

論文 温度ひび割れ幅におよぼす鉄筋およびひび割れ本数の影響

児嶋保明^{*1}・谷口 博^{*2}・森本博昭^{*3}・小柳 治^{*3}

要旨: 鉄筋により温度ひび割れ幅を制御するためには適正な鉄筋量の選定が重要となる。その際、ひび割れ幅はひび割れ本数ならびにひび割れ間隔にも影響を受けるため鉄筋量の選定においてはこれらの影響を考慮する必要がある。本研究は壁体に発生する温度ひび割れを対象として、鉄筋のひび割れ幅の制御効果とこれにおよぼす鉄筋量、ひび割れ本数およびひび割れ間隔の影響を3次元FEM解析により明らかにしたものである。

キーワード: 温度ひび割れ幅制御鉄筋、ひび割れ幅、ひび割れ本数、ひび割れ間隔

1. はじめに

マスコンクリートの温度ひび割れ制御法として、従来より設計・施工の段階において各種の対策が提案されてきた。その中で、鉄筋によるひび割れ幅の制御は確実な効果が期待できることから有力な実用的ひび割れ制御対策の一つと考えられる。しかし、ひび割れ幅を効果的に制御するためには適正な鉄筋量の選定が重要となる。ひび割れ幅は鉄筋量に加えて、ひび割れ本数およびひび割れ間隔にも影響すると考えられるので、鉄筋による合理的なひび割れ制御法を確立するためにはひび割れ幅におよぼすこれら要因の影響を明らかにしておく必要がある。

本研究では、3次元FEM温度ひび割れ解析をもとに壁状構造物における最大ひび割れ幅と鉄筋量の関係を明らかにするとともに、これにおよぼすひび割れ本数ならびにひび割れ間隔の影響を検討する。

2. 解析概要

2.1 温度ひび割れ解析手法

3次元FEMによる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。

このモデルは、JCI マスコンクリートの温度応力委員会提案モデル〔1〕を3次元に拡張したものである〔2〕。ひび割れをはさむ相対する2つの節点は、あらかじめ極めて大きな剛性を持つ結合要素で連結しておく。

②温度応力の計算を増分的に進めていく。各時間ステップにおいて、節点まわりのコンクリートの応力の平均値と引張強度を比較する。

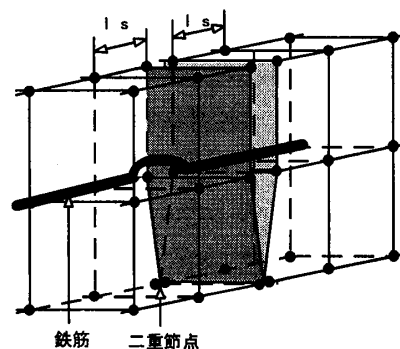


図-1 三次元ひび割れモデル

*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 工学部土木工学科

*3 岐阜大学教授 工学部土木工学科、工博(正会員)

③応力が引張強度を上まわったとき、その要素が含まれる壁断面にひび割れを発生するものとし、断面に含まれる全ての結合要素の剛性を0近くに低下させてひび割れを表現する。その際、安定的に解が得られるよう結合要素の剛性を段階的に低減させる。

④ひび割れ発生にともなう応力再配分計算を行い、ひび割れ発生後の応力と変形状態を計算する。ひび割れ幅はひび割れをはさむ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組み込まれている付着モデルの特性値である付着喪失等価領域 l_s は鉄筋比などにより変化すると考えられるが、本研究では15cm(一定)と仮定した。また、ひび割れが発生しない解析ケースの場合、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。また、ひび割れ設定位置以外の部分では新たなひび割れは発生しないものと仮定した。

2.2 解析対象構造物および解析ケース

本研究で解析対象とした構造物は、図-2に示すような基礎コンクリート上に構築された壁体である。壁厚は1m、壁高さは2m、壁長さは30mである。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するものとし、 w/c を50%、単位セメント量を $450\text{kg}/\text{cm}^3$ とした。解析ケースについては、まずひび割れ間隔の影響を検討するために、ひび割れ間隔を壁高さの1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0倍と変化させた。その際、ひび割れ本数は3本と一定にした。ひび割れの本数と間隔は密接に関連するが、ひび割れ発生による周辺応力の緩和性状はひび割れ発生材齢、鉄筋比および材料、施工に起因するばらつきにより変化し、両者は必ずしも一対一に対応しないと考えられる。そこで、ひび割れ本数の影響を検討するために、ひび割れ間隔を一定としてひび割れ本数を1, 2, 3, 4本と変化させた。それぞれのケースについて鉄筋比を0.2, 0.4, 0.6, 0.9%の4段階に変化させ、鉄筋量と最大ひび割れ幅の関係を検討した。なお、いずれの解析ケースについても壁長さは30m(一定)とし、ひび割れ本数が複数の場合は壁中央寄りに発生させた。解析ケースは合わせて36ケースである。

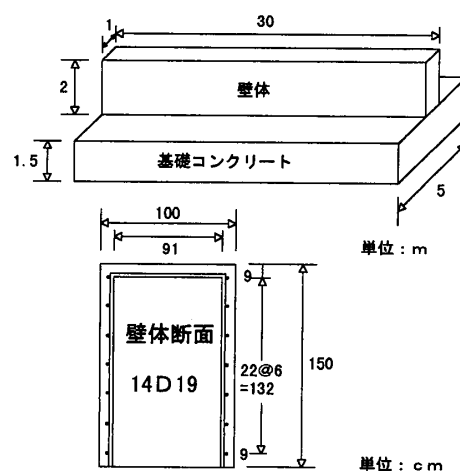


図-2 解析対象構造物

で、ひび割れ本数の影響を検討するために、ひび割れ間隔を一定としてひび割れ本数を1, 2, 3, 4本と変化させた。それぞれのケースについて鉄筋比を0.2, 0.4, 0.6, 0.9%の4段階に変化させ、鉄筋量と最大ひび割れ幅の関係を検討した。なお、いずれの解析ケースについても壁長さは30m(一定)とし、ひび割れ本数が複数の場合は壁中央寄りに発生させた。解析ケースは合わせて36ケースである。

2.3 解析条件

温度解析は2次元FEMにより実施した。外気温を 20°C 一定とし、発熱体は壁体のみとした。壁体コンクリートの打ち込み温度は 20°C とし、断熱温度上昇特性は土木学会コンクリート標準示方書[3](以下、示方書)を参考にして決定した。

ひび割れ解析では、コンクリートの圧縮強度は同じ配合のコンクリートの実測値から得られた式(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(2)、(3)を用いた。

$$\text{圧縮強度 (N/mm}^2\text{)} \quad f'_c(t) = \frac{t}{0.1585 + 0.0295t} \quad t : \text{day} \quad (1)$$

$$\text{引張強度 (N/mm}^2\text{)} \quad f_t(t) = 0.35\sqrt{f'_c(t)} \quad (2)$$

$$\text{弾性係数 (N/mm}^2\text{)} \quad E(t) = \phi(t) \times 4.7 \times 10^3 \sqrt{f'_c(t)} \quad \phi(t) : \text{低減係数} \quad (3)$$

本研究では、弾性係数の低減係数 $\phi(t)$ を示方書を参考に、材齢3日まで0.73、3～5日を0.87、5日以降は1.0とした。コンクリートの熱膨張係数は $10\mu/\text{℃}$ とした。

3. 解析結果

3.1 壁体の温度およびコンクリート応力

図-3に壁体中段の中心と表面の温度履歴を示す。壁体中心の最高温度は材齢2日前後で 65℃ （最大温度上昇量 35℃ ）となり、壁体表面の最高温度 40℃ との温度差は 25℃ となった。壁体中段のコンクリート応力の経時変化を図-4に示す。コンクリート応力は温度上昇にともない圧縮応力となり、その後の温度降下にともない引張応力に移行する傾向を示す。最大引張応力は中段中心で 3.0N/mm^2 でこの時の温度ひび割れ指数は0.60である。

3.2 温度ひび割れ幅

(1) ひび割れ間隔の影響

図-5は鉄筋比を0.2%としてひび割れ間隔を壁高さの1.0、1.5、2.0、2.5および3.0倍に変化させた場合の材齢12日におけるひび割れ幅を3次元的に表示したものである。この図より、ひび割れ間隔が小さくなるとひび割れ幅はひび割れ断面の全領域で減少する傾向にある。この傾向は、ひび割れ間隔が壁高さの2.0倍以下であれば比較的顕著であるが、間隔が2.0倍以上になるとひび割れ幅

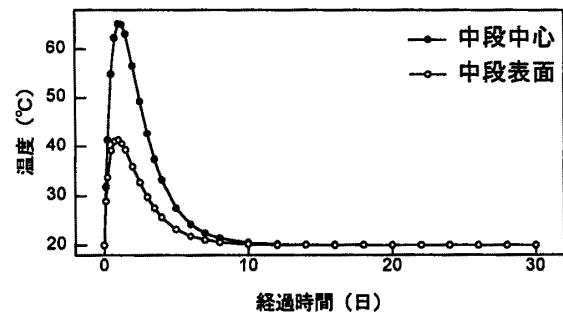


図-3 温度履歴

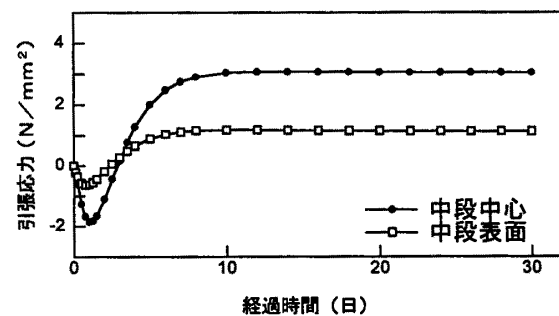


図-4 コンクリート応力の経時変化

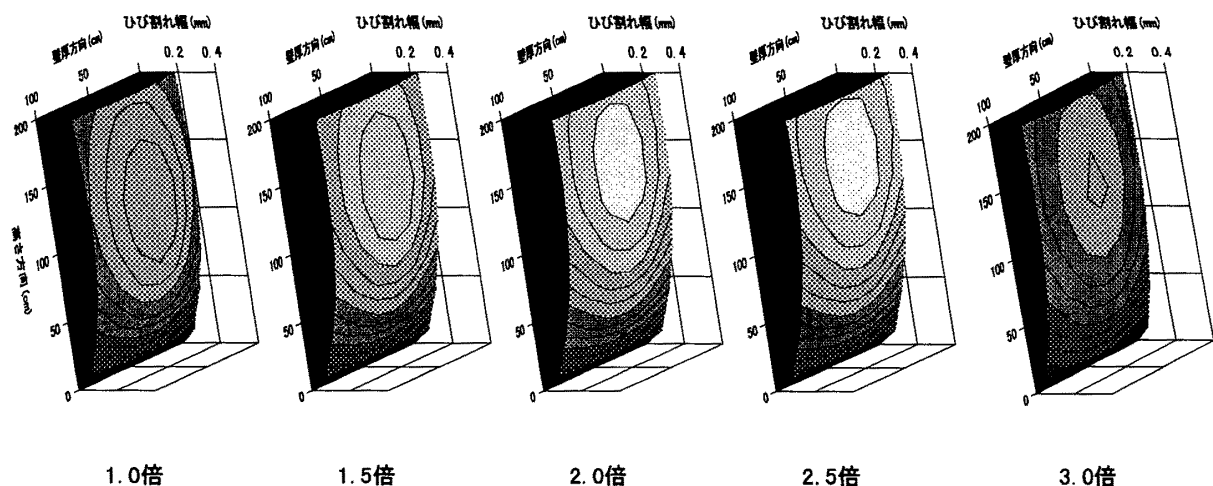


図-5 ひび割れ幅の3次元分布性状（鉄筋比0.2%）

はほとんど変化せず、ひび割れ間隔の影響は小さくなる。ひび割れ間隔が壁高さの2.0倍以上の時の最大ひび割れ幅に対して1.5倍の場合は93%程度、1.0倍の場合は80%程度に小さくなっている。ひび割れ間隔の違いにともなうひび割れ幅分布の形状には大きな変化は認められない。ひび割れ間隔が壁高さの2.0倍以上になるとひび割れ幅が大きく変化しないのは、ひび割れの影響領域（応力解放領域）がひび割れ位置から壁高さに等しい範囲内にあるためと考えられる。

図-6 は鉄筋比を0.9%とした場合のひび割れ幅の3次元表示である。図から、鉄筋比が大きくなっても鉄筋比0.2%の場合と同様、ひび割れ間隔が壁高さの2.0倍以上ではひび割れ間隔がひび割れ幅に与える影響はほとんど見られなくなる。

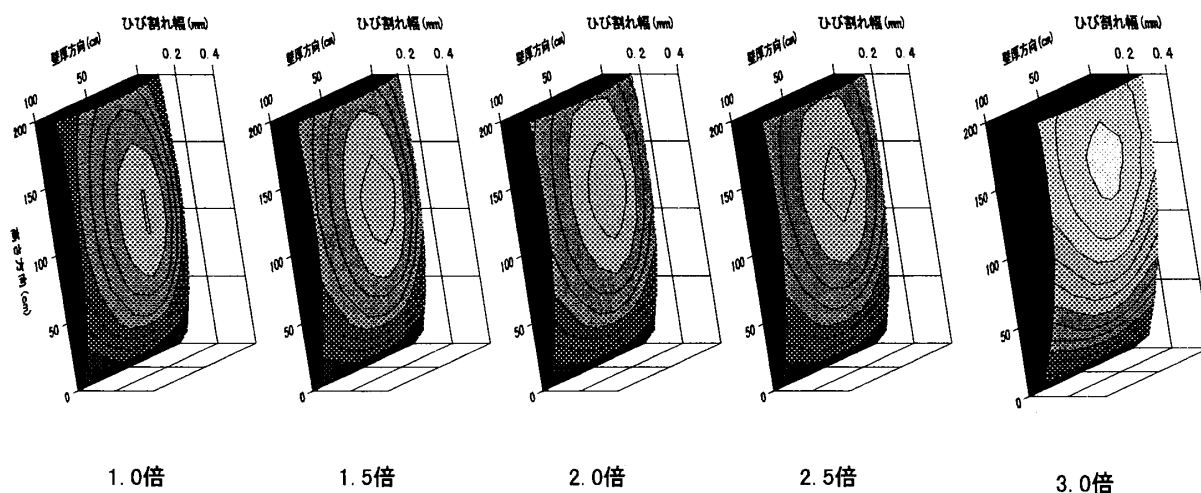


図-6 ひび割れ幅の3次元分布性状（鉄筋比0.9%）

図-7 は、壁体表面における最大ひび割れ幅とひび割れ間隔との関係を示したものである。この図からも、各鉄筋比ともひび割れ間隔が壁高さの2.0倍以上であれば、ひび割れ間隔は最大ひび割れ幅に大きな影響を与えないことがわかる。ひび割れ間隔が2.0倍以下になるとひび割れ幅は小さくなり、ひび割れ間隔が壁高さの2.0倍以上の時の最大ひび割れ幅に対して1.5倍の場合は93%程度、1.0倍の場合は80%程度に減少している。本研究で用いている付着モデルでは付着特性におよぼす鉄筋比の影響を考慮していないため、鉄筋比が変化しても応力解放領域が大きく変化せず、その結果、ひび割れ幅とひび割れ間隔の関係は各鉄筋比ともほぼ同

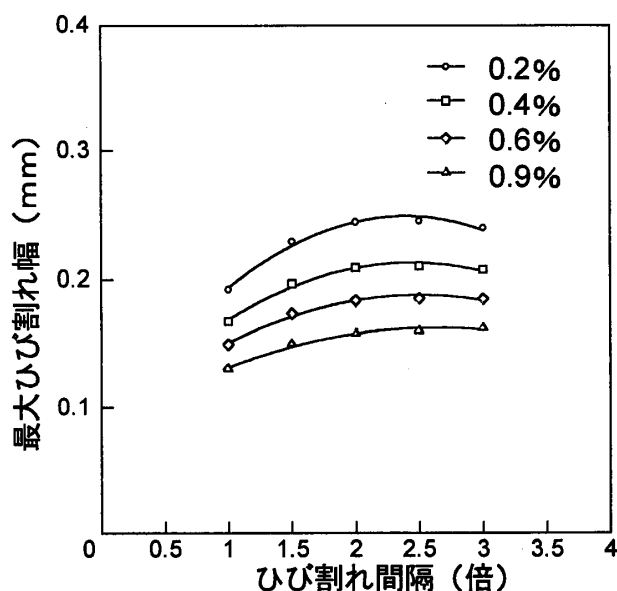


図-7 最大ひび割れ幅とひび割れ間隔の関係

様なものになったものと考えられる。鉄筋比が大きくなると最大ひび割れ幅は減少するが両者の関係はいずれのひび割れ間隔にかかわらずほぼ同様の傾向を示している。

(2) ひび割れ本数の影響

ひび割れ本数の影響を検討するにあたり、ひび割れ間隔が2.0倍以上であればひび割れ幅にあまり影響しないことから、ひび割れ間隔は壁高さの2.0倍とした。

図-8 は鉄筋比を0.2%にしてひび割れ本数を1, 2, 3, 4本に変化させた場合の材齢12日におけるひび割れ幅を3次元的に表示したものである。この図より、ひび割れ断面の全領域でひび割れ本数が増すとひび割れ幅は減少する傾向にある。すなわち、ひび割れ本数が1本の時の最大ひび割れ幅に対して2本の場合85%程度、3本の場合75%程度、4本の場合65%程度に低下している。ひび割れ本数の違いにともなうひび割れ幅分布曲面の形状には大きな変化は認められない。

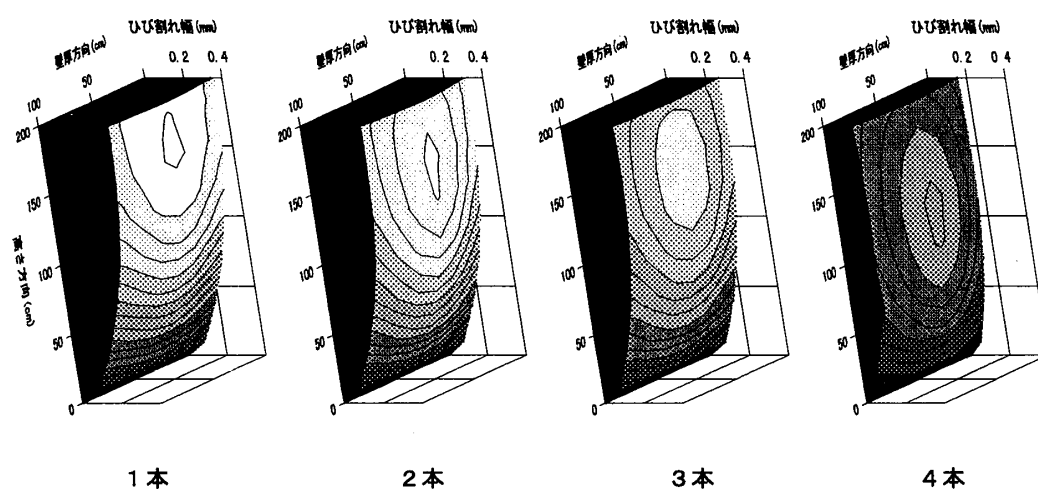


図-8 ひび割れ幅の3次元分布性状(鉄筋比0.2%)

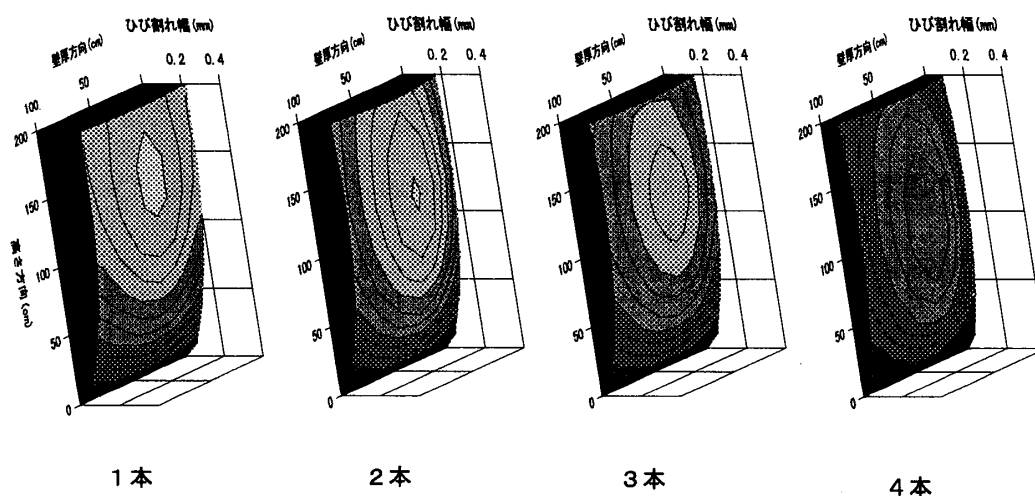


図-9 ひび割れ幅の3次元分布性状(鉄筋比0.9%)

図-9に示す鉄筋比を0.9%とした場合も、ひび割れ断面の全領域でひび割れ本数が増すとひび割れ幅は減少する傾向にある。

図-10に、壁表面の最大ひび割れ幅とひび割れ本数との関係を示す。この図からも、ひび割れ本数が増えると最大ひび割れ幅が減少することがわかる。各鉄筋比ともひび割れ本数が1本の時の最大ひび割れ幅に対して2本の場合は85%程度、3本の場合は75%程度、4本の場合は65%程度に低下している。このようにひび割れ本数が増えるとひび割れ幅が減少するのは、ひび割れ本数が増大するにともない壁体の全体形状が変化し、このため応力が減少するためであると考えられる。

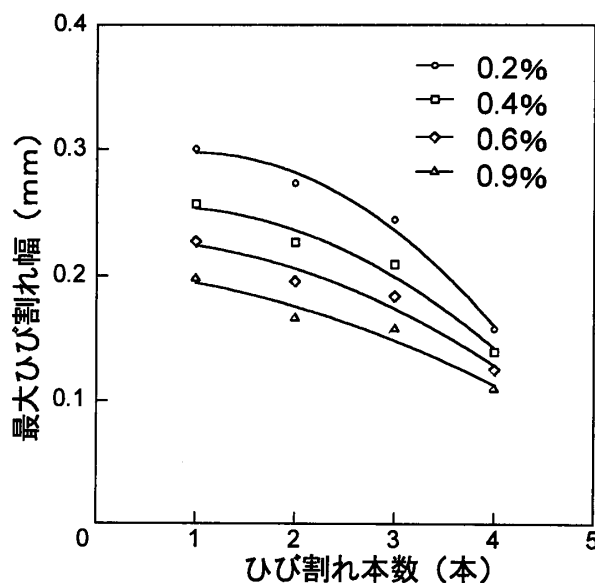


図-10 最大ひび割れ幅とひび割れ本数の関係

以上の検討結果から、温度ひび割れ幅は、鉄筋比に加えてひび割れ間隔

(応力解放領域の重なり) およびひび割れ本数(壁体の全体形状の変化および応力解放領域の重なり)に影響されることが明らかとなった。今後、さらに解析ケースを蓄積していくとともに、ひび割れ発生にともなう壁体の応力変化と応力解放領域の性状ならびにこれらとひび割れ幅の関連さらには鉄筋の付着性状の影響を検討していく必要がある。

4. まとめ

本研究の結果をまとめると次のようになる。

- ①ひび割れ間隔が小さくなるとひび割れ幅はひび割れ断面の全領域で減少する。この傾向は、ひび割れ間隔が壁高さの2.0倍以下であれば比較的顕著であるが、間隔が2.0倍以上になるとひび割れ幅はほとんど変化せず、ひび割れ間隔の影響は小さくなる。
- ②鉄筋比が大きくなると最大ひび割れ幅は減少する。ひび割れ間隔が変化しても両者の関係はほぼ同様の傾向を示す。
- ③ひび割れ本数が増すとひび割れ幅は減少する。ひび割れ本数が増えてもひび割れ幅分布曲面の形状はほとんど変化はしない。
- ④ひび割れ本数およびひび割れ間隔が壁全体の応力分布性状および応力解放領域に影響をおよぼすことによりひび割れ幅が変化するものと考えられる。

参考文献

- [1] 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についての提案」、pp.46~67、1992.9
- [2] 鈴木唯士、児嶋保明、森本博昭、小柳 治: 鉄筋による温度ひび割れ幅の制御について、コンクリート工学年次論文集、Vol.18、No.1、pp.1311~1316、1996.6
- [3] 土木学会: コンクリート標準示方書【平成8年度版】・施工編、pp.190~191、1996