

論 文

[1163] 転圧コンクリートの強度特性に関する研究

正会員 ○ 森濱 和正（建設省土木研究所）

西川 正夫（東亜建設工業（株））

1. まえがき

最近、施工の合理化などの観点から転圧コンクリート（以下、RCC）が注目されている。しかしながら、RCCのような超硬練りコンクリートの強度特性は明らかになっていないことが多い。それは、普通のコンクリートでも強度に影響を与える要因が多いにもかかわらず、RCCの場合はさらに考慮しなければならないことがあるためである。一般にコンクリート強度は材料の品質、配合、施工、養生方法などの影響を受ける。それらのうち、RCCに大きな影響を与える要因の一つに施工時の締固め程度の問題がある。また、配合を決めるにあたっては通常セメント水比から求めているが、RCCのように空隙を含むようなコンクリートはセメント空隙比のほうが適しているといわれている¹⁾。本論文では、これらの検討に加えRCCに空気を連行した場合の強度特性、早期供用の可能性を検討するために養生条件と強度発現特性について実験的に検討したものである。そして、とくにRCCを舗装に適用した場合の配合設計、品質管理などにおけるいくつかの知見を得たので報告する。

2. 実験概要

2. 1 実験項目と方法

RCCの強度特性（曲げ、引張、圧縮強度）、ヤング係数、ポアソン比についての実験は、表-1の配合条件のコンクリートを用い、つぎの項目について行った。

- ① 締固め率と強度：D、F、H配合について、目標締固め率92、94、96、98%の供試体を作製し、材令7および28日で強度試験を行った。
- ② 各種配合条件と強度：水セメント比、細骨材率、単位水量の異なる配合（表-1の全配合）について、目標締固め率96%、材令7および28日で強度試験を行った。
- ③ 養生条件と強度発現：湿潤養生した短期、長期材令（1～91日）の強度および湿潤養生を種々の材令（1、2、3、5、7日）で中止し、その後気温20°C、相対湿度60%の実験室内に放置したときの強度を求めた（目標締固め率96%）。
- ④ 空気を連行したときの強度：H配合についてAE減水剤を添加し、空気量を0、2、4%連行したコンクリートについて、締固め率92、94、96%の供試体の強度試験を行った。

2. 2 使用材料

- ① セメント：普通ポルトランドセメント（比重3.16、ブレーン値3,200cm²/g）

- ② 骨材：粗骨材は碎石（最大寸法20mm、比重2.66、FM6.48）

細骨材は川砂（比重2.60、FM2.74）

- ③ 混和剤：AE減水剤主剤（リグニンスルホン酸塩ポリオール複合体）

助剤（アルキルスルホン酸塩）

表-1 配合条件

| | 単位水量Wkg/m ³ (VC値sec) | | | |
|-------------------|---------------------------------|---------|---------|----|
| | 120(20) | 110(40) | 100(60) | |
| | 水セメント比% (W/C) | | | |
| | 38 | 43 | 38 | 33 |
| 細骨材 s/a (%) | 46 | A | B | C |
| | 42 | D | E | F |
| | 38 | I | J | K |
| | | | G | H |

2.3 試験方法

- ① 供試体作製方法：曲げ供試体（ $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ ）は目標締固め率になるように試料を計量し、2層に分け35回ずつ突棒で突固め、振動ハンマで所定の高さになるまで締固めた。引張および圧縮供試体（ $\phi 10 \times 20\text{cm}$ ）も試料を計量し、2層に分けそれぞれ12回突固め、振動ハンマで締固めた。
- ② 空気量測定方法：文献2)によった。
- ③ 強度試験：曲げ強度試験はJIS A 1106によった。引張強度試験は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の供試体を3~5cm程度に切断し、それをJIS A 1113に準じて行った。圧縮強度試験はJIS A 1108によった。ヤング係数およびボアソン比の測定は、コンプレッソメータ、エクステンソメータを使用した。
- ④ 締固め率の測定：曲げ供試体の体積は両端面と中央の4辺と長辺を4点測定し、引張および圧縮供試体は上下端面の直交する直径と高さを4点測定して求めた。供試体重量は試験直前に測定し、その重量を体積で割り供試体密度を求めた。締固め率は、供試体密度を理論最大密度（空隙を0としたときの配合から求まる密度）で割って求めた。

3. 実験結果

3.1 締固め率と強度

供試体の締固め率と曲げ、引張、圧縮強度の関係（水セメント比一定）は図-1～3のとおりである。締固め率92～98%程度の範囲でほぼ一次の関係にあることがわかる。それぞれの関係の回帰式は以下のとおりであり、高い相関関係がある。

$$\text{曲げ強度 (7日)} f_b = 3.546 \delta_c - 284.7 \quad (r = 0.862) \quad (1)$$

$$f_b = 4.199 \delta_c - 341.7 \quad (r = 0.829) \quad (2)$$

$$\text{引張強度 (7日)} f_t = 2.419 \delta_c - 191.9 \quad (r = 0.835) \quad (3)$$

$$\text{圧縮強度 (7日)} f_c' = 52.40 \delta_c - 4684 \quad (r = 0.881) \quad (4)$$

$$f_c' = 63.07 \delta_c - 5663 \quad (r = 0.858) \quad (5)$$

ここに、 f_b 、 f_t 、 f_c' ：曲げ、引張、圧縮強度 (kgf/cm^2)

δ_c ：締固め率 (%)

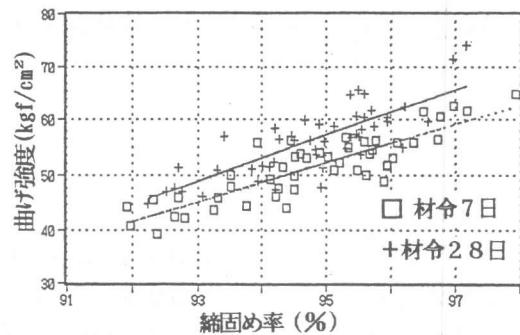


図-1 締固め率と曲げ強度との関係

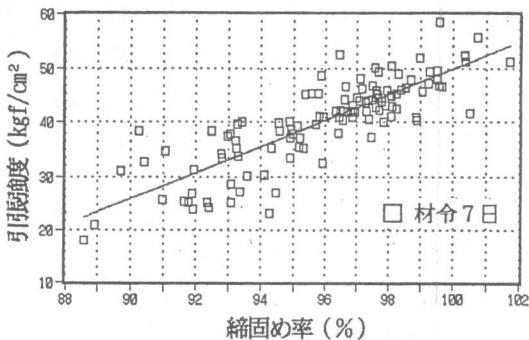


図-2 締固め率と引張強度との関係

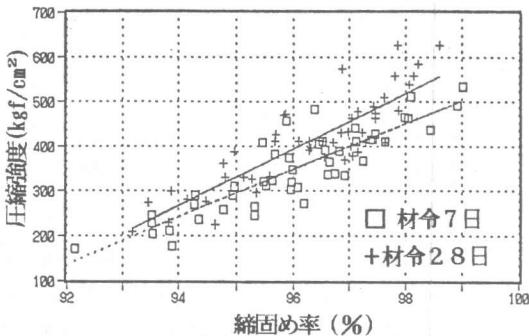


図-3 締固め率と圧縮強度との関係

締固め率の影響はきわめて大きく、曲げ強度について見ると材令28日において((2)式)締固め

率1%につき曲げ強度は 4.2kgf/cm^2 の増減があることになり、コンクリート舗装³⁾では設計基準曲げ強度(45kgf/cm^2)の約10%にも相当する。RCCの施工において、締固め率が大きく、変動が小さくなるようなコンクリートの配合、施工方法を考える必要がある。

このことはまた、著者が提案⁴⁾しているように施工時の締固め率を考慮した配合設計、品質管理を行わなければならないことを示している。強度の管理試験について、舗装では現在曲げ強度による設計、品質管理が行われているが、引張強度も設計、品質管理に使える可能性がある。管理・検査にも、構造物(舗装版)から採取したコア供試体による割裂試験などに使える可能性も考えられる。

3.2 曲げ強度、引張強度、圧縮強度の相互関係

(1)～(5)式から、締固め率を消去して曲げ強度と圧縮強度、引張強度と圧縮強度、曲げ強度と引張強度との関係を求めると、それぞれ次式となる。

$$\text{曲げ-圧縮(7日)} f_b = 0.06767 f_c + 32.3 \quad (6)$$

$$(28日) f_b = 0.06658 f_c + 35.3 \quad (7)$$

$$\text{引張-圧縮(7日)} f_t = 0.04617 f_c + 24.4 \quad (8)$$

$$\text{曲げ-引張(7日)} f_b = 1.466 f_t - 3.4 \quad (9)$$

また、通常のコンクリート強度の関係式の一例を以下に示す。

$$\text{曲げ-圧縮}^5) f_b = 0.118 f_c + 4.3 \quad (10)$$

$$\text{引張-圧縮}^6) f_t = 0.245 f_c^{0.803} \quad (11)$$

$$\text{曲げ-引張}^7) f_b = 1.26 f_t + 11.9 \quad (12)$$

(6)～(9)式および(10)～(12)式を表すと図-4、5となる。これらよりRCCの強度には通常のコンクリートと比較してつぎのような特徴がある。

(1) 曲げ強度と圧縮強度との関係

普通、曲げ圧縮比(曲げ強度/圧縮強度)は $1/5 \sim 1/8$ 程度といわれているが、RCCは $1/4 \sim 1/8$ 程度になっており、圧縮強度の小さいときの曲げ圧縮比が通常より大きくなっている(圧縮強度 200kgf/cm^2 のとき(10)式に比べ約1.7倍、 600kgf/cm^2 でほぼ一致)。

(2) 引張強度と圧縮強度との関係

引張圧縮比(引張強度/圧縮強度)は、 $1/8 \sim 1/13$ 程度といわれているが、RCCは $1/4 \sim 1/8$ 程度と強度比は大きい。これはRCCの引張強度が普通よりかなり大きいためであり、(11)式と比べると圧縮強度 200kgf/cm^2 のときRCCの引張強度は約2倍、 600kgf/cm^2 のとき約1.2倍となっている。

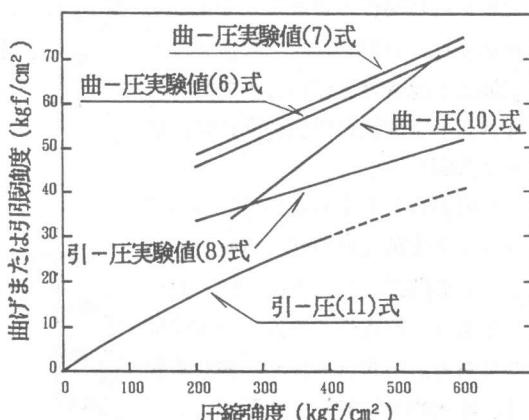


図-4 曲げ、引張、圧縮強度の相互関係

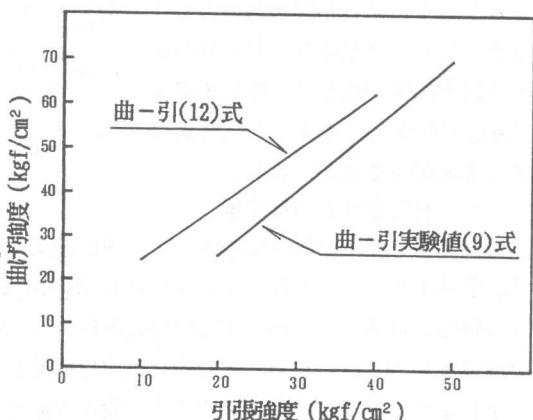


図-5 引張強度と曲げ強度との関係

(3) 曲げ強度と引張強度との関係

曲げ強度は引張強度の1.5~2倍程度といわれているが、RCCは約1.4倍であった。また RCC は引張強度に対して曲げ強度が小さくなっているのは、引張強度がきわめて高いためである。

このように RCC の曲げ、引張強度は普通コンクリートに比べて高く、とくに圧縮強度の小さいところで顕著なのは、単位水量が少なくブリージングがほとんどないこと、振動締固めによる骨材のかみ合わせによるものと考えられる。

3.3 セメント空隙比と強度

RCC のようにコンクリート中に空隙を含む場合の強度は、セメント水比より、コンクリートに含まれる空隙に支配されるといわれており、セメント空隙比と強度の間には、ほぼ比例関係が成立する。

今回実施した全実験結果について、セメント空隙比と曲げ、引張、圧縮強度との関係を示したのが図-6~8であり、原点近くを通る一次の関係にある。いずれも多くの異なる配合、締固め率に対して比較的よい相関関係がある。条件を限定することによりさらに高い相関関係を得ることができることにより、RCC のように締固め率が異なり、配合を変えた場合の強度は、セメント空隙比によって求めることができる。

3.4 養生条件と強度発現

温潤養生を種々の材令で中止して、その後気中に放置したときの曲げ強度の推移を図-9に示す。普通ポルトランドセメントを使用し、締固め率96%程度で材令28日の曲げ強度が 60kgf/cm^2 程度の場合、材令1日でも28日強度の60%程度得られており、通常のコンクリートより初期材令の強度発現が大きい。しかもその後、気中に放置しておいても温潤養生したものとの強度比は80%以上となっており、早期供用できる可能性のあることを示している。

コンクリート舗装の交通開放時期は、交通荷重や疲労、その後の強度発現などから、現場養生

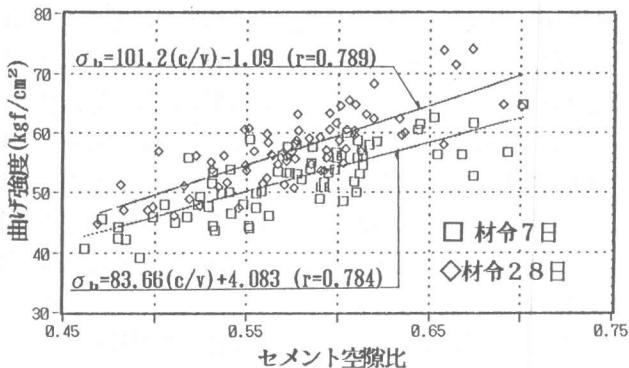


図-6 セメント空隙比と曲げ強度との関係

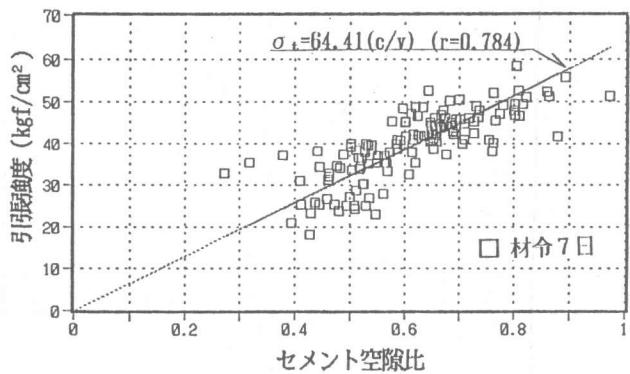


図-7 セメント空隙比と引張強度との関係

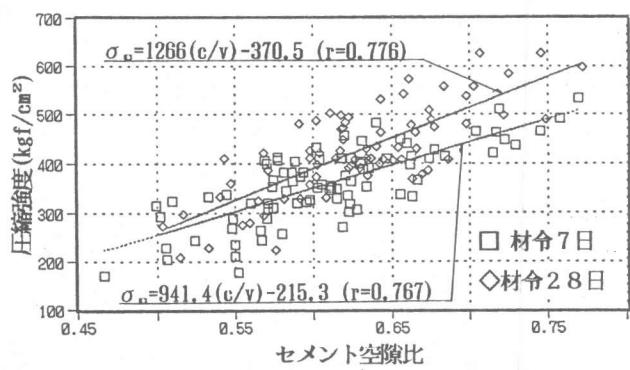


図-8 セメント空隙比と圧縮強度との関係

した供試体の強度が設計基準曲げ強度の75% (35 kgf/cm^2) 以上であればよいと規定しており³⁾、普通ポルトランドセメントでは1~2週間程度となっている。RCCを舗装に適用することにより、大幅に交通開放時期を短縮できる可能性がある。ただし、その際、コンクリートは凝結・硬化過程にあり、疲労や気象作用などに対する抵抗性のメカニズムは異なる可能性があるため、十分な検討が必要である。また、初期載荷にともなう長期的な影響についての検討も必要である。

3.5 空気を連行したときの強度

表-2に、H配合の空気を0、2、4%連行したときの曲げ強度の標準偏差、変動係数、締固め率94%相当の曲げ強度を示す。標準偏差と変動係数は、空気量が増加するほど小さく、曲げ強度は大きくなる傾向にある。

空隙は、それが欠陥となり破壊の進行を早める役割を果たし、空隙が大きいほど強度は低下することはよく知られている。RCCは締固め率の管理を行い、空隙率 (= 1 - 締固め率) が一定水準以下になるように施工している。そのため RCC に微細な空気を連行すれば、連行した空気を含んだものが空隙となり、それを同時に締固めることになる。しかも空気の連行によりワーカビリチーが改善されるため締め固まりやすくなることにより、大きな空隙を生じる確率が小さくなり、強度の変動が小さく、強度が大きくなる傾向があるものと考えられる。このことより、RCCに空気を連行した場合の強度は、通常のコンクリートのように空気量の増加による強度低下とワーカビリチーの改善により単位水量が減少にともなう強度増加が打ち消し合うのとは異なり、ワーカビリチーの改善（今回の実験では、空気量0%のときVC値60秒に対し、2%、4%はほぼ40秒、20秒）による単位水量の減少と、空気量の増加による強度増加という相乗効果が期待できる。

RCCに空気を連行することは、ワーカビリチーの改善による施工性の改善（コンクリートの製造、転圧など）や凍結融解抵抗性の向上⁸⁾に加え、高い強度が得られ変動が小さいという良質なコンクリートが期待できるため、RCCはAEコンクリートにすることが望ましいと考えられる。ただし、このような超硬練りコンクリートに所定の空気量を連行するためには、多量のAE減水剤を添加（標準量の6倍）しなければならなかった。今後、超硬練りコンクリートに適したAE剤やAE減水剤の開発が望まれる。

3.6 ヤング係数、ポアソン比

図-10に圧縮強度とヤング係数の関係を示す。回帰式はつぎのとおりである。

$$E_c = 13,600 f'_{\perp}^{1/2} + 50,200 \quad (r = 0.555) \quad \cdots \cdots \quad (13)$$

ここに、 E_c : ヤング係数 (kgf/cm^2)

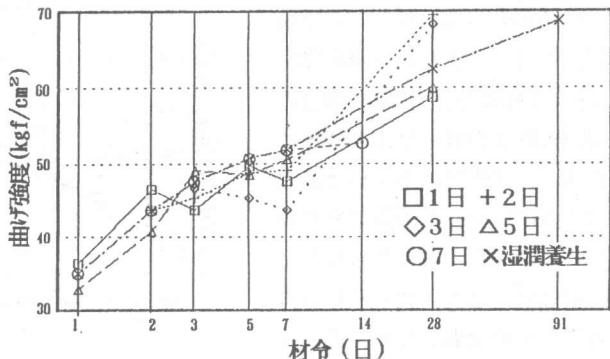


図-9 濡潤養生材令の変化と曲げ強度との関係

表-2 強度の分布(H配合)

| 空気量 | 材 令 | |
|-----|------|------|
| | 7 日 | 28 日 |
| 0 % | 3.6 | 2.6 |
| | 7.2 | 4.9 |
| | 48.6 | 52.8 |
| 2 % | 2.1 | 2.9 |
| | 4.4 | 5.3 |
| | 49.9 | 55.4 |
| 4 % | 1.2 | 2.7 |
| | 2.3 | 4.9 |
| | 51.4 | 56.7 |

上段：標準偏差(kgf/cm^2)

中段：変動係数(%)

下段： $\delta_c = 94\%$ のときの曲げ強度(kgf/cm^2)

相関関係は低いが、これは供試体作製方法とヤング係数測定位置の関係から、打継ぎ部分の締固め程度の良否により強度に比べヤング係数が小さいと思われるものがいくつか測定されたことによるものと考えられる。図中には、土木学会のRC示方書⁹⁾の基準値も示してあるように、RCCのヤング係数は通常のコンクリートとほぼ同じ関係

にある。ポアソン比も平均 $0.185 = 1 / 5.4$ であり、ほぼ通常のコンクリートと同じ関係である。設計にあたって、ヤング係数、ポアソン比は通常の数値を使ってよいと考えられる。

4.まとめ

RCCの強度特性に関する実験を行い、つぎの結論が得られた。

- ① 締固め率と強度の間には高い正の相関関係があり、設計、施工、品質管理は締固め率を考慮する必要がある。また、強度はセメント空隙比によって求めることができる。
- ② 曲げおよび引張圧縮比は、通常のコンクリートに比べ大きい。とくに、低強度においてその傾向が顕著である。
- ③ 強度発現は、通常のコンクリートより大きな初期材令での曲げ強度が期待でき、早期供用できる可能性がある。
- ④ RCCに空気を連行することはワーカビリチーの改善に加え、強度が高く変動の小さい良質なコンクリートが期待できる。
- ⑤ ヤング係数およびポアソン比は、通常のコンクリートとほぼ同じである。

【参考文献】

- 1) A.N.Talbot : A Proposed Method of Estimating the Density and Strength of Concrete and Proportioning the Materials by the Experimental and Analytical Consideration of Voids in Mortar and Concrete, Proc.ASTM, 1921
- 2) 太田、岡村：即時脱型用コンクリートの空気量と凍結融解抵抗性、土木学会第40回年次学術講演会講演概要集第5部, 1985.10
- 3) 日本道路協会：セメントコンクリート舗装要綱, 1984.2
- 4) 森濱、西川：転圧コンクリートの配合設計法に関する研究、第44回セメント技術大会講演集, 1990.5
- 5) セメント協会・道路対策専門委員会：舗装用コンクリートの品質に関する共同試験報告、道路対策専門委員会報告R-1, 1981.6
- 6) R.Narayanan : The tensile Strength of Concrete by the Split Test, Indian Concrete J., 35-8, 1961.8
- 7) セメント協会・コンクリート専門委員会：舗装用コンクリートの曲げ強度および引張強度について、セメント・コンクリート, No.290, 1971.4
- 8) 西川、小林、森濱：転圧コンクリートの凍結融解抵抗性について、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集第5部, 1990.10 (投稿中)
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編, 1986.10

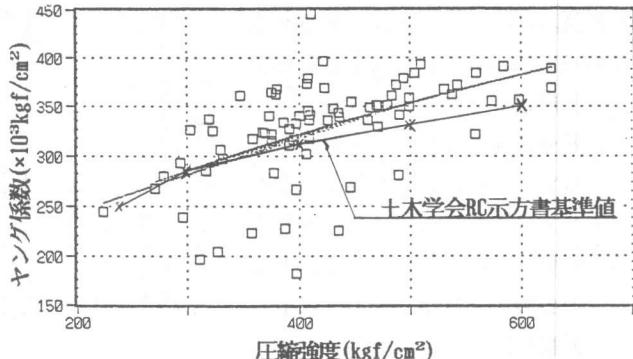


図-10 圧縮強度とヤング係数との関係