

論文 鉄筋による温度ひび割れ幅の制御について

鈴木唯士*¹ 児嶋保明*¹ 森本博昭*² 小柳 洽*²

要旨: 鉄筋によるひび割れ幅の制御は有効な対策の一つである。土木学会標準示方書には、鉄筋比をパラメータとした壁状構造物について、温度ひび割れ指数とひび割れ幅との関係図が提示されている。しかし、示方書に示された関係図は限られた実測データをもとにして得られたもので、その信頼性については十分検討されていないのが現状である。本研究では、3次元温度ひび割れ解析手法を用いて解析的に壁状構造物における鉄筋量とひび割れ幅の関係を明らかにするとともに、示方書に示されている温度ひび割れ指数とひび割れ幅の関係図との対応についても検討した。
キーワード: 温度ひび割れ指数、ひび割れ幅、ひび割れ制御鉄筋、ひび割れ解析

1 はじめに

コンクリートの温度ひび割れに対しては従来より材料および施工面から各種の制御対策が実施されてきた。これらのうち、鉄筋によるひび割れ幅の制御は有効な対策の一つである。平成3年度版土木学会標準示方書（以下示方書）においても、壁状構造物に対して鉄筋比をパラメータとして、温度ひび割れ指数とひび割れ幅との関係図が提示されている。しかし、示方書に示された関係図は限られた実測データをもとにして得られたもので、その信頼性については十分検討されていないのが現状である。そこで本研究では、3次元温度ひび割れ解析手法を用いて解析的に壁状構造物における鉄筋量とひび割れ幅の関係を明らかにするとともに、示方書に示されている温度ひび割れ指数とひび割れ幅の関係図との対応について検討する。

2 解析概要

2.1 FEMによる3次元温度ひび割れ解析手法 [1]

FEMによる3次元温度ひび割れ解析は次の手順により実施した。

- ①ひび割れ発生予想位置を図-1のようにモデル化する。ひび割れをはさむ2つの節点は、きわめて大きな剛性を持つ結合要素で連結しておく。なお、図中の鉄筋は内部に配置されている。
- ②温度応力の計算を増分的に進めていく。二重節点まわりの応力が引張強度を上まわったとき、結合要素を0近くにまで低下させてひび割れを表現する。
- ③ひび割れ発生後の応力と変形状態を計算する。ひび割れ幅は2つの節点の変位差として計算する。

なお、ひび割れ解析モデルにおける付着モデル [2] の特性値である付着喪失等価領域 l_s は15cmとした。

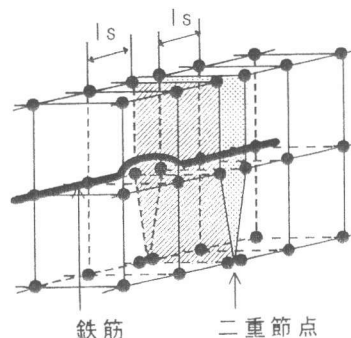


図-1 3次元ひび割れモデル

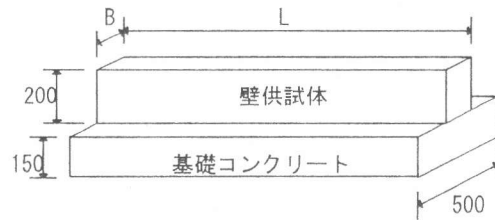
2.2 解析対象構造物および解析ケース

本研究の解析対象構造物は、図-2に示すような幅(B)×高さ(H)×長さ(L)=5.0×1.5×15mのコンクリート基礎上に構築された壁状構造物とした。ひび割れは壁中央部に1本発生するものとした。壁体のコンクリートの配合は、普通ポルトランドセメントを使用し、w/c=50%として単位セメント量を320, 400, 450kg/m³の3レベルに変化させた。また、壁体は、高さ(H)=200cmを一定とし、幅(B)を50, 70, 100cmの3段階に変化させた。また、長さ(L)は15.30mの2段階に変化させた。単位セ

* 1 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

* 2 岐阜大学教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)

メント量 320kg/m^3 では、壁厚を3段階に、長さを2段階に変化させた。また、単位セメント量 $400, 450\text{kg/m}^3$ のケースでは、高さは 200cm 、壁厚は 100cm とそれぞれ一定とし、長さを2段階に変化させた。壁形状と単位セメント量の1つの組み合わせに対して鉄筋比を $0.2, 0.4, 0.6, 0.9\%$ の4通りに変化させ、それぞれのケースについて温度ひび割れ指数とひび割れ幅の関係について検討した。なお、解析ケースは合わせて40ケースである。



C (kg/m^3)	320	400	450	
B (cm)	50	70	100	
L (cm)	1500		3000	
P (%)	0.2	0.4	0.6	0.9

図-2 解析対象構造物

2.3 解析条件

温度解析は外気温は 20°C 一定とし、発熱体は壁体のみとした。また、壁体のコンクリートの打込み温度は 20°C とし、単位セメント量 $320, 400, 450\text{kg/m}^3$ の各ケースに対する断熱温度上昇量は、示方書を参考にして決定した。

ひび割れ解析においては、コンクリートの圧縮強度は式(1)により評価し、引張強度および弾性係数については示方書に示されている式から評価した。なお、水セメント比が同一であっても強度は単位セメント量により変化する。しかし、本研究では近似的に各ケースとも同一の算定式を用いた。

$$\text{圧縮強度 } f'_c(t) = \frac{t}{0.01585 + 0.00295t} \quad t : \text{day} \quad (1)$$

本研究では、弾性係数の低減係数を示方書を参考に材齢3日まで 0.73 そして $3\sim 5$ 日を 0.87 、5日以降は 1.0 とした。引張強度については温度応力の増加速度などの影響を考慮して算定式から求めた値の 80% とした。壁の熱膨張係数には $10\mu/\text{C}$ とした。

2.4 ひび割れ幅と温度ひび割れ指数の関係の求め方

本研究では壁中段中心および中段表面に注目して、これらの位置における最大ひび割れ幅と温度ひび割れ指数との関係を検討した。なお、解析ケースによっては温度ひび割れ指数が大きくなりひび割れが発生しない場合がある。この場合は、引張応力が最大になる材齢を選び出し、その時点で強制的にひび割れを発生させて、ひび割れ幅を算定した。

3 解析結果

3.1 壁体の温度上昇

図-3は単位セメント量 $C = 320\text{kg/m}^3$ の配合で壁厚を $50, 70, 100\text{cm}$ に変化させた場合の壁中段中心の温度履歴を比較したものである。壁厚が大きくなると壁の最高温度および温度上昇量が大きくなり、ピークとなる時間はやや遅くなる傾向を示す。壁中心の最高温度は材齢2日前後で最大となり壁厚 50cm の場合で 40°C 、壁厚 70cm の場合で 45°C 、壁厚 100cm の場合で 52°C であった。壁中心と表面の温度差は、壁厚 50cm の場合 7°C 、壁厚 70cm の場合 11°C 、壁厚 100cm の場合 15°C の温度差が生じており、壁厚が大きくなると温度差も大きくなった。

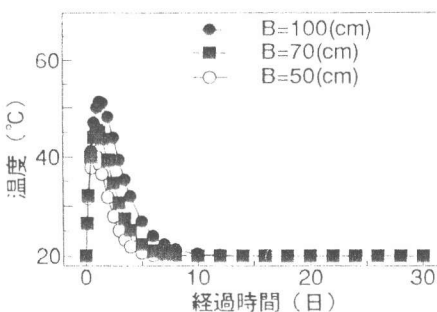


図-3 中段中心の温度履歴
($C=320\text{kg/m}^3$)

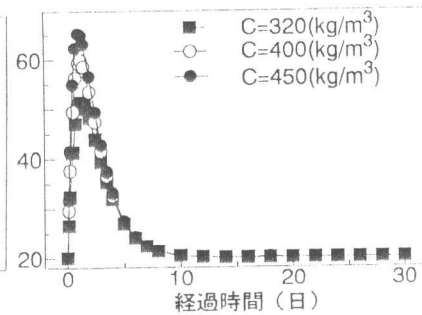


図-4 中段中心の温度履歴
($B=100\text{cm}$)

図-4は壁厚 100cm で単位セメント量を $320, 400, 450\text{kg/m}^3$ に変化させた場合の温度履歴の比較図であ

る。この図から単位セメント量を大きくすると壁の最高温度および温度上昇量も大きくなることがわかる。壁の最高温度は単位セメント量 400kg/m^3 では 60°C 、単位セメント量 450kg/m^3 では 66°C となる。中心と表面の温度差はそれぞれ 20°C および 26°C とかなり大きな温度差が生じた。

3.2 コンクリート応力ならびに温度ひび割れ指数

(1) コンクリート応力

図-5に $C = 320\text{kg/m}^3$ 、 $L = 15\text{m}$ の壁体で壁厚を50, 70, 100cmに変化させた場合の中央断面におけるコンクリート応力の経時変化を示す。壁の温度応力はいずれの解析ケースにおいても壁の温度上昇にともない圧縮応力となり、その後温度降下にもない引張応力に移行する傾向を示している。

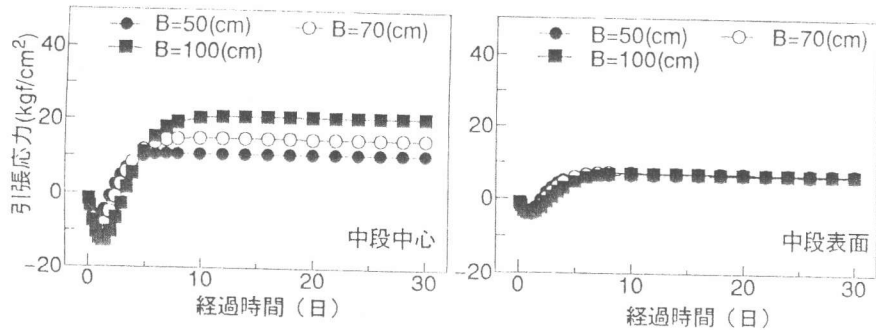


図-5 コンクリート応力の経時変化 ($C=320\text{kg/m}^3$, $L=15\text{m}$)

壁中心の応力は壁厚が大きいほど材齢初期に生ずる圧縮応力およびその後生じる引張応力ともに大きくなる傾向にある。壁厚100cm (壁体A) のコンクリート応力は最大で 21kgf/cm^2 で、壁厚50cm (壁体E) の最大応力 11kgf/cm^2 の2倍程度となる。

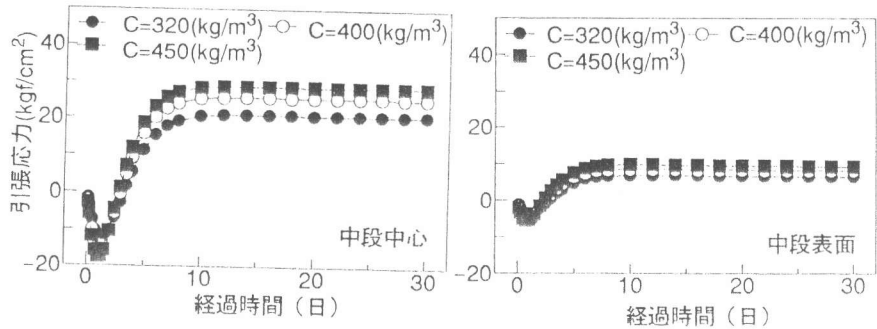


図-6 コンクリート応力の経時変化 ($B=100\text{cm}$, $L=15\text{m}$)

また、表面に生ずる温度応力は内部拘束応力の影響から中心より小さくなることがわかる。また、表面でも壁厚が大きくなるにつれて応力も大きくなる傾向にあるが、中心ほど顕著ではない。

図-6に $B = 100\text{cm}$ 、 $L = 15\text{m}$ で単位セメント量 C を320, 400, 450kg/m^3 に変化させた場合のコンクリート応力の経時変化の比較を示す。図から中心および表面ともに単位セメント量が大きくなると温度応力は大きくなる。中心および表面での引張応力も壁中心と同様に単位セメント量が大きくなると応力も大きくなる。

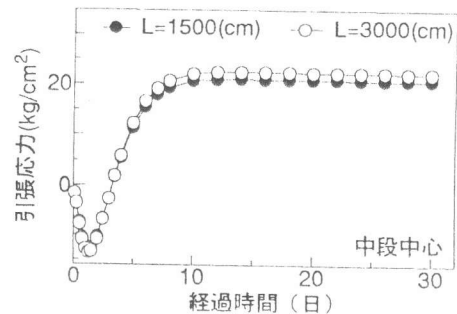


図-7 コンクリート応力の経時変化 ($C=320\text{kg/m}^3$, $B=100\text{cm}$)

図-7は $C = 320\text{kg/m}^3$ 、 $B = 100\text{cm}$ の壁で L を15, 30mに変化させた場合の中段中心でのコンクリート応力である。この図から $L = 30\text{m}$ の場合と $L = 15\text{m}$ の場合の応力の差は $1\sim 2\text{kgf/cm}^2$ 程度にすぎず、本研究の範囲内では壁形状 (L/H) の影響は小さい。

(2) 温度ひび割れ指数

表-1に各解析ケースの壁中段における最大引張応力ならびに温度ひび割れ指数を示す。この表から最もひび割れ指数の小さい壁は $C = 450\text{kg/m}^3$ 、 $B = 100\text{cm}$ 、 $L = 30\text{m}$ の壁体 (壁体J) であり、温度ひび割れ指数が0.60となり、ひび割れの発生する危険性がかなり高いことを示している。これに対して

最もひび割れ指数が小さいのは $C = 320 \text{ kg/m}^3$ 、 $B = 50\text{cm}$ 、 $L = 15\text{m}$ の壁体（壁体E）で、温度ひび割れ指数の値は1.56となりひび割れ発生の危険性は比較的小さい。また、温度ひび割れ指数が1.0付近の壁は本解析モデルでは $C = 320\text{kg/m}^3$ 、 $B = 70\text{cm}$ 、 $L = 30\text{m}$ の壁体（壁体D）であった。

これらの結果から単位セメント量、壁厚、壁長さが大きいほど温度ひび割れ指数が小さくなり、従って温度ひび割れの発生の危険性を小さくするには単位セメント量の低減や壁厚方向に不均一な温度分布が生じないようにすることが有効であることがわかる。

3.3 鉄筋による温度ひび割れ制御 (1) 鉄筋のひび割れ制御効果

表-1 各壁の最大応力と温度ひび割れ指数

壁体	C (kg/m^3)	B (cm)	L (cm)	最大応力 (kgf/cm^2)	温度 ひび割れ指数
A	320	100	1500	21.3	0.87
B			3000	22.6	0.82
C	320	70	1500	15.4	1.15
D			3000	16.3	1.08
E	320	50	1500	10.9	1.56
F			3000	11.7	1.46
G	400	100	1500	26.2	0.71
H			3000	27.7	0.67
I	450	100	1500	29.3	0.64
J			3000	31.9	0.60

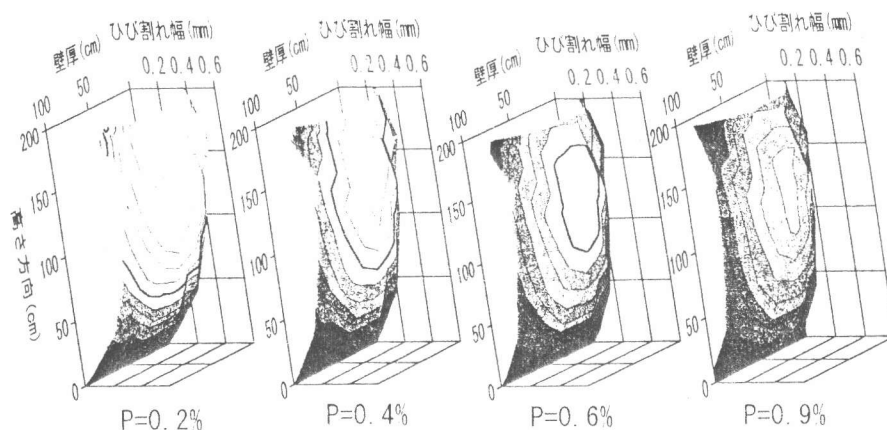


図-8 ひび割れ幅の3次元分布性状（壁体J）

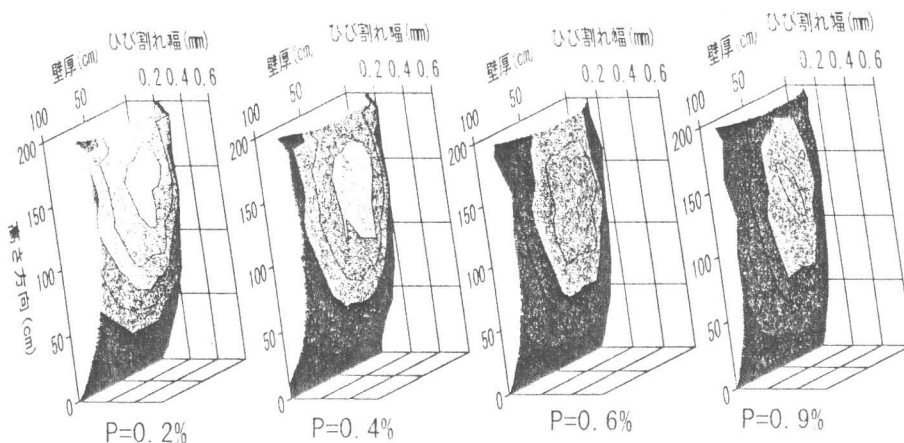


図-9 ひび割れ幅の3次元分布性状（壁体A）

図-8は $C = 450\text{kg/m}^3$ 、 $B = 100\text{cm}$ 、 $L = 30\text{m}$ の壁体（壁体J）において、鉄筋比を0.2%、0.4%、0.6%および0.9%に変化させた場合の材齢14日におけるひび割れ幅の算定値を3次元表示したものである。この壁は、温度ひび割れ指数0.60ときわめてひび割れ発生の危険性が高い壁である。この図より鉄筋比を増加させることにより、ひび割れ幅を全断面において低減できることがわかる。例えば、

壁中段の表面部では鉄筋比0.2%の時のひび割れ幅に対して鉄筋比0.4%の場合75%程度、鉄筋比0.6%の場合60%程度、鉄筋比0.9%の場合45%程度に低減される。同様に壁中心部では鉄筋比0.4%の場合85%程度、鉄筋比0.6%の場合78%程度、鉄筋比0.9%の場合70%程度に低減され、中心部では表面部に比べ、やや鉄筋の効果が低下する。

図-9は $C = 320\text{kg/m}^3$ 、 $B = 100\text{cm}$ 、 $L = 15\text{m}$ の壁体（壁体A）の場合である。この壁の温度ひび割れ指数は0.87である。鉄筋比を増加させることにより、ひび割れ幅は全断面において低減されている。壁中段の表面部では鉄筋比0.2%に対して鉄筋比0.4%の場合75%程度、鉄筋比0.6%の場合60%程度、鉄筋比0.9%の場合45%程度に低減される。壁中心部では鉄筋比0.4%の場合85%程度、鉄筋比0.6%の場合80%程度、鉄筋比0.9%の場合75%程度に低減される。

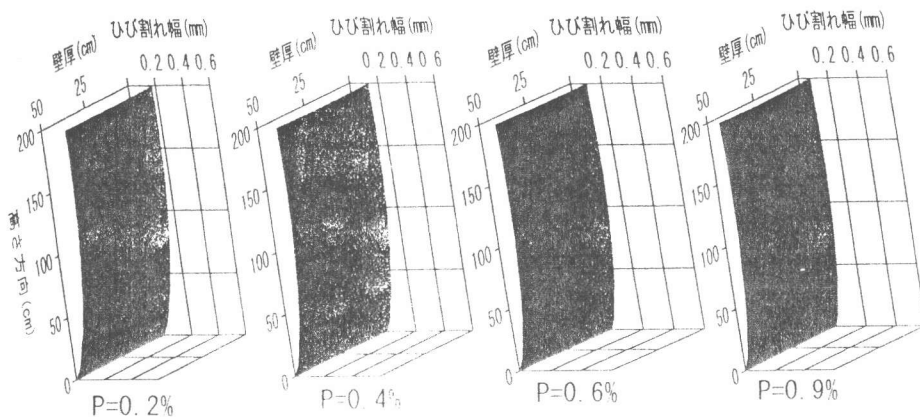


図-10 ひび割れ幅の3次元分布性状（壁体E）

図-10は $C = 320\text{kg/m}^3$ 、 $B = 50\text{cm}$ 、 $L = 15\text{m}$ の壁体（壁体E）の場合である。この壁の温度ひび割れ指数は1.56であり、本モデルの中で最もひび割れ発生危険性が小さい壁である。この壁では壁中段の表面部において鉄筋比0.2%に対して鉄筋比0.4%の場合80%程度、鉄筋比0.6%の場合70%程度、鉄筋比0.9%の場合55%程度に低減される。壁中心部では鉄筋比0.4%の場合83%程度、鉄筋比0.6%の場合72%程度、鉄筋比0.9%の場合60%程度に低減される。

これらの結果から、鉄筋によりひび割れ幅を効果的に制御できることが明かとなった。しかし、ひび割れ指数が十分に大きい壁では、鉄筋によるひび割れの制御効果は小さくなる傾向にある。このように温度ひび割れの制御を検討する場合には、その対策の適用範囲に十分留意する必要がある。

(2) 温度ひび割れ指数とひび割れ幅との関係

図-11は3次元解析で得られた温度ひび割れ指数とひび割れ幅との関係を、鉄筋比ごとにプロットしたものである。図中のひび割れ幅は、ひび割れ断面の中心におけるひび割れ幅である。また同じ図中には示方書に示されている関係式を合わせて示す。この図から、壁中心での最大ひび割れ幅は、いずれの鉄筋比においても、示方書よりも大きな値を示している。また、温度ひび割れ指数とひび割れ幅との関係は直線関係ではなく曲線的な関係となり、温度ひび割れ指数が1.0以下となるとひび割れ幅が急激に増加する。すなわち、温度ひび割れ指数が例えば0.5付近になると鉄筋比が増大してもひび割れ幅は0.3mm以上になっている。また、壁中心のひび割れ幅と温度ひび割れ指数との関係は鉄筋比にかかわらずほぼ同様の傾向となり、鉄筋比が増大すると関係曲線がその分だけ下方にシフトする結果となった。

次に、壁表面における温度ひび割れ指数と最大ひび割れ幅の関係図を図-12に示す。この図から表面における温度ひび割れ指数と最大ひび割れ幅の関係は中心と同様、曲線的な関係となるが曲線の

形状は比較的緩やかである。温度ひび割れ指数が1.0以下の領域では鉄筋によりひび割れ幅が効果的に制御されていることがわかる。しかし、1.0~1.3以上になるとひび割れ幅は大きく変化しなくなるとともに、鉄筋の制御効果も小さくなる。示方書の値と比較すると、温度ひび割れ指数0.7~1.2の領域においては各鉄筋比とも示方書の関係式と良く合致している。しかし、0.5以下になると本研究の結果は示方書にくらべてやや大きなひび割れ幅を与え、特に鉄筋比が大きな領域においてこの傾向が大きくでている。この点に関しては、実際の構造物ではひび割れ指数が小さくなるとひび割れが分散する。その結果、ひび割れ幅は小さくなり、鉄筋比が大きい程この傾向にあることが認められている。一方、本研究の解析ではひび割れが壁中央に1本発生した場合について解析を行っており、ひび割れの分散が考慮されていないことが原因の一つとして考えられる。いずれにしても表面のひび割れ幅については、本研究で得られた温度ひび割れ指数とひび割れ幅との関係は、示方書のそれと比較的良く合致した。

以上のように、鉄筋により温度ひび割れの制御を行う場合、壁表面部においては温度ひび割れ指数が適当な範囲内であれば効果的にひび割れ幅を制御できる。一方、壁中心部においては全般的に鉄筋比を大きくしてもその効果はあまりは期待できない。従って壁全断面にわたりひび割れ幅を制御する場合は温度ひび割れ指数を大きくするような対策も合わせて検討する必要があると考えられる。

4 まとめ

本研究の結果をまとめると次のようになる。

- ①適正量の鉄筋により壁の温度ひび割れ幅を低減することができる。ただし、温度ひび割れ指数が適当な範囲にあることが前提となる。
- ②温度ひび割れ指数と最大ひび割れ幅の間には直線ではなく曲線的な関係が存在する。
- ③温度ひび割れ指数が1.0~1.3以上になると温度ひび割れ指数が大きくなってもひび割れ幅の変化は小さく、また鉄筋のひび割れ幅制御効果も小さくなる。
- ④本研究で得られた表面部における温度ひび割れ指数と最大ひび割れ幅の関係は、温度ひび割れ指数が0.7~1.2領域では各鉄筋比とも示方書に示された関係図と良く合致した。

参考文献

- 1)高井茂信、国枝 稔、森本博昭、小柳 浴：「マスコンクリート構造物の3次元温度ひび割れ解析」、コンクリート工学年次論文集、Vol.17、No.1 pp 1109~114、1995
- 2)JCI;マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書、「温度応力ひび割れ幅算定の提案」pp.46.~67、1992.9

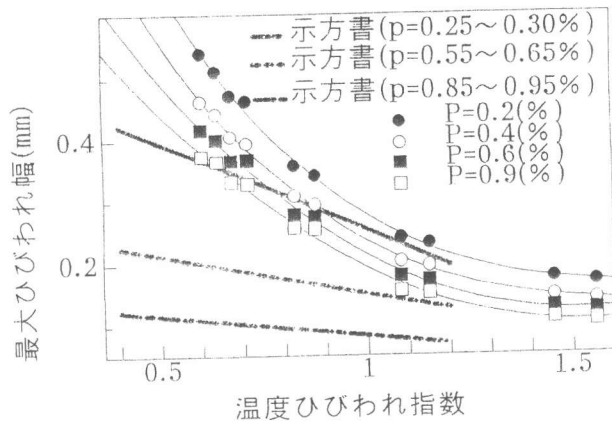


図-11 温度ひび割れ指数と最大ひび割れ幅の関係 (中心)

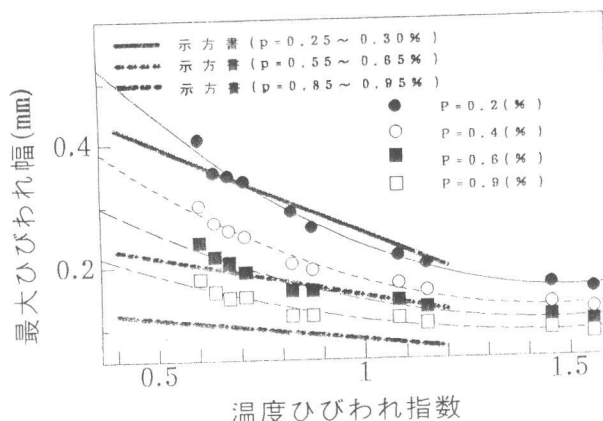


図-12 温度ひび割れ指数と最大ひび割れ幅の関係 (表面)