

論 文

[1035] 沈下および収縮によるかぶりコンクリートの初期欠陥と
RC部材の構造挙動

正会員 ○下村 匠（東京大学工学部）

正会員 三島徹也（前田建設工業技術研究所）

正会員 佐藤文則（前田建設工業技術研究所）

正会員 前川宏一（東京大学工学部）

1. はじめに

コンクリートは打設・養生方法や環境作用によって、構造物の耐久性能や力学的性能を劣化させるさまざまな欠陥が生じることがある。とりわけ、打ち込み直後から硬化コンクリートへと、その性状が時間的に大きく変化する初期材令には欠陥が発生しやすく、この時期に発生した微細な欠陥が構造物の寿命を大きく左右してしまう場合さえ有り得る。コンクリートに内在する欠陥を定量評価し、欠陥を生じさせる作用と発生する欠陥との関係を定量的に明らかにすることは、欠陥の発生を予測し、欠陥に強いコンクリートを開発するためには重要である。本研究では打ち込み直後から初期材令に、ブリージングと骨材の沈下、および乾燥などにより自由水が減少することによる収縮によって、打ち込み面かぶりコンクリートに発生する初期欠陥を、領域平均的なコンクリートの力学特性であるTension-Stiffening効果によって評価することを試みる。

2. 実験概要2. 1 供試体

供試体の形状および寸法を図-1に示す。環境作用が供試体の力学的性能に明確に反映できるように、供試体は体積に比べ打ち込み面積の大きい形状を採用した。鉄筋は打ち込み面側と底面側にかぶり厚2cmでD10鉄筋を2本づつ計4本配し、製作に当たっては鉄筋かぶりの精度に十分注意を払った。供試体中央部には載荷時に最初にひびわれを誘発する目的でノッチを設け、またひびわれ位置での鉄筋のひずみを測定するために、この位置において鉄筋にひずみゲージを貼り付けた。試験区間は、供試体中央部80cmとした。

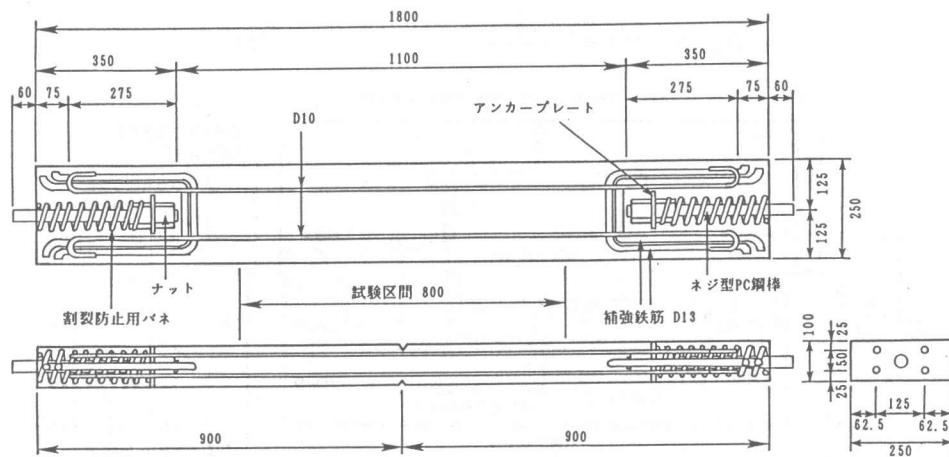


図-1 供試体の形状および寸法

単位:mm

実験に使用したコンクリートの配合を表-1に示す。

2.2 かぶりコンクリートの負担応力の検出方法

供試体の材令が十分経過した後に図-2に示す載荷装置により引張試験を行なった。得られた測定値より、打ち込み面側および底面側かぶりコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係を以下の手順により求める。打ち込み面側を例にとって説明する。

まず供試体にかかる全荷重 P_u を中央部ひびわれ位置における鉄筋のひずみで配分することにより、打ち込み面側断面に作用する荷重 P_{su} を求める。

$$P_{su} = P_u \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_u + \varepsilon_d} \quad (1)$$

表-1 実験に使用したコンクリートの配合

ここに、 ε_u ：打ち込み面側鉄筋の中央部におけるひずみ、 ε_d ：底面側鉄筋の中央部におけるひずみである。試験区間における、打ち込み面側鉄筋の平均応力 $\bar{\sigma}_{su}$ 、打ち込み面側コンクリートの平均応力 $\bar{\sigma}_{cu}$ は次の関係を満たす。

$$\bar{\sigma}_{su} = A_s \bar{\sigma}_{su} + A_c \bar{\sigma}_{cu} \quad (2)$$

ここに、 A_s ：鉄筋の断面積、 A_c ：コンクリートの断面積である。鉄筋降伏前は $\bar{\sigma}_{su}$ は次式で表わされる。

$$\bar{\sigma}_{su} = E_s \bar{\varepsilon}_u \quad (3)$$

ここに、 E_s ：鉄筋の弾性定数、 $\bar{\varepsilon}_u$ ：打ち込み面側における部材の平均ひずみである。各側における部材の平均ひずみは、図-2に示すように各鉄筋位置における試験区間両端部の相対変位を各面において測定し、試験区間長さで除することによって求める。(2)、(3)式より、コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係を得る。

$$\bar{\sigma}_{cu} = \frac{P_u - A_s E_s \bar{\varepsilon}_u}{A_c} \quad (4)$$

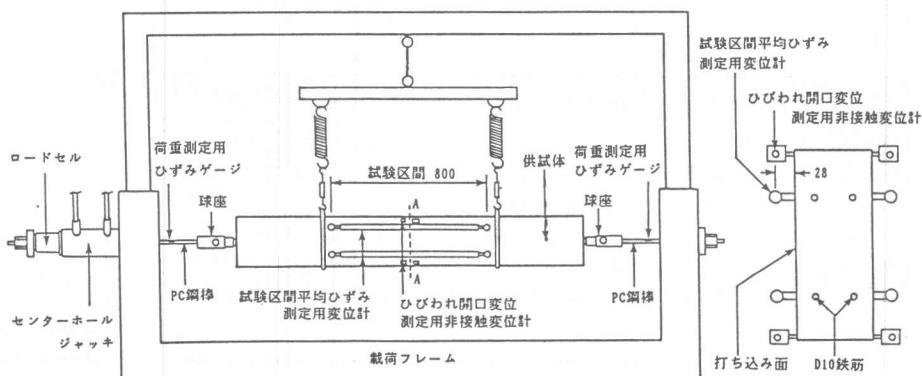


図-2 載荷装置

単位:mm

ただし(3)式が成立するのは鉄筋降伏前においてのみであるため、(4)式は鉄筋降伏前においてのみ正しい。底面側についても同様の方法でコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係を得る。

2.3 本実験における初期欠陥の評価方法

打ち込み面かぶりコンクリートに初期欠陥を発生させるため、材令初期において各供試体に表-2に示す環境履歴を与えた。供試体の材令が十分経過した後に2.2で述べた方法により引張試験を行ない、打ち込み面側および底面側かぶりコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係を検出する。ブリージングによる沈下や水分を蒸発させようとする環境作用によって打ち込み面側かぶりコンクリートには、顕在的あるいは潜在的に品質の劣る部分、すなわち『初期欠陥』が存在しており、これらは鉄筋の自由な伸びを拘束しようとする領域平均的なコンクリートの引張特性であるTension-Stiffening効果に影響する。一方、底面側かぶりコンクリートは初期材令において、沈下の影響を受けにくく、また比較的良好な水分環境が確保されるため初期欠陥は少ないと考えられる。本実験では、

表-2 各供試体に与えた環境履歴

供試体	与えた環境履歴
No1	打ち込み直後より材令4時間まで打ち込み面にジェットヒーターによる熱風を当てる
No2	材令20時間より材令24時間まで打ち込み面にジェットヒーターによる熱風を当てる
No3	材令24時間より材令28時間まで打ち込み面にジェットヒーターによる熱風を当てる
No4	打ち込み直後より材令4日まで打ち込み面に扇風機による風を当てる
No5	打ち込み直後より材令4日まで打ち込み面に扇風機による風を当てる
No6	材令1日より材令14日まで散水し麻布とシートをかぶせた湿度100%湿润養生

3. 実験結果と考察

注) 各供試体とも上記以外は室内において気乾養生

3.1 材料および環境履歴と初期欠陥の関係

各供試体の試験材令、試験時圧縮強度、また各側かぶりコンクリートの引張特性を代表する数値として、2.2で述べた方法により求めた各側かぶりコンクリートの平均応力を試験区間平均ひずみが0~1000 μ の範囲において平均した値(打ち込み面側 σ_{cu} 、底面側 σ_{cd})とそれを圧縮強度の2/3乗で除した値、および σ_{cu} と σ_{cd} の比などを表-3にまとめる。 σ_{cu} と σ_{cd} の比は、打ち込み面側かぶりコンクリートと底面側かぶりコンクリートの引張特性を比較する際の指標となる値である。

表-3 実験結果の一覧

供試体	試験 材令 (日)	試験区間 ひびわれ 本数(本)	圧縮強度 f'_c (kg/cm ²)	打ち込み面側引張特性		底面側引張特性		σ_{cu}/σ_{cd}
				σ_{cu} (kg/cm ²)	$\sigma_{cu}/f'_c^{2/3}$	σ_{cd} (kg/cm ²)	$\sigma_{cd}/f'_c^{2/3}$	
No1	28	5	322	12.4	0.26	19.2	0.41	0.65
No2	34	6	293	8.8	0.20	12.3	0.28	0.71
No3	38	7	376	8.7	0.17	10.2	0.20	0.85
No4	36	5	364	4.2	0.08	8.6	0.17	0.49
No5	36	5	507	10.4	0.16	10.5	0.17	0.99
No6	17	6	336	12.3	0.25	13.3	0.27	0.93

注) σ_{cu} , σ_{cd} は平均ひずみ0~1000 μ の範囲において、かぶりコンクリートが負担している応力の平均値である。

各供試体について、打ち込み面側・底面側かぶりコンクリートの試験区間における平均応力-平均ひずみ関係を図-3~図-8に示す。コンクリートの平均応力を求める式(4)が適用できる

のは鉄筋降伏前についてであるので、図-3～図-8は鉄筋が降伏した時点まで描いてある。

以下に供試体ごとに初期欠陥と引張特性の関係を考察する。

供試体No1

材料はW/C=62.4, W=226の水分の多い配合である。環境履歴は打ち込み直後から4時間打ち込み面にジェットヒーターによる熱風を当てた。打ち込み面側と底面側の引張特性の差異は非常に大きい。つまり環境作用によって、同一部材内においても性質のまったく異なるコンクリートが形成されたことを意味する。打ち込み直後に高温となることによって、打ち込み面側かぶりコンクリートの水和は促進されるが、同時に急激に自由水を奪われることによって収縮が生じ、また水和も抑制される。

これらの相反する作用によって、打ち込み面側かぶりコンクリートの引張特性が決定されたと考えられる。一方、底面側は高温となる促進作用のみが貢献するため引張強度は非常に高い。

供試体No2

材料はW/C=62.4, W=226であり、供試体No1と同配合である。環境履歴は材令20時間より4時間打ち込み面にジェットヒーターによる熱風を当てた。つまり、供試体No1と材料・環境作用が同じで、環境作用を与える材令が異なるケースである。打ち込み面側と底面側の引張特性の差異は存在するものの、供試体No1に比べると小さい。環境作用の強さが同じであっても、作用を受ける時点におけるコンクリートの水和の進行状態が異なることによって、受ける影響の大きさが異なり、水和の進んでいない打ち込み直後のコンクリートの方が環境作用の影響を大きく受けるといえる。

供試体No3

材料はW/C=55, W=168の最も標準的な配合とした。環境履歴は材令24時間より4時間打ち込み面にジェットヒーターによる熱風を当てた。打ち込み面側かぶりコンクリートと底面側かぶりコンクリートの性状の差は、平均ひずみが小さい範囲においては小さいが平均ひずみが大きくなるにしたがい大きくなっている。つまり引張強度的な性質においてよりも付着特性において、両側コンクリートの性状

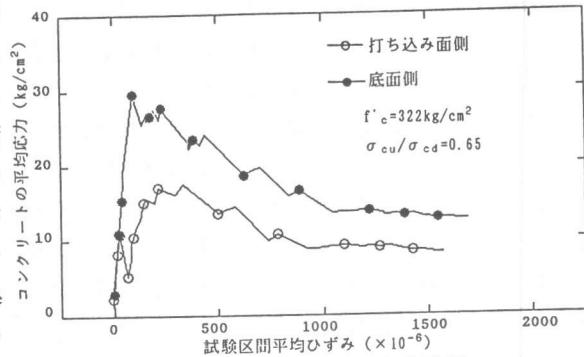


図-3 供試体No1実験結果

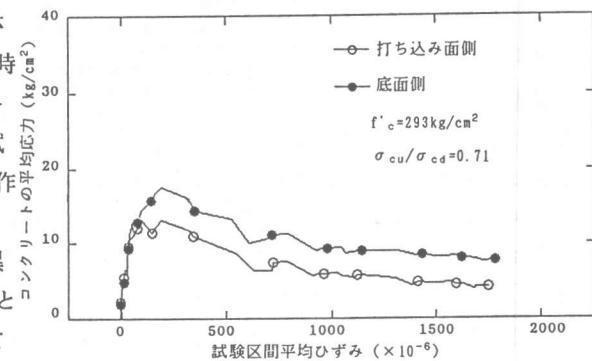


図-4 供試体No2実験結果

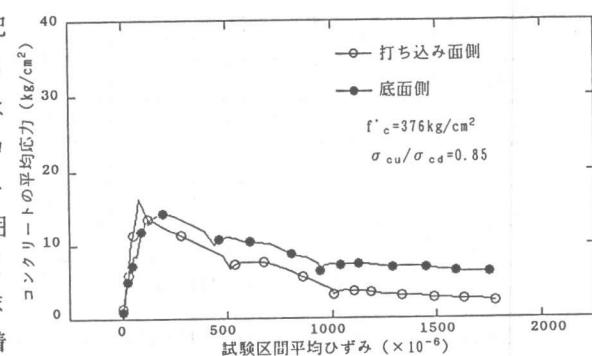


図-5 供試体No3実験結果

の差は大きいといえる。コンクリートに存在している初期欠陥が引張強度や付着性状など引張特性のうちのどのような性質に、具体的にどう影響するのかは今後明らかにする必要がある。

供試体No4

材料はW/C=6.0のモルタルである。環境履歴は打ち込み直後より材令4日まで打ち込み面に扇風機による風を当て続けた。ブリージングによる沈下が著しく、ブリージング水により打ち込み直後の乾燥は抑制されたが、鉄筋に沿って沈下ひびわれが発生し、ブリージング水がひいた後の乾燥によりさらに開口した。これは沈下による欠陥と収縮による欠陥は条件によっては複合する場合があることを示す。

打ち込み面側かぶりコンクリートの負担応力は底面側のそれに比べて非常に小さい。特に平均ひずみの大きい範囲での負担応力が小さく、沈下ひびわれにより付着力が損なわれている。

供試体No5

材料はW/C=4.5, C=433の単位セメント量の多い配合である。環境履歴は供試体No4と同じく打ち込み直後より材令4日まで打ち込み面に扇風機による風を当て続けた。両側のかぶりコンクリートの引張特性の差異は非常に小さい。これは供試体No5がブリージングの少ないコンクリートであり、沈下による欠陥が発生しなかったことの貢献が大きいためと考えられる。

しかし、両面ともかぶりコンクリートの負担応力の絶対量は圧縮強度に比べて非常に小さい。これは、打ち込み面に風を当てるることにより、打ち込み面側かぶりコンクリートだけでなく底面側も乾燥の影響を受けたためと考えられるが、初期材令におけるコンクリート内部の水分移動機構については今後検討する必要がある。

供試体No6

東京大学コンクリート研究室が開発したハイパフォーマンスコンクリートを用いた。¹⁾スラグ、フライアッシュ、膨張混和剤など混入する粉体・混和剤を工夫し、フレッシュコンクリートとしての特性、初期欠陥に対する抵抗性、硬化後の耐久性能を改善したコンクリートである。環境履歴は、材令1日より湿潤養生を施した。供試体No6はブリージングの少ない優れた材料に対し、良好な環境を与えるこ

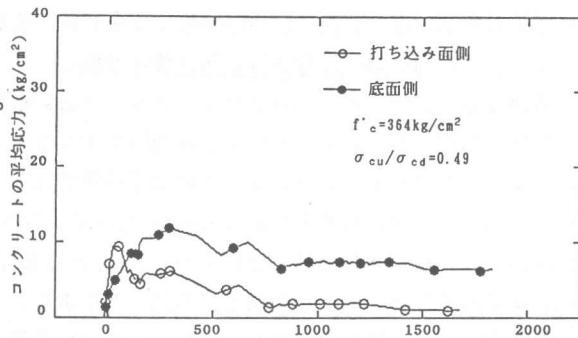


図-6 供試体No4実験結果

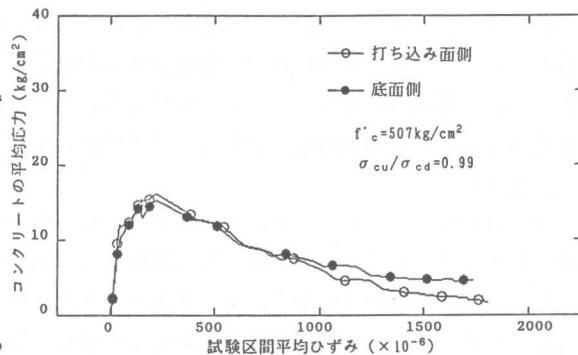


図-7 供試体No5実験結果

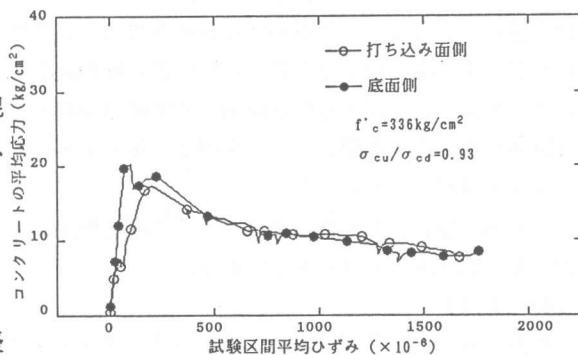


図-8 供試体No6実験結果

とにより、高品質な打ち込み面かぶりコンクリートが実現できることを検証したケースである。両側のかぶりコンクリートの引張特性の差異は非常に小さく、圧縮強度に比べた負担応力の絶対量も大きい。初期欠陥が極力発生しないようにした供試体No6の両側かぶりコンクリートの引張特性の差異が小さいことは、引張特性による初期欠陥評価の妥当性の根拠となり得るといえる。

3. 2 初期欠陥の定量評価の可能性と問題点

本研究では、打ち込み面かぶりコンクリートに初期欠陥を発生させた供試体を引張試験に供し打ち込み面側かぶりコンクリート、底面側かぶりコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係を検出した。さらにかぶりコンクリートの引張特性を代表する数値として、各側かぶりコンクリートの平均応力の、平均ひずみが0~1000 μ の範囲における平均値（打ち込み面側 σ_{cu} 、底面側 σ_{cd} ）を求め、同一供試体におけるそれらの比 σ_{cu}/σ_{cd} を打ち込み面側かぶりコンクリートの引張特性の優劣の指標とした。この値と打ち込み面かぶりコンクリートに発生している初期欠陥の量との間に高い相関が存在するなら、この値により初期欠陥の定量評価が可能であるといえる。本実験結果によれば、初期に急激に乾燥させた供試体No1、ブリージングによる沈下が著しい供試体No4などのように沈下・収縮による初期欠陥が発生していると考えられる場合は σ_{cu}/σ_{cd} の値が小さく、ある程度水和が進んでから乾燥させた供試体No2、No3、W/Cの小さい供試体No5、および材料・養生条件の良い供試体No6などのように比較的健全であると考えられる場合は σ_{cu}/σ_{cd} の値が大きい。以上のことから、引張特性には初期欠陥の影響が現われ、引張特性による打ち込み面かぶりコンクリートに存在する初期欠陥の定量評価は可能であると考えられる。ただし、引張特性により評価されるコンクリートの品質が有害物質の侵入に対する抵抗性など、コンクリートの品質を表わすその他の量とどのような相関があるのかは今後検証する必要がある。

4. まとめ

本研究では、ブリージングによる沈下および自由水が減少することによる収縮によって、打ち込み面かぶりコンクリートに発生する初期欠陥に対し、領域平均的なコンクリートの力学特性であるTension-Stiffening効果による評価を試みた。本研究により以下のことが明らかになった。

- 1)かぶりコンクリート中に顕在的あるいは潜在的に存在する初期欠陥はコンクリートの引張特性に影響を及ぼし、引張特性により初期欠陥を評価することが可能である。
- 2)コンクリートの品質は水和の進行による正の寄与と欠陥の発生による負の寄与により決定される、コンクリートの品質を予測するためには双方を考慮し総合評価する必要がある。
- 3)環境の作用量が同じでも、作用を受ける時点でのコンクリートの水和の進行度の違いによってコンクリートが受ける影響は異なる。コンクリートに発生する欠陥を予測するためには、環境の作用量だけではなく、作用を受ける時点でのコンクリートの状態を考慮する必要がある。
- 4)沈下により生じたひびわれが、その後の乾燥によりさらに開口することがある、すなわち沈下による欠陥と収縮による欠陥は複合する場合がある。
- 5)環境の作用量・作用する材令が同じであっても、配合の違いによってコンクリートが受けるダメージは異なるものとなる。

これらの知見をもとに今後は、沈下や環境作用によるコンクリートの欠陥の発生を統一的に予測する研究を進めてゆく予定である。

【参考文献】

- 1)小沢一雅、前川宏一、岡村 甫：ハイパフォーマンスコンクリートの開発、コンクリート工学年次論文報告集 第11巻 (1989)