

## 論文 若材齢コンクリートの付着特性に関する実験的研究

三村陽一\*1・吉武 勇\*2・浜田純夫\*3・永井泉治\*4

**要旨:** マスコンクリートの温度ひび割れ予測を行う温度応力解析において、その予測精度の向上には若材齢時における鉄筋とコンクリートの付着特性の把握が必要不可欠なものである。若材齢コンクリートは、活発な水和反応進行過程にあり、時々刻々と力学的特性が異なってくるため、進行する材齢に応じた付着実験が必要とされる。本研究では、若材齢時における鉄筋とコンクリートの付着特性を把握する目的から、種々の材齢における鉄筋の両引き試験を行い、その特性について検討を行った。

**キーワード:** マスコンクリート, 若材齢コンクリート, 付着, 両引き試験

## 1. まえがき

マスコンクリートの施工に際して温度ひび割れの発生を検討するにあたり、一般に温度・温度応力といった一連の解析により、ひび割れ発生の有無またはそのひび割れ幅の予測が行われている。しかしながら、現状の温度応力解析では、若材齢時におけるコンクリートの諸物性の影響を一括して有効ヤング係数に含ませているため、より精度の高い推定を行うには、種々のコンクリート物性を把握する必要があるものと考えられる。

温度ひび割れ予測の推定精度に対し、最も顕著な影響をもたらすコンクリート物性として、若材齢時におけるクリープが挙げられる。ここで鉄筋近傍のコンクリートのクリープ変形には、鉄筋による拘束効果が生じるものと思われる。特に引張応力が卓越する構造物表面部には、一般に鉄筋が密に配置されるため、この両者の付着特性を明確にすることは極めて重要なものと考えられる。また、付着特性の明確化により温度ひび割れ対策のひとつであるひび割れ制御鉄筋の最適少量および配置についても検討できるものと思われる。

一般に、コンクリートと鉄筋の付着特性は、付

着応力  $\tau$  とすべり  $S$  の関係(以下、 $\tau$ - $S$  関係と称す)で表される。六車・森田ら<sup>1)</sup>の提案する  $\tau$ - $S$  関係は、比較的短い付着長の実験により得られた結果を基に構築されている。しかし、山尾ら<sup>2)</sup>は定着長が短い試験供試体では、実構造物の付着挙動の推定に限度があることを報告している。また、島ら<sup>3)</sup>は  $\tau$ - $S$  関係にひずみの影響を取り入れることによって、より一般性の高い  $\tau$ - $S$  関係を提案している。しかしながら、ここで提案されている  $\tau$ - $S$  関係は、十分に水和反応が進行したコンクリートによる実験結果を基に構築されたものであり、若材齢時におけるコンクリートの物性変化に伴う付着を対象とする研究例は極めて少ない。また、一般に  $\tau$ - $S$  関係を求める際に行われる試験方法は、鉄筋の片側引き抜き(片引き)試験である。この試験においてコンクリートは、載荷応力の反力により圧縮応力場となる。温度ひび割れの発生するコンクリート部位は、鉄筋ともに引張応力場にあり、引張応力場における付着強度は、圧縮応力場の場合の60~80%に低下することが報告されている<sup>4)</sup>。

そこで本研究は、マスコンクリートの温度ひび割れ予測の推定精度向上を目的に、若材齢時においてコンクリートと鉄筋ともに引張応力場となる

\*1 山口大学大学院 理工学研究科博士前期課程社会建設工学専攻, (正会員)

\*2 日本学術振興会特別研究員 PD (山口大学工学部社会建設工学科所属), 博士(工学) (正会員)

\*3 山口大学教授 工学部社会建設工学科, Ph.D. (正会員)

\*4 (株)エイトコンサルタント

両側引き抜き(両引き)試験を行い、若材齢コンクリートと鉄筋の付着特性について検討を試みたものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験供試体

本研究で用いる試験供試体の概略図を図-1に示す。試験供試体は、鉄筋を水平方向に配置した型枠内にコンクリートを打設することで作製した。これは、ブリージングによる影響を鉄筋の長さ方向に同一とするためである。コンクリート供試体の寸法は、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$  および  $150 \times 150 \times 520\text{mm}$  (以下、それぞれ CASE10, CASE15 と称す)とし、コンクリート断面の寸法が付着特性に及ぼす影響について検討することを目的とした。コンクリートの配合条件および骨材の諸物性値を表-1に示す。

表-1 配合条件と骨材の諸物性値

W/C (%)	S/a (%)	単体量 ( $\text{kg/m}^3$ )				AE剤 ( $\text{g/m}^3$ )
		W	C	S	G	
55	44.6	165	300	811	1047	937.5
細骨材		比重		F.M.		
		2.60		2.25		
粗骨材		比重		最大粒径		
		2.70		20mm		

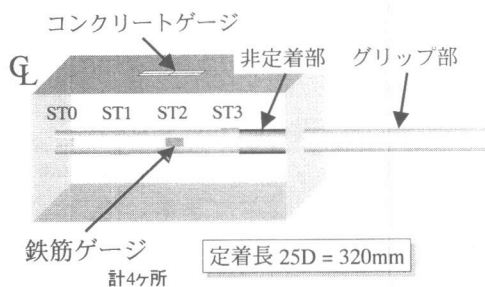


図-1 試験供試体概略図

鉄筋は各 CASE ともに SD295A, D13(径: 12.7mm)を用いたことから、最小被り厚は CASE10, 15 でそれぞれ 3.4D, 5.4D となる。ここでマスコンクリートを対象とした既往の付着試験では、鉄筋の定着長が鉄筋径の 3 倍と極めて短い試験供試体を用いられている<sup>9)</sup>。山尾ら<sup>2)</sup>は、定着長が短い試験供試体では、実際の構造物の付着挙動を推定することに限度があり、25D 程度が必要であることを報告している。このことから、本研究における鉄筋とコンクリートの定着長は 25D(約 320mm)とした。供試体の端部には、荷端の影響を小さくする目的から、非定着部を設けた。非定着部は、コンクリート型枠の制約上、全長から定着部を差し引いた部分とした。したがって CASE10 は、片側 40mm(約 3.1D)、CASE15 では片側 100mm(約 8.3D)となった。非定着部ではグリスを塗布したテープで鉄筋を被覆することによって、鉄筋とコンクリートの付着を切ることとした。

鉄筋のひずみは、図-1に示される定着部の片側において、等間隔(約 4.2D)に区切った 4ヶ所で測定を行った。同図において、ST0~ST3 は鉄

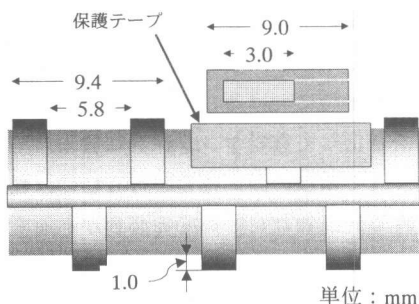


図-2 ひずみゲージの貼付状況

筋ひずみの測定位置を示すものであり、試験供試体中心部より鉄筋に沿って、ST0, ST1, ST2, ST3 の順である。ひずみゲージは、鉄筋の節を切削した平面上において、荷中に鉄筋の編心が生じないように、らせん状に貼付した(図-2 参照)。ひずみゲージの貼付後、ビニールテープで被覆することによって、ゲージを絶縁するとともに、打設時におけるゲージの損傷の防止を図った。しかし、このようなゲージの貼付方法のため、鉄筋の表面形状を変化させることによって、付着特性に影響を及ぼすことが予想される。したがって、その影響を小さくするため、節の切削は必要最小限にとどめ、また保護テープも図-2

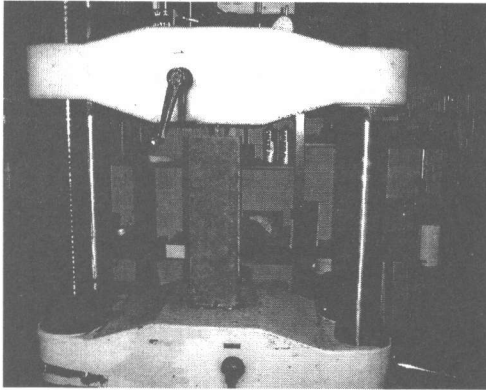


図-3 載荷状況

に示すように、鉄筋ゲージの近傍のみに貼付した。また、コンクリート供試体表面部への引張応力伝達度を調べる目的から、図-1 に示される供試体表面部において、コンクリートのひずみを測定した。なお、本研究ではここで得られるコンクリートひずみを CON と略記している。

## 2.2 試験方法

本研究における両引き試験では、コンクリートの両端面より張り出した鉄筋をグリップにより固定し、油圧式万能試験機 (Max100tf) を用いて、鉄筋へ引張力(載荷力)の導入を図った(図-3 参照)。ここで、マスコンクリートの温度応力は、水和熱に伴う部材伸縮の拘束に起因することから、一般的な配合条件下では 40~60℃程度(断熱温度上昇量)の温度変化による温度応力が最大となる。この場合、鉄筋の線膨張率約  $12\mu/\text{℃}$  では鉄筋降伏には至らないことから、本研究における載荷力は、徐々に漸増させ鉄筋が降伏する直前(4.0tf $\approx$ 39kN)とした。また、放熱に伴う温度応力の解放を模擬するために、除荷過程における付着挙動の測定も併せて行った。鉄筋とコンクリートの付着度の影響を定量的に評価する目的から、同様の試験を D13 の鉄筋単体(記号: STEEL)でも行った。なお、載荷および除荷速度はいずれも約 6.0kgf/sec(約 59N/sec)である。ひずみの測定は、載荷・除荷いずれも 0.1tf(0.98kN)刻みでデータロガーに取り込み、RS232C インタ

表-2 実験項目

記号	CASE	断面寸法 (mm)	試験材齢 (日)
1d-10	10	100×100	1
2d-10			2
3d-10			3
7d-10			7
14d-10			14
28d-10			28
1d-15	15	150×150	1
2d-15			2
3d-15			3
7d-15			7
14d-15			14
28d-15			28
STEEL	—	なし	—

フェースを介してパソコンのハードディスクに記録した。

## 2.3 実験項目

本研究では、付着挙動の材齢変化に関して、コンクリート断面および鉄筋ゲージ位置に着目した実験的検討を試みた。本研究で行った実験項目を表-2 に示す。なお、表中における記号は、頭文字が試験を行った材齢(以下、試験材齢と称す)を表し、末尾の数字がコンクリート断面の寸法を意味する。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 ひずみ分布

#### (1) 位置の違いによる比較

試験材齢 3 日、供試体断面寸法 100mm(記号: 3d-10)の載荷および除荷過程における載荷応力と鉄筋ひずみの関係を図-4 に示す。なお、比較のため、鉄筋単体のひずみ変化を同図に併記する。図-4 より、載荷初期において、供試体中心部に近いほど、鉄筋にひずみが生じておらず、ひずみと応力のなす傾きが大きくなっていることがわかる。また同一の載荷応力における鉄筋ひずみは、中心部に近いほど小さくなっていることがわかる。これは鉄筋に導入された応力が、付着機構によりコンクリート部位にも一部伝達さ

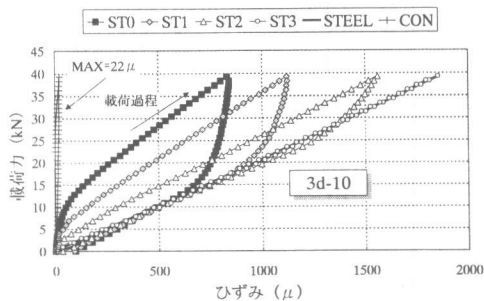


図-4 鉄筋ひずみの位置別変化

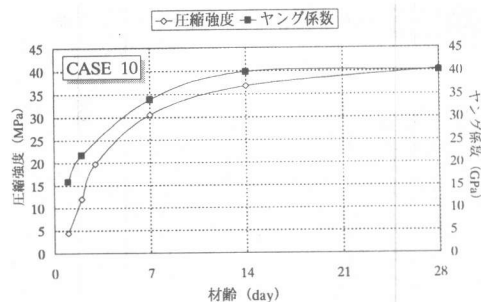


図-6 圧縮強度およびヤング係数の経時変化

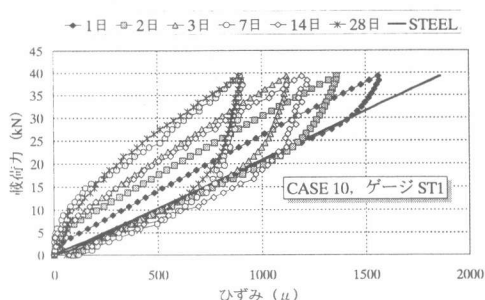


図-5 試験材齢の違いによる鉄筋ひずみの変化

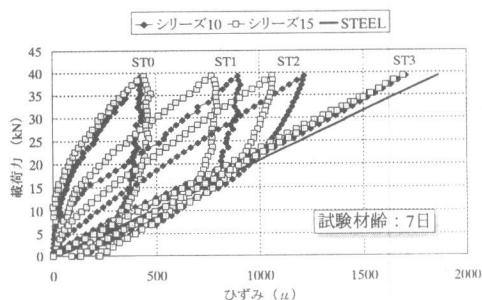


図-7 断面寸法の違いによる鉄筋ひずみの変化

れ、コンクリート部が変形に対して抗することで、鉄筋が負担する応力が低減されたためと考えられる。特にこの傾向は、試験供試体中心部に近いほど著しいことが予想される。

また、供試体表面部におけるコンクリートひずみの最大値は  $22\mu$  であり、他のケースにおいても同程度のひずみ量であった。これは、鉄筋のひずみ量に比して極めて小さなひずみ量であるといえる。このことから、本研究で用いた鉄筋径および供試体断面程度では、コンクリート表面にほとんど引張ひずみは生じないことが分かった。すなわち、鉄筋の極近傍のコンクリート部においてのみ引張ひずみが発生し、少なくとも鉄筋より  $50\text{mm}$  程度離れたコンクリート部には、鉄筋への荷力の影響はほとんどないことが分かった。なお、この結果は鉄筋径によって大きく影響を受けるものと考えられるため、今後種々の鉄筋径を有する試験供試体についても検討する必要があるといえる。

## (2) 試験材齢の違いによる比較

断面寸法  $100\text{mm}$  の供試体(CASE10)のゲージ位置 ST1 に着目したときの、試験材齢の違いによる荷重応力と鉄筋ひずみの関係を図-5 に示すとともに、図-6 においてコンクリートの圧縮強度およびヤング係数の材齢変化を示す。なお、圧縮・ヤング率試験は、試験供試体と同一のバッチより作製した円柱供試体を用いたものである。

図-5 より、試験材齢 14 日において一部例外が認められるものの、同一の荷重応力によって生じる鉄筋ひずみは、試験材齢 1 日から 7 日まで減少傾向にあり、試験材齢 7 日と 28 日の結果は、ほぼ同程度となっていることが分かる。また、この傾向は、他の測定点および CASE15 においても同様であった。これは図-6 に示される結果から分かるように、材齢 7 日までの力学特性(圧縮強度やヤング係数)の増進は著しく、鉄筋とコンクリートの付着機構も同様に堅固になったものと考えられる。特にコンクリートの剛性を示すヤング係数に着目

すれば、材齢 1 日から 7 日にかけて約 2 倍まで大きくなっており、それに応じて付着力が増大し、コンクリート部の負担が大きくなって、鉄筋ひずみが減少したものと考えられる。逆に 7 日以降では、コンクリートの圧縮強度およびヤング係数の変化はほぼ収束傾向にあることから、7 日以降において有為な差異が生じなかったものと思われる。

### (3) コンクリートの断面寸法の違いによる比較

供試体の断面寸法の違いによる荷重応力-鉄筋ひずみ結果の一例を図-7 に示す。この結果より、いずれの測定点においても、断面寸法によらず鉄筋ひずみは、ほぼ同程度であることがわかる。これは(1)で述べたように、鉄筋の応力は、鉄筋の極近傍にのみ伝達されるため、コンクリートの断面寸法が付着特性におよぼす影響が極めて小さかったものと考えられる。

### (4) 鉄筋周辺部の破壊形態

コンクリート供試体内部の破壊形態を把握する目的から、試験終了後において同供試体をダイヤモンドカッターで切断し、鉄筋周辺の破壊状況を観察した。その結果を図-8 に示す。この図より、中心部では鉄筋の節跡が残っており、端部側ではコンクリートと鉄筋のすべりにより節の跡は、削り取られて平滑になっていることがわかる。また、内部ひびわれの発生は確認できなかった。この破壊状況とコンクリート表面部にひずみがほとんど生じなかった結果より、鉄筋からの応力は鉄筋周辺部のみに伝達されるという推測が裏付けられる。

## 3.2 付着損失領域と付着損失比

付着による鉄筋ひずみの拘束度を定量的に把握する目的から、本研究では荷重力-鉄筋ひずみ曲線から形成される面積を用い、付着特性の評価を行った(図-9 参照)。なお本研究では同面積を付着損失領域( $L$ )と表す。この付着損失領域( $L$ )は、荷重力-鉄筋ひずみ曲線において、荷重過程の積分値から除荷過程の積分値を差し引くことで求め

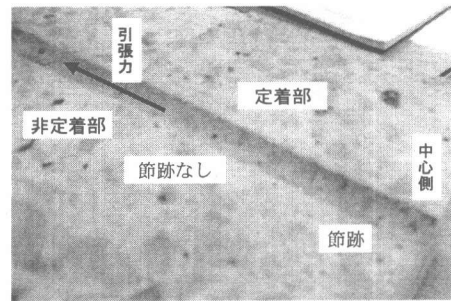


図-8 鉄筋周辺部の破壊状況

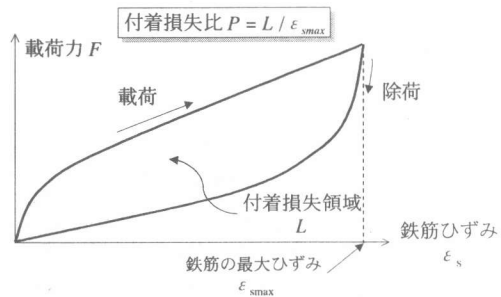


図-9 付着損失領域および付着損失比の定義

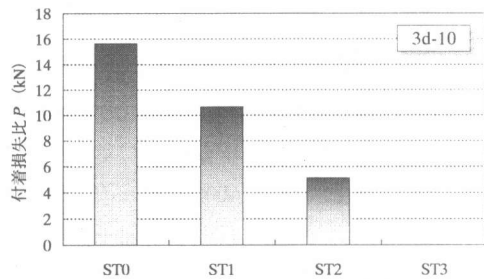


図-10 付着損失比の位置別比較

た。

付着による鉄筋変形の拘束効果が高まると、鉄筋単体での両引き試験に比べ、鉄筋ひずみの発生は荷重過程では抑制され、除荷過程では保持される傾向にある。このことから、付着損失領域( $L$ )は付着効果が高まるほど大きくなることが予想される。しかしながら、最大鉄筋ひずみ( $\epsilon_{smax}$ )が異なっていると、付着損失領域( $L$ )を用いて付着効果を単純に比較することは困難となることから、最大鉄筋ひずみに対する付着損失領域( $L$ )の比となる付着損失比( $P$ )を用いて付着効果の評価を試

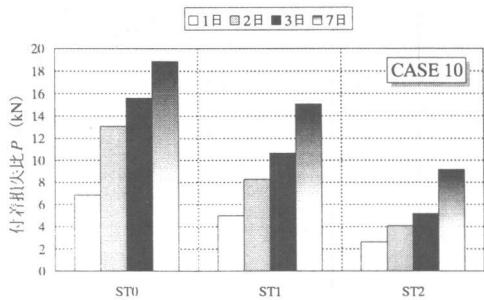


図-11 試験材齢の違いによる付着損失比の比較

みた(式(1)参照)。

$$P = \frac{L}{\epsilon_{s \max}} \quad (1)$$

一例として試験材齢3日、コンクリートの断面寸法 100mm(記号: 3d-10)の実験による付着損失比(P)の算出結果を図-10に示す。この結果より、供試体中心部に近いほど付着損失比(P)はほぼ線形的に大きくなっており、付着効果が大きいことがわかる。

また、付着損失比(P)の材齢変化を調べるため、異なる試験材齢における付着損失比(P)の比較を行った(図-11参照)。なお、図-11に示されるコンクリートの断面寸法は 100×100mm(CASE10)である。また、試験材齢7日以降における鉄筋ひずみ分布が、試験材齢7日のものとほぼ同程度であったことから、図-11では試験材齢7日までの計算結果を示す。

この結果より、いずれの測定点においても付着損失比(P)は材齢1~7日まで増加傾向にあり、材齢(水和)の進行に伴い付着効果は高まっていると考えられる。このような傾向は、CASE15においても同様であった。

#### 4. まとめ

本研究は、マスコンクリートの温度ひび割れ予測の推定精度向上を目的に、若材齢時における鉄筋とコンクリートの付着特性について検討を試みたものである。本研究の範囲内において

得られた結論を以下に要約する。

- ①本研究で用いた鉄筋径およびコンクリート断面程度では、供試体表面にほとんど引張ひずみは生じず、鉄筋からの応力は、鉄筋近傍のコンクリート部にのみ伝達される。
- ②材齢7日までの鉄筋とコンクリートの付着挙動は、コンクリートの材齢に伴って変化する。また、材齢7日以降では、その特性に大きな差異は生じない。
- ③材齢1~7日までは、付着効果が大きくなることによって、付着損失比は増加する傾向にある。

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、山口大学工学部中村秀明助教授および高海克彦助教授より多くの御助言を頂きました。また、実験の実施にあたっては、山口大学大学院の仁尾彰一郎氏に多大な御協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 六車 熙, 森田司郎, 富田幸次郎: 鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究, 日本建築学会論文報告集, No.131, pp.1~8, 1967.1.
- 2) 山尾芳秀, 周 礼良, 二羽淳一郎: 付着応力-すべり関係に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No.343, pp.219~228, 1984.3.
- 3) 島 弘, 周 礼良, 岡村 甫: マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集, No.378/V-6, pp.165~174, 1987.2.
- 4) 壹岐直之, 清宮 理, 山田昌郎: 付着-すべり関係に影響を及ぼす要因の実験的研究, 土木学会論文集, No.550/V-33, pp.73~83, 1996.11.
- 5) 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(温度ひび割れ幅算定方法についての提案), pp.18-45, 1992.9.