

戦-22 性能規定に対応したコンクリート構造物の施工品質管理・検査に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 22～平 26

担当チーム：材料地盤研究グループ（基礎材料）、

研究担当者：渡辺博志、古賀裕久、伊佐見和大、

【要旨】

コンクリートに求められる性能を明確にしたより合理的な施工品質管理・検査体系が求められている。基礎材料チームでは、コンクリートの配合や打設に関する品質管理、検査について検討を行う。H22 年度は、現状の課題の整理などを行った上で、室内実験や実構造物調査による検討を行った。室内実験においては、高さのある部材では、良好な配合のコンクリートでも高さ方向に強度などの品質が異なることを確認した。ペースト分の分離が著しい配合では、この品質の差が顕著に現れることがわかった。この高さ方向の品質の差については、超音波伝播速度などいくつかの試験法で検知できたものの、精度などに関する課題も明らかになった。

キーワード：コンクリート、品質管理、打込み、養生、非破壊試験

1. はじめに

コンクリート構造物に関する施工品質管理や検査は、従来から用いられてきた材料・工法を念頭において定められた各施工段階における試験や、出来形検査、目視による検査や強度試験等で構成されており、出来上がりコンクリートそのものの各種性能を直接的に検査する方法は、現状では確立されていない。このため、ともすれば従来の仕様にこだわることとなり、新材料・新工法を柔軟に活用することが難しい。

一方で、コンクリート構造物への要求性能の多様化に伴い、施工に起因したコンクリート構造物の不具合に関する現場技術相談も多くなっている。

そこで、受け取り検査時の各種性能を担保した品質検査等の充実や性能規定に対応したコンクリートの施工標準が求められている。本研究では、特にコンクリート構造物の耐久性に影響する打込み等の施工要因や寒冷地での養生条件に着目し、検討を行う。基礎材料チームでは、主として打込み時の課題について検討を行う。

一方、単位水量を増やすなどしてスランプを増大させたコンクリートでは、これを構成する水や骨材などの材料分離が生じやすくなることが知られている。ただし、最近では、高性能 AE 減水剤などの使用実績も増えており、技術が蓄積されているので、コンクリートの品質を損なわずにスランプを増大させることも十分可能と考えられている。

しかし、既存の品質管理・検査体系は、暗黙の内にスランプ 8cm のコンクリートが使用されることを前提に構築されており、スランプを増大させた際に生じる材料分離などの懸念に対応したものとはなっていない。この点について検討するためには、コンクリートの打込み時の材料分離の程度やそれによって生じる性能の変化について把握する必要があるが、現状では十分に明らかになっていない。

そこで、H22 年度は、配合の異なるコンクリートを用いた室内実験や、実構造物の調査などを行って検討した。

2. 2 室内実験

コンクリートの部材では、打込み時・締固め時にブリーディング水の上昇や骨材の沈降が生じるため、高さ方向に品質の差が生じることが古くから知られている（例えば、1）、2）。しかし、既存の検討は強度的な側面からの品質評価が主で、耐久性に関する知見は少なかった。

そこで、スランプやブリーディング量の異なる 3 種類の配合のコンクリートを用い、高さ 1m の供試体を作製して材料分離の影響を検討した。詳細は、3 章に報告する。

2. 検討の概要

2. 1 打込みに関する課題

従来、一般的な土木用コンクリート構造物では、スランプ 8cm のコンクリートが用いられる場合が多かった。しかし、近年、コンクリート構造物の耐震性などに関する要求の高まりから部材に配置される鋼材量が増えており、コンクリートを確実に充てんするためには、よりスランプの大きい配合が望ましいとの指摘がある。

2. 3 実構造物の調査

コンクリートの施工の良否が耐久性に与える影響について検討するため、過去に建設省行った調査の結果から部位によってコンクリートの品質に違いが生じているおそれのある構造物を選定した。このうち、東北地方に位置する2件の構造物（橋脚1件、橋台1件）を対象に、外観調査およびコア試料の採取等を行った。

コア試料を用いた試験の一部を継続して実施しているところであり、調査結果は来年度以降にとりまとめて報告する。

3. 打込みに関する室内実験

3. 1 概要

従来、一般的な土木構造物ではスランブ8cmのコンクリートが用いられてきた。しかし近年、部材形状や配筋量、施工条件等を考慮して、打込み時点での最小スランブを設定することが提案されている。

一方、コンクリートのスランブを増大させると、既往の研究からブリーディング量や粗骨材の分離の程度などがやや大きくなるおそれがあるが、これらが構造体コンクリートの品質に及ぼす影響については必ずしも十分には明確でない。また、これらの影響が生じたおそれのあるコンクリートを硬化後に評価する方法も確立されていない。そこで、種々の配合のコンクリートで1mの高さの供試体を作製して検討した。

3. 2 実験方法

3.2.1 コンクリートの配合および供試体

配合を、表-1に示す。配合選定は、土木学会の「施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針(案)」²⁾を参考にし、配合1および2は、適切に施工できる単位水量および単位セメント量とした。配合3は、材料分離が生じやすいように単位セメント量を減らした上で、高性能 AE 減水剤を過剰に用いてペーストを流動化させることでスランブを目標にあわせた。なお、配合1～3ともに、細骨材はブリーディングが生じやすいように粒径0.15mm以下の微粒分を除去した。

供試体は、700mm×400mm×1000mmの壁状無筋コンクリートで、2層に分けて打込んだ。打込み時間間隔は、30分程度である。締固めは、棒状バイブレータを用いて、供試体断面の中心部で各層15秒（配合1）、または、各層10秒（配合2、3）実施した。締固め後、ブリーディング量を測定するため、天端に上昇したブリーディング水を随時除去した。なお、打重ね時に下層コンクリート上面にあったブリーディング水は除去しなかった。

壁状供試体は配合ごとに2体ずつ作製し、1体は硬化前に行う洗い分析試験に用いた。もう1体は20℃の室内で5日間打設面を湿布で覆って型枠内で養生し、脱型後は気中養生した。その後、各種非破壊試験やコアを採取しての圧縮強度試験などに使用した。

3.2.2 フレッシュ時の試験

フレッシュコンクリートの品質を把握する試験として、スランブ試験、空気量試験およびブリーディング試験を実施した。また、材料分離性状を把握する試験として、洗い分析試験を実施した。

ブリーディングは、JIS A 1123に従った試験（JIS法）と壁状供試体の上面でブリーディング水を採取し測定した試験（壁法）を実施した。

洗い分析試験は、ブリーディング終了直後の壁状無筋コンクリートを高さ方向に10分割して各段から試料を採取し、JIS A 1112に準拠して実施した。なお、洗い分析試験終了後の粗骨材をふるいわけ、粒径5～10mmおよび10～20mmの骨材量を求めた。

3.2.3 コアを用いた試験

供試体から図-1のようにコアを採取して、圧縮強度試験、密度および吸水率試験、促進中性化試験（3箇所のみ）を行った。コアの採取は材齢18日に行い、試験材齢まで気中養生を行った。また別途作製した標準養生（20℃、水中）供試体を用いた試験も行った。

圧縮強度試験の試験材齢は28日とし、2体の試験結果の平均値を用いた。

促進中性化の条件は、JIS A 1153に従い、温度20℃、RH60%、二酸化炭素濃度5%とした。

3.2.4 非破壊試験

配合によるコンクリート品質の違いや、1mの高さの中での品質の違いを調査可能な手法を検討するため、材齢28日の時点で、超音波伝播速度の測定およびリバウンドハンマーを用いた反発度の測定を行った。

超音波伝播速度は、公称周波数28kHzの超音波を使用する装置を用い、供試体の両側面に探触子を設置して探触子間を超音波が通過するのに要する時間を測定して、その結果から算出した。高さ方向に50mmごとに18箇所測定した。

反発度は、JIS A 1155の方法に準じて、高さ方向50mmごとに5点ずつ測定した。同一高さ位置で多数回の測定ができなかったため、高さの異なる2箇所のデータをまとめて10点とし、平均値を求めた。ただし、供試体の最上部および最下部は、他の測定位置と大きく性状が異なる可能性があるため、これらの位置については、5

表-1 コンクリートの配合

	目標SL (cm)	単位量 (kg/m ³)				添加量 (C%)		
		W	C	S	G	Ad1	Ad2	AE
配合1	8.0	175	318	803	980	0.00	—	0.0030
配合2	18.0	175	318	803	980	0.25	—	0.0030
配合3	18.0	150	273	903	980	—	4.00	0.0045

粗骨材最大寸法：20mm

セメント：普通ポルトランドセメント（密度3.16g/cm³）

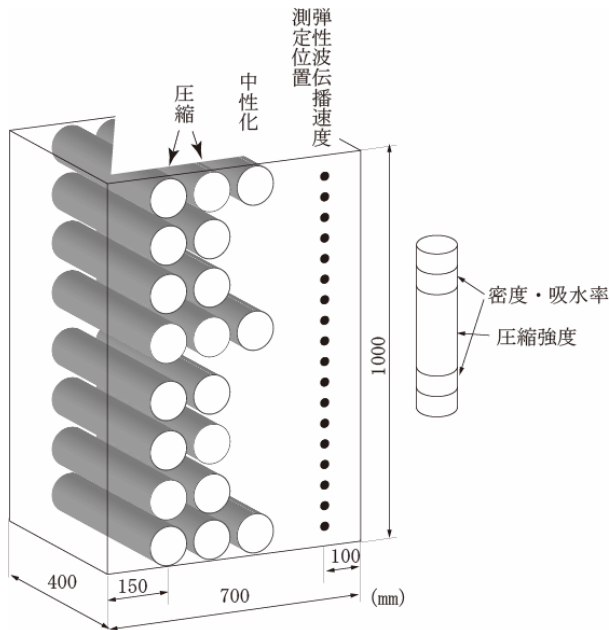
細骨材：静岡県掛川産山砂（密度2.57g/cm³、吸水率1.87%）

粗骨材：茨城県笠間産砕石（密度2.67g/cm³、吸水率0.46%）

AE減水剤（Ad1）：リグニンスルホン酸系

高性能AE減水剤（Ad2）：ポリカルボン酸系

空気連行剤（AE）：変性ロジン酸化合物系



※促進中性化用の供試体は、各コアから厚さ 60mm の試料を採取して切断面を用いた。

図-1 コア採取位置の概略

点の測定結果の平均とした。なお、平均値からの偏差が20%以上となるデータについては、平均値の算定から除外した。

3. 3 実験結果及び考察

3.3.1 フレッシュ時の試験結果

（1）スランプおよびブリーディング量

スランプ試験の結果を表-2に示す。配合1および2は、プラスチックでワーカブルなコンクリートであった。一方、配合3は、粗々しく、流動化したペーストと骨材が容易に分離するコンクリートであった。

ブリーディング試験結果を図-2に示す。まず、JIS法の結果に着目すると、ブリーディングの速度は、配合1および2は同程度だが、配合3は、打ち込み後短時間でブリーディング水が上昇した。最終的なブリーディング

表-2 スランプ試験結果

	CT (°C)	SL (cm)	air (%)
配合1	21.1	6.5	3.0
配合2	20.3	15.7	6.2
配合3	20.3	14.5	2.9

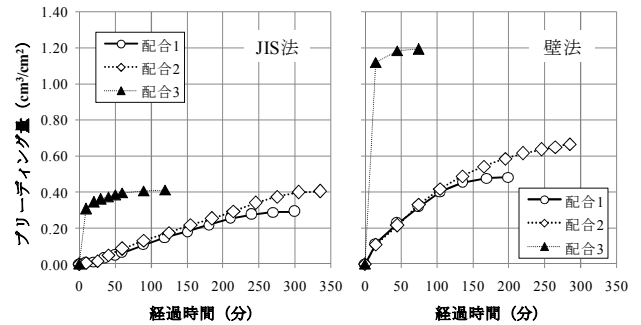


図-2 ブリーディング試験結果

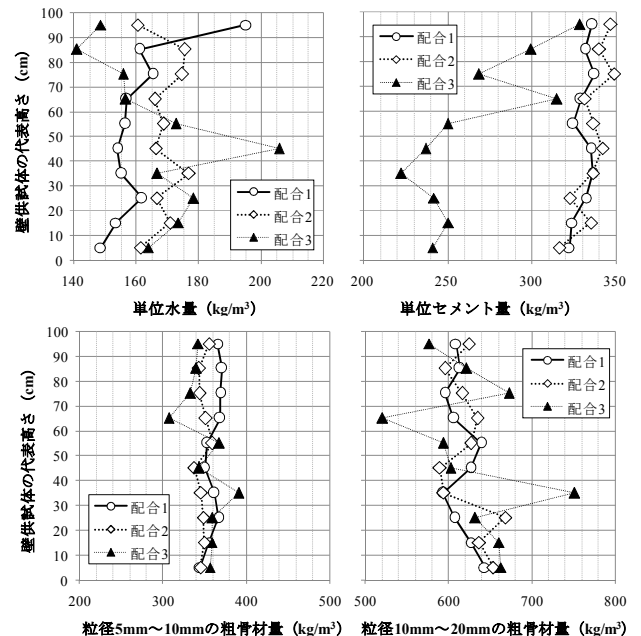


図-3 洗い分析試験結果

量は、配合1が比較的少なく、配合2および3は、同程度であった。

次に壁法の結果に着目すると、ブリーディングの速度はやや速まるとともに、配合3ではブリーディング量が著しく増加した。最終的なブリーディング量は、配合1および2は、JIS法と比べて1.66倍、配合3は2.91倍となった。ブリーディング量は容器断面積が大きいほど、大きくなる傾向があることが知られており、配合1および2でブリーディング量が同程度ずつ多くなったのは、供試体の寸法の違いが影響したとも考えられる。一方、配合3はスランプ試験でもペーストと骨材が分離するよ

うなコンクリートであったため、振動締固めを行ったことで分離が助長され、ブリーディング量がさらに大きくなったと考えられる。

(2) ブリーディングに伴う水・セメントの移動

洗い分析試験結果を図-3に示す。まず、傾向が比較的類似している配合1および2に着目する。

推定された単位水量は、両配合ともに、上部でやや大きくなる傾向があり、高さ80～90cmの位置では、最上段を除いた全ての段を平均した値と比較して、5kg/m³程度大きくなっていた。なお、両配合とも示方配合の単位水量よりも小さく推定される傾向があること、配合2の最上段の単位水量が小さくなったのは、ブリーディング水を断続的に除去したためと考えられる。

推定された単位セメント量は、両配合ともに、上部で大きくなる傾向があり、高さ80～90cmの位置では、最上段を除いた全ての段を平均した値と比較して、4kg/m³程度大きくなっていた。

このように水量、セメント量ともに上部が大きいが、これらの推定結果から水セメント比を算定すると、両配合とも上部が大きくなる傾向であった。しかし、高さ80～90cmの位置でも、最上段を除く全ての段の平均値と比較して、1%程度しか大きくない。すなわち、上部と下部での水セメント比の差は、顕著ではなかった。

なお、配合3は、単位水量、単位セメント量ともに測定位置による変動が顕著であった。この理由は明確ではないが、配合3では、高性能AE減水剤を多量に添加していることもあり、洗い分析の際にセメントを十分沈降させることが困難であった。このため、両者を適切に分離して推定することができなかったものと考えられる。

(3) 骨材の沈降

粒度5～10mmの粗骨材量は、いずれの配合も上部から下部にかけてほとんど変わらない結果となった。

粒度10～20mmの粗骨材量は、いずれの配合も下部で大きくなる傾向となり、最下段の位置では、最上段を除いた全ての段の平均値と比較して、25kg/m³程度大きくなっていた。

なお、推定された単位粗骨材量は、いずれの配合も粒度10～20mmの粗骨材が沈降したため、下部でやや大きくなる傾向となった。

3.3.2 コアを用いた試験の結果

(1) 圧縮強度試験結果

標準養生供試体の圧縮強度試験結果を表-3に示す。また、これと比較して壁状供試体のコアの圧縮強度を図-4に示す。壁状供試体では、最上部を除いて、最下点から

表-3 圧縮強度試験結果

種類	圧縮強度 (N/mm ²)		
	標準養生	壁状供試体 (最上部以外)	壁状供試体 (最上部)
配合1	43.9	36.4～40.8	43.8
配合2	40.3	32.6～38.6	39.1
配合3	36.2	27.4～34.8	30.8

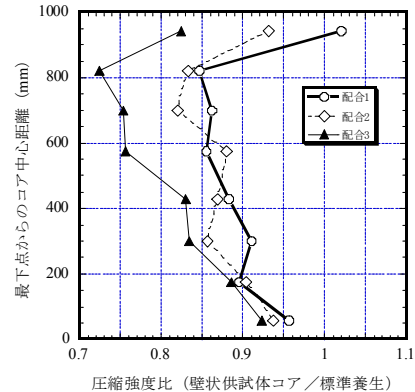


図-4 コアの圧縮強度

上部にかけて圧縮強度は徐々に低下した。その傾きは配合1および2は同等で、スランプの差による相違は見られない。これに対し、配合3は高さ方向の圧縮強度の変化が著しく、標準養生供試体よりも最大で30%程度低下していた。なお、各配合において最上部の強度が増加したのは、打ち込み後のブリーディング水の除去によって組織が緻密化したためと考えられる。

(2) 密度・吸水率試験結果

コンクリートコアの密度および吸水試験結果から算出した空隙率を図-5に、空隙率と圧縮強度比の関係を図-6に、コアの絶対乾密度を図-7に示す。空隙率の算出にあたっては、次式(1)を用いた。

$$P = \frac{W_s - W_d}{V_s} \cdot \frac{1}{\rho_w} \times 100 \quad (1)$$

ここに、P：空隙率（%）、 W_s ：飽水状態の質量、 W_d ：絶対乾質量、 V_s ：飽水状態の体積、 ρ_w ：水の密度

コンクリートコアの空隙率は供試体最上部を除き、上部ほど大きい傾向にある。各配合の高さ方向に生じた圧縮強度の変化（図-4）は、空隙量の差によって生じたと考えられる。

一方、各高さ位置での空隙量は配合によらずほぼ同一であり、スランプの違いや材料分離の程度による違いは明確ではなかった。さらに図-6では、空隙率と圧縮強度比は相関関係にあり、その傾きは配合によらずほぼ同等

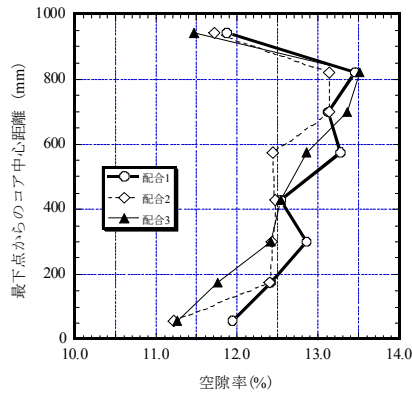


図-5 空隙率

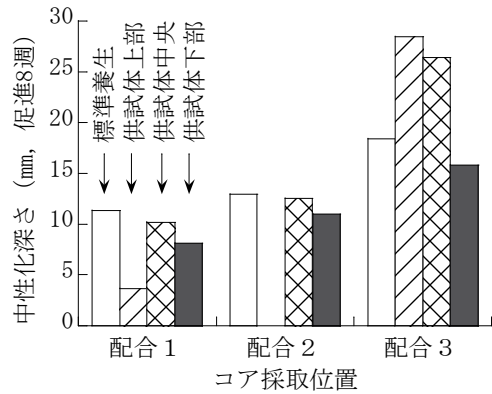


図-8 促進中性化試験結果 (8 週間)

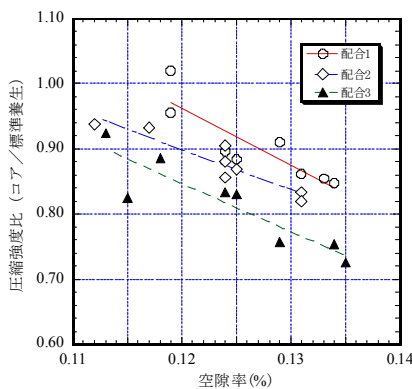


図-6 空隙率と圧縮強度比の関係

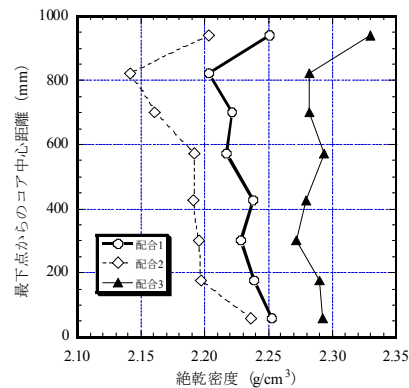


図-7 絶対乾密度

であったが、同一空隙率で比較すると、配合 1 に対して配合 2 および 3 は低くなった。以上をまとめると、図-4 および図-5 に示すとおりコンクリートコアの空隙率の測定値を得ることにより構造物内の相対的な品質の変動を推定することができる。ただし、コンクリート強度と空隙率の関係は配合条件によって変わるため、空隙率の値のみからコンクリートの圧縮強度を一意的に判断することは難しい。

配合 1 および 2 のコアの絶対乾密度は、最上部を除いて供試体上部ほど小さく、密度の大きい骨材が上部側ほど少ないことを示している。なお、最上部の絶対乾密度がその真下よりも大きい理由としては、ブリーディング水の除去による緻密化が考えられる。一方、配合 3 は高さ方向の絶対乾密度に差が生じていないが、この原因については不明であり、今後微細組織構造についての詳細な検討が必要である。

(3) 促進中性化試験結果

コアの促進中性化試験結果を、図-8 に示す。まず、配合 1 および配合 2 に着目すると、中性化深さは、供試体上部で採取したコアで最も小さく、配合 2 では中性化が認められなかった。今回の供試体では、ブリーディング水を随時除去しており、その効果で、図-5 等でも見られるようにコンクリートが緻密なものとなっていることが考えられる。この位置においては、標準養生を行った供試体よりも中性化深さが小さくなっていた。

一方、最下部のコアは、空隙率の試験結果では、最上部と同程度となっていたものの、中性化深さは、供試体中央部で測定した結果よりも 1~2 割小さい程度であった。

配合 3 については、著しく大きい中性化深さとなっている場合もあった。材料分離が著しい供試体である上に、配合 1、2 よりも単位セメント量を減少させているため、コンクリート中には小規模な未充填箇所が認められた。

3.3.3 非破壊試験の結果

(1) 超音波伝播速度

超音波伝播速度の測定結果を図-9 に示す。いずれの配合でも上端より 20cm 程度を除き、供試体の下部から上部に向かって伝播速度が低下する傾向で、コンクリートが密実になっていると考えられる供試体下部ほど伝播速度が大きい傾向であった。

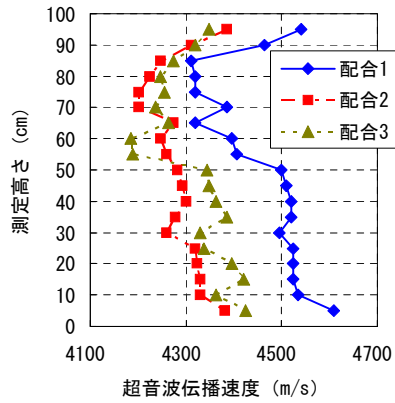


図-9 超音波伝播速度

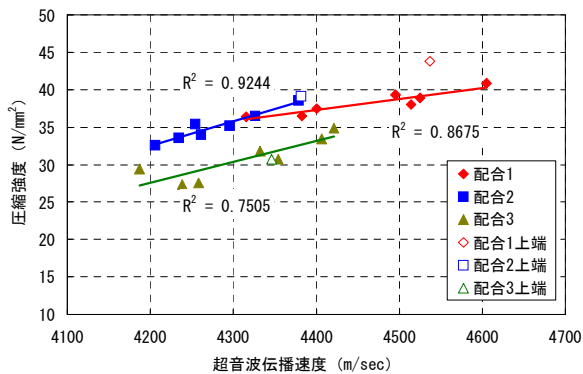


図-10 超音波伝播速度と圧縮強度の関係

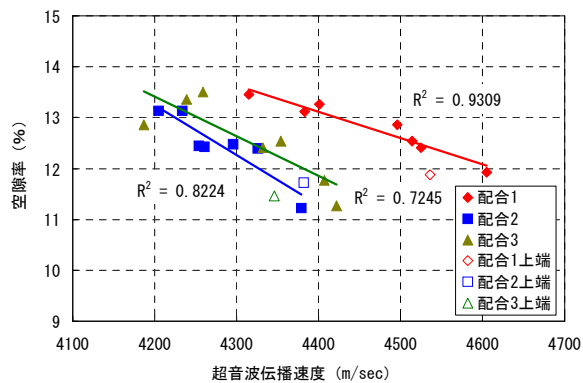


図-11 超音波伝播速度と空隙率の関係

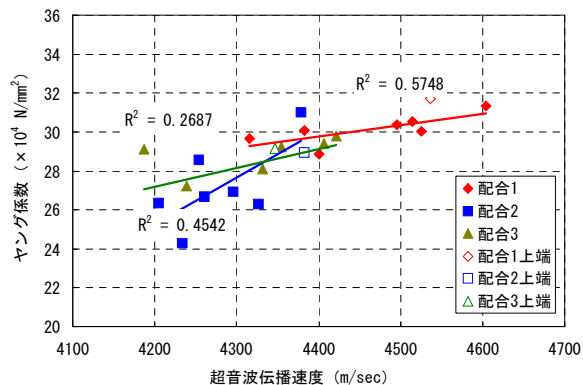


図-12 超音波伝播速度とヤング係数の関係

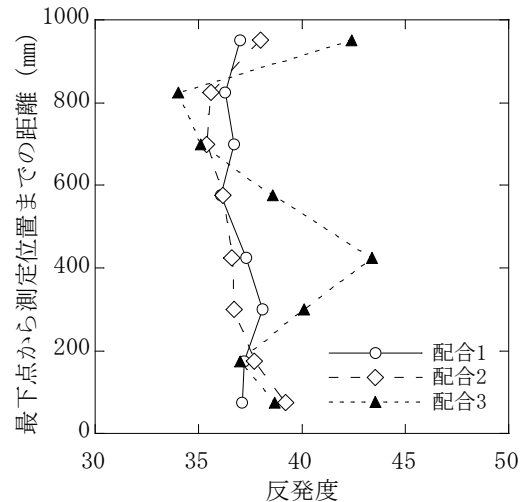


図-13 反発度の測定結果

超音波伝播速度と圧縮強度、空隙率の関係を図-10、図-11に示す。なお、図中には、最上部のコアを除いて線形回帰分析を行った結果を示した。超音波伝播速度は、配合ごとには圧縮強度や空隙率と比較的高い相関関係が見られた。超音波伝播速度は、コンクリートの密実さの違いを評価する指標として取り扱える可能性がある。

一方で、ブリーディング水除去の影響が見られる最上部のコアの試験結果を見ると、その他の部位の試験結果とは大きく異なり、やや低めの伝播速度が測定される場合があった。また、配合1を用いた供試体は上下方向の圧縮強度等の変化が比較的小さく、部位による品質の差が少ないと見られるが、超音波伝播速度では、上下の差が大きかった。この理由は明確にはできなかった。

なお、超音波伝播速度とヤング係数の関係を図-12に示す。一般に超音波伝播速度はコンクリートのヤング係数と関係があるとされているが、本実験ではその相関関係は、強度や空隙率ほど明確ではなかった。

(2) 反発度

反発度の測定結果を図-13に示す。配合2の測定結果については、供試体の最上部を除き、下部から上部にかけて反発度が小さくなる傾向が認められ、図-4に示した圧縮強度の分布の傾向を比較的良好に表しているようにも思われる。一方、配合1や配合3の測定結果では、強度分布の傾向を読み取ることは困難であった。

また、反発度の測定結果の平均値は、配合によらず同程度となっており、配合によって異なる圧縮強度(表-3.3)の違いを評価することはできなかった。

一方で、反発度測定結果のうち、平均値からの偏差20%以上のデータ(JIS A 1155では破棄すべきデータ)

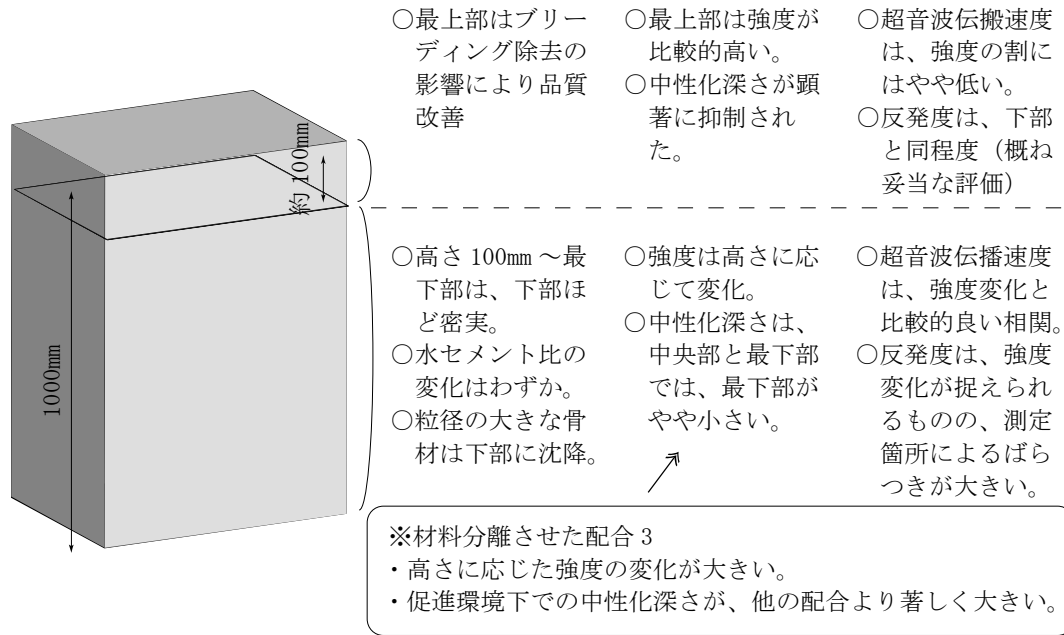


図-14 超音波伝播速度とヤング係数の関係

に着目すると、95点打撃したうち、配合2が1点、配合1が4点、配合3が13点と、配合による違いが大きかった。この結果から、配合2と比較すると、配合1や配合3は打撃位置における品質のばらつきが大きく、このために上下方向の品質変動を反発度の測定結果から評価することが困難であったと考えられる。

3. 4 実験結果のまとめ

コンクリートのスランブを変更した場合の、特に耐久性への影響について検討するため、高さ1mの壁状供試体を作製して実験を行った。

その結果、コンクリートの配合や材料分離の影響については、以下の知見を得た。また、これらのうち主要な結果についてまとめた結果を図-14に示す。

- (1) 高さ1mの壁状供試体で測定されたブリーディング量は、JISによる測定結果よりも、1.66倍以上大きな値となった。特に材料分離が顕著な配合の場合は、ブリーディング量に顕著な差が生じた。
- (2) 壁状供試体では、上部ほど水、セメントの量が増える傾向にあった。ただし、水セメント比で見ると、高さ方向の差は顕著ではなかった。
- (3) 比較的粒径の大きい粗骨材（10～20mm）は供試体の下部で増える傾向があった。下部での増加量は、配合によらず同程度であった。
- (4) 採取したコアで試験したところ、ブリーディング水除去の影響がでた最上部を除き、上下方向で圧縮強度が変化し、上部ほど強度が低い傾向であった。また、

その程度は、著しい材料分離を生じさせた配合3で顕著であった。スランブの異なる配合1と配合2では、上下の強度差は同程度であった。すなわち、スランブを18cm程度に設定しても、ブリーディング量が過大とならないように制御されていれば従来から土木用として用いられているスランブ8cm程度のコンクリートとほとんど変わらない。しかし、材料分離に対する配慮がなされずブリーディング量が多いコンクリートではスランブ18cmの場合、品質の変動幅が大きくなる。

- (5) 上下方向の強度差は、供試体の空隙率の大小と良好な関係があった。ただし、同じ空隙率でも、配合によって強度は異なっていた。
- (6) 上下方向の促進環境における中性化深さの差は、中央部に対し、最下部は10～20%程度小さかった。最上部はブリーディング水を除去した影響か、中性化が大幅に抑制されていた。
また、非破壊試験の結果からは、以下の知見を得た。
- (7) 超音波伝播速度の測定結果は、壁状供試体の上下方向の品質の変化を捉えることができ、密実に供試体の下部ほど伝播速度が大きい傾向が見られた。
- (8) 一方、超音波伝播速度と圧縮強度、空隙率の関係は、配合ごとに違いが見られた。また、ブリーディング水を除去した影響がでた最上部は、その他の部位と傾向が大きく異なる場合があった。
- (9) 反発度の測定結果は、打撃位置によるばらつきが大きく、配合1および配合3では、壁状供試体の上下方

向の品質の変化を捉えることが困難であった。

- (10)特に材料分離の影響が大きい配合3では、反発度測定点のうち平均値からの偏差が20%以上となって破棄した点の数が特に多くなった。

4. まとめ

コンクリートに求められる性能を明確にしたより合理的な施工品質管理・検査体系を目指して検討を行った。H22年度は初年度であることから、現状の課題の整理などを行った上で、室内実験や実構造物調査による検討を開始した。

その結果、室内実験においては、高さのある部材では、良好な配合のコンクリートでも高さ方向に強度差が生じ、促進中性化試験の結果などがわずかに異なることを確認した。また、ペースト分の分離が著しい配合では、この品質の差が顕著に現れることがわかった。作製した供試体について種々の非破壊試験を適用したところ、超音波伝播速度などいくつかの試験法で高さ方向の品質の差が検知できたものの、ブリーディングを除去した最上部の品質については、必ずしも適切に評価できないなど、課題もあった。

各種試験方法の評価のばらつきを踏まえると、高い流

動性を有するコンクリートの品質信頼性を確認するためには、例えば(1)ブリーディング量の測定を行い過大なブリーディング量となっていないことを確認する、(2)分離抑制がなされていることを確認するため微粒分量の目安を設定する、(3)超音波伝播速度やコアの空隙率など複数の指標により品質の変動が過大となっていないことを確認する、といった手法が活用できる可能性がある。

参考文献

- 1) 神田衛、吉田八郎；コンクリート打ち込み後の部材断面における水セメント比の分布性状―主として配合要因の影響について―、セメントコンクリート論文集、Vol.30、pp.280-284、1976
- 2) 加賀谷誠、徳田弘、舟木論：締固め時間がコンクリートの空気量と圧縮強度の分布に及ぼす影響、セメント技術年報、Vol.41、pp.287-290、1987
- 3) 土木学会：施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針(案)、コンクリートライブラリー126、2007
- 4) 辻正哲ほか：ブリーディングの発生機構に関する基礎的研究、セメント技術年報、No.37、pp.229-232、1983

A STUDY ON THE PERFORMANCE-BASED QUALITY CONTROL AND INSPECTION METHODS FOR THE CONSTRUCTION OF CONCRETE STRUCTURES

Budgeted : Grants for operating expenses
General account

Research Period : FY2010-2014

Research Team : Material and Geotechnical
Engineering Research Group
(Concrete and Metallic Materials
Research Team)

Author : WATANABE Hiroshi
KOGA Hirohisa
ISAMI Kazuhiro

Abstract : In order to improve reliability of newly constructed concrete structures, it is important to rationalize the framework of quality control and inspection. In this research projects, concrete and metallic materials research team set the target on the quality control and inspection scheme that can prevent segregation of concrete due to poor mix proportion and inadequate casting. In fiscal year 2010, concrete specimens, 1m in height, were cast to investigate the distribution of compressive strength and resistance for carbonation.

Key words : concrete, quality control, placing, curing, non-destructive testing