

覆工コンクリートの現場炭酸化養生用配合に関する検討  
ー G I 基金事業『CUCO』開発成果ー

東急建設株式会社 正会員 ○石川 祥太 早川 健司 伊藤 正憲  
鹿島建設株式会社 正会員 関 健吾 フェロー会員 坂井 吾郎

1. はじめに

建設活動を通じたカーボンニュートラル社会実現への貢献の一つとして、コンクリートの CO<sub>2</sub> 排出削減、固定量最大化とコスト低減の両立に向けた技術開発が挙げられ、筆者らもグリーンイノベーション (GI) 基金コンソーシアム「CUCO (Carbon Utilized COncrete)」の一員として、研究開発を進めている。これまでにセメント系材料を強制的に炭酸化させて、組織の緻密化や化学的安定性の向上を図り、セメント硬化体の耐久性を大幅に向上させた炭酸化コンクリートをプレキャスト部材に適用する研究がされている<sup>1)</sup>が、炭酸化コンクリートの普及促進のためには、現場打ちへの展開が必要である。一方、現場打ち土木構造物は、橋梁下部、ボックスカルバート等様々な構造形式があり、使用コンクリートの種類や構造物の形状、施工条件がそれぞれ異なるため、幅広く現場打ちコンクリートへ適用していくためには、構造物に応じた適切な配合や炭酸化養生方法を検討する必要がある。本研究は、種々ある土木構造物のうち、山岳トンネルの覆工コンクリートを対象とし、現場打ち炭酸化コンクリートを適用していくための第一段階として、トンネル覆工へ適用する炭酸化コンクリートの配合に関する基礎的な検討を行った。

2. 実験概要

山岳トンネルにおける覆工コンクリートは、セントル型枠を用いてコンクリートを打込み、翌日にセントル型枠を脱型し、その後養生台車等を用いた湿潤養生が行われる。コンクリートの配合は地山条件によって異なるが、無筋の一般的な覆工には設計基準強度 18N/mm<sup>2</sup> のコンクリートが用いられる。一方、炭酸化コンクリートは炭酸化することで強度増進するが、覆工コンクリートの巻厚は 30cm 以上であり、覆工断面全体を炭酸化すること、また従来の施工方法において脱型時までには炭酸化養生することは難しい。そこで、炭酸化養生の効果を見込まずに覆工コンクリートに要求される初期強度と設計基準強度を担保できる配合の検討を行った。

使用材料を表 1 に、コンクリートの配合を表 2 に示す。コンクリートの基準配合は高炉セメント B 種を想定した。一方、炭酸化コンクリートの配合は、既往の研究実績より OPC, BF, ダイカルシウムシリケート γ 相

(以下、γ C<sub>2</sub>S とする) の比率を 30 : 40 : 30 とした。このとき、炭酸化養生しない場合の圧縮強度は低下すると予想されるので、W/B=40, 50, 60%の 3 水準 (No.1 ~ No.3) に変化させた。また、圧縮強度や炭酸化深さに及ぼす γ C<sub>2</sub>S の影響を検討するため、γ C<sub>2</sub>S の置換率を 10~40%の範囲で 4 水準 (No.4~No.7) に変化させた。

セントル型枠脱型時を想定した材齢 1~2 日の供試体は封緘養生、残りの供試体は脱型後、水中養生の後に圧縮強度試験を行った。また、促進炭酸化については、打込み後の翌日に脱型し、温度 20℃、湿度 60%R.H., CO<sub>2</sub> 濃度 5%の環境で 28 日まで炭酸化養生した供試体を対象とした。

3. 実験結果

表 3 に材齢 7 日及び 28 日の圧縮強度試験結果を示す。材齢 28 日の圧縮強度は、W/B=50%の配合 No.2 は基準配合と同等であり、W/B=60%の場合には 21.7N/mm<sup>2</sup> 以上であり、水和反応のみで設計基準強度 18N/mm<sup>2</sup> 以上の値を示したが、基準配合よりは小さくなった。

表 1 使用材料

| 材料   | 記号  | 摘要                                                            |
|------|-----|---------------------------------------------------------------|
| セメント | C   | 普通ポルトランドセメント、密度 : 3.16g/cm <sup>3</sup>                       |
| 混和材  | BF  | 高炉スラグ微粉末 4000 プレーン<br>密度 : 2.80g/cm <sup>3</sup> 以上           |
|      | γ   | ダイカルシウムシリケート γ 相、密度 : 3.16g/cm <sup>3</sup>                   |
| 細骨材  | S1  | 東京都西多摩郡奥多摩町産 砕砂<br>密度 : 2.67g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率 : 2.97    |
|      | S2  | 千葉県君津市市宿産 山砂<br>密度 : 2.53g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率 : 1.42       |
| 粗骨材  | G   | 東京都西多摩郡奥多摩町産 砕石<br>粗骨材最大寸法 : 20mm, 密度 : 2.69g/cm <sup>3</sup> |
| 混和剤  | Ad1 | リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体                                         |
|      | Ad2 | リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテル複合体                                   |

表 2 コンクリートの配合

| 配合                 | 目標<br>スランプ<br>(cm) | 目標<br>空気量<br>(%) | W/B <sup>※1</sup><br>(%) | s/a<br>(%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |     |     |      | C : BF : γ   | CO <sub>2</sub> 排出量 <sup>※2</sup><br>(kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ) |
|--------------------|--------------------|------------------|--------------------------|------------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|--------------|----------------------------------------------------------------------------|
|                    |                    |                  |                          |            | W                       | C   | BF  | γ   | S1  | S2  | G    |              |                                                                            |
| 基準                 |                    |                  | 60                       | 45.0       |                         | 160 | 131 |     | 680 | 132 | 1002 | 55 : 45 : 0  | 126                                                                        |
| No.1               |                    |                  | 60                       | 45.0       |                         | 88  | 117 | 88  | 678 | 132 | 998  |              | 82                                                                         |
| No.2               |                    |                  | 50                       | 43.0       |                         | 105 | 140 | 105 | 629 | 122 | 1004 | 30 : 40 : 30 | 97                                                                         |
| No.3               | 18 ± 2.5           | 4.5 ± 0.5        | 40                       | 41.0       | 175                     | 131 | 175 | 131 | 572 | 111 | 992  |              | 121                                                                        |
| No.4               |                    |                  |                          |            |                         | 88  | 175 | 29  | 678 | 132 | 998  | 30 : 60 : 10 | 76                                                                         |
| No.5               |                    |                  |                          |            |                         | 88  | 146 | 58  | 678 | 132 | 998  | 30 : 50 : 20 | 79                                                                         |
| No.6 <sup>※2</sup> |                    |                  | 60                       | 45.0       |                         | 88  | 117 | 88  | 678 | 132 | 998  | 30 : 40 : 30 | 82                                                                         |
| No.7               |                    |                  |                          |            |                         | 88  | 88  | 117 | 678 | 132 | 999  | 30 : 30 : 40 | 84                                                                         |

※1 : B=C+BF+γ, ※2 : No.1 と No.6 は同一配合

キーワード : CUCO, 炭酸化コンクリート、覆工コンクリート、現場炭酸化養生、CO<sub>2</sub> 排出量  
連絡先 〒252-0244 神奈川県相模原市中央区田名 3062-1 東急建設株式会社 技術研究所 土木材料 G Tel:042-763-9507

図1に結合材水比と材齢1日の圧縮強度の関係を示す。材齢1日の圧縮強度は、基準配合の約0.9N/mm<sup>2</sup>に対し、 $\gamma$ -C<sub>2</sub>Sを混入した配合ではこれより小さくなった。W/B=40%とした配合 No.3 でも基準配合以下であり、基準配合と同等の初期強度を得るためには W/B=35%程度が必要であることが分かった。

図2に材齢と初期強度の関係を示す。基準配合の材齢24hの圧縮強度を基準とした場合、 $\gamma$ -C<sub>2</sub>Sを混入したW/B=60%の配合 No.1 では約32hで達すると想定され、基準配合よりも約1.3倍の時間を要する結果となった。

図3にNo.1～No.3の養生期間14日の炭酸化深さを示す。W/Bが小さくなるに従い、炭酸化深さが小さくなる傾向を示した。圧縮強度についても同様の傾向が確認されたので、圧縮強度が増加するに伴い、CO<sub>2</sub>の侵入が抑制され炭酸化深さが小さくなったと考えられる。

図4に炭酸化養生期間と炭酸化深さの関係を示す。 $\gamma$ -C<sub>2</sub>Sの置換率が10, 20, 30%では概ね同様の傾向になったが、置換率40%の配合 No.7 では炭酸化の進行が遅くなった。 $\gamma$ -C<sub>2</sub>Sの含有量が一定量を超えると炭酸化の進行が鈍化する可能性があり、これは $\gamma$ -C<sub>2</sub>SがCO<sub>2</sub>を吸収し表面が緻密になったことが一要因と考えられる。

各配合のCO<sub>2</sub>排出量(表2)に着目すると、基準配合と同等の初期強度を得るためには、W/Bを小さくする必要があるが、CO<sub>2</sub>排出量は増加する傾向にある。また、図3に示したように、W/Bを小さくすると炭酸化の進行は遅くなり、初期強度を得るためにW/Bを小さくすることはCO<sub>2</sub>の固定量に対しては不利となる可能性があり、初期強度の確保の方法については他の方策を含め検討する必要がある。

#### 4. おわりに

本報では、現場炭酸化養生用の覆工コンクリートの配合について、圧縮強度及び炭酸化について報告した。今後は、CO<sub>2</sub>吸収量の測定を含めた種々の試験を考慮した配合選定を検討する予定である。

**謝辞：**本成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP21014)を受け、革新的カーボンネガティブコンクリートの材料・施工技術及び評価技術の開発で得られた成果である。

#### 参考文献

- 1) 取達剛, 渡邊賢三, 横関康祐, 坂田昇:炭酸化コンクリートを用いた長寿命栈橋補修工法, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第7巻, pp.71-76, 2007.11
- 2) 土木学会:コンクリートライブラリー134, 庄司慎ら:副生の水酸化カルシウムを用いたC<sub>2</sub>Sの製造とCO<sub>2</sub>排出量原単位, Cement Science and Concrete Technology, Vol67, No.1, pp.553-558, 2013

表3 材齢7日及び28日の圧縮強度

| 材齢  | 圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> ) |      |      |      |      |      |      |      |
|-----|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
|     | 配合                       |      |      |      |      |      |      |      |
|     | 基準                       | No.1 | No.2 | No.3 | No.4 | No.5 | No.6 | No.7 |
| 7日  | 15.9                     | 11.5 | 16.6 | 21.3 | 14.2 | 10.7 | 11.5 | 9.01 |
| 28日 | 29.5                     | 21.7 | 27.9 | 41.1 | 28.8 | 23.1 | 21.7 | 22.1 |

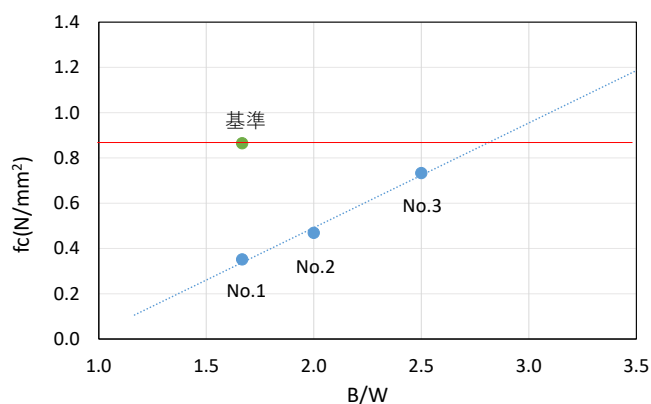


図1 結合材水比と材齢1日の圧縮強度の関係

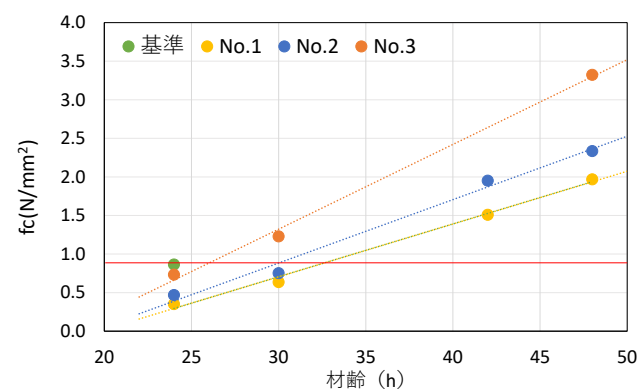


図2 材齢と初期強度の関係

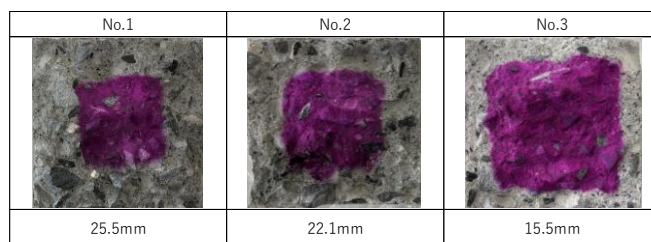


図3 養生期間14日の炭酸化深さ

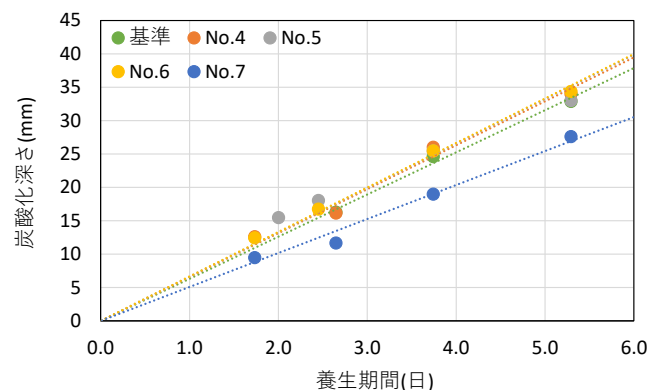


図4 炭酸化養生期間と炭酸化深さの関係