比べると中庸熱配合ではおよそ7割弱程度であった。これは模擬体、簡易断熱を問わず測定箇所毎でみても同様の傾向(65~69%)であった。温度上昇のピークタイムは、多少の差はあるが打設からおよそ1日後に最高温度に到達した。なお、最高温度到達前後の上昇下降±1℃の状態がおよそ14時間程度持続していた。これは普通配合、中庸熱配合ともにほぼ同じ傾向だった。

表-12 温度上昇量の比較

W/C (%)	温度測定箇所		配合 (セメント)	コンクリート温度 (°C)			最高温度到達時間	温度上昇量 対普通比 (%)
				荷卸し時	最高温度	温度上昇量		
40	模擬体	中心部	普通	26.1	73.7	47.6	24h後	
			中庸熱	26.7	59.5	32.8	27h後	69%
		端部	普通	26.1	59.7	33.6	19h後	
			中庸熱	27.0	49.5	22.5	28h後	67%
	簡易断熱試験体		普通	26.3	66.7	40.4	26h後	
			中庸熱	26.4	54.4	28.0	31h後	69%
50	模擬体	中心部	普通	30.4	66.3	35.9	21h後	
			中庸熱	29.8	54.2	24.4	21h後	68%
		端部	普通	30.7	57.0	26.3	25h後	
			中庸熱	30.1	47.1	17.0	24h後	65%
	簡易断熱試験体		普通	29.6	59.7	30.1	23h後	
			中庸熱	28.8	49.5	20.7	25h後	69%

セメントの水和発熱に伴うコンクリート構造物の熱伝導・熱応力・温度ひび割れの検討を行った。

(1) 打ち込み後の部材温度の経時変化の比較(簡易断熱試験体の実測温度と理論値)

土木学会標準示方書(2012年制定 コンクリート標準示方書 6編 温度ひび割れに対する照査)より、 $Q(t)$ 断熱温度上昇量を参考に、モデル部材の温度を理論算出したものを  $T(t_i)$ とし、実機試験で得られた簡易断熱試験体の温度との経時変化比較を行った。グラフを図-15及び図-16に示す。

図-15 部材温度 W/C50% 普通配合(N)

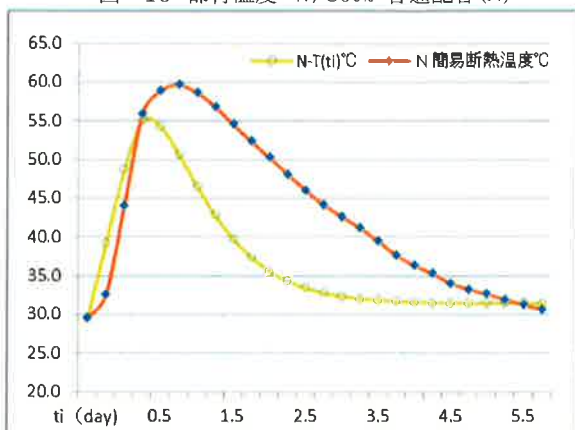
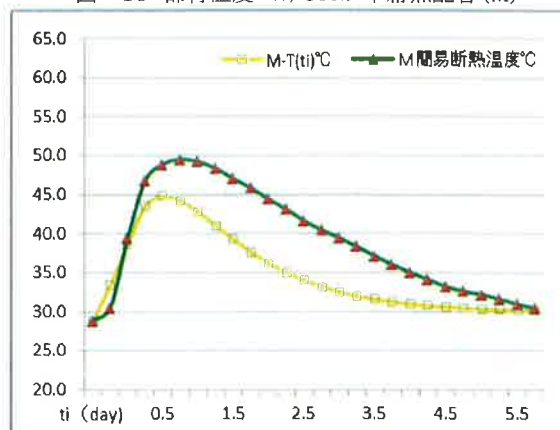


図-16 部材温度 W/C50% 中庸熱配合(M)



グラフは縦軸に温度(°C)、横軸に経過日数(日)を表す。※ $T(t_i)$ °C :  $Q(t)$ 断熱温度上昇量を用いて算出した理論値  
 実機試験で得られた簡易断熱試験体の温度は、 $Q(t)$ 断熱温度上昇量を用いて算出した理論値に比べ、どちらの配合においても高い結果となった。【普通配合:簡易断熱最高温度 59.7°C、理論値 55.1°C (温度差 4.6°C)】【中庸熱配合:簡易断熱最高温度 49.5°C、理論値 44.8°C (温度差 4.7°C)】また、温度の最高到達時間においては両配合ともに実機試験値は、理論値に比べ遅くなる結果となった。

W/C40%の検討は、 $Q(t)$ 断熱温度上昇量を求める際、単位セメント量が  $250 \leq C \leq 400 \text{ kg/m}^3$ を条件としているため今回省略とした。

(2) 熱応力解析とひび割れ予測

土木学会標準示方書(2012年制定 コンクリート標準示方書 6編 温度ひび割れに対する照査)より、 $f'c(t')$ を参考に理論上の引張強度  $f_t(t_i)$ を算出し、今回実機試験で得られた簡易断熱試験体の温度によって発生する引張応力を  $\sigma(t_i)$ とし、土木学会の  $Q(t)$ 温度上昇量から得られる理論値の推定引張応力  $T(t_i)$ との経時変化比較を行った。グラフを図-17及び図-18に示す。

図-17 応力と引張強度 W/C50% 普通配合(N)

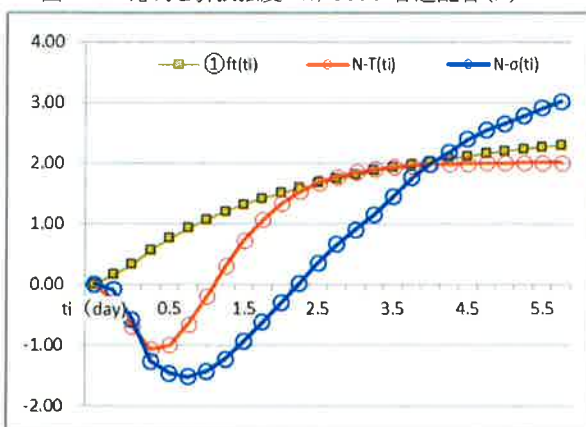
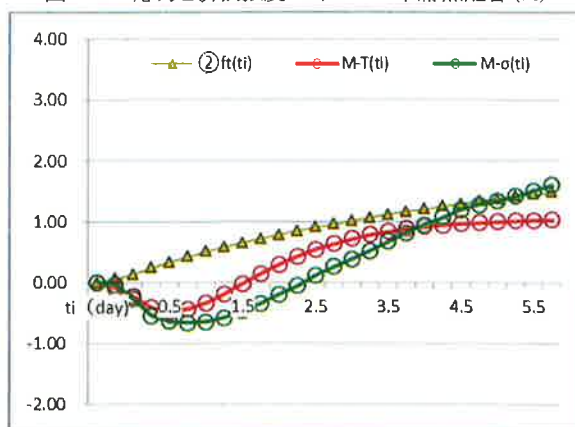


図-18 応力と引張強度 W/C50% 中庸熱配合(M)



グラフは縦軸に応力・強度(N/mm<sup>2</sup>)、横軸に経過日数(日)を表す。

- ① $f_t(t_i)$ :N引張強度 N-T( $t_i$ ):N推定引張応力 N- $\sigma(t_i)$ :N実機引張応力
- ② $f_t(t_i)$ :M引張強度 M-T( $t_i$ ):M推定引張応力 M- $\sigma(t_i)$ :M実機引張応力

今回は夏季での1水準の比較である。中庸熱配合では、推定引張応力  $M-T(t)$ は引張強度 $\sigma(t)$ を上回ることにはなかったが、実機試験値(簡易断熱温度)を用いた引張応力 $M-\sigma(t)$ が引張強度をわずかに上回る結果となった。一方普通配合では、 $N-T(t)$ 、 $N-\sigma(t)$ ともに引張強度 $\sigma(t)$ を上回る結果となり、こちらの方が温度履歴が高く膨張収縮の差が大きい為、ひび割れの危険性が高いと思われる。

③ 中庸熱配合は普通配合に比べて初期強度が小さいというが、どの程度違うのか？

各配合における、強度発現及び普通配合に対する中庸熱配合の強度比を表したグラフを供試体環境毎に図-19～22に示す。図中の棒グラフは圧縮強度値を、折れ線グラフは同一材齢における普通配合に対する中庸熱配合の強度比をそれぞれ表している。材齢3日及び7日での中庸熱配合の圧縮強度は、普通配合のそれと比べると約5～6割程度の強度発現であった。しかし、後述のように中庸熱配合は長期強度への伸びが大きく、材齢56日の圧縮強度では普通配合とほぼ同等の数値となった。

図-19 W/C40% 標準水中

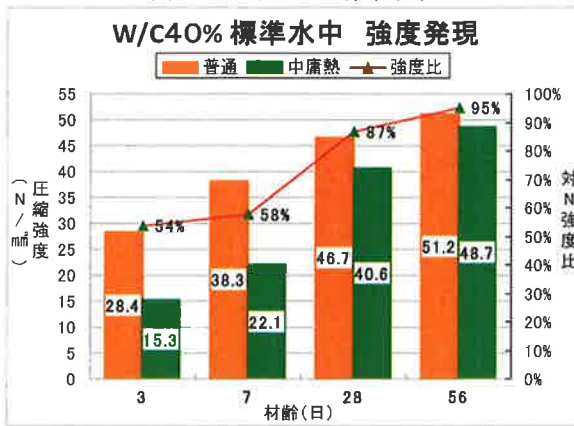


図-20 W/C40% 現場水中

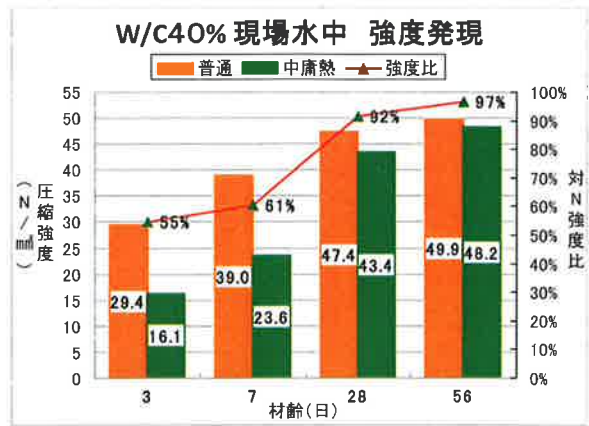


図-21 W/C50% 標準水中

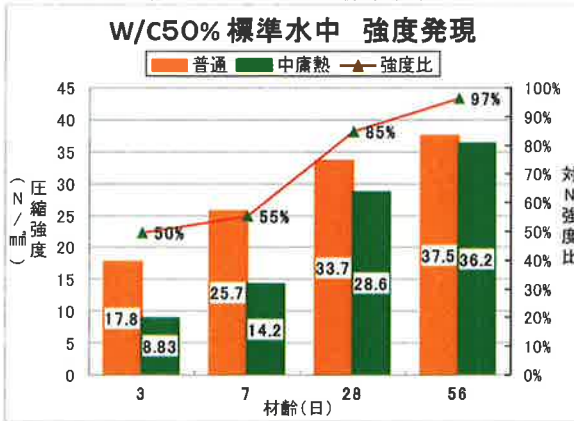
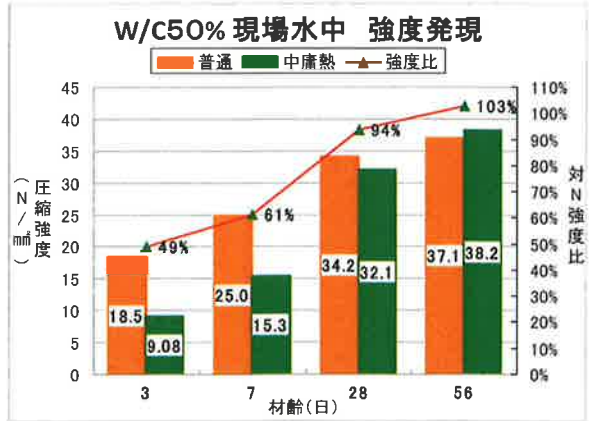


図-22 W/C50% 現場水中



④ 中庸熱配合は普通配合に比べて長期強度の伸びは大きいというが、どの程度増進するのか？

各配合における、材齢7日から56日への強度増進状況を表したグラフを供試体環境毎に図-23～26に示す。図中の棒グラフは圧縮強度値を、●印は材齢7日から56日への強度増進倍率をそれぞれ表している。材齢7日から56日への強度増進倍率を見ると、普通配合では平均約 1.4 倍程度なのに対し、中庸熱配合では約 2～2.5 倍の伸びが見られた。

図-23 W/C40% 標準水中

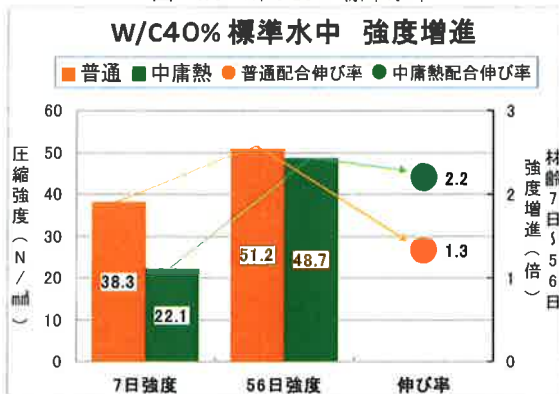


図-24 W/C40% 現場水中

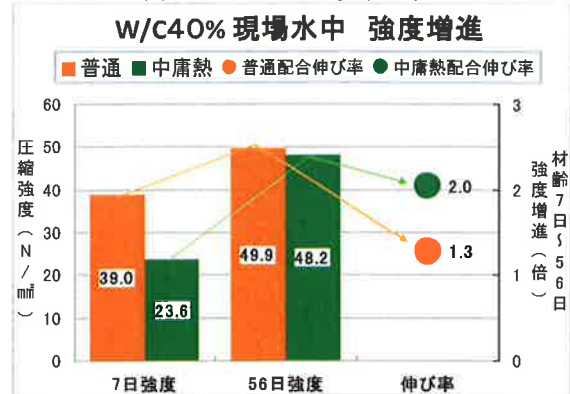


図-25 W/C50% 標準水中

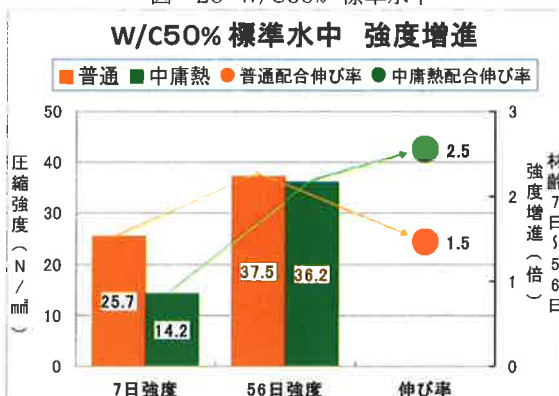
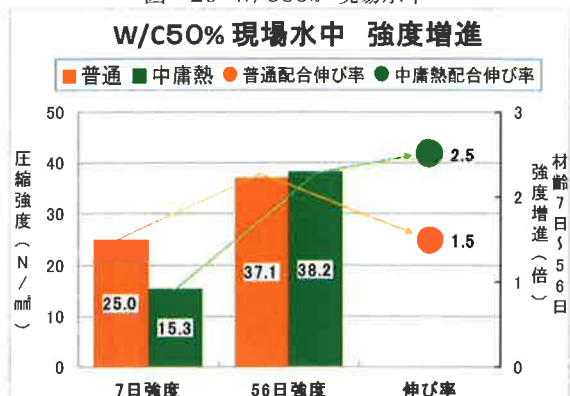


図-26 W/C50% 現場水中



5. まとめと今後の課題

温度ひび割れの低減を目的に中庸熱配合を選択する傾向にあるが、前述のようにセメントの特性から比較をすると中庸熱配合の優位性が見えてくる。ただし、普通配合から中庸熱配合に変えることは、水和熱によって発生する温度上昇量を抑え、引張応力を低減するためには有効だが、一方では強度発現が緩やかであるため、初期の引張強度も低くなってしまふ。それらの特性を十分に把握したうえで使用することが重要と考える。

今回の研究の結果は、全般的に中庸熱ポルトランドセメントの特徴・特性について文献等で見聞きした内容の傾向が出た結果となった。ただ、今回は夏季に1回実施しただけの結果であるから、他の季節でも同様の結果になるのかどうか、検証の必要性を感じた。機会があれば冬季や通常期にも実施してみたい。その場合には、材齢91日までの追跡も行いたい。

以上