

報告 スラブ状基礎における普通セメントと低熱セメントの温度応力計測解析

神山英幸*¹・野本健司*²・西垣和弘*³・栩木 隆*⁴

要旨：変電機器基礎（幅約15m,長さ約22m,厚さ1.4m）工事に際し、低熱セメントと同時に普通セメントを使用して、マスコンクリートにおける温度応力低減効果を現場計測の実施および温度応力解析を行うことにより比較検討した。その結果、最高温度および最大引張応力度に関しては、低熱セメントの方が有利であることが分かったが、ひびわれ指数に関しては、明らかに有利であるとは判断できないものの、最大ひびわれ幅に関しては有効であることを確認した。

キーワード：マスコンクリート、温度応力、温度ひびわれ、低熱セメント、FEM 解析

1. まえがき

マスコンクリート構造物の温度ひびわれを制御する対策には、設計、材料、配合、施工面から様々なものがある。たとえば、材料では低発熱型のセメントを用いる方法、配合では単位水量を小さくするなどの方法がある。また、施工面からは打設温度を下げるために骨材や水などの材料温度を予め冷却しておく、いわゆるプレクーリング工法がある。

本報文は、新榛名変電所構内において、1000kV変電機器実証試験設備設置工事におけるトランス基礎部分に、セメント自体の改良によって低熱化を可能にした高ビーライト系セメント（低熱ポルトランドセメント：以下、Lと称す）を使用し、同時に普通セメント（以下、Nと称す）を使用して、マスコンクリートにおける温度応力低減効果を現場計測の実施および温度応力解析を行うことにより比較検討した。その結果、いくつかの知見が得られたので報告する。

2. 基礎構造物の概要

対象とした基礎構造物は、図-1に示したように赤相、白相、黒相の3種類の変圧器基礎である。大きさはほぼ同形で幅約15m,長さ約22m,厚さ1.4mであり、基礎形式は杭基礎（赤相、白相）および直接基礎（黒相）である。赤相にはNセメントを、白相、黒相にはLセメントを1次コンクリートとして1.0m、2次コンクリートとして0.4m打設（赤相は4.5週間後、白相は5.3週間後、黒相は4.5週間後に打設）し、ここでは、1次コンクリートについて報告する。

3. 低熱ポルトランドセメントについて

低発熱型のセメントは、混和材による低発熱化の研究[1]が進んでおり、三成分系セメント（フライアッシュ、スラグ等との混合）の低発熱型のセメントが盛んに使用されるようになってきている。しかし、これら多成分系のセメントでは産業副産物であるスラグ微粉末やフライアッシュ

* 1 東京電力(株)UHV送変電建設所南いわき開閉所工事事務所 副長、工修（正会員）

* 2 東京電力(株)UHV送変電建設所沼田工事事務所 課長、工修

* 3 (株)熊谷組技術本部土木設計部 課長、工修

* 4 秩父小野田(株)セメント・コンクリート研究所技術センター アシスタントリーダー（正会員）

等の混合材がセメント中に60～85%程度と極めて多量に添加されることになるため、品質変動の影響を受けることが懸念される。今回、使用した低熱ポルトランドセメント[2]は混和材を全く使用しない高ビーライト系の低発熱セメント[3]でセメントクリンカーの製造時に構成化合物の比率[4]を変化させたものであり、水和発熱が小さく長期強度発現性に優れているビーライト(C_2S)の比率が各種のポルトランドセメントの中で最も高く、逆に発熱が大きく強度発現性に寄与の少ない間隙相(C_3A , C_4AF)の比率が最も低くなっている。このため、日本工業規格(JIS)の中熱セメントのすべての品質規定にも適合した上で、コンクリートの終局断熱温度上昇量は低熱ポルトランドセメントを用いた場合、図-2[4]に示すように、普通、高炉B種(BB)及び、中熱(M)の各セメントに比べて大幅に小さく、初期材齢においてはフライアッシュ混入低熱高炉セメント(MBF)を下回る上昇温度となっている。また、初期材齢での温度上昇速度が非常に緩やかなことから、実構造物に打設した場合、放熱の程度によっては大幅な温度の低減を期待することができる。

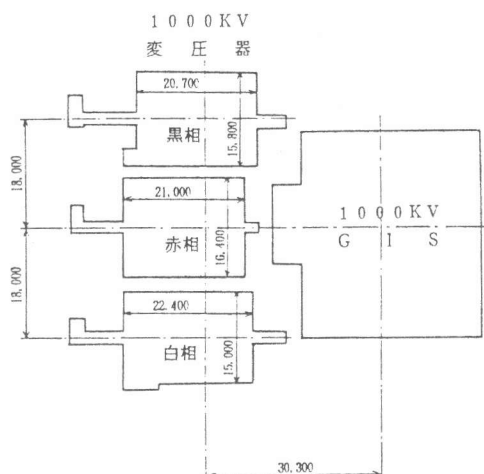


図-1 基礎構造物の概要

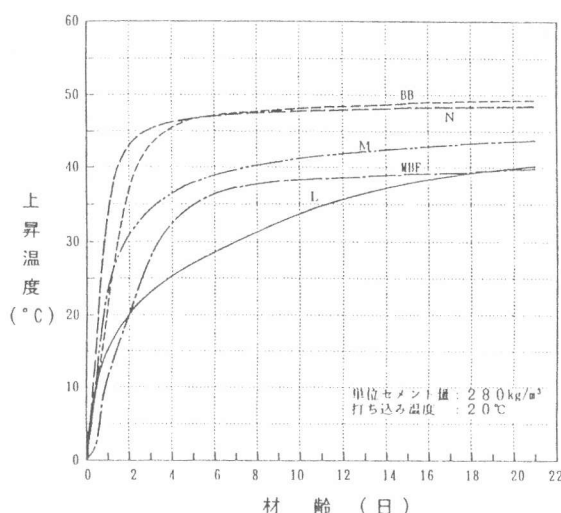


図-2 材齢と断熱温度上昇量の関係

4. コンクリート試験

4. 1 コンクリートの配合

設計基準強度を 180kgf/cm^2 (材齢56日)とし、表-1に示す配合のコンクリートを打設した。

表-1 コンクリートの配合表

セメント	G_{max} (mm)	sl (cm)	Air (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m^3)				A E ※ゾリス N0.70
					W	C	S	G	
N	25	12 ± 2.5	4.5 ± 1	60	169	282	797	1015	4.5
L	25	12 ± 2.5	4.5 ± 1	60	166	277	812	1015	4.43

4. 2 コンクリート試験結果

NセメントとLセメントのコンクリート試験結果より以下のような特徴が分かった。

(1) 強度特性

図-3に圧縮強度試験結果を示す。LセメントはNセメントに対して材齢7日までで35%前後、材齢28日までで50%程度の圧縮強度であるが材齢56日では90%程度となり、大きな伸びを示している。さらに材齢91日では、Nセメントの強度を上回り、長期材齢での強度発現が大きいことが分かる。

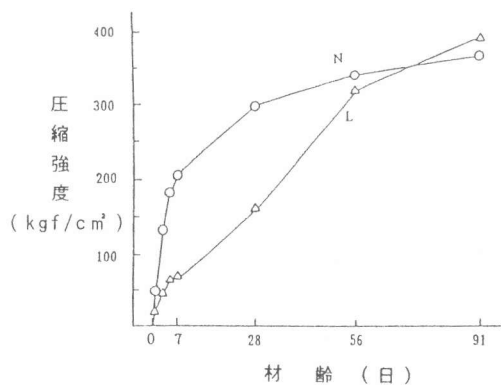


図-3 圧縮強度試験結果

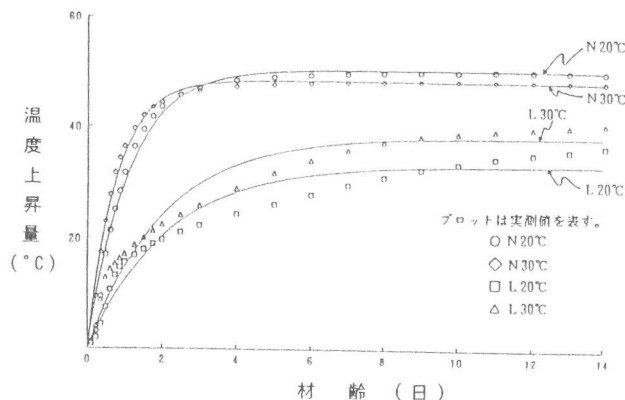


図-4 断熱温度上昇量の経時変化

(2) 発熱特性

図-4 に断熱温度上昇試験の実測値及び断熱温度上昇の近似式を示す。練り上がり温度が20°Cの場合、Lセメントの断熱温度上昇量は材齢1日で、15.9°C、材齢3日で22.4°Cになり、Nセメントに対してそれぞれ15.9°C、24.7°C低く、材齢5日まではほぼ半分程度の温度上昇量であり、発熱が緩やかなことが分かる。また、材齢14日の温度上昇量は、Nセメントが、50.5°C、Lセメントが37.0°Cであり、LセメントはNセメントに対して13.5°C低い結果を示した。

一方、練り上がり温度が30°Cの場合では、Nセメントは発熱速度は大きいものの、材齢2日以降での温度上昇量は20°Cの場合に比べてやや小さいのに対し、Lセメントは発熱速度と材齢14日までの温度上昇量ともに20°Cの場合に比べてやや大きい傾向にあった。これは、高温条件においてビーライトの水和が促進され、長期まで反応が継続したものであると考えられる。近似式の定数でみた場合で

も、LセメントはNセメントと比較して、終局温度上昇量K、温度上昇速度 α 値ともに小さいものの、Lセメントは式形にのりにくいことが分かった。

なお、実際に使用したコンクリートの強度試験結果を表-2に示す。

表-2 コンクリート強度試験結果

箇 所	使用セメントの種類	スランプ (cm)	空気量 (%)	練り上り温度 (°C)	試験項目	材 齢						
						1日	3日	5日	7日	28日	56日	91日
赤 相	Nセメント	11.5	4.0	27.0	圧縮強度	60.6	148	180	211	281	323	349
					弾性係数 ($\times 10^5$)	1.18	1.66	1.86	2.09	2.39	2.60	2.66
					引張強度	5.34	13.5	17.5	18.9	26.7	28.4	29.2
白 相	Lセメント	12.5	4.7	27.5	圧縮強度	23.0	39.8	47.8	55.1	143	289	358
					弾性係数 ($\times 10^5$)	0.60	0.86	1.07	1.10	1.78	2.49	2.73
					引張強度	2.67	4.16	4.93	5.81	14.6	27.8	30.2
黒 相	Lセメント	12.5	4.0	22.5	圧縮強度	24.8	37.9	46.3	50.8	137	285	355
					弾性係数 ($\times 10^5$)	0.61	1.02	1.18	1.24	1.86	2.55	2.70
					引張強度	2.57	4.41	5.07	5.36	13.1	26.8	28.5

(単位: kgf/cm²)

5. 基礎スラブの温度・応力計測

5. 1 計測器設置位置

計測機器の設置位置を図-5に示す。なお、日射による輻射熱がコンクリート温度に与える影響を検討するため日射計も設置した。

5. 2 温度計測結果

中心部における温度履歴を図-6に示したが、コンクリートの最高温度は、各相とも材齢1日前後において計測された。

Nセメントを用いた赤相のコンクリートの最高温度は材齢32時間で約60℃であった。コンクリートの打設温度が27℃であることから、温度上昇量は約33℃となる。また、Lセメントを用いた白相のコンクリートの最高温度は、材齢20時間で約45℃であり、打設温度が27.5℃であるから温度上昇量は約17.5℃となる。同様に、Lセメントを用いた黒相のコンクリートの最高温度は、材齢22時間で約40℃であり、打設温度が22.5℃であるから温度上昇量は約17.5℃となる。コンクリート温度の全体的な傾向として、中心部が高く、表面部に向かって低くなっている。Lセメントを用いた場合、Nセメントを用いた場合よりも約15.5℃（約47%）の温度低減効果が認められた。

5. 3 応力計測結果

コンクリート中心部（表面から50cm下）及び、底面部（中心から28cm下）の応力は、初期材齢では、圧縮側へ移行しその後は引張側へと変化している。これに対し、表面部での応力は、初期では引張側へ移行し、その後は圧縮側へと変化している。各相の最大引張応力の発生した時期と引張応力の大きさは、赤相表面部では材齢3日で約7.9 kgf/cm²、白相表面部では材齢2日で約3.2 kgf/cm²であり、表面部の最大引張応力を、LセメントとNセメントで比較すると約4.7 Kgf/cm²

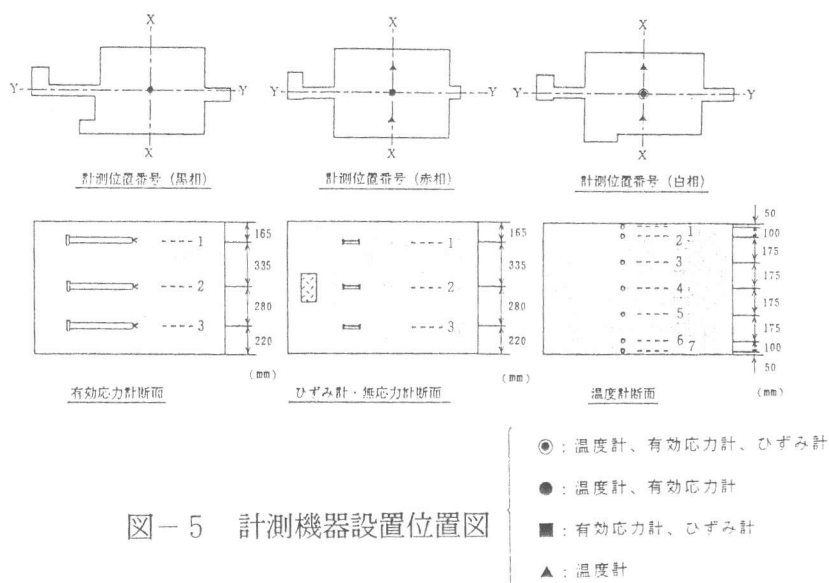


図-5 計測機器設置位置図

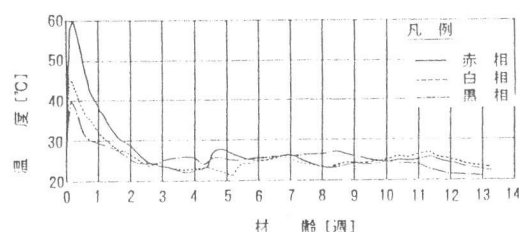


図-6 コンクリート中心温度計測結果

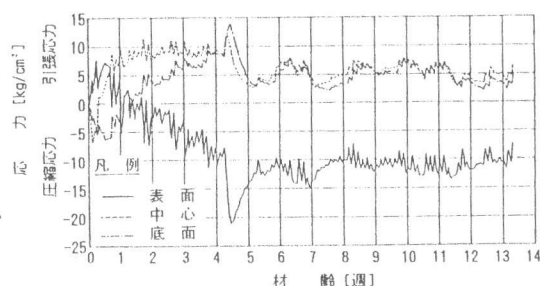


図-7 コンクリート応力計測結果
(赤相、Nセメント)

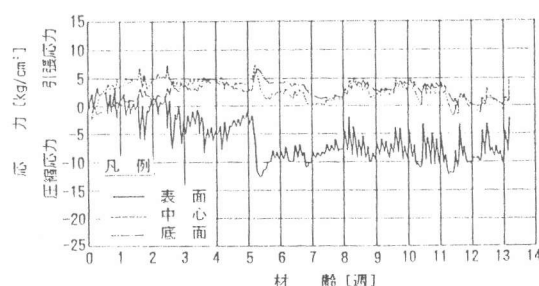


図-8 コンクリート応力計測結果
(白相、Lセメント)

低下し、比率にして60%程度の低減効果が認められた。(図-7~8) また、中心部及び底面部では、各相とも2次コンクリート打設後に最大引張応力が発生するという傾向が現れている。

5. 4 温度ひびわれ

温度ひびわれ発生の評価は、温度ひびわれ指数を用いて行う。表-3にNセメントおよびLセメントの温度ひびわれ指数を示したが、両者とも1.2を満足しているものの、Lセメントが温度および応力に対して低減効果が優れているほどの効果が認められなかった。これは、温度ひびわれ指数が、引張強度(表-2)をその時の計測引張応力で除した値であり、引張応力が小さいにもかかわらず、引張強度が予想以上に初期材齢で上がらなかったためと考えられる。そこで、引張応力が小さいことに注目し、表-4に小野らの方法(ブロック長21m, 外部拘束度0.12)およびBS5337の方法(異形タイプ2、鉄筋径D16) [5]に基づいて最大ひびわれ幅を検討した結果を示したが、ひびわれ幅に関して小野らの方法で約17%, BS5337の方法で約47%の効果が認められた。

表-3 ひびわれ指数

セメント	1日	3日	5日	7日
N	1.21	2.50	2.67	4.46
L	1.21	1.97	2.48	4.62

表-4 最大ひびわれ幅

	セメント	鉄筋比	温度降下量	小野らの方法	BS5337の方法
赤相	普通	0.243%	33.0℃	0.18mm	0.36mm
白相	低熱	0.243%	17.5℃	0.15mm	0.19mm

6. 温度応力解析

解析方法は、温度解析・応力解析とも2次元FEM解析であり、地盤およびコンクリートを一体としたモデル化を行って実施した。温度解析条件のうち、コンクリートの熱伝導率および比熱は2.0 kcal/mhr℃、0.22 kcal/kg℃とし、地盤および杭のそれは1.5 kcal/mhr℃、0.2 kcal/kg℃とした。また、断熱温度上昇量および打ち込み温度は、図-4および表-2に示した値を用いた。応力解析条件のうち、コンクリートの弾性係数は表-2に示した値を用い、境界の拘束条件は、地盤の底面のみFIXとした。

6. 1 入力外気温度の補正

セメントの水和熱に起因してコンクリート構造物に発生する温度応力は、境界条件における温度変化、特に外気温の変化の影響を敏感に受ける。通常、解析では、実際に計測された外気温度の経時変化をそのまま入力することが多いが、コンクリート表面部温度の計測値と解析値とを比較すると大きな誤差が生じていることが少なくない。これは実構造物の表面部の温度履歴は、計測外気温度から与えられる影響以上に、日射による輻射熱の影響を受けているためと考えられる。

今回の解析では、建築の分野において採用されている相当外気温度の概念を採り入れ、入力外気温度を日射による輻射熱を考慮した形に補正した。さらに養生条件によるコンクリートの境界条件の変化に合わせて入力外気温度の設定を変更することにした。

6. 2 解析結果

相当外気温度を用いたLセメントに関する温度解析結果を図-9~11に、応力解析結果を図-12~14に示したが、両者とも比較的良好に対応している。

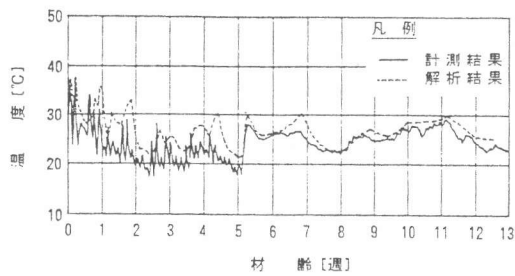


図-9 温度解析結果 (Lセメント、表面)

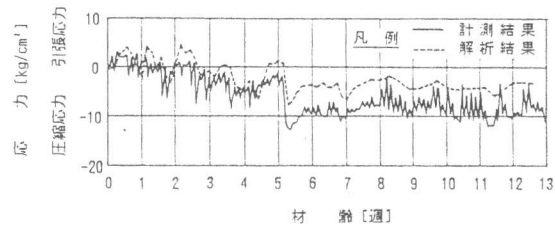


図-12 応力解析結果 (Lセメント、表面)

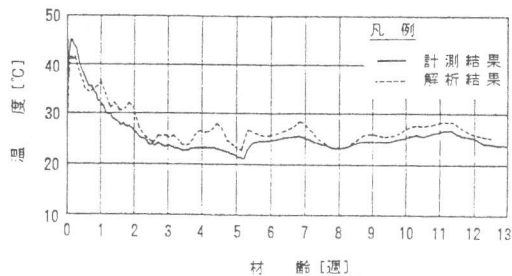


図-10 温度解析結果 (Lセメント、中心)

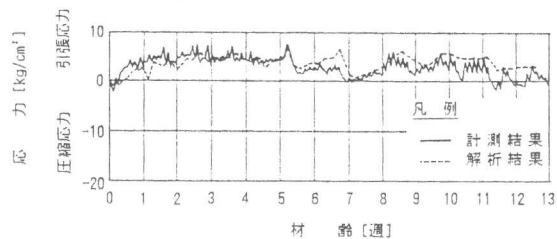


図-13 応力解析結果 (Lセメント、中心)

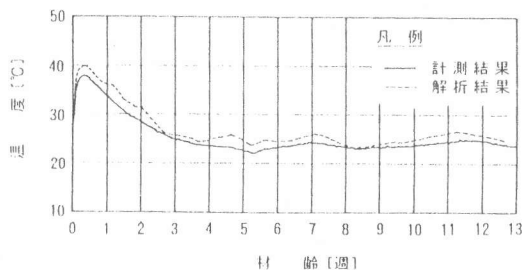


図-11 温度解析結果 (Lセメント、底面)

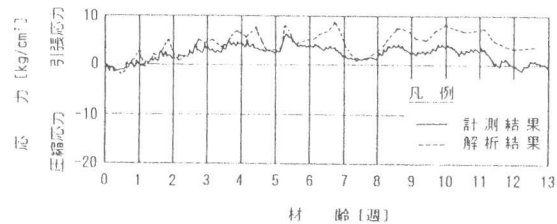


図-14 応力解析結果 (Lセメント、底面)

7. まとめ

本解析の範囲から、得られた知見を整理すると以下ようになる。

- ① Lセメントは、Nセメントに比べ最高温度に関して約47%、最大引張応力度に関して約60%低減することができる。
- ② 両セメントの温度ひびわれ指数にはほとんど差違が認められなかったが、最大ひびわれ幅に関しては、Lセメントの方がNセメントよりも小さい。
- ③ 温度解析用の外気温度は、日射の影響を考慮した相当外気温度を取り入れることにより、適切に表現することができる。

参考文献

- 1) 羽原俊祐、飛内圭之：低発熱セメント，セメント・コンクリート，No. 535，pp. 12～24，1991. 9.
- 2) 原田、榎木他：低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートの特性とマスコンクリートへの適用，セメント・コンクリート論文集，No. 47，pp. 326～331，1993
- 3) 田中、原田他：高ビーライト系ポルトランドセメント，コンクリート工学，Vol. 31，No. 9，pp. 18～27，1993. 9.
- 4) 園部、神山、檜崎：変電機器基礎における温度・応力計測，電力土木，No. 252，pp. 36～45，1994. 7.
- 5) 日本コンクリート工学協会：温度応力ひびわれ幅算定方法についての提案，pp. 2～9，1992. 9.