

論文

[1112] セメントモルタルの硬化初期における引張り限界ひずみの経時変化

松藤 泰典^{*1}・小山 智幸^{*2}

1. 序

暑中環境下で打設されるコンクリートは、練り上がり時や運搬中における流動性の低下および打設時におけるコールドジョイントの発生、また硬化後においては長期強度増進の低下や表層部の劣化による耐久性の低下等種々の品質低下を生じる傾向にある。しかし、国内の暑中環境に限定すればこれらの悪影響が他の時期と比較して際立って顕著であるとは言えず、夏季調合の実施や材料の温度管理等により、これらの品質低下を防ぐことは可能である。しかし、表層部の劣化、特に初期材令時におけるひび割れの発生に関しては、その発生要因および性状が定量的に把握されておらず、適切な対策が施されているとは言えないのが現状である。

筆者等は初期ひび割れ発生の原因として、コンクリート内部と表層部の温度差に着目し、外的要因として気温・湿度等の環境要因、内的要因として水セメント比等の調合および材料が、温度差に及ぼす影響に関して実験・検討を行った[1]-[3]。また対策要因として保水養生・給水養生など養生による効果についても検討を行っている[4]。本研究ではこれらの結果をもとに、温度差によって試験体表層部に生じる引張りひずみを算定し、ひび割れ発生の判定やひび割れ対策の効果に関して検討を行うを行うため、硬化初期における線膨張係数および引張り限界ひずみを測定した。本編では初期ひび割れ発生の判定方法および引張り限界ひずみの測定結果について示す。

2. 初期ひび割れ発生の判定方法

図1に初期ひび割れ防止対策の検討方法を示す。気温・湿度等の外的要因および材料・調合等の内的要因、また養生等の対策要因を入力条件として熱伝導解析を行う[5]。その際、表層部からの脱水に関しては、表層部における吸熱として扱う。熱伝導解析により算定された部材内部の温度分布から、各材令における線膨張係数の値を用いて温度ひずみ解析を行う[6]。ここで算定された表層部に生じる引張りひずみと本実験で測定を行う引張り限界ひずみを比較することにより初期ひび割れ発生の危険性について判定を行う。ひび割れ

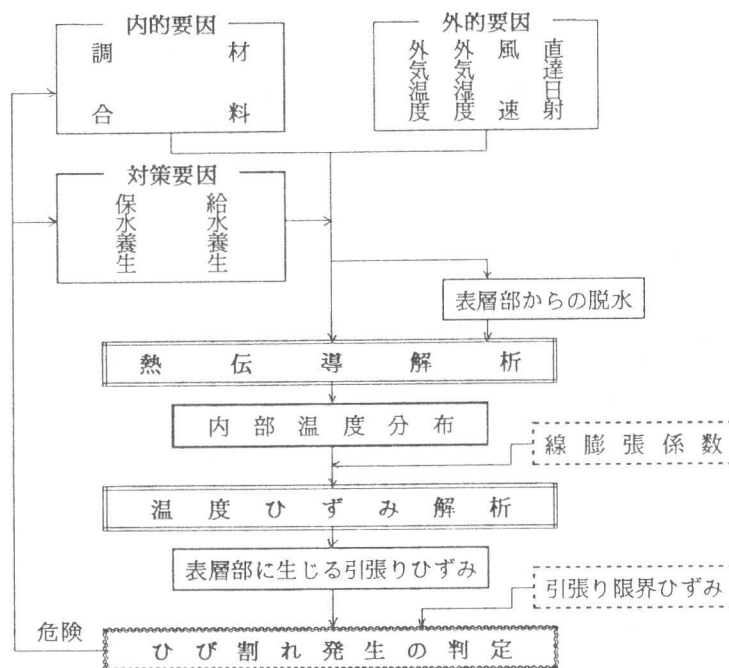


図1 初期ひび割れ防止対策の概念図

* 1 九州大学教授 工学部建築学科, 工博(正会員)

* 2 九州大学講師 工学部建築学科, 工修(正会員)

が生じる危険性があると判断された場合には養生方法または材料・調合等に関して再度検討し、安全と判断されるまで検討を行う。

図2にひび割れ判定の概念図を示す。笠井等の研究[7]によるとコンクリートは打設直後には大きな伸び能力を示すが、水和の進行とともに引張り限界ひずみは低下し、ある材令において極小値を示す。引張り限界ひずみの経時変化よりも上部の領域が初期ひび割れ発生の危険域である。数値解析により算定された引張りひずみの経時変化がひび割れ発生危険域に含まれる領域をひび割れが発生する危険性があるとみなして両者を比較することにより初期ひび割れ発生の判定を行う。

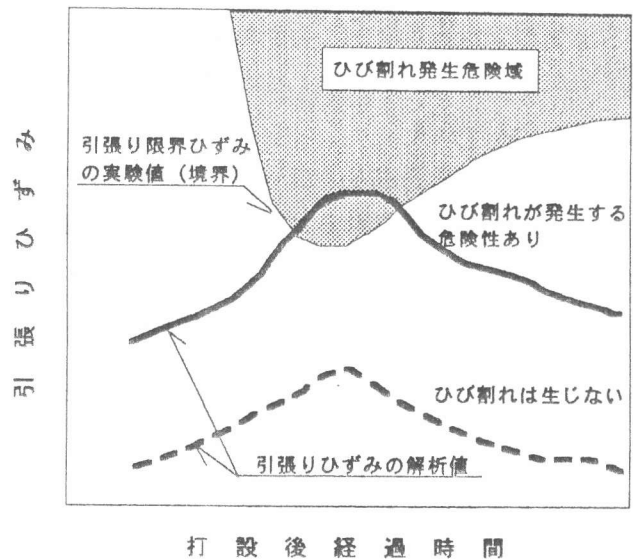


図2 初期ひび割れ判定の概念図

3. 引張り限界ひずみの測定方法

実験では、モルタル試験体の引張り限界ひずみを打設直後から打設後24時間まで測定した。測定間隔は打設後12時間までは1時間間隔、引張り限界ひずみが極小値を示す時期の前後では30分間隔とした。また打設後12時間以降24時間までの間は試験体により14, 18時間においても測定を行った。使用した型枠は、図3に示すように、中央部分を細く両側を太くして、中央部分にひび割れが生じやすい形状とした。中央部は幅3cm、深さ2cm、長さ6cm程度で、両側の太い部分には先端を丸めたボルト(6φ)を長さ方向に3本ずつ配してモルタルと型枠の付着を向上させた。また型枠の両側には上記のボルトおよび接着剤を用いてアルミ角パイプを取り付けた。パイプの一方にはナットを固定しており、試験時に載荷フレームを図の様に取り付けて、ボルトにより試験体を型枠ごと両側から引張って荷重を載荷した。

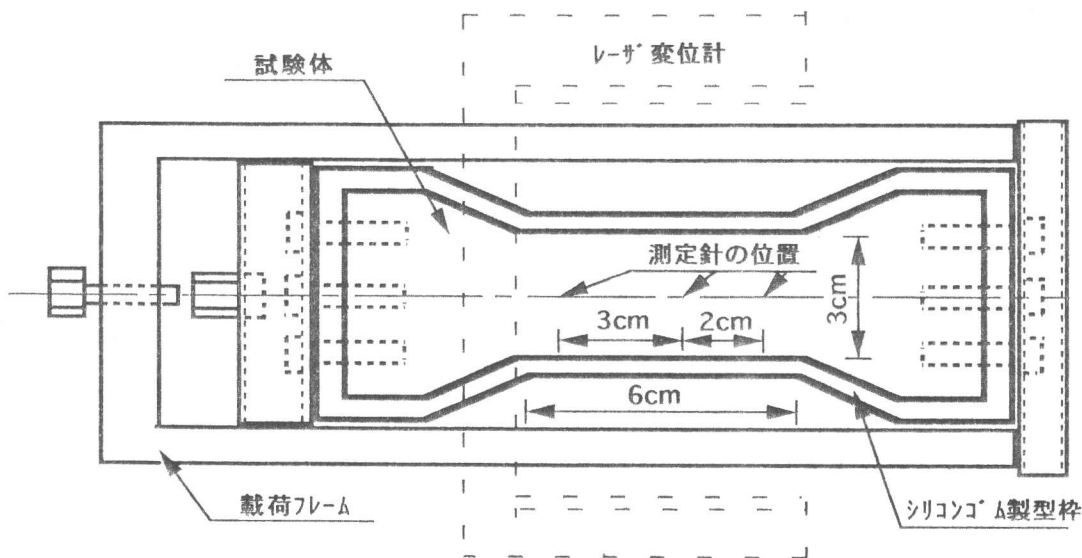


図3 引張り限界ひずみ測定装置

型枠は試験体の硬化に伴う収縮を拘束しないように軟質のシリコンゴムで作成し、また載荷時までおよび載荷中における型枠と測定台の間の滑りをよくするために粘度の低いオイルを塗り、型枠が自由に変形できるようにした。また表面からの脱水による乾燥収縮を出来るだけ低減するため、打設直後から試験材令まで試験体表面をラッピングした。

測定は、図3に示した測定針の間隔の載荷による変動を非接触型レーザ変位計を用いて測定し、載荷前の測定針間隔で除してひずみを算定した。測定針は3本使用し、片方の測定間隔にひび割れが生じた瞬間他方のひずみが解放されることを利用してひび割れ発生時期を判断した。

なお試験体数は各材令について3体としたが、材令によっては試験体数を適宜増やしている。

実験項目を表1に示す。外的要因として外気温度、内的要因として調合・材料が、引張り限界ひずみの経時変化に及ぼす影響に関して検討を行っている。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材には海砂を用い、試験体6ではセメント重量の10%をシリカフェームで置換して高性能AE減水剤を使用した。外気温度は温度の影響を検討する試験体1, 2, 3ではそれぞれ15, 25, 35℃の3種類とし、他の試験体では35℃一定とした。また外気湿度は試験体の乾燥による収縮を防ぐため、80%R.h.一定とした。なお打設温度は外気温度と同じとした。

表1 実験項目

試験体	調 合 (kg/m ³)					養生温度 (°C)	検 討 項 目
	W C+SF (%)	セメント C	シリカフェーム SF	水 W	細骨材 S		
1	50	605	—	302	1392	35	標準試験体
25						養生温度の影響	
15							
4	40	622	—	311	1430	35	水セメント比の影響
5	50	931	—	456	838		単位セメント・水量
6	25	932	104	259	1005		シリカフェームの影響
7	25	1036	—	259	1005		試験体6との比較用

*試験体6および7は高性能AE減水剤をセメント重量の1.8%添加

4. 実験結果および考察

a) 外気温度の影響

図4に引張り限界ひずみの経時変化に及ぼす外気温度の影響を示す。打設直後の試験体は、粘性体としての性質が卓越しており伸び能力が大きいため、引張り限界ひずみは極めて大きな値となる。その後水和の進行とともに急速に伸び能力が失われるため引張り限界ひずみは急激に低下し、水和反応速度の極大値に相当する打設後5~12時間頃に極小値を示す。この様に引張り限界ひずみの経時変化について笠井等の初期引張り強度に関する研究と同様

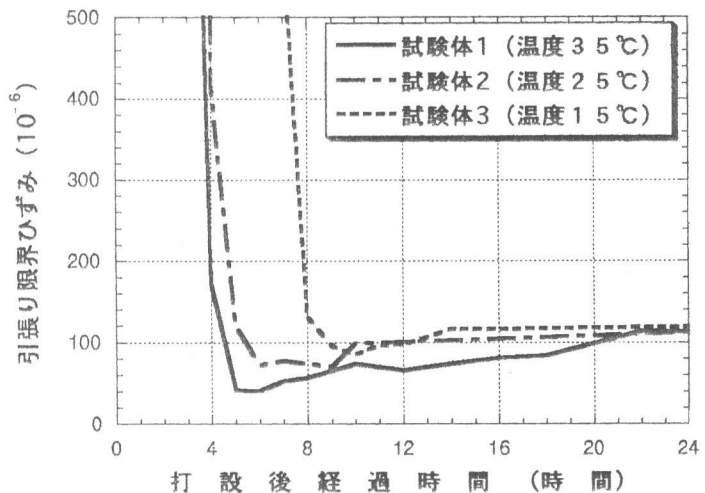


図4 引張り限界ひずみ (外気温度の影響)

の結果が得られた。また、引張り限界ひずみが極小値を示す時期は、外気温度が高いほど早く、極小値は温度が高いほど小さくなる傾向が見られた。このことは外気温度が高いほど初期の脆性が高くなることを示しており、暑中環境下で初期ひび割れが生じやすいという定性的傾向が確認された。引張り限界ひずみは極小値を示した後徐々に増加し、本実験の場合材令1日で 100×10^{-6} 程度の値に回復した。

b) 調合の影響

図5に水セメント比が50%の試験体1と40%の試験体4の引張り限界ひずみの経時変化を示す。水セメント比の小さい試験体4は水和の進行が早いため試験体1よりも早い時期に引張り限界ひずみが低下するが、極小値に関してはほとんど差が認められなかった。

図6に単位セメント量が引張り限界ひずみに及ぼす影響を示す。同図において、試験体5は水セメント比が試験体1と同じで単位セメント量は約1.5倍であるが、引張り限界ひずみの極小値は試験体1よりも若干大きな値を示している。

(c) シリカフェームの影響

図7にシリカフェームを使用した試験体6の引張り限界ひずみの経時変化を示す。試験体6は、水セメント比等他の条件が試験体7と同じで、セメント量の10%をシリカフェームで置換した試験体であるが、引張り限界ひずみの極小値は試験体7よりも若干小さい値を示した。

以上引張り限界ひずみの経時変化に及ぼす外気温度や調合の影響に関して検討を行ったが、今回測定を行った範囲では調合による影響は小さく、外気温度の影響が顕著であった。

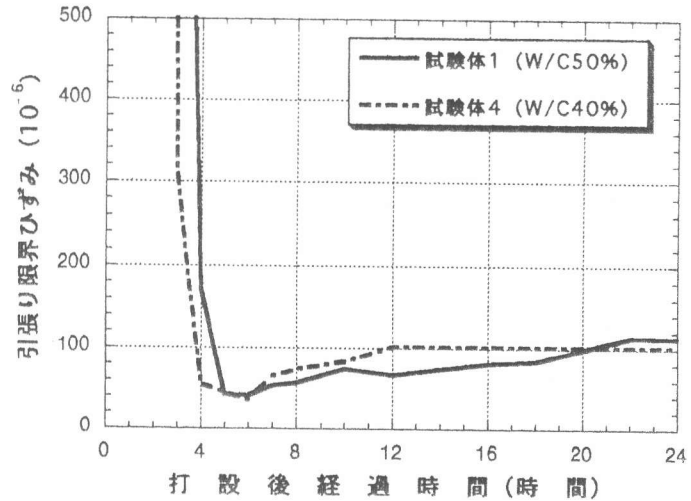


図5 引張り限界ひずみ（水セメント比の影響）

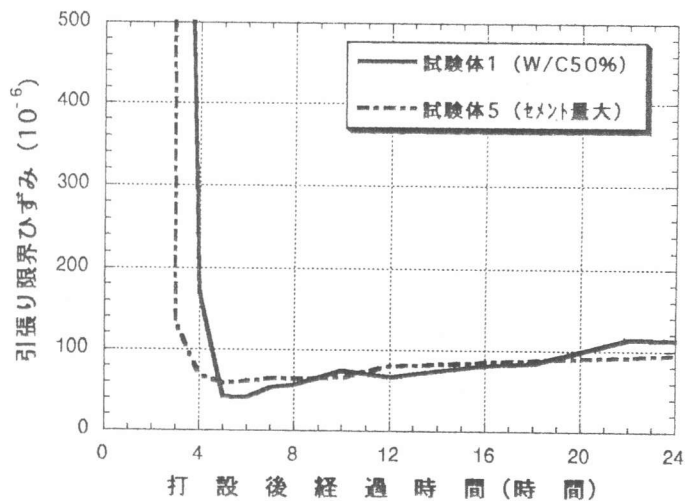


図6 引張り限界ひずみ（セメント量の影響）

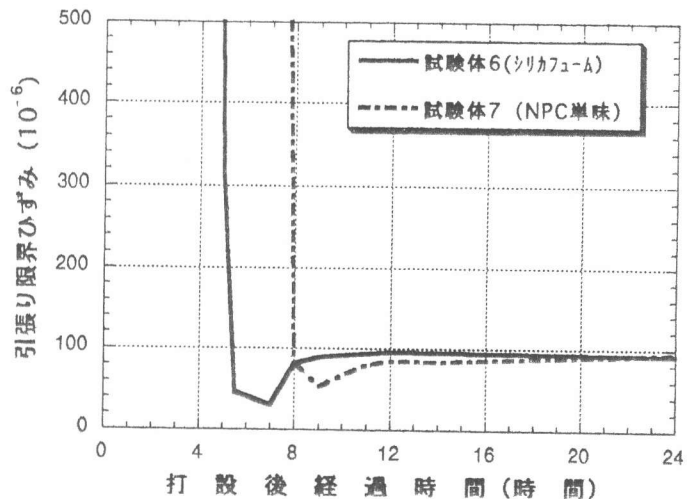


図7 引張り限界ひずみ（シリカフェームの影響）

5. 初期ひび割れ判定

図8に引張りひずみの解析値およびひび割れ発生域との比較を外気温度が25℃の場合について示す。同図に示す引張りひずみの値は、引張り限界ひずみを測定した試験体2と同調合の試験体について温度分布を測定した実験[1]で測定された実測値を用いて温度ひずみ解析で算定した値を示している。打設温度が30℃で外気温度よりも高いため、打設直後の引張りひずみが大きな値を示している。その後水和反応速度がピークとなる打設後10時間頃に極大値を示し、ほぼ同時期に引張り限界ひずみも極小値となる。両者を比較すると表層部に生じる引張りひずみはひび割れ発生危険域よりもかなり小さく、外気温度が25℃の場合には初期ひび割れは生じないと判定できる。

外気温度が35℃の場合について図9に示す。外気温度35℃の場合、表層部の引張りひずみは打設後5時間頃に極大値約 34×10^{-6} を示すが、この時期の引張り限界ひずみは約 40×10^{-6} であり、両者はかなり近い値となった。従って25℃の場合と比較すると外気温度が35℃の場合、即ち暑中環境下においては初期ひび割れが生じやすい状況になるといえる。また、両者が接近する時期は水和反応速度が極大値に達する打設後5～6時間前後であり、この時期にひび割れが生じやすいことが示された。

図10に外気温度が35℃で外気相対湿度を50,70,90%とした場合のひび割れ発生域と引張りひずみの解析値を示す。同図によれば湿度50%の試験体においては打設後5～7時間前後で引張りひずみの解析値はひび割れ発生危険域に入っており、何らかの対策が必要であると判断できる。実際にひび割れ観察

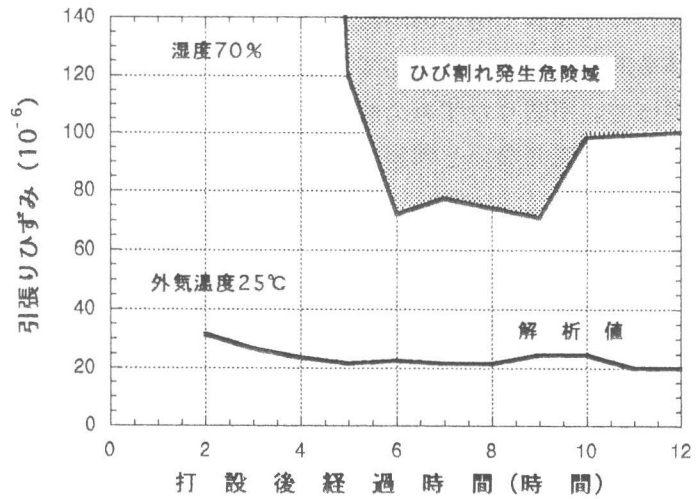


図8 初期ひび割れの判定 (外気温度25℃)

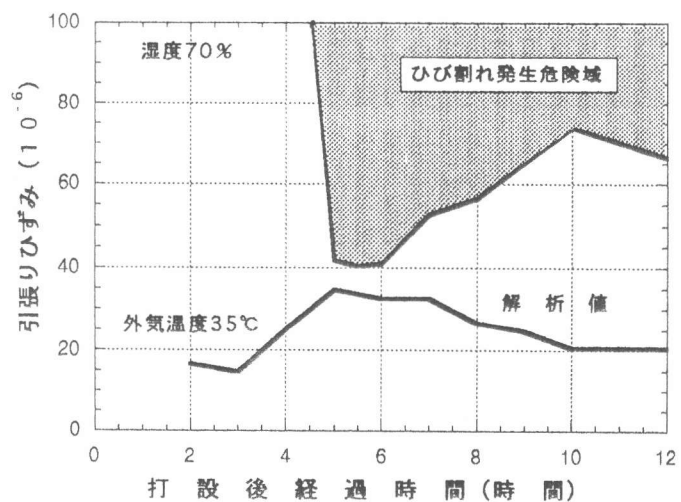


図9 初期ひび割れの判定 (外気温度35℃)

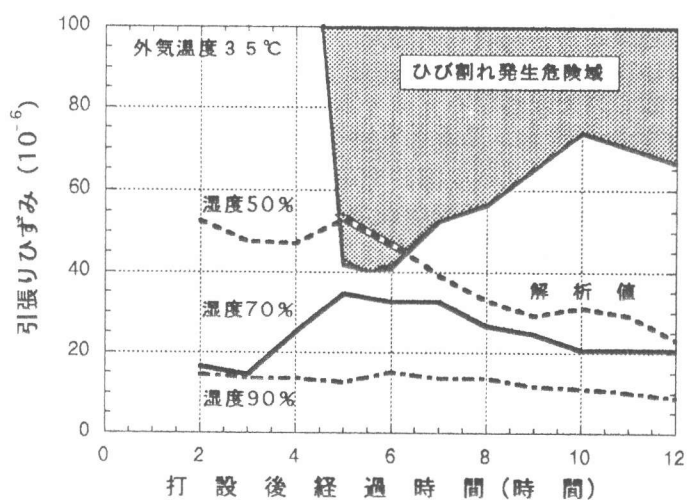


図10 初期ひび割れの判定 (湿度の影響)

を行った実験でもこの時期にひび割れが生じた試験体が確認されたが、ひび割れの生じない試験体もあった。これに対して引張りひずみが危険域を下回る場合にはひび割れは観察されなかった。従って、引張りひずみの解析値がここで定義したひび割れ危険域よりも、下側にあれば初期ひび割れは生じないと判定できる。

6. 結論

本研究では打設後24時間程度までの硬化初期におけるモルタル試験体の引張り限界ひずみを測定し、これまでの研究結果をもとに初期ひび割れ発生の判定を行った。得られた結果を以下に示す。

①硬化初期における試験体の引張り限界ひずみは打設直後は大きく、材令とともに急減し、水和反応速度が極大値になる時期に極小となる。この初期脆性を示す時期は温度が高いほど早く、極小値も小さくなる傾向がみられた。従って暑中環境下においては他の時期よりも初期ひび割れが生じやすいことが確認された。

②引張り限界ひずみの極小値は調合等の影響を受けて変化するが、今回検討を行った調合の範囲では、外気温度の場合と比較するとその影響は小さい。

③今回測定された引張り限界ひずみを用いて外気温度や外気湿度を変化させた際の初期ひび割れ判定を行った。その結果外気温度が高い場合にひび割れが生じやすくなる傾向がみられた。また外気湿度が低い試験体では試験体に生じる引張りひずみが引張り限界ひずみよりも大きくなる時期が生じた。ひび割れ観察実験においても初期ひび割れが生じたものがあり、本方法の妥当性が確認された。

<謝辞> 本研究は文部省科研費（奨励研究A，課題番号05750546）の助成を受けた。また本研究の遂行にあたり文部技官津賀山健次氏，また実験・解析において本学大学院生山野義則氏，西誠二氏，および卒論生木村幸藏君の多大な協力を得た。末尾ながら謝意を表す。

<参考文献>

- [1]松藤泰典他：「An Experimental Study on Temperature Distribution Inside Mortar Specimens Placed in High Temperature Ambience」日本建築学会構造系論文報告集 第422号，1991年4月，pp.1-pp.13
- [2]松藤泰典他：「暑中環境下で打設されるモルタル試験体の温度分布（その2）外気湿度の影響」日本建築学会九州支部研究報告 第32号，1991年3月，pp.93-pp.96
- [3]松藤泰典他：「暑中環境下で打設されるモルタル試験体の温度分布 - 風速の影響 -」日本建築学会九州支部研究報告 第33号，1992年3月，pp.25-pp.28
- [4]松藤泰典他：「暑中環境下で打設されるモルタル試験体の温度分布 - 直達日射の影響および養生方法の検討 -」日本建築学会九州支部研究報告 第34号，1993年3月，pp.53-pp.56
- [5]眞方山美穂：「暑中環境下で製造・施工されるコンクリートの温度性状に関する研究」九州大学修士論文 1991.3
- [6]松藤泰典他：「暑中環境下で打設されるモルタル試験体の温度ひび割れに関する数値解析」日本建築学会大会学術講演梗概集 1993年9月，pp.903-pp.904
- [7]笠井芳夫他：「コンクリートの初期引張り強度に関する研究」セメント技術年報 22，昭和43年，PP.320-PP.325