

論文 打重ね部の細孔構造および耐久性能に関する検討

陶 佳宏*1・松下 博通*2・鶴田 浩章*3・相原 康平*4

要旨：打重ねを行ったコンクリートは、その打重ね部において耐久性能の低下が懸念される。これは、打重ね部の細孔構造と密接に関係しているものと思われる。そこで本研究では、打重ね面の性能を定量化することを目的として、打重ね部および健全部の微小硬度および細孔径分布を測定し、耐久性能と細孔構造の関係について検討を行った。その結果、打重ね部の微小硬度が小さくなると耐荷性能、耐久性能は低下した。また、打重ね部の全細孔容積は大きくなる傾向にあり、特に $0.05 \mu\text{m}$ 以上の細孔容積が耐久性能に影響を及ぼすことが推測された。

キーワード：打重ねコンクリート、細孔径分布、微小硬度、耐久性能

1. はじめに

コールドジョイントは、コンクリートを打ち込む際に適切な時間間隔より遅れて打ち込む場合や打重ね面の処理が不適切な場合に生じるもので、発生させないように施工を行うことが前提とされている。

コールドジョイントが形成されると、耐荷性能、使用性能、耐久性能および美観に悪影響を及ぼすことが懸念される。しかし、現在の土木学会「コンクリート標準示方書」には、コールドジョイントの発生条件や防止対策、発生後の構造物への影響度や対処方法についての具体的な記述はなされていない。今後、従来の設計基準が仕様規定型から要求される品質を満足するように構造物を施工する性能照査型へ移行するに伴い、打重ね面の性能についてのより詳細な検討が必要とされている。

コールドジョイントの発生にはコンクリートの凝結性状が大きく影響することは容易に推測されるが、凝結性状は材料の種類や環境条件、配合等により異なる。そのため、打重ねの許容

範囲等を単純に時間を指標として表すことは困難であり、本稿ではプロクター貫入抵抗値を指標として用いた。

打重ねを行ったコンクリートは、著者らの研究¹⁾において耐荷性能や耐久性能が低下することがわかっている。耐荷性能や耐久性能が低下する原因の1つに、打重ね面に堆積したブリーディング水やレイタンスが挙げられる。これらが堆積すると、打重ね面では健全部と比較して空隙の構造が変化すると考えられ、その結果その部分の強度および耐久性能は低下することが予測される。本稿では、打重ねを行う時の下層コンクリートのプロクター貫入抵抗値を変化させて供試体を作製し、打重ね部および健全部の微小硬度、細孔径分布を測定し、耐久性能と細孔構造の関係について検討を行った。

2. ビッカース硬さと耐久性能の関係

これまでの報告²⁾より、曲げ強度試験、促進中性化試験および塩水噴霧試験の試験結果をそれぞれ図-1~3に示す。供試体は材齢7日まで

*1 九州大学大学院助手 工学研究院建設デザイン部門 (正会員)

*2 九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門 工博 (正会員)

*3 九州大学大学院助教授 工学研究院建設デザイン部門 博士(工学) (正会員)

*4 九州大学大学院工学府 建設システム工学専攻 修士課程

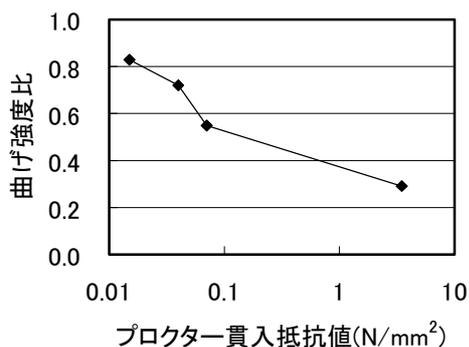


図-1 プロクター貫入抵抗値と曲げ強度比の関係

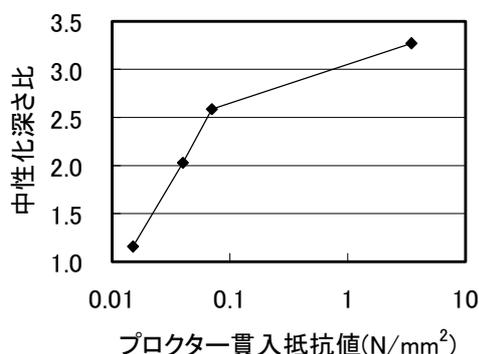


図-2 プロクター貫入抵抗値と中性化深さ比の関係

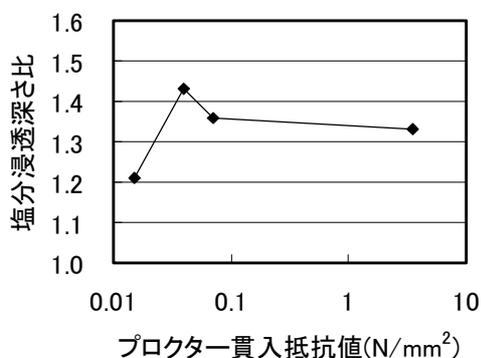


図-3 プロクター貫入抵抗値と塩化物イオン浸透深さ比の関係

水中養生を行い、直ちに促進中性化試験および塩水噴霧試験を開始した。促進中性化試験の試験環境は、二酸化炭素濃度 15%、温度 30℃、湿度 60%RH で、これを 2 週間行った。また、塩水噴霧試験は塩水濃度 3%で 20 サイクル行った。なお、噴霧 12 時間、乾燥 12 時間を 1 サイクルとした。中性化深さは打重ね面付近において進行が大きくなっており、始発時間で打ち重

ねた供試体では一体供試体のおよそ 3 倍であった。また、打重ねにより曲げ強度が 2 割程度低下しても、一体供試体と同等の中性化深さであった。また、塩化物イオン浸透深さは、打重ねを行った供試体において若干大きい値（一体供試体の 1.3~1.4 倍）となったが、曲げ強度比の低下率による影響は、中性化と比較して小さいものであった。

以上の結果から、打重ね面に脆弱な層が存在することが推測できた。本章ではビッカース硬さ試験により脆弱な層の存在の確認を行った。ビッカース硬さ試験は、主に金属材料の硬さ測定に使用されていたが、近年コンクリート構造物の耐久性評価にも適用されている²⁾。なお、本実験におけるビッカース硬さ試験は、測定面にひし形のくぼみを付けたときの載荷荷重 $F(N)$ と、くぼみの表面積 $S(mm^2)$ から求めたビッカース硬さ(HV)値を用いて評価した。

2.1 実験概要

(1) 使用材料

本実験で使用した材料は、セメントとして普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm³，比表面積：3290cm²/g），細骨材として海砂（密度：2.58g/cm³，吸水率：1.60%，粗粒率：2.67），粗骨材として碎石（密度 2.91 g/cm³，吸水率：0.70%，最大寸法：20mm），混和剤としてリグニンスルホン酸系 AE 減水剤とアルキルアリルスルホン酸系空気連行剤を用いた。

(2) 配合

コンクリートの配合は、表-1 に示すように、W/C=55%，コンクリートの練上がり温度を 20℃とし、スランプが 12.0±2.5cm，空気量が 4.0±1.0%となるように混和剤の量を変化させて調整した。なお、このときの最終ブリーディ

表-1 コンクリートの配合表

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)			
		W	C	S	G
55	44	175	318	777	1115

AE 減水剤：セメント 100kg に対して 250ml 使用

ング量は $0.462\text{cm}^3/\text{cm}^2$ であった。

(3) 供試体

供試体は $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の縦打ち角柱供試体を使用した。供試体作製の際は、すべて鉛直打重ねとし、まず下層コンクリートを型枠中央まで打ち込んだ後、表面処理は一切行わず、プロクター貫入抵抗値が 0.015 , 0.04 , 0.07 , $3.5\text{N}/\text{mm}^2$ (本研究では 0.5 , 2 , 4.5 , 7.8 時間後) に達したときに下層コンクリートの上部に同配合のコンクリートを打ち重ねた。各層はそれぞれ 2 層に分け、突き棒で 10 回 (10cm^2 につき 1 回) 突き固めた後、木槌で型枠を数回叩いた。また、上層コンクリートを打ち重ねる際には、下層コンクリートまで突き棒が貫入しないように突固めを行った。上層コンクリート打込み後、室温 20°C 、湿度 $60\%\text{RH}$ の室内でそれぞれ 24 時間放置した後脱型し、材齢 28 日まで 20°C で水中養生を行った。供試体は各打重ね間隔につき 2 体作製した。供試体の一覧表を表-2 に示す。

表-2 供試体一覧表

供試体	打重ねを行った時の下層コンクリートのプロクター貫入抵抗値(N/mm^2)
N	0
C-1	0.015
C-2	0.04
C-3	0.07
C-4	3.5

2.2 実験方法

JIS Z 2244 に準じて行った。試験片は、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の縦打ち角柱供試体の中心(打重ね面)から上下 5cm 付近を、コンクリートカッターを用いて切断し、さらに打設面と垂直な方向に 2 等分し、この面を研磨して測定面とした。微小硬度試験機に測定面を上にして置き、端の方から順にくぼみを押し測定を行った。測定位置は、ビッカース硬さ値が小さくなる点が見つかるまでは 10mm 間隔で、それ以降は打重ね部と健全部の境界が特定できるまで、その点から

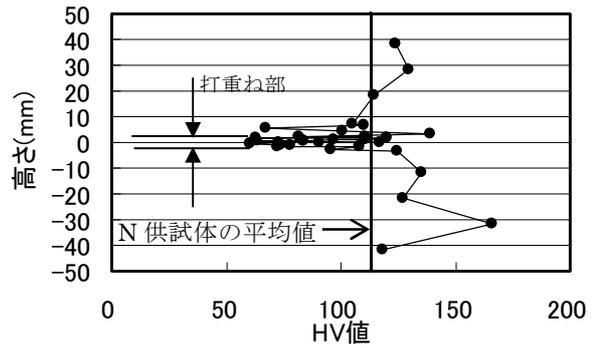


図-4 HV 値と測定位置の関係 (C-3 供試体)

表-3 HV 値の測定結果

供試体	HV値		打重ね部の厚さ(mm)
	健全部	打重ね部	
N	113	—	—
C-1	139	100	3.19
C-2	114	88	3.28
C-3	119	80	2.49
C-4	114	81	5.43

両方向に $0.2 \sim 0.3\text{mm}$ 間隔で各点一回のみ測定した。なお、測定面に露出した粗骨材は避けモルタル部のみ測定した。また、ビッカース硬さ値は式(1)より求めた。

$$\text{HV} = 0.102\text{F}/\text{S} = 0.1891\text{F}/\text{d}^2 \quad (1)$$

ここに HV : ビッカース硬さ

F : 載荷荷重(N)

S : くぼみの表面積(mm^2)

d : くぼみの対角線の平均値(mm)

2.3 実験結果

図-4 に打重ねを行わない N 供試体と、 $0.07\text{N}/\text{mm}^2$ (C-3) で打ち重ねた供試体の HV 値と測定位置の関係を示す。図-4 に示すように HV 値が健全部と比較して著しく小さくなった範囲を打重ね部とし、打重ね部の中心からの垂直方向の距離を測定位置の高さ(mm)とした。N 供試体ではばらつきはあるものの HV 値は $100 \sim 120$ 程度であったのに対し、C-3 供試体では、打重ね面付近において HV 値が $20 \sim 30\%$ 小さくなっており、最も小さい値では 60 程度で

あった。これは、下層コンクリートのブリーディング水やレイタンスの堆積による脆弱層であると思われる。本実験では HV 値のばらつきが大きかった。これは、細骨材が存在する位置を測定したか、表面に露出していない粗骨材が存在する位置を測定したか、または骨材がないセメントペースト上を測定したかで HV 値が大きく異なるためだと思われる。

表-3 にそれぞれの供試体の健全部と打重ね部の HV 値の平均値と打重ね部の厚さを示す。打重ねを行ったいずれの供試体においても打重ね面付近において HV 値が小さくなっており、その平均値は打重ね間隔が長くなるにつれて若干小さくなっているのが分かる。この HV 値が連続して小さくなっている範囲を打重ね部の厚さとした。打重ね部の厚さは C-4 供試体で大きくなっているが、C-4 供試体以外は打重ね間隔に関係なく 3mm 程度であった。

打重ね部の HV 値の平均と曲げ強度比(打重ねコンクリートの曲げ強度/一体供試体の曲げ強度)、中性化深さ比(打重ね部の中性化深さ/健全部の中性化深さ)、塩化物イオン浸透深さ比(打重ね部の浸透深さ/健全部の浸透深さ)の関係を図-5~7 に示す。なお、図-6、図-7 の縦軸は、打重ね部の浸透深さの最大値である。打重ね部の HV 値が低下すると、曲げ強度比は低下し浸透深さ比(特に中性化深さ比)は増加しているのが分かるが、塩化物イオン浸透深さ比と打重ね部の HV 値との間に明確な関係を見いだすことはできなかった。このことから、HV 値の低下による浸透速度への影響は、中性化の方が大きいことが分かる。また、打重ね部の厚さと曲げ強度比、浸透深さ比を表-4 に示す。本実験では、打重ね部の厚さが C-4 以外の供試体において打重ね間隔に関係なくほぼ一定であったため、打重ね部の厚さが耐荷性能、耐久性に及ぼす影響について明確にすることはできなかった。

3. 細孔径分布と耐久性能の関係

細孔はコンクリートの様々な力学特性、特に

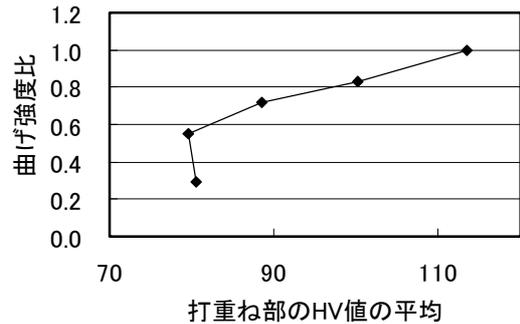


図-5 打重ね部の HV 値の平均と曲げ強度比の関係

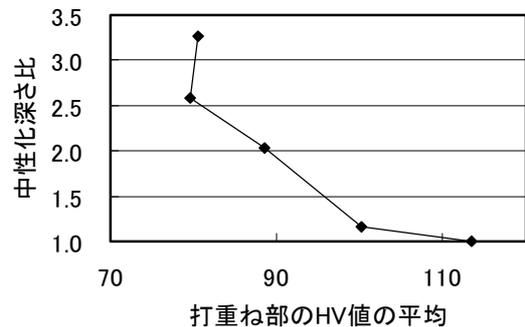


図-6 打重ね部の HV の平均と中性化深さ比の関係

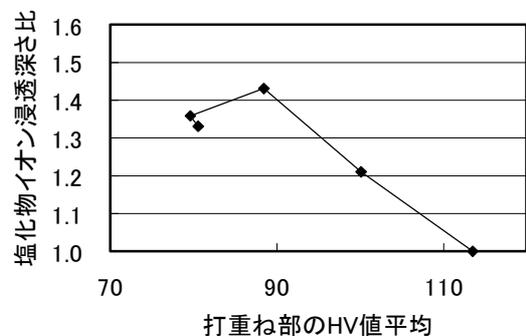


図-7 打重ね部の HV 値の平均と塩化物イオン浸透深さ比の関係

表-4 打重ね部の厚さと曲げ強度比および浸透深さ比

打重ね部の厚さ(mm)	曲げ強度比	中性化深さ比	塩化物イオン浸透深さ比
—	1.00	1.00	1.00
3.19	0.83	1.16	1.21
3.28	0.72	2.03	1.43
2.49	0.55	2.59	1.36
5.43	0.29	3.27	1.33

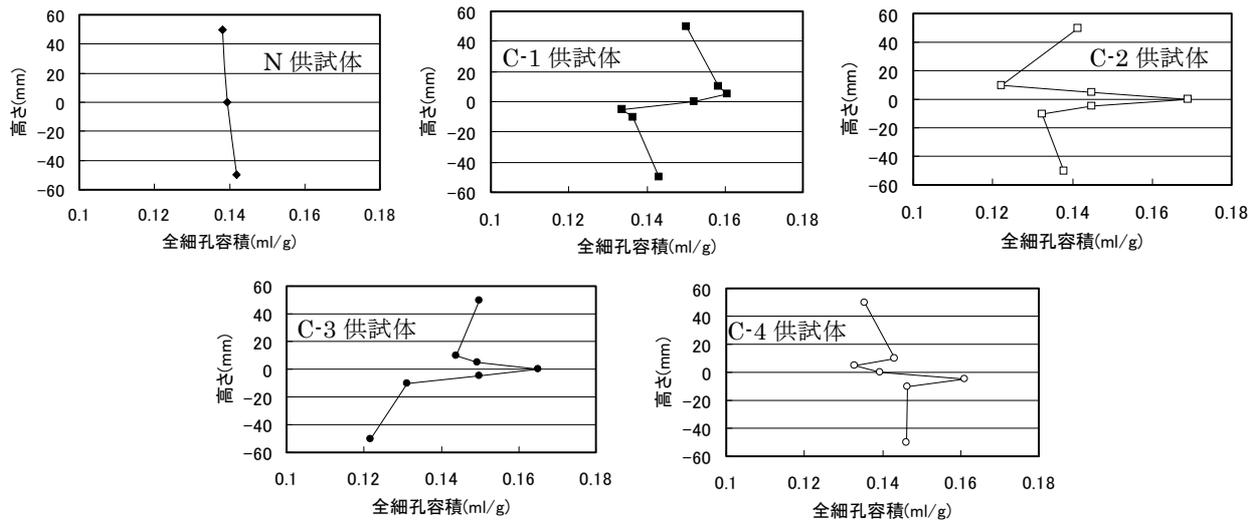


図-8 全細孔容積と測定位置の関係

物質透過性に大きな影響を及ぼすと考えられる。本章では、ポロシメータを用いて打重ね部の細孔径分布の測定を行い、耐荷性能および耐久性との関係に着目した。

3.1 実験概要

使用材料、配合および供試体の作製方法は 2 章と同様とした。

本実験では、水銀圧入式ポロシメータを用いて、モルタル部分の細孔径分布および細孔容積を測定した。

測定用の試料は、打重ね面を目視によって判断できなかったこと（特に、打重ねを行ったブロック貫入抵抗値が小さい供試体）や、沈降などの影響により打重ね面が水平となっていないことを考慮して、1 つの供試体につき打重ね面付近から 5mm 間隔で 5 箇所と、打重ね面から 5cm の位置から 1 箇所ずつ、合計 7 箇所から採取した。試料は 5mm 四方に砕き、1 箇所につき約 2g とした。一体供試体については、中心部と中心部から 5cm の位置から合計 3 箇所採取した。測定する際には、真空ポンプを用いて真空引きを 12 時間行い、試料を乾燥させた。

3.2 実験結果

図-8 に各供試体における全細孔容積と測定位置の関係を示す。一体供試体以外のいずれの供試体も、中央付近で全細孔容積が大きくなる

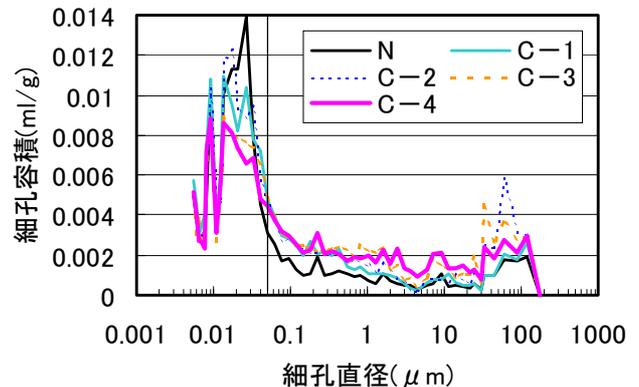


図-9 打重ね部の細孔径分布

表-5 打重ね部の細孔容積

供試体	細孔容積(ml/g)		
	全細孔	0.05 μm以上	0.05 μm以下
N	0.135	0.047	0.093
C-1	0.161	0.054	0.106
C-2	0.169	0.066	0.104
C-3	0.165	0.076	0.089
C-4	0.161	0.074	0.087

箇所が存在している。本実験では、試料の大きさを 5mm 四方としたが、C-4 供試体を除いて打重ね部の厚さが 3mm 程度であったことや、打重ね面が水平となっていないことから、純粹に打重ね部のみの試料を得ることができなかった。そのため、5 箇所から採取した試験片のうち最も全細孔容積の多い箇所を打重ね部としたが、打重ね部と健全部が同一試料に存在し

ていることや、打重ね部が複数の試料に分割されている可能性があることなどから、必ずしも全細孔容積が最大となる点の数値が打重ね部の全細孔容積を表しているとは言えない。しかし傾向としては、打重ね部において全細孔容積が大きくなっているのが分かる。各供試体の打重ね部における細孔径分布を図-9に示す。N供試体の測定値は供試体の中央部のものを採用した。いずれの供試体においても、 $0.01\sim 0.1\mu\text{m}$ 程度の細孔が多くなるという傾向が確認されたが、打重ね間隔が経過するにつれて、 $0.05\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$ の径の大きい細孔が増加し、 $0.05\mu\text{m}$ 以下の径の小さい細孔が減少する結果となった。

そこで、各供試体の打重ね部の全細孔容積と、 $0.05\mu\text{m}$ を境にそれぞれ細孔容積の和を算出した結果を表-5に示す。一体供試体や打重ね供試体の健全部と比較して、打重ね部の全細孔容積および $0.05\mu\text{m}$ 以上の細孔容積は大きくなっており、全細孔容積は $0.16\sim 0.17\text{ml/g}$ であった。既往の研究では、 $0.075\sim 7.5\mu\text{m}$ の総細孔容積がW/Cを大きくすることにより約 0.02ml/g 増加すると、中性化深さは約2.4倍となる³⁾と報告されている。本実験においては $0.05\mu\text{m}$ 以上としているが、細孔容積が約 0.02ml/g 増加すると中性化深さは約2倍となっており、W/Cを変化させた時と同様な結果が得られた。また、既往の研究では、塩化物イオンに関して耐久性能に影響を及ぼす細孔直径の範囲は $0.05\mu\text{m}\sim 2\mu\text{m}$ ^{4), 5)}とあるが、本実験の結果から中性化に関しても同様のことが言えると思われる。一方、塩化物イオンの浸透に関しては、打重ね部において健全部より大きくなっているが、細孔直径との関係を明確にすることはできなかった。

4. まとめ

本研究で得られた知見をまとめると以下のようになる。

(1) 打重ねを行った供試体の打重ね部付近のピ

ッカーズ硬さ値は、健全部や一体供試体と比較して、 $20\sim 30\%$ 小さい値となった。

(2) 打重ね部のHV値の平均が低下すると、曲げ強度比は低下し浸透深さ比は増加する傾向にあるが、打重ね部の厚さが耐荷性能、耐久性能に及ぼす影響については明確にすることができなかった。

(3) 打重ね部の全細孔容積は、健全部のそれと比較して大きい値を示した。

(4) 打重ね部では、健全部と比較して径の大きい細孔($0.05\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$)が多く存在しており、この範囲の細孔容積が耐久性能に大きく影響していると考えられる。

参考文献

- 1) 陶佳宏, 松下博通, 藤本良雄, 亀澤靖: 打重ねコンクリートの耐久性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23-2, pp.775-780, 2001
- 2) 大脇英司, 宇治公隆, 坂井悦朗, 大門正機: コンクリート構造物の耐久性評価へのピッカーズ硬さ測定法の応用, セメント・コンクリート, No.638, pp36-41, 2000
- 3) 鄭載東, 平井和喜, 三橋博三: 中性化速度に及ぼすコンクリートの調合及び細孔構造の影響に関する実験的研究, コンクリート工学論文集, Vol.1, No.1, pp.61-73, 1990.1
- 4) 桜田良治, 山下義秀, 佐藤満: コンクリートの塩分浸透に及ぼす骨材の特性の影響について, 土木学会第52回年次学術講演集V部門, V-113, pp.226-227, 1997
- 5) 桜田良治ほか: コンクリートの細孔構造と塩化物イオンの拡散係数, 第25回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集, pp.137-142, 1998