

論文 マスコンクリートの温度ひび割れ発生に関する解析的研究

神代泰道*1・一瀬賢一*2・川口徹*3

要旨：マスコンクリート部材として代表的な壁状および床状構造物を対象として、若材齢コンクリートのクリープ性状を厳密に考慮できる3次元有限要素法による温度応力解析を行い、コンクリートの調合条件、施工条件が温度ひび割れ発生に及ぼす影響を検討した。その結果、以下のことが分かった。1) 壁状構造物では、温度上昇の大きいセメントほど、かつ、打込み長さが長いほど、温度応力は増大し、温度ひび割れが発生しやすくなる。2) 床状構造物では、温度上昇の大きいセメントほど、かつ、打込み高さが高いほど、温度応力は増大し、表面ひび割れが発生しやすくなる。

キーワード：マスコンクリート、3次元温度応力解析、温度応力、ひび割れ指数

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の大規模化、高層化に伴い、マスコンクリートの検討が必要となる事例が増加している。コンクリート構造物の長寿命化、高耐久化が強く求められている中、有害な温度ひび割れは鉄筋コンクリート構造物の耐久性を損なう恐れがある。このため、大規模な部材を打設する際には、マスコンクリートとして検討・対策が求められる。しかしながら個々の固有の条件毎に発生する温度応力を解析的に予測するには、時間がかかり速やかな対策がとれないなどの問題があった。

ここではマスコンクリート工事の代表例として壁状構造物と床状構造物を対象とし、セメントの種類、打込み高さ及び打込み長さが温度応力に及ぼす影響について解析的に検討し、それぞれのマスコンクリート部材の温度応力に及ぼす影響要因を考察した。

2. 解析方法の概要

温度解析は、3次元有限要素法による非定常熱伝導解析を用いた。温度応力解析は、コンクリート打込み直後からの若材齢コンクリートの弾性係数の発現性状やクリープ性状を厳密に反

映した3次元有限要素法による温度応力解析プログラム¹⁾を用いた。なお、応力解析ではひび割れ、自己収縮や乾燥収縮の影響については考慮していない。温度ひび割れ発生危険性は、式(1)に示すようにひび割れ指数で評価した。一般的にこの指数が1.0を下回ると温度ひび割れが発生する危険性が高くなるとされる。

$$I=f(t)/\sigma(t) \quad (1)$$

$f(t)$ ：有効材齢 t 日における引張強度 (N/mm^2)

$\sigma(t)$ ：有効材齢 t 日における温度応力 (N/mm^2)

3. 解析上の設定条件

3.1 コンクリートの調合条件

表-1に示すようにセメントは普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種、中庸熟および低熟ポルトランドセメントの4種類とし、水

表-1 コンクリートの調合

No.	セメント種類	W/C (%)	単位セメント量 (kg/m^3)	断熱温度上昇式 $Q=K(1-e^{-\alpha t})$		
				K	α	β
1	普通	50.0	340	56.3	1.37	1.00
2	高炉	50.0	340	54.4	0.88	1.00
3	中庸熟	50.0	340	50.5	0.76	1.00
4	低熟	50.0	340	44.8	0.51	0.70

*1 (株)大林組 技術研究所 建築材料研究室 構造材料グループ 副主査 工博 (正会員)

*2 同 グループ長 工博 (正会員)

*3 同 技術管理部 部長 工博 (正会員)

セメント比を50%, 単位セメント量を 340kg/m^3 とした。コンクリートの断熱温度上昇特性は表-1に示す式で曲線化した。なお, 定数 K , α 及び β については資料²⁾を参考とし, セメントの種類に応じて設定した。コンクリートの断熱温度上昇曲線を図-1に示す。

3.2 力学性状

コンクリートの圧縮強度は, 図-2に示すように凝結の終結材齢から発現するものとし, 片対数軸グラフ上で折れ線上の発現を示すものとした。弾性係数は, 図-3に示すように資料²⁾のデータとこれまでの実験データによる回帰式により, 圧縮強度の関数として与えた。温度応力は重ね合わせ法を適用し, ある時間区分内に生じた温度ひずみとクリープひずみの増分による

応力増分を求め, それ以前からの応力増分を足し合わせて, その時点の温度応力として評価した¹⁾。クリープ性状は図-4に示す基準コンクリートによる実験データを用い, 任意のコンクリートに対しては次のように反映した。まず任意のコンクリートの温度解析結果により有効材齢を求め, その有効材齢に対する弾性係数を求める。次にその値と同じ弾性係数になる基準コンクリートの有効材齢を求め, これを等価有効材齢とする。この等価有効材齢を載荷有効材齢とする単位クリープひずみが発生するものと仮定した¹⁾。引張強度は, 図-5に示す供試体の割裂引張強度と圧縮強度の関係による回帰式により推定した。なお, 実構造物中の引張強度を評価するにあ

り, 文献¹⁾と同様に回帰式に対し0.8倍とした値を用いた。解析で用いた各種定数を表-2に示す。地盤の弾性係数は, N 値=10程度の砂地盤を想定して 30N/mm^2 とした。コンクリートの打込み温度は 20°C , 外気温は 15°C 一定とした。地盤の最深部は 15°C 一定の固定温度とした。

表-2 解析で用いた各種定数

項目	コンクリート	地盤
比熱($\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$)	1.20	1.34
熱伝導率($\text{W/m}^\circ\text{C}$)	2.70	1.44
密度(kg/m^3)	2300	1800
熱伝達率(W/m^2)	上面: 14.0 側面: 8.0(5日)→14.0	露出面: 14.0
ヤング係数(N/mm^2)	$E_c = 4763 (F_c)^{0.523}$	30
ポアソン比	0.2	0.3
引張強度(N/mm^2)	$F_t = 0.145 (F_c)^{0.785}$	—
線膨張係数($\mu/^\circ\text{C}$)	10	10

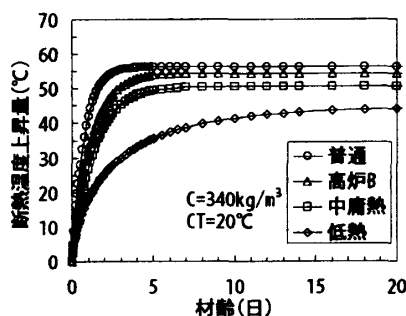


図-1 断熱温度上昇曲線

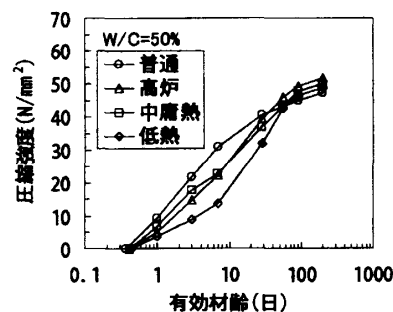


図-2 圧縮強度の発現性状

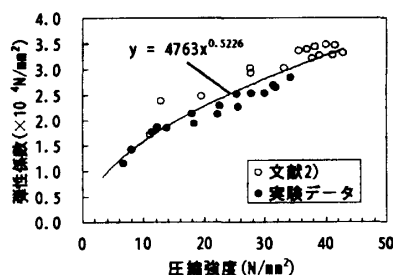


図-3 圧縮強度と弾性係数の関係

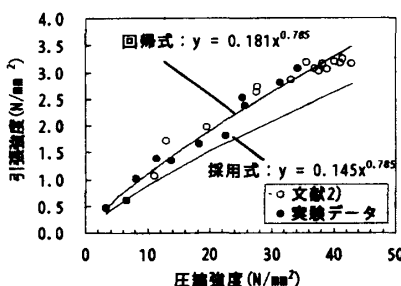


図-5 圧縮強度と引張強度の関係

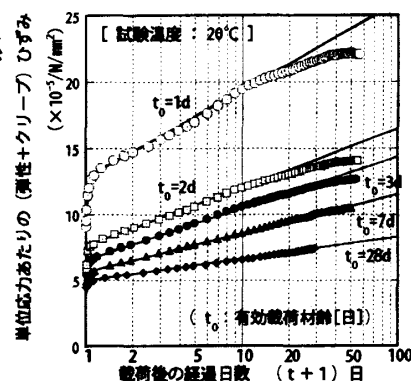
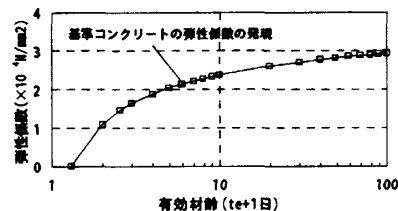


図-4 若材齢クリープ性状¹⁾

3.4 解析モデル

壁状構造物は、図-6(1)に示すように高さ1.0mの基礎スラブ上に打設される高さ2.5mの壁状構造物とし、壁厚を1, 2, 3m, 打込み長さを5, 10, 25, 40mと変化した場合の温度応力について検討した。床状構造物は、図-6(2)に示すように地盤の上に打設される基礎スラブ状構造物とし、打込み高さを1, 2, 3mと変化した場合の温度応力について検討した。さらに高さ2mおよび3mについては、それぞれ1mずつにリフト分割する場合についても検討した。解析モデルは対称性を考慮して1/4モデルとした。解析モデルの一例を図-7に示す。

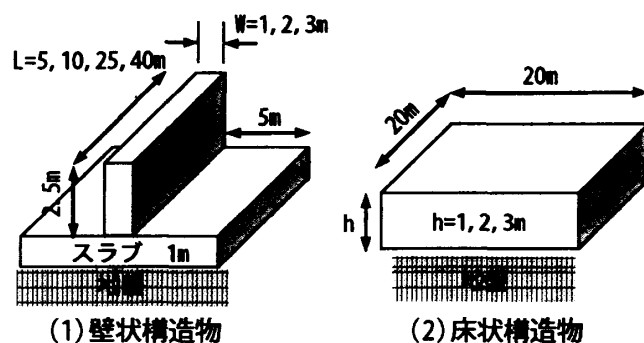


図-6 解析対象部材

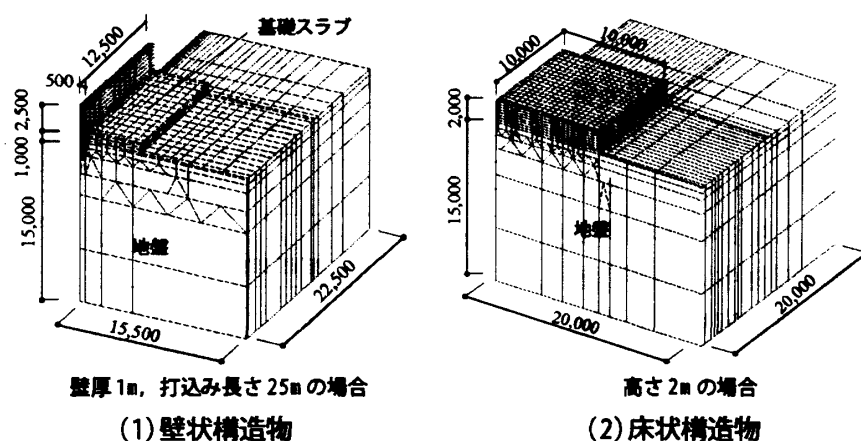


図-7 解析モデル

4. 壁状構造物の解析結果

4.1 セメント種類・打込み長さの影響

温度解析結果の一例として、壁厚2m, 打込み長さ25mとした場合の部材中心部の打込みからの温度変化を図-8に示す。最高温度はセメントの種類によって異なり、普通>高炉>中腐熱>低熱の順であった。なお、打込み長さの影響はほとんどなかった。図-9に壁厚2mとした場合の打込みからの温度応力の推定結果を示す。最高温度までの温度上昇中に圧縮応力が蓄積され、その後、温度降下に伴い、引張側に移行する。引張応力の大きさは、打込み長さが長くなるほど大きくなり、また、温度上昇が大きいセメントほど、発生する応力も大きくなった。打込み長さが25m以上になると普通、高炉および中腐熱では、温度応力が引張強度を上回り、ひび割れ発生の危険性が高くなるという結果となった。

4.2 壁厚の影響

中腐熱を用いて打込み長さ25mとし、壁厚を

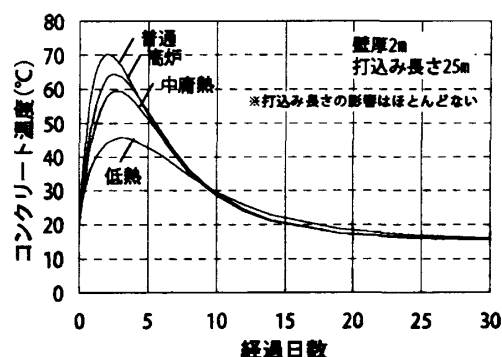


図-8 温度解析結果(壁厚2m)

1, 2, 3mと変化した場合の温度および応力解析結果を図-10に示す。壁厚が大きいほど最高温度は高くなり、その後の温度降下も緩やかとなった。温度応力は、壁厚が小さいほど引張側に早く転じ、引張強度と一致する時期は、壁厚が大きいほど遅れる傾向であった。

4.3 ひび割れ指数に及ぼす影響要因

各解析ケースにおいて(1)式によりひび割れ指数を算定し、その最小値をL/H(打込み長さ/壁高さ)で整理して図-11に示す。これらの結果から例えば、壁厚1mの壁状構造物にお

いて、ひび割れ指数 1.0 を満足する L/H についてセメント種類ごとに求めると、普通では 4、高炉では 6、中庸熱では 9、低熱では 20 という目安を得ることができる。ひび割れ指数は、 L/H を小さくするほど増大するが、壁厚の小さい方が、より顕著にひび割れ指数が増大することが分かる。

の降下に伴い引張側に移行する。打込み高さが低いほど早期に引張側に移行する。一方、表面部の温度応力は、温度の上昇中に引張応力が蓄積され、温度降下に伴い圧縮側に移行する。打込み高さが高いほど大きくなり、2m 以上では引張強度を超え、ひび割れの危険性が高くなることが分かる。

5. 床状構造物の解析結果

5.1 打込み高さの影響

中庸熱を用いて打込み高さを 1, 2, 3m と変化させた場合の床状構造物の部材中心部と表層部の温度解析結果を図-12 に示す。表層部は部材断面上部の表面上の点である。中心部の温度は、打込み高さが高くなるほど高く、また外気温まで下がる時間も長くなる。一方、表層部の温度は、打込み高さが違ってても大きな変化はない。温度応力解析結果を図-13 に示す。中心部の温度応力は、温度上昇中に圧縮応力が蓄積され、温度

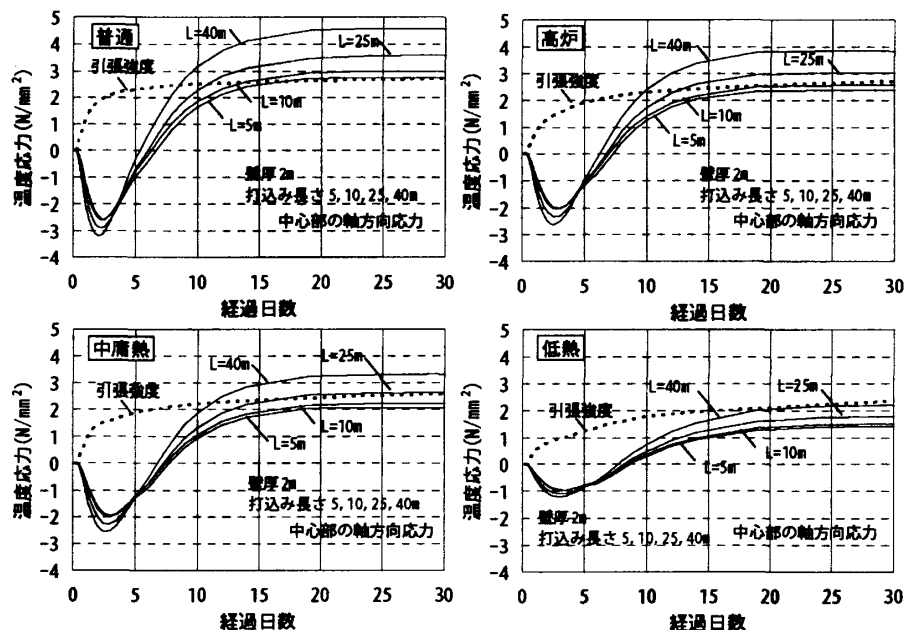


図-9 打込み長さを変化させた場合の応力解析結果 (壁厚 2m)

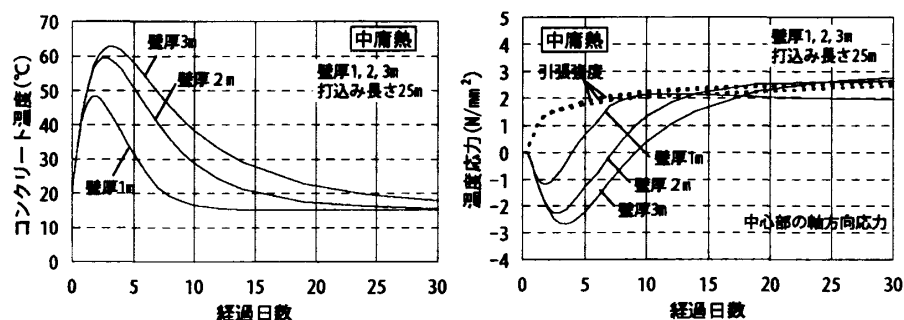


図-10 壁厚を変化させた場合の温度・応力解析結果 (中庸熱, 打込み長さ 25m)

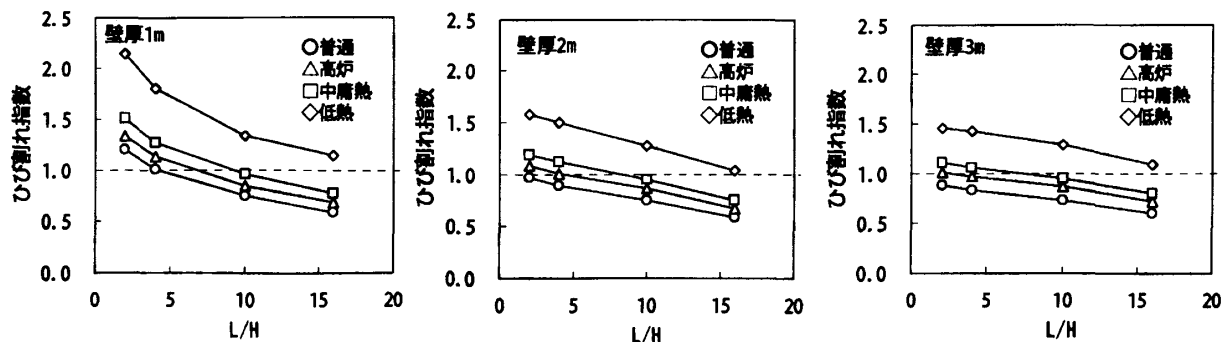


図-11 壁状構造物の中心部のひび割れ指数

5.2 リフト分割の影響

高さ2mの床状構造物を高さ1mずつ2リフトに分割した場合の温度および応力解析結果を図-14に、高さ3mの床状構造物を高さ1mずつ3リフト分割した場合を図-15に示す。それぞれ1回で打込んだ場合に比べて、最高温度は小さくなり、このため部材の内外温度差が低減され、表層部の温度応力も小さくなっている。一方、中心部の温度応力は、上部リフトの温度上昇に伴って引張応力が発生し、1回で打込んだ場合よりも大きな引張応力が発生することが分かる。

は低下し、温度ひび割れ発生の危険性は大きくなる。なお、今回の検討範囲においては、中心部より表層部のひび割れ指数が小さくなり、発生するひび割れは表面ひび割れであると考えられた。ひび割れ指数が1.0となる打込み高さを各セメントごとに求めると、普通および高炉では1.5m、中庸熱では2.0m、低熱では2.5mという目安が得られた。リフト分割した場合のひび

は低下し、温度ひび割れ発生の危険性は大きくなる。なお、今回の検討範囲においては、中心部より表層部のひび割れ指数が小さくなり、発生するひび割れは表面ひび割れであると考えられた。ひび割れ指数が1.0となる打込み高さを各セメントごとに求めると、普通および高炉では1.5m、中庸熱では2.0m、低熱では2.5mという目安が得られた。リフト分割した場合のひび

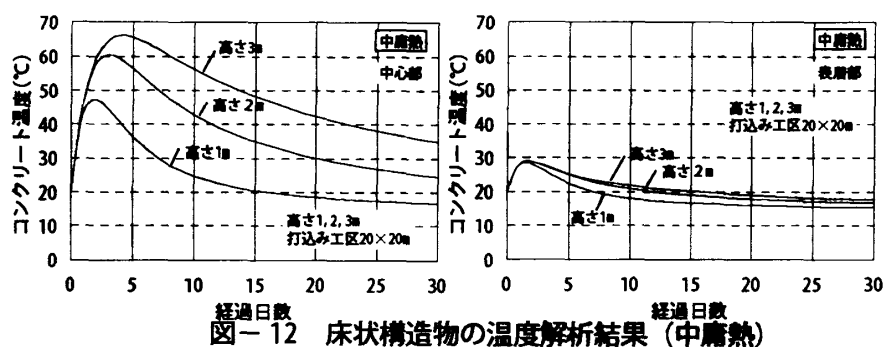


図-12 床状構造物の温度解析結果 (中庸熱)

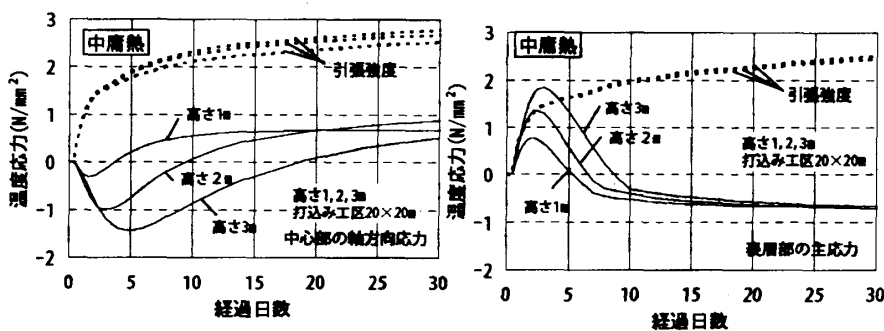


図-13 床状構造物の温度応力解析結果 (中庸熱)

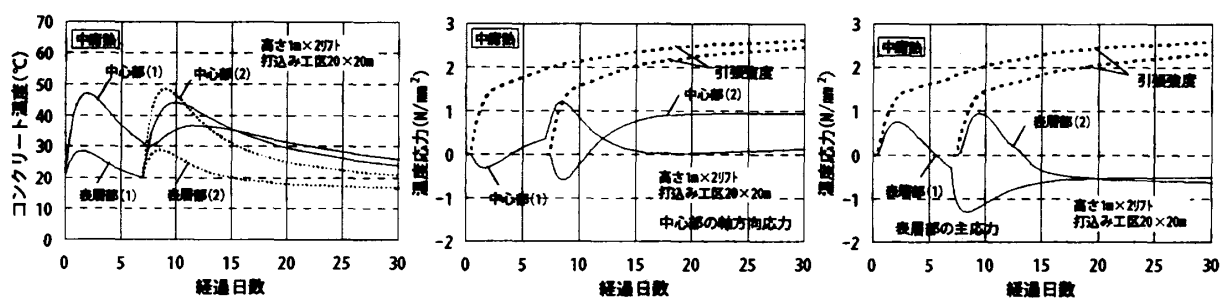


図-14 高さ2mの床状構造物を2リフト分割した場合の温度・応力解析結果 (中庸熱)

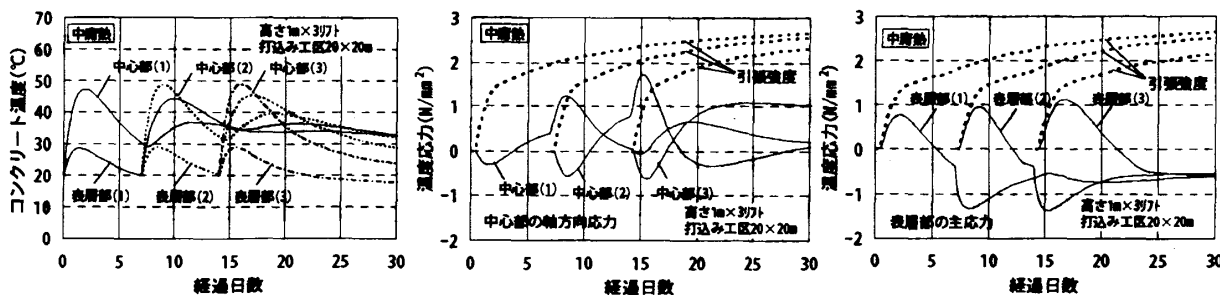


図-15 高さ3mの床状構造物を3リフト分割した場合の温度・応力解析結果 (中庸熱)

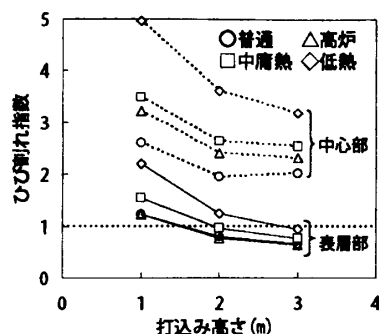


図-16 打込み高さとひび割れ指数の関係

割れ指数を図-17に示す。リフト分割により各リフトにおける表層部のひび割れ指数は増加するが、中心部のひび割れ指数は、上部リフトの温度上昇の影響により低下することが分かる。

6. 既往の報告事例との比較

実際の構造物において温度・応力を測定している報告事例と今回の検討結果について比較を行った。文献³⁾は、1.5mの基礎コンクリート上に打込まれる壁厚1m、高さ1.5m、打込み長さ15mの壁状構造物である。普通セメント（単位セメント量380kg/m³）を用いた結果、材齢5日でひび割れが発生したと報告されている。今回示した図-11によって温度ひび割れ発生の危険性を評価すると、壁厚1m、L/H=10における普通セメントのひび割れ指数は0.75となり、危険性は高いといえる。

文献⁴⁾は、0.4m厚のスラブ上に打込まれる壁厚1.2m、高さ3.1m、打込み長さ20.8mの壁状構造物である。低熱セメント（単位セメント量354kg/m³）を用いた結果、ひび割れの発生はなかったと報告されている。図-11によってL/H=6.7の場合の低熱セメントのひび割れ指数を求めると、壁厚1mで1.6、壁厚2mで1.4であり、温度ひび割れが発生する可能性は低いと評価できる。このように詳細な条件は異なるものの、今回の検討結果を用いて温度ひび割れの危険性を簡易に判断できる見通しが得られた。

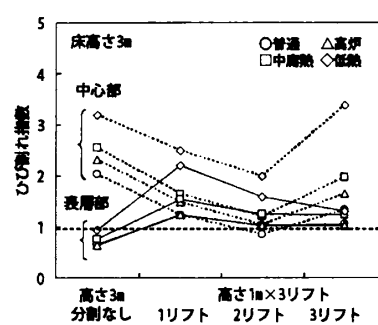
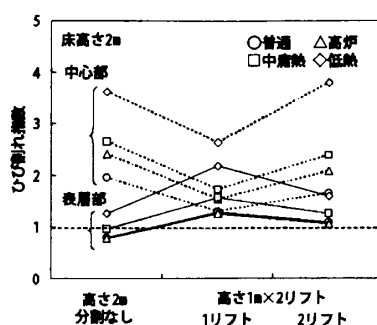


図-17 リフト分割とひび割れ指数の関係

7. まとめ

マスコンクリート部材として代表的な壁状および床状構造物を対象として、セメントの種類、施工条件が温度ひび割れ発生に及ぼす影響を検討した。知見を以下に示す。

- (1) 壁状構造物では、温度上昇の大きいセメントほど、かつ、L/Hが大きいほど、ひび割れ指数は低下し、温度ひび割れが発生しやすくなる。
- (2) 壁厚が小さいほど、L/Hを小さくすることで、より顕著にひび割れ指数を改善することができる。
- (3) 床状構造物では、温度上昇の大きいセメントほど、かつ、打込み高さが高いほど、表層部のひび割れ指数は低下し、表面ひび割れが発生しやすくなる。
- (4) リフト分割により表層部のひび割れ指数は改善するが、上部リフト打設に伴う温度上昇の影響により、下部リフトの中心部のひび割れ指数は低下する傾向である。

参考文献

- 1) 川口 徹：施工条件がマスコンクリートの温度応力に及ぼす影響に関する解析的研究，日本建築学会構造系論文集，No. 535，pp. 21-28，2000
- 2) 太平洋セメント技術資料，2001
- 3) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリート温度応力研究委員会報告書，pp. 137-140，1998
- 4) 日本建築学会：マスコンクリートにおける技術の現状，pp. 176-179，2001