初期材齢コンクリートの水平鉄筋の上面に沿う沈下ひび割れ に関する実験的研究

THE EXPERIMENTAL STUDY ON THE SETTLEMENT CRACKS OF CONCRETE OCCURRING OVER HORIZONTAL REINFORCING BARS AT THE EARLY AGES

林 瑩 奎*, 前田 孝一**

Hyoung-Gyu LIM and Koichi MAEDA

This paper is intended to quantify the crack formation condition when cracks occur over horizontal reinforcing bars by the subsidence of concrete. The subsidence tests of a concrete specimen in which a reinforcing bar was suspended from the fixed crosshead of a test machine with a piano wire were conducted by employing experimental parameters such as loading ages, concrete cover, loading speed and effect of aggregate.

As a result, it was made clear that the rate of subsidence of concrete when cracking occurs at the surface of concrete is approximately 0.67mm at 3hours ages and that it decreases suddenly and is approximately 0.06mm at 6hours ages. Using a finite element method to predict stress and strain state in the specimens for the case in which cracks may occur along horizontal reinforcing bars, numerical analysis was done. The local stress and the strain value predicted from a quantity of subsidence rate and load in crack formation obtained from this experiment agreed with previous experiment results.

Keywords: Early ages, Settlement cracks, Quantity of settlement, Tensile strain, Tensile strength, Cracks criteria

初期材齢, 沈下ひび割れ, 沈下量, 引張ひずみ, 引張強度, ひび割れ条件

1. はじめに

一般に, 梁や床スラブの初期材齢コンクリートにおける沈下によるひび割れの原因は, コンクリートのブリーディングや沈下によるものと, 型枠の変形によるものがあると言われている。本研究は, コンクリートの沈下量と水平鉄筋に沿ったコンクリートのひび割れとの関係を定量的に明らかにし, その沈下ひび割れの発生条件を定量化することを目的にしている。

コンクリートのブリーディングと沈下についての既往の研究は, 主に, セメント化学分野を中心に, セメントの比表面積を測定する手法で研究されている。材料施工の立場では, コンクリートの沈下量として, ほぼ 1.8mm であるという報告^{1),2),3)}もあるが, ひび割れと沈下量との関係について検討した研究はない。

型枠の変形によるコンクリートの沈下には, 支保工の沈下, 根太, せき板などの反り変形による沈下が考えられる。支保工の材質には, 木製と鋼管がある。木材の支保工の場合は吸水と乾燥による変形が生じ, 鋼管の支保工の場合は熱膨張により変形が生じる場合がある。また, 床スラブの型枠設計の際, 一般に, 構造安全性とコンクリートの仕上りの観点から, たわみ量が 0.3cm 以下^{4),5)}と言う基準があるが, この値と, コンクリートに沈下ひび割れが生じる時の沈下量との比較検討が必要である。

実際に, 建築現場で床スラブの支保工に作用する荷重と変形量を実測した既往の研究^{6),7),8)}では, 型枠にコンクリートを打設してから支保工を除去するまでの間に 2~3 mm 程度の沈下が生じると報告している。しかし, その沈下量によりひび割れが生じるか否かについては言及されていない。

以上のことより, 本研究は, 水平鉄筋に沿った初期材齢コンクリートのひび割れに及ぼす沈下量の影響についての資料を提供する目的で, かぶり厚さと載荷速度と骨材の影響をパラメータにし, 鉄筋を埋め込んだコンクリート供試体のコンクリート部分を沈下させる実験を行った。

2. 実験概要

本実験⁹⁾では, コンクリートの沈下量と水平鉄筋に沿ったコンクリートのひび割れとの関係を定量的に明らかにする。表1に実験要因を, 表2にコンクリート調合を, 図1に実験方法を各々示す。

2.1 実験要因

実験要因は, かぶり厚さ, 載荷速度, 載荷材齢, 及びモルタルとコンクリートの比較である。かぶり厚さは, 床スラブのかぶり厚さ 3cm を基準として 2cm, 3cm, 4cm とした。本実験に使うテンシロン引

* 韓国, 安養科学大学建築科 専任講師・工博

Full-Time Lecturer, Dept. of Architecture, Anyang Technical College, Korea, Dr. Eng.

** 千葉大学工学部デザイン学科 助教授・工博

Assoc. Prof., Dept. of Design, Faculty of Engineering, Chiba University, Dr. Eng.

張試験機の制限速度を考慮して、載荷速度は 0.5mm/min と 5.0mm/min とした。載荷材齢は、破断時の引張ひずみと材齢との関係についての笠井の研究¹⁰⁾によると、12 時間以後からは破断時の引張ひずみがある程度の一定値を示すと指摘しているため、12 時間までとすることにし、材齢 3, 6, 9, 12 時間とした。

2.2 実験方法

1) コンクリート調査

使用したセメントは、普通ポルトランドセメントで、水セメント比 60%，スランプ 18cm，空気量 4 % で、粗骨材は最大寸法 25mm の川砂利を用い、細骨材は最大寸法 5mm の川砂を用いた。モルタ

(a) 試験体形状

(b) 載荷方法

図1 実験方法⁹⁾

表1 実験項目と要因

実験項目		実験要因	
コンクリート	材齢とかぶり厚さとの関係	かぶり厚さ	2, 3, 4cm
	速度の影響	載荷速度	0.5, 5.0mm/min
		かぶり厚さ	3cm
モルタル	骨材の有無	載荷速度	5.0mm/min
		かぶり厚さ	3cm

※各要因 3 体で、合計 60 体である。

表2 コンクリート調査

目標スランプ (cm)	水セメント比 (%)	粗骨材最大寸法 (mm)	細骨材率 (%)	重量 (kg/m ³)			
				単位水量	セメント	細骨材	粗骨材
18	60	25	38.5	168	279	718	1125

ルの調査は、水セメント比 55 %，セメントと細骨材の重量比が 1 : 3 で、細骨材は最大寸法 5mm の川砂を用いた。

2) 供試体の作製と養生

実験用型枠 (150 × 90 × 200mm 鋼製型枠) に所定のかぶり厚さまで φ 13mm の異形鉄筋を入れてコンクリートを 3 層に分けて各層を突棒で 10 ~ 15 回突き、型枠の周囲を軽くたたいて成形した。

供試体を所定の材齢まで恒温室 (温度 20℃，湿度 75 %) で養生し、2 時間後に、ブリーディングによるひび割れを防ぐため、コンクリートの表面をこて均した。また、コンクリート上部の表面乾燥を防ぐため、湿らした紙で被って養生を行った。

3) 実験と測定方法

図 1 のように、所定のかぶり厚さで埋め込んだ鉄筋をピアノ線で吊り止め、所定材齢のコンクリートをテンシロン引張試験機で、コンクリート表面にひび割れが現れるまで所定の速度で沈下させながら、荷重と沈下量のデータをパソコンに取り込んだ。

測定はコンクリートに埋め込んだ鉄筋の両端部に 1/100mm の精度のダイヤルゲージ式変位測定器を 2 個設置し、荷重と沈下量のデータをパソコンに取り込んだ。その 2 つの平均値を沈下量とした。

図2 荷重と沈下量の曲線のタイプ

表3 コンクリートの材齢とひび割れ発生沈下量 (10⁻³ mm) とひび割れ発生応力指標 (N/mm²)

a) かぶり厚さをパラメータにした場合				
かぶり厚さ/材齢	3 時間	6 時間	9 時間	12 時間
2cm	78.5 (0.03)	11.0 (0.10)	3.0 (0.39)	6.0 (0.62)
	42.5 (0.02)	5.5 (0.08)	7.0 (0.34)	2.0 (0.69)
	63.0 (0.02)	7.5 (0.06)	3.5 (0.32)	3.5 (0.63)
平均	61.3 (0.02)	8.0 (0.08)	4.5 (0.35)	3.8 (0.65)
3cm	69.5 (0.03)	5.5 (0.16)	5.0 (0.27)	3.0 (0.79)
	50.5 (0.03)	6.0 (0.14)	7.5 (0.25)	12.0 (0.75)
	80.0 (0.03)	7.0 (0.13)	7.0 (0.29)	4.0 (0.72)
平均	66.7 (0.03)	6.2 (0.14)	6.5 (0.27)	6.3 (0.76)
4cm	65.0 (0.03)	15.0 (0.11)	5.0 (0.37)	6.5 (0.64)
	62.5 (0.03)	19.0 (0.09)	11.5 (0.35)	8.5 (0.55)
	74.5 (0.03)	11.0 (0.09)	8.5 (0.39)	3.4 (0.75)
平均	67.3 (0.03)	15.0 (0.09)	8.3 (0.37)	6.1 (0.65)

b) 載荷速度を 0.5mm/min にした場合				
速度/材齢	3 時間	6 時間	9 時間	12 時間
0.5mm/min	44.0 (0.02)	8.0 (0.06)	5.5 (0.16)	7.0 (0.41)
	46.5 (0.02)	8.0 (0.08)	4.5 (0.15)	6.0 (0.44)
	60.5 (0.02)	10.5 (0.05)	11.0 (0.16)	5.5 (0.30)
平均	50.3 (0.02)	8.8 (0.06)	7.0 (0.15)	6.2 (0.38)

c) モルタルした場合				
材料/材齢	3 時間	6 時間	9 時間	12 時間
モルタル	130.0 (0.02)	15.0 (0.07)	11.0 (0.29)	13.5 (0.38)
	153.0 (0.02)	10.0 (0.08)	6.0 (0.38)	9.5 (0.40)
	155.0 (0.01)	7.0 (0.07)	10.0 (0.34)	12.0 (0.42)
平均	146.0 (0.02)	10.7 (0.07)	9.0 (0.34)	11.7 (0.40)

※ () の数値は応力指標である。

3. 実験結果

図2に、荷重と沈下量の曲線のタイプを示す。

荷重と沈下量の曲線は、材齢3時間の場合のように途中でピークを示さないもの（タイプ1）と材齢6時間以降の場合のように、途中でピークを示すものに分けることが出来る。ピークを示すものは、ピークに達した後、荷重が低下し、その後、一定の荷重を示すものと（タイプ2）、再び荷重が多少増加する傾向を示すもの（タイプ3）がある。

途中でピークを示すタイプの場合、ピーク点でコンクリート表面にひび割れが現れた。そこで、ピーク点の沈下量をひび割れ発生沈下量と定義した。

a) かぶり厚さをパラメータにした場合

図 a) の拡大図

b) 載荷速度をパラメータにした場合

c) 骨材の有無

図3 コンクリートの材齢とひび割れ発生沈下量との関係

下量と定義した。材齢3時間の場合のように途中でピークを示さないものについては、コンクリート表面にひび割れが現れる時を肉眼で確認し、その時の沈下量をひび割れ発生沈下量とした。

測定されたひび割れ発生時の荷重は、かぶり厚さと幅の影響があるため、荷重をかぶり厚×幅で割った値で応力の次元を持たせ、これをひび割れ発生応力指標と定義した。これは、ひび割れが発生する部分の局所的な応力ではないのであるが、その指標とはなりうる。例えば、これは、コンクリートの割裂引張試験で荷重を試験体の直径×高さで割った値に相当する。

表3に、ひび割れ発生沈下量とひび割れ発生応力指標を、かぶり厚さ、載荷速度、骨材の影響をパラメータとして、材齢との関係を示す。

図3に、かぶり厚さ、載荷速度、骨材の影響をパラメータとした、材齢とひび割れ発生沈下量との関係を示す。

材齢3時間と材齢6時間以降では沈下量が大きく減少している。これは、材齢3時間ではまだ強度発現する前の段階にあるからであると考えられる。

ひび割れ発生沈下量に及ぼすかぶり厚さの影響については、かぶり厚さにかかわらず、ひび割れ発生沈下量は材齢6時間で急激に減少し、その後、材齢経過に伴い徐々に減少する傾向が見られる。

ひび割れ発生沈下量に及ぼす載荷速度の影響については、

a) かぶり厚さをパラメータにした場合

b) 載荷速度をパラメータにした場合

c) 骨材の有無

図4 コンクリートの材齢とひび割れ発生応力との関係

0.5mm/min と 5.0mm/min を比較すると、材齢 3 時間では、載荷速度 5.0mm/min 方が 0.5mm/min より約 1.5 倍大きく現れているが、材齢 6 時間以降では載荷速度の影響があまり見られない。

ひび割れ発生沈下量に及ぼす骨材の有無の影響については、材齢にかかわらずにモルタルの方がコンクリートよりほぼ 2 倍くらい大きくなっている。

図 4 に、かぶり厚さ、載荷速度、骨材の影響をパラメータとした、材齢とひび割れ発生応力指標との関係を示す。

ひび割れ発生応力指標に及ぼす材齢の影響については、材齢とともに増大する傾向が見られる。ひび割れ発生沈下量が材齢 6 時間以降ほぼ一定になっていることから、強度、ならびに、弾性係数が材齢とともに増大していると考えられる。

ひび割れ発生応力指標に及ぼす、かぶり厚さの影響については、かぶり厚さの影響が非常に小さいことが分かる。

ひび割れ発生応力指標に及ぼす、載荷速度の影響については、沈下量の場合と異なり、載荷速度に大きく影響される。若材齢コンクリートのリラクゼーションの影響がかなり大きいと考えられ、無視できないと言える。

図 5 有限要素分割

a) 鉄筋周辺のコンクリート要素の主応力分布

b) 鉄筋上部のコンクリート要素の主応力分布

図 6 かぶり厚さに対する鉄筋周辺と鉄筋上部のコンクリート要素の主応力分布

ひび割れ発生応力指標に及ぼす、骨材の有無の影響については、ひび割れ発生沈下量の場合は逆にコンクリートの方がモルタルより大きくなる傾向が見られる。材齢 12 時間では、モルタルのひび割れ発生応力指標がコンクリートの約半分になった。

4. 実験結果の考察

本実験から得られるひび割れ発生沈下量やひび割れ発生応力指標は、ひび割れ現象を外的な変形や荷重で評価したものである。他方、コンクリートのひび割れ条件は、応力やひずみといった局所的な内的条件で与えられる。そこで、本実験と同様のモデルを対象に有限要素法を用いて応力ならびにひずみ分布の解析を行ない、本実験から得られた沈下量や応力指標から、予測される引張終局ひずみならびに引張強度を求める。

解析に用いた有限要素法は、二次元弾性平面応力解析で、要素は一定ひずみ三角形要素である。

図 5 に、有限要素分割を示す。まず、モデルを鉄筋周辺のコンクリートの部分と、それ以外のコンクリート部分に分け、前者を極座標系で、 $n1=10$ 個、 $m1=10$ 個に分割し、後者を直角座標系で、 $n2=5$ 個、 $m2=8$ 個に分割し、コンクリート要素を更に二分割した。

次に、鉄筋とコンクリートの境界の応力伝達に関しては、若材齢コンクリートの場合、引張応力やせん断応力の伝達は期待できず、圧縮応力のみ伝達できると考えられる。この様な応力状態は、鉄筋の部分は空隙で、鉄筋上部のコンクリートの鉛直方向の変位が拘束されるモデルに近いと考えられる。そこで、載荷方法と拘束条件については、鉄筋要素の弾性係数をコンクリートに比べ著しく小さく

表 4 応力ならびにひずみへの変換係数の解析結果

かぶり厚さ (d)	鉛直反力 R_y (N)	応力 (要素番号 19) σ_{xx} (N/mm ²)	ひずみ (要素番号 19) ϵ_{xx}	応力変換係数 $K_s = \sigma_{xx} / (2R_y / (d \cdot t))$	ひずみ変換係数 $K_\epsilon = \epsilon_{xx} / \delta_r$ (1/mm)
20mm	16.28	0.042	0.00042	0.255	0.0042
30mm	17.48	0.036	0.00036	0.308	0.0036
40mm	18.64	0.030	0.00030	0.323	0.0030

※ 鉄筋上部の節点の強制変形 $\delta_r = 0.1$ mm
コンクリート弾性係数 $E_c = 100$ N/mm²

図 7 笠井¹⁰⁾による引張終局ひずみと材齢と、本実験の比較

図 8 笠井¹⁰⁾による引張強度と材齢の関係と、本実験の比較

し（本解析では 1/1000）、モデルの底面の鉛直方向と側面の水平方向を拘束し、鉄筋の上部の節点の鉛直上方向に強制変形 $\delta_y = 0.1\text{mm}$ を与えることにした。なお、解析と実験とでは強制変形の与え方が鉄筋とコンクリートで逆になっている。

弾性解析なので材料定数としての弾性係数の値はあまり意味がないのであるが、とりあえず、コンクリートの弾性係数を $E_c = 100\text{N/mm}^2$ とし、コンクリートと鉄筋のポアソン比を 0.3 とした。

図 6 に、かぶり厚さを 2, 3, 4cm と変化させた場合の鉄筋周辺と鉄筋上部の鉛直方向のコンクリート要素の応力分布図を示す。鉄筋周辺に大きな引張応力が見られるが、これは、局所的な応力集中である。重要なのは、鉄筋上方のコンクリート表面の応力ならびにひずみである（要素番号 19）。

表 4 にかぶり厚さ d をパラメータにして、強制変形 $\delta_y = 0.1\text{mm}$ を与えた節点の節点反力 R_y と、鉄筋上方のコンクリート表面の引張主応力ならびに主ひずみ（要素番号 19） σ_{xx} 、 ε_{xx} の値、および、応力変換係数 $K_s = \sigma_{xx} / (2 R_y / d)$ 、ひずみ変換係数 $K_e = \varepsilon_{xx} / \delta_y$ の値を示す。応力変換係数で節点反力 R_y が 2 倍されているのは、解析モデルが対称性により半分を解析しているからである。本実験から得られたひび割れ発生応力指標に変換係数 K_s を掛けることにより鉄筋上方のコンクリート表面の応力が得られる。同様に、本実験から得られたひび割れ発生沈下量に変換係数 K_e を掛けることによりひずみが得られる。

本実験から得られたひび割れ発生沈下量と応力指標を鉄筋上方のコンクリート表面の応力とひずみに変換した値を既往の研究データと一緒に図 7、図 8 に、示す。

図 7 に、笠井¹⁰⁾の材齢と引張終局ひずみの関係と、本実験から得られた材齢とひび割れ発生沈下量から予測される鉄筋上方のコンクリート表面のひずみとの関係を比較して示す。コンクリートの引張終局ひずみが材齢 6 時間で急激に減少した後、ほぼ一定になる傾向である。このような傾向は、本実験からの材齢とひび割れ発生沈下量との関係とほぼ同様な傾向である。しかし、材齢 6 時間以降の笠井の引張終局ひずみの値は、本実験から予測される鉄筋上方のコンクリート表面のひずみの値よりかなり小さい値である。

図 8 に、笠井¹⁰⁾の材齢と引張強度の関係と、本実験から得られた材齢とひび割れ発生応力指標から予測される鉄筋上方のコンクリート表面の応力との関係を比較して示す。引張終局ひずみと比較して、強度の場合、両者はかなり良い一致を示すと言える。

以上から、弾性解析を用いて水平鉄筋に沿った沈下ひび割れを予測するための局所的なコンクリートのひび割れ条件としては、強度発現前（材齢 3 時間）では、ひずみ条件を用い、強度発現後（材齢 6 時間以降）では応力条件を用いるというのが妥当と考えられる。特に、水平鉄筋に沿った沈下ひび割れの弾性解析の場合、载荷が強制変形で与えられるため、得られるひずみ場は弾性係数に依存しないので、強度発現前の局所ひずみを近似的に求めるのに有効である。

5. まとめ

本研究は、水平鉄筋に沿った初期材齢コンクリートのひび割れに及ぼす沈下量の影響についての資料を提供する目的で、かぶり厚さと载荷速度と载荷材齢と骨材の影響をパラメータにし、鉄筋を埋め

込んだコンクリート供試体を用いて鉄筋を固定し、コンクリート部分を沈下させる実験を行った。

その主な結論として、次のことが言える。

- 1) ひび割れ発生沈下量に及ぼす载荷材齢の影響については、コンクリートの強度発現の開始をセメントの凝結の終結（普通ポルトランドセメントで材齢約 4 時間）で定義すると、その前後で大きく異なり、強度開始発現後でひび割れ発生沈下量が著しく小さくなる。例えば、かぶり厚さ 3cm のコンクリートの表面にひび割れが発生する時の沈下量は強度発現前の材齢 3 時間で約 0.67mm であり、強度発現開始後の材齢 6 時間以降で約 0.06mm である。
- 2) ひび割れ発生沈下量に及ぼすコンクリートのかぶり厚さの影響については、かぶり厚さが大きくなるとひび割れ発生沈下量も増大する傾向が見られる。
- 3) ひび割れ発生沈下量に及ぼす载荷速度の影響については、0.5mm/min と 5.0mm/min を比較すると、材齢 3 時間では、载荷速度 5.0mm/min 方が 0.5mm/min より約 1.5 倍大きく現れているが、材齢 6 時間以降では载荷速度の影響があまり見られない。
- 4) ひび割れ発生時の沈下量は、骨材量が多くなると小さくなり、コンクリートはモルタルの約 1/2 となった。
- 5) ひび割れ発生時の荷重をかぶり厚さ×幅で割った値で定義されるひび割れ発生応力指標と材齢の関係では、かぶり厚さに係わらず単調増加する一定の関係が得られる。
- 6) 载荷速度が大きくなると、応力発生時の応力指標が大きくなる傾向がある。
- 7) ひび割れ発生応力指標に及ぼす骨材の有無の影響については、沈下量の場合と逆にコンクリートの方がモルタルより大きくなる。
- 8) 本実験から得られたひび割れ発生沈下量とひび割れ発生応力指標を、弾性を仮定した有限要素法により、鉄筋上方のコンクリート表面のひずみと応力に変換すると、既往の研究で得られている引張終局ひずみや引張強度とほぼ同じ値になった。

参考文献

- 1) 佐治泰次、松藤泰典：軟練りコンクリートの沈降現象と調査について（第 1 報）、日本建築学会論文報告集、第 138 号、pp1-6、1967.8
- 2) 久保壽彦ら：超遅延剤を用いたコンクリートの打設工法（その 1）、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）、pp127-128、1982.10
- 3) 杉本 貢ら：新タイプの高流動コンクリートの開発（その 10）、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、pp209-210、1997.9
- 4) 内藤龍夫：型枠施工、鹿島出版会、pp.35-41、1992.2
- 5) 日本建築学会：建築工事標準仕様書 JASS5 鉄筋コンクリート工事
- 6) 近藤基樹：建築工事における型枠存置期間とその研究の推移、コンクリート工学、pp.14-27、1987.9
- 7) 山本正勝：鉄筋コンクリート施工における支柱の効果、建築学会研究報告、pp.139-140、1954.10
- 8) 近藤基樹：建築工事における型枠存置期間とその研究の推移、コンクリート工学、Vol.25、No.9、pp14-27、1987.9
- 9) 林 登奎ら：初期材齢コンクリートの沈下ひび割れに関する実験的な研究、日本建築学会学術講演梗概集（中国）、1999.9、pp757 - pp758
- 10) 笠井芳夫：コンクリートの初期引張強度に関する研究、コンクリート・ジャーナル、Vol.7、No7、pp1-10、1969.7

（2001年 4 月 23 日原稿受理、2001年 10 月 30 日採用決定）