

大型供試体を用いたコンクリートの乾燥収縮に関する基礎的研究

稲津 貴和子^{*1} 田村 隆弘^{*2}

A Fundamental Study on Drying Shrinkage of Concrete using Large Specimens

Kiwako INADU^{*1} and Takahiro TAMURA^{*2}

Abstract

In many reinforced concrete structures, concrete member are cracked by reason of the dry-shrinkage and the temperature stress. It is known that the reinforcing bar (rebar) disperse such a crack, as the result it control the crack width. However, it isn't clear how much the rebar influence the crack width. In experimental study, the uni-axial restraint test of four type specimens in large size, that is restraint and non-restraint and whether the rebar arrange or not, are conducted under dryness for two months. From the test results, the rebar dispersed the crack of concrete, and the effect of rebar to control the crack width was confirmed.

Key Words : Drying shrinkage, Restrained member, Large specimen, Rebar, Crack width, Disperse the crack

1. 序 論

1.1 研究の背景

従来、コンクリート構造物は一般的に耐久性に優れ、半永久的にメンテナンスフリーであると考えられていた。しかし近年、早期劣化現象が指摘され始めるようになり、コンクリート構造物に発生するひび割れが問題となっている。ひび割れに関する研究は多くの研究者によってなされているが、発生原因の複雑さから、発生確率やひび割れ幅を正確に予測出来るまでには至っていない^{1),2),3),4)}。コンクリート構造物にひび割れが発生すると、美観や機能性を損なうだけでなく耐久性にも影響を与える。ひび割れの発生を完全に防ぐことは技術的には可能であるが、実構造物で考えるとコストの面などから難しいといえる。そのため、ひび割れからの劣化が問題とならないような場合にはそれを許

容するという考え方があり、実際に建設現場では竣工時に発生しているひび割れが有害か無害かという観点で評価が行われている。すなわち、コンクリート構造物に発生するひび割れは発生することよりも、その幅が問題とされる。

1.2 既往の研究

このような背景から山口県では、ひび割れの原因究明と発注や設計段階においてもひび割れの予測を目的として、ひび割れの発生状況、施工状況、ひび割れ幅について整理したデータを蓄積している⁵⁾。そこでデータの分析の結果から、例えば、実構造物では鉄筋比が高い場合に最大ひび割れ幅が小さくなるといった傾向が確認された⁶⁾。

コンクリート構造物は拘束を受けなければ（すなわち、自由に膨張・収縮が可能な状態であれば）ひび割れは発生しないが、実際にはコンクリート部材は底面

*1 環境建設工学専攻

*2 土木建築工学科

または、底面と両端が固定されていることが多く、収縮によるひび割れが発生しやすい状態にある。特に乾燥収縮によるひび割れは、ほとんどのコンクリート部材で発生する可能性がある。しかし、その発生メカニズムはセメントや骨材の質、量、部材の大きさ、環境条件などの多くの要因が複雑に関連していることから未だに解明されていない。建設現場ではこのような予測の難しいひび割れを最小限に留めることが要求されており、ひび割れ幅やひび割れ間隔を正確に求める算定式の確立が望まれている。

そこで本研究では、そうした建設現場のニーズに応えることを目的として、鉄筋によるひび割れ幅の抑制効果に着目し、鉄筋と乾燥収縮ひび割れの関係について実験的に確認した。コンクリートの乾燥収縮に関する研究は多く行われており、試験方法についても既にJISに規定されたものがあるが、それらは1m程度の供試体を用いたものである⁷⁾。本稿では、より実構造物に近い状態を表現するため、従来の乾燥収縮試験とは異なる大型(5m)の供試体による乾燥収縮試験を行い、この結果からひび割れ幅と鉄筋比の関係について考察した。

2 実験概要

2.1 実験条件

両端を拘束した拘束収縮供試体を2体、両端を拘束しない自由収縮供試体を2体準備した。鉄筋による収縮ひび割れの分散効果を確認するため、拘束収縮供試体、自由収縮供試体ともに1体を無筋、もう1体は補強筋としてD16を2本埋設し、計4パターンとした。なお、供試体条件を表1に示す。

2.2 使用材料及び配合

本実験では乾燥収縮によるひび割れを明瞭に表現するために、コンクリートよりも収縮量の大きいモルタルを使用した。配合及び強度を表2に示す。

2.3 供試体の形状・寸法

2.3.1 拘束収縮供試体

拘束収縮供試体は全長5,160mm(拘束鋼材を含む)、高さ200mm、幅400mmで、補強筋に異形鉄筋D16(SD295)を用いたものと無筋の2体である。拘束区間でのモルタル供試体の拘束鋼材への固定は、鋼棒(M16ネジ鉄筋)を両端に2本ずつ入れて緊結し、さらに軸方向にアンカーボルト(M16)を両端に4本ずつ、鋼棒と交差させるように配置し、固定度を高めた(図1(1)参照)。試験区間は断面200mm×200mm、長さ4,000mmである(図1(2)参照)。試験区間の型枠底部には、供試体と鋼材の付着を防ぎ、また、変形時の摩擦を低減するために0.1mmのテフロンシートを2重に敷いた。

2.3.2 自由収縮供試体

自由収縮供試体は、補強筋に異形鉄筋D16(SD295)を用いたものと無筋の2体である。鉄筋を用いた供試体は拘束収縮供試体の試験区間と同様で、全長4,000mm、高さ200mm、幅200mm、無筋の供試体は部材長さによらず、ひずみ量は一定と仮定し、全長は試験区間の1/2である2,000mmとし、高さ200mm、幅200mmとした(図1(3)参照)。2体の供試体とも拘束収縮供試体と同様、型枠底部にテフロンシートを2重に敷いて下面での拘束を回避した。

2.4 実験方法

各種供試体は打設後3日で脱枠し、扇風機による送風により、(JISでは4面乾燥とされているが⁷⁾)3面乾燥を開始した。設備の都合上、温度、湿度の管理は

表1 供試体条件

| | 供試体番号 | 鉄筋 | 鉄筋本数 | 鉄筋比(%) | 試験区間(mm) |
|---------|-----------|-----|------|--------|----------|
| 拘束収縮供試体 | 4mRD00K | 無筋 | — | — | 4,000 |
| | 4mRD16-2K | D16 | 2 | 1.0 | |
| 自由収縮供試体 | 2mRD00F | 無筋 | — | — | 2,000 |
| | 4mRD16-2F | D16 | 2 | 1.0 | 4,000 |

表2 モルタルの配合及び強度

| W/C(%) | 単位重量(kg/m ³) | | | 圧縮強度(N/mm ²) | 引張割裂強度(N/mm ²) | ヤング係数(KN/mm ²) |
|--------|--------------------------|---------|------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | 水(W) | セメント(C) | 細骨材 | | | |
| 43 | 285 | 663 | 1037 | 32.79 | 3.40 | 26.43 |

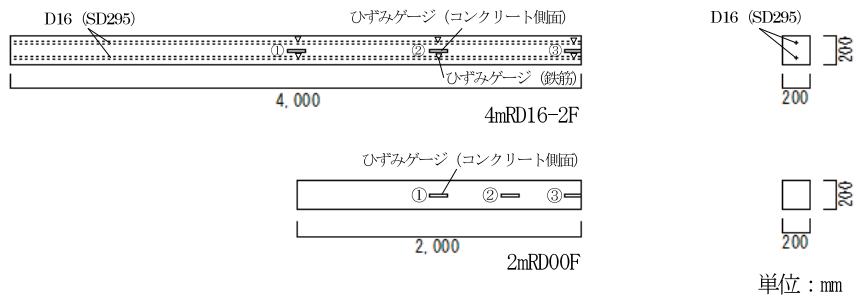
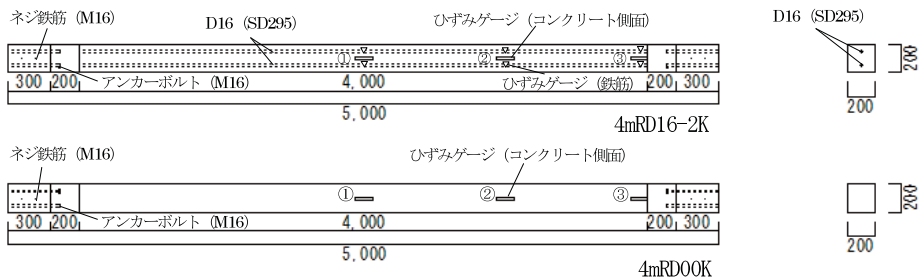
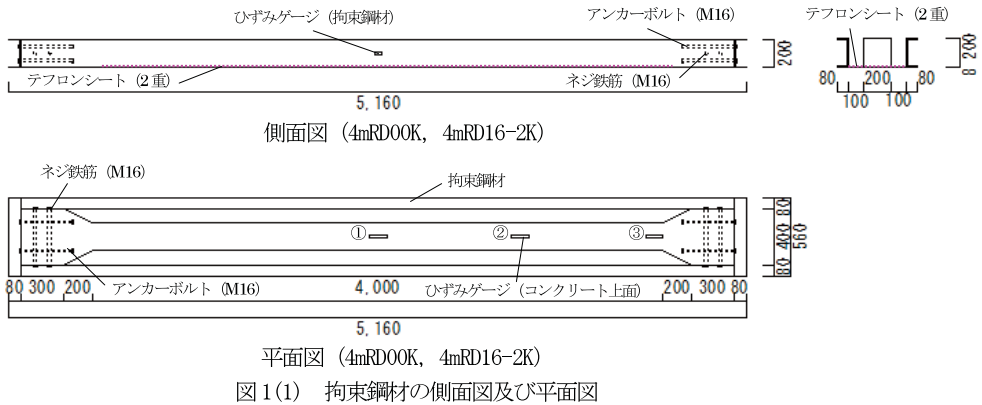


図 1 供試体の形状・寸法

行わず、気温 22.1~39.1℃ (平均温度 27.8℃)、湿度 37.0~89.8% (平均湿度 73.3%) の環境下であった。収縮ひずみの測定は、脱枠時にモルタル表面の上面及び側面に長さ 120mm のひずみゲージ、埋設鉄筋には長さ 3mm のひずみゲージを図 1 に示す位置に貼り付け、拘束鋼材の収縮ひずみは、ウェブ部分の長さ方向の中央、重心位置に貼り付けて 3 時間ごとに自動計測した。測定中の様子を写真 1 に示す。発生したひび割れは、クラックゲージ及び携帯式顕微鏡により計測した。また、断面を横断したひび割れについては、 π ゲージによりひび割れ幅の時間的変動を計測した。



写真 1 測定中の様子

3. 実験結果

3.1 供試体のひずみの経時変化

図2に材令61日目までの各種供試体の乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。ここのひずみは、図1に示すひずみゲージ(コンクリート)の位置で測定したモルタル上面及び側面のひずみを平均したもので、各断面位置でのひずみとした。拘束収縮供試体は、自由収縮供試体に比べ、収縮ひずみが小さいことが分かる。拘束収縮供試体では無筋の場合、鉄筋を用いた場合と比べ、ひずみが断面②では約55%、断面③では約45%増加している。拘束収縮供試体の結果からも分かるように、鉄筋を入れることで収縮が抑制されるため、無筋の場合より収縮量を低減すると考えられるが、自由収縮供試体では、鉄筋を用いた4mRD16-2Fのほうが鉄筋を入れない2mRD00Fより収縮ひずみの大きくなる結果となった。これは扇風機の位置の関係から、2mRD00Fにうまく送風出来ていなかったのではないかと考えられる。また、今回はひずみ量は部材長さに影響しないと仮定し、自由収縮供試体無筋の場合を2mとしたが部材長さについてもひずみに影響を与えた可能性もある。拘束収縮供試体では、4mRD16-2Kが材令36日目に断面①のひずみゲージ内にひび割れが発生したため、その後ひずみは減少しているが、この点を除くと①、②、③のどの断面においてもひずみ量はほぼ一定である。それに対し、自由収縮供試体では供試体中央部から端部にいくにつれてひずみ量が大きくなる傾向がみられた。2mRD00Fでは、断面②と断面①でのひずみ量にあまり差がない。これは、部材長さが4mではなく2mであることが影響していると考えられる。今後は、自由収縮供試体無筋の4mの場合も検討する必要がある。

3.2 拘束鋼材のひずみの経時変化

図3に拘束鋼材のひずみの経時変化を示す。4mRD00Kは材令17日目に1.3mmの大きな貫通ひび割れが発生したため、急激にひずみが増大している。ひび割れが生じることで拘束応力が衝撃的に解放され、瞬間的に生じたひずみであるといえる。拘束収縮供試体2体とも、モルタル表面には大きなひずみを生じていたが、拘束鋼材のひずみは $\pm 10 \mu$ 以下で推移しているため、ほぼ完全拘束に近い状態であるといえる。

3.3 ひび割れ発生時のモルタルの収縮応力

ひび割れ発生前の拘束鋼材のひずみからひび割れ発生直前のモルタルの換算応力度(σ_c)を式(1)により算定した。

$$\sigma_c = \varepsilon_s \times E_s \times A_s / A_c \quad (1)$$

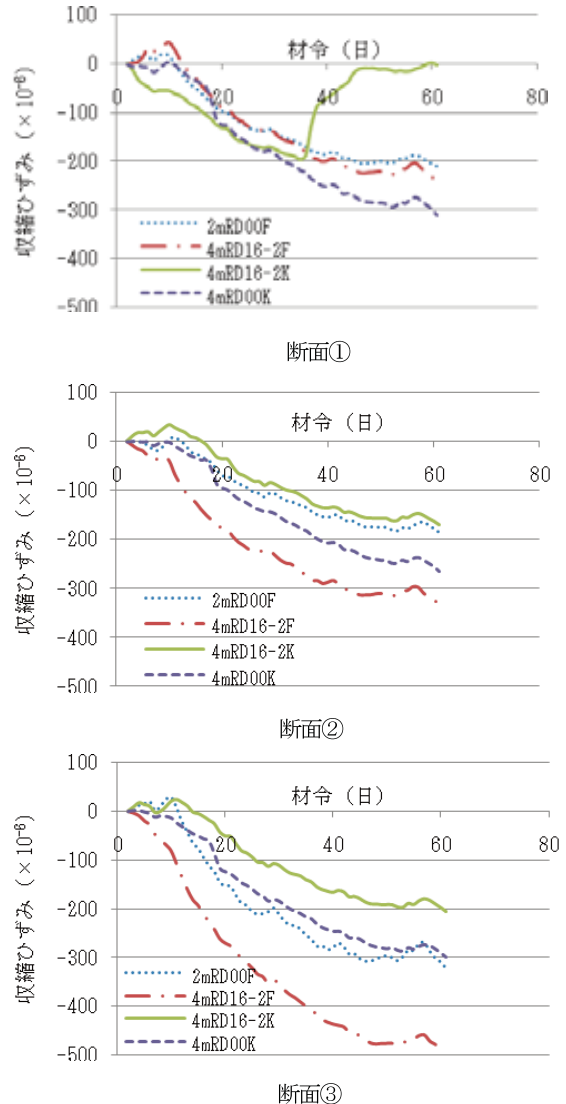


図2 各種供試体の乾燥収縮ひずみの経時変化

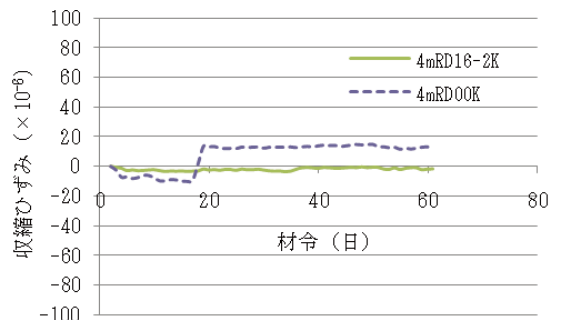


図3 拘束鋼材のひずみの経時変化

ϵ_5 : ひび割れ発生までの拘束ひずみ

E_S : 拘束鋼材の弾性係数(N/mm²)

A_S : 拘束鋼材の断面積(mm²)

A_c : コンクリートの破断面の断面積(mm²)

表 3 に算出した換算応力度を示す。4mRD00K では収縮応力が割裂試験による引張強度(材令 28 日時点)の 95%, 4mRD16-2K では 85%に達した時点でひび割れが発生している。

3.4 ひび割れ性状

各種供試体の材令 61 日目までに発生したひび割れの状況を図 4 に示す。4mRD00K では、材令 17 日目に 1.3 mm の貫通ひび割れが 1 本発生した(図 4 4mRD00K①参照)。この貫通ひび割れの状況を写真 2 に示す。4mRD00K は、貫通ひび割れの発生本数は 1 本であり、このため、ひび割れ幅が大きくなっている。その後、材令 20 日目に 4mRD16-2K に 0.15 mm のひび割れを 1 本, 0.05 mm のひび割れを 2 本確認した(図 4 4mRD16-2K①, ②, ③参照)。0.15 mm のひび割れはほぼ貫通しているが、他の 2 本は上面のみ、または上面及び一方の側面に発生しており、貫通はしていない。4mRD16-2K ではひび割れ発生本数は多いが、その幅は小さく、貫通にまで至るものは少なかった。自由収縮供試体(2mRD00F, 4mRD16-2F)については、いずれの供試体においても各面を横断するようなひび割れは確認されなかった。鉄筋の有無による最大ひび割れ幅を比較すると、無筋の 4mRD00K のほうが鉄筋を入れた 4mRD16-2K の約 8.7 倍であった。時間の経過とともに各種供試体とも、表面に 0.05 mm 以下の非常に微小なひび割れが多く発生しているが、これは乾燥により表面のみに発生しているため、今後進展する可能性はあるが、機能性、耐久性への影響は少ないと考える。

3.5 ひび割れ幅の変動

コンクリートの収縮は外気温や湿度にも影響される。ひび割れ幅は季節による温度変化だけでなく、1 日のうちの温度変化の影響も受けながら伸縮を繰り返し、進展していく。発生したひび割れのうち、今回は 4mRD00K の貫通ひび割れ及び 4mRD16-2K の上面及び一方の側面を横断したひび割れの変動を計測した。 π ゲージはひび割れをまたぐようにひび割れの真上に 1 か所、その横に 1 か所の計 2 か所ずつ設置した(図 4 4mRD00K ①, 4mRD16-2K③参照)。図 5 に温度変化に伴うひび割れ幅及びその横の変動を示す。4mRD00K は温度が上昇するに従い、ひび割れの横のひずみはわずかな伸びであるが、ひび割れの真上の π ゲージは大きな伸びを示している。これは、貫通ひび割れの発生により、供試体が完全に分離し、片端拘束片端自由の状態となり、 π

表 3 換算応力度

| | 換算応力度 σ_c (N/mm ²) | 引張強度 f_t (N/mm ²) | σ_c / f_t |
|-----------|------------------------------------------|------------------------------------|------------------|
| 4mRD00K | 3.17 | 3.40 | 0.93 |
| 4mRD16-2K | 2.89 | 3.40 | 0.85 |

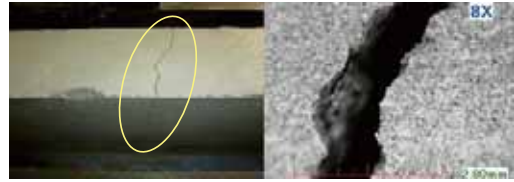
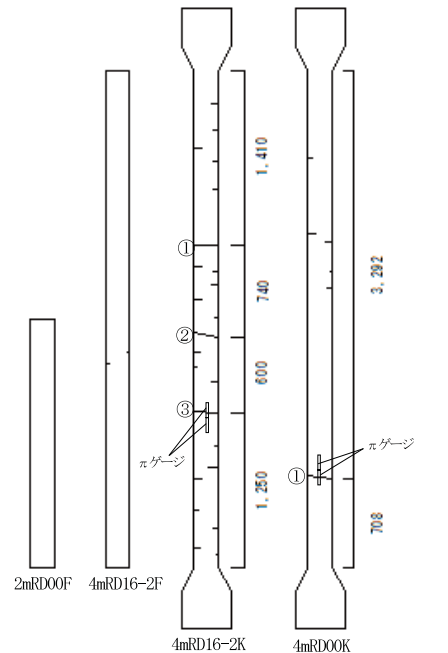


写真 2 4mRD00K の貫通ひび割れの様子



単位: mm

図 4 ひび割れ発生箇所

ゲージを設置している両端が自由に収縮できることからこのような結果になったと考えられる(図 6(a)参照)。4mRD16-2K は 4mRD00K とは対称的に、温度の上昇に伴いひび割れの真上及びその横の π ゲージは縮みを示している。発生しているひび割れは表面を横断しているものの、完全に貫通した状態とはなっていないため、拘束を受けることで部材全体が均一に収縮しているといえる(図 6(b)参照)。本実験では、外気温の上昇により供試体は収縮するという結果が得られたが、コンクリートは内部温度の上昇により膨張するという性質も持っている。今回はモルタルの内部温度は計測していないため、内部温度による影響は明らかでない。今後は内部温度を計測し、内部拘束についても検討する必要がある。

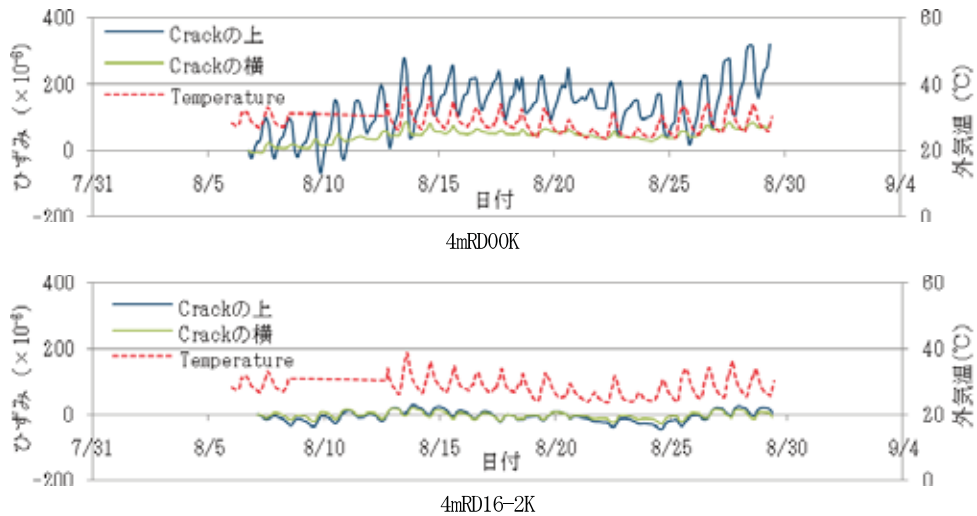


図5 ひび割れ幅の変動

4. 結論

本研究では、大型供試体による一軸拘束試験を行い、鉄筋が乾燥収縮ひび割れに与える影響について実験的に検証した。結論を以下に示す。

- (1) 本実験に用いた拘束供試体でも、十分な拘束力を確保出来ている（部材の完全拘束を表現出来ている）。
- (2) 無筋で拘束を受ける供試体は、鉄筋を用いたものと比べ収縮ひび割れが増加し、ひび割れ本数は少ないが、1本当たりのひび割れ幅が大きくなった。
- (3) 鉄筋を用いることで、収縮ひずみ量を低減し、ひび割れを抑制する効果があることが確認された。
- (4) 拘束された部材は部材全体が均一に収縮しているが、自由収縮の場合、端部に行くに従い収縮量が大きくなる傾向がみられた。
- (5) ひび割れ幅は外気温や湿度に影響を受け、1日の温度変化の中でも伸縮を繰り返しながら進展していく。

実構造物での鉄筋比とひび割れ幅の関係と同様な傾向を本実験でも表現することが出来たが、今後は鉄筋量とひび割れ幅の関係や部材長さによる収縮量の違い及び詳細な温度の影響などについて明らかにする必要がある。今後は、ひび割れ幅の予測式の確立を目指したい。

文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートの温度応力研究委員会 報告書，1992。
- 2) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートの

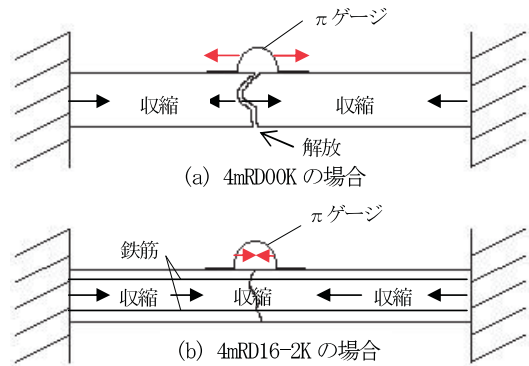


図6 ひび割れ幅について

ひび割れ制御指針 2008, 2008。

- 3) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御に関する研究委員会 報告書，2006。
- 4) 田村隆弘，稲津貴和子，国重典宏：実構造物のデータベースを用いた初期ひび割れ幅の予測式に関する研究，コンクリート工学年次論文集，pp.1331-1336，2011。
- 5) 山口県建設技術センター：http://www.yama-ctc.or.jp/data/index.html
- 6) 稲津貴和子，田村隆弘，澤村修司：山口県のコンクリート工事に関するデータベースを用いたひび割れ幅に関する統計的研究，コンクリート工学年次論文集，pp.1337-1342，2011。
- 7) 日本コンクリート工学協会：JCI 規格集，2004。

(2011.9.26 受理)