

UDC 666.972.017
669.162.275.2:666.913
66-915.2:66.093.4

高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を用いた コンクリートに関する基礎的研究 (10)

—中性化による水和物組織の変化— Studies on Slag-Gypsum Cement Concrete (10)

魚本 健人*・小林 一輔*・高木 良二**・星野 富夫*
Taketo UOMOTO, Kazusuke KOBAYASHI, Ryoji TAKAGI and Tomio HOSHINO

1. は し が き

前報¹⁾では高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を用いたコンクリートの圧縮強度が中性化深さと良い相関性があることを示した。また、この中性化は空気中の炭酸ガスによるものであることが明らかとなっている。²⁾しかし、中性化により水和物組織がどのように変化するか、また、その対策はどのようにすれば良いかが明らかでない。そこで本文ではこれらの点について実験的に検討を加えた。

2. 実 験 概 要

水中養生ならびに空中養生を行ったコンクリートおよびセメントペーストそれぞれの中性化深さならびに変色深さを調べるとともに、中性化部分および非中性化部分のポロシチーを測定し、さらにX線回折試験および走査型電子顕微鏡による観察を行った。

コンクリートの配合はW/C=55%、単位水量180kg/m³とした。水中養生は20℃、空中養生は初期養生として水中養生1週後、20℃、50% R. H. の恒温恒湿室に放置した。セメントペーストの場合はW/C=35, 45, 55%とし、養生は初期養生として、水中養生を1週および4週行った後、上記と同様な条件下に放置する空中養生を行った。

セメントペーストおよびコンクリートの試料は10mm以下に破碎し、フェノールフタレインで呈色するものとし、メタノールに浸漬して水和を停止させたのち、十分に真空乾燥したものをを用いた。

なお、コンクリートの試験材令は材令26週とし、セメントペーストは材令60週とした。

3. 実験結果と考察

3.1 中性化深さと変色深さ

高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を用いた場合、コ

* 東京大学生産技術研究所 第5部

** 新日本製鉄化学工業株式会社

ンクリート内部は写真-1に示すように中央部分が青緑色を示し、外側は白色を示す。これはスラグを用いたコンクリートに特有のもので、その原因はスラグ中に含まれる硫化物の影響によるものである。すなわち、スラグ中に含まれる硫化物が点在しているために生じる現象であって、空气中に放置すると空気酸化されるため白色となるのである。このため空气中にコンクリート等を放置すると空気の浸透に伴いコンクリートは白色に変化する。

このような現象に着目し、中性化深さと変色深さ(白色部分の深さ)の相関性を調べたものが図-1である。この図から明らかなように、中性化深さと変色深さは良い相関性があり、変色深さは中性化深さの約4倍である。

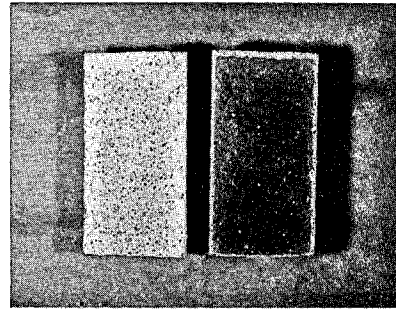


写真-1 変色部分と中性化部分

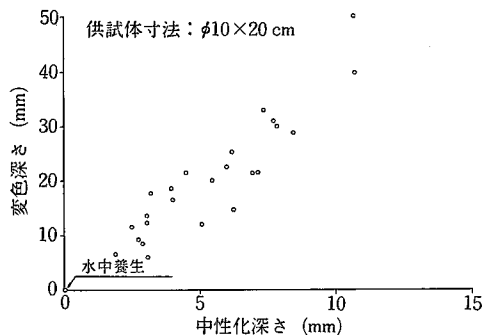


図-1 高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を用いたコンクリートの中性化深さと変色深さ

すなわち、コンクリートの中性化は空気の浸透に伴って起こるが、直ちに完全に中性化されるわけではない。このため後述のように非中性化部分であってもCaCO₃の回折ピークが認められるという現象も生ずる。一方、水中養生のみを施した場合には変色ならびに中性化は全く認められない。

3.2 X線回折試験

図-2は、水中養生した場合と空中養生した場合のコンクリートのモルタル部分(中性化部分ならびに非中性化部分)のX線回折試験結果を示したものである。

この図から次のことが明らかである。

- i) 水中養生した場合と空中養生した場合の非中性化部分のX線回折パターンはほぼ同じであるが、空中養生時の非中性化部分には石こうの存在が認められる。
 - ii) 中性化した部分は、水中養生した場合ならびに非中性化部分に比べエトリンガイトの回折強度は小さく、逆に炭酸カルシウムおよび石こうの回折強度が大きい。
- 一方、セメントペースト(すべて完全に変色していた)

の場合には次の傾向が認められる(図-3参照)

- i) 中性化によりエトリンガイトは減少するが、全く認められないわけではない。
- ii) 中性化により炭酸カルシウム量は増大するが、非中性化部分にも炭酸カルシウムの生成が認められる。
- iii) 水中養生期間が1週間の場合よりも4週間の場合の方が中性化による影響を受けにくい。

これらの結果から、中性化の起こった部分ではエトリンガイトの分解が生じ、炭酸カルシウムならびに石こうが生成しているものと考えられる。しかし、非中性化部分と言えども炭酸化が生じており、したがって水和物組織の変化も起こっているものと推定される。これは、空気の浸透によって供試体の変色が生じていることから推察される。なお、水中養生期間が長い場合の方が中性化を受けにくいことは中性化深さが9.5mm(水中養生期間4週)と10.6mm(水中養生期間1週)であったことから明らかである。

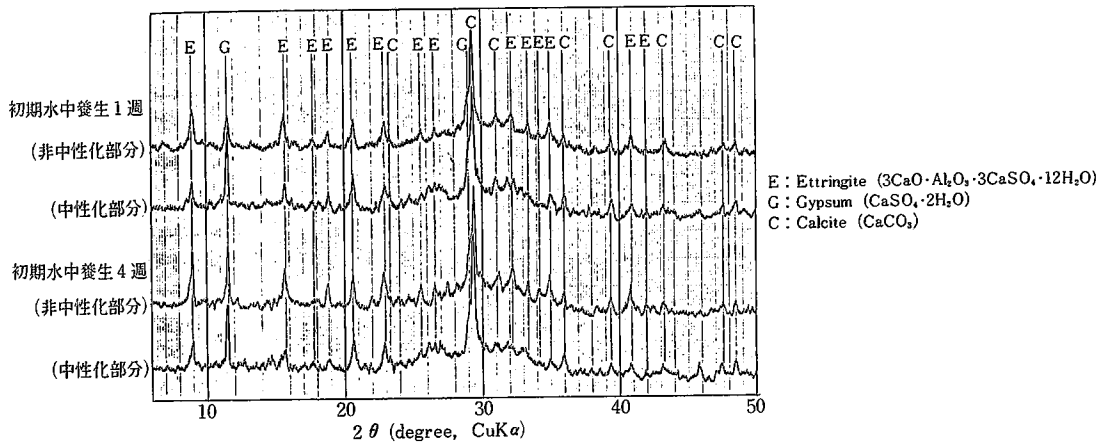


図-2 コンクリートのモルタル部分の回折図(材令26週)

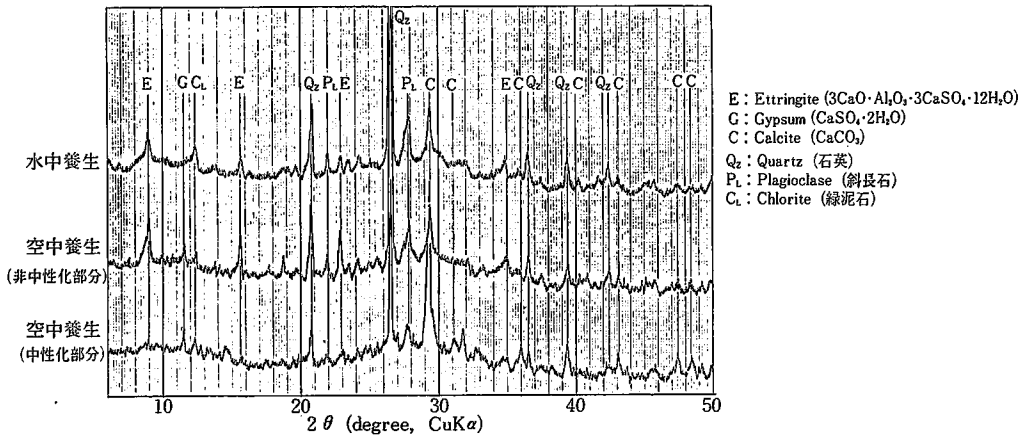


図-3 セメントペーストのX線回折図(材令60週, W/C=45%)

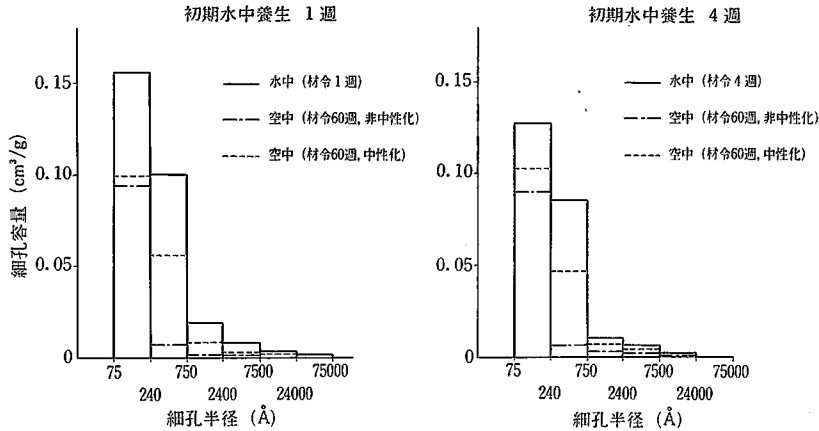


図-4 セメントペーストのポロシチー

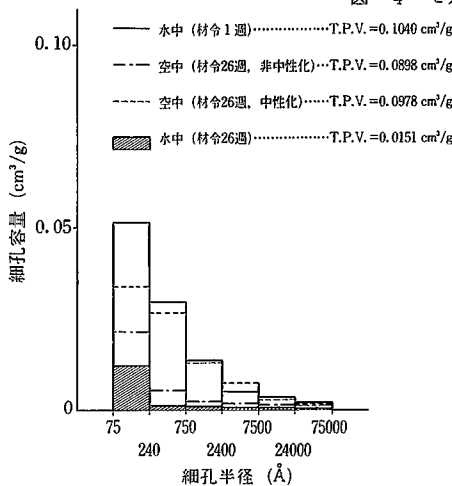


図-5 コンクリートのモルタル部分のポロシチー

3.3 ポロシチー

図-4 はセメントペーストの、図-5 はコンクリートのモルタル部分のポロシチーを示したものである。

この図から次の傾向が認められる。

- i) 同一材令では空中養生した場合の、全空隙量(T.P.V.)は水中養生した場合に比べ、著しく大きい。
- ii) 中性化された部分は非中性化部分よりもT.P.V.は大きく、また特に240 Å~750 Åの範囲の空隙が多い。
- iii) 空中養生開始時(水中養生1週)のポロシチーに比べ、材令が経過すればたとえ中性化された場合でも全体的に空隙量は小さくなる。

これらの結果は、前報³⁾とほぼ同じであり、中性化による影響が大きいことを示している。とくにコンクリートのモルタル部分のポロシチーは、空中養生開始時(水中養生1週または4週)、空中養生(材令60週、中性化部分)空中養生(材令60週、非中性化部分)、水中養生時の順により緻密となることがその大きい特徴である。

3.4 水和物組織の走査電顕像

写真-2~6は、中性化部分と非中性化部分を比較したものである。これらの図より、中性化部分に比べ非中性化部分はより緻密であると言えよう。また、エトリンサイトについては、非中性化部分では典型的なエトリンサイトの結晶が認められるのに比べ、中性化された部分ではこれが変形しており、多様な形態を示していることが注目される。

4. 中性化によるコンクリート中の水和物組織の変化

今までに述べた実験結果から、空中養生を行ったコンクリートにおいては次の現象が起きていると考えられる。

- i) 空気の浸透が起こり、やや遅れて中性化が進む。
- ii) 空気の浸透ならびに中性化の生じた部分ではペースト部分の水和物組織が変化する。
- iii) 空中養生により、中性化された部分では非中性化部分や水中養生を行ったものに比べて空隙が多く、また構成化合物としては炭酸カルシウム、石こうの量が多く、エトリンサイトの量は少ない。なお、エトリンサイトの結晶には変化が認められる。

ところで前報で述べたように高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材ではアルカリ刺激剤が少ないか、或いは全く存在しない場合には、水和反応が殆んど起こらない。このことは高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を用いたコンクリートはアルカリ刺激剤が空气中で徐々に中性化(炭酸化)され、アルカリ濃度が低下すると、水和反応が遅延し、ついには停止することを意味する。その結果水和の進行に伴うペースト部分のポロシチーの減少が阻害され、さらに中性化が進むと水和物の分解が起こると考えられる。前報¹⁾で述べたように空中養生時のコンクリート強度は徐々に低下するという現象は以上の理由によ

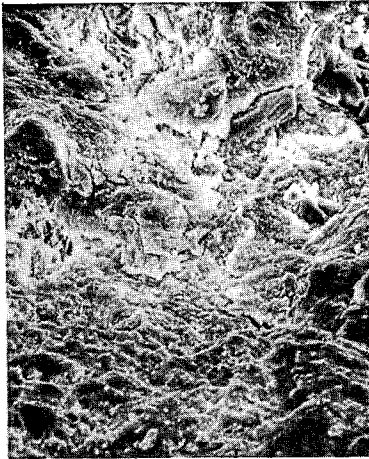


写真-2 水中養生したコンクリート(1,000倍)

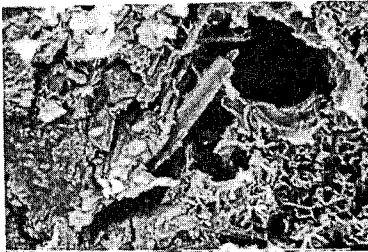


写真-3 水中養生したコンクリート(4,400倍)



写真-4 空中養生したコンクリート(中性化部分, 2,200倍)

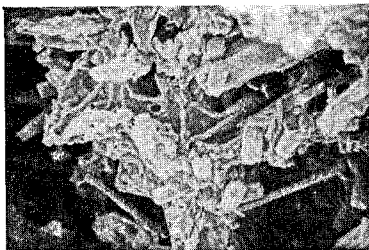


写真-5 空中養生したコンクリート(中性化部分, 4,400倍)

って説明することができる。ただし、中性化される速度は初期養生を十分に行った場合にはペースト部分がより緻密な組織となり、カルシウムシリケート水和物で満たされるため遅くなるものと思われる。これは水中養生期

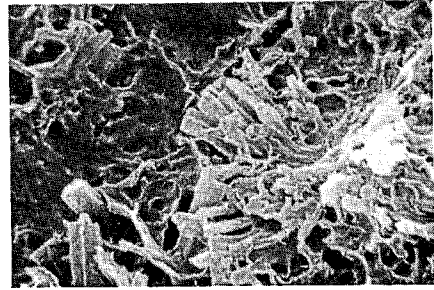


写真-6 空中養生したペースト(中性化部分, 4,400倍)
間異なる場合の中性化深さに著しく差があることや水セメント比の小さなものほど中性化されにくいことを指摘した前報^{1), 3)}からも明らかである。

高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を用いた場合に生ずるこのような現象が、普通ポルトランドセメントを用いた場合に生じにくい原因を求めれば、遊離消石灰の量に帰着する。すなわち、普通ポルトランドセメントでは常に消石灰量が過剰であるため、外部からの炭酸化に対し極く表層のペースト部分だけで十分抵抗しうが、高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材では遊離状態の消石灰量が不足するため内部まで炭酸化が進みやすい。しかし、高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材の場合アルカリ過剰の条件下では水和反応が阻害され強度も出ないため、過剰のアルカリ刺激剤を添加することは望ましくない。

以上の結果から、高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を用いたコンクリートの炭酸化による表面劣化を防止する方法としては、コーティング等を施すことにより空気との接触を遮断する方法、表層部分に炭酸ガスを吸収するフィルター層を設ける方法、結合材の水和反応を高め早く緻密な組織にさせる方法などが考えられるが、コーティング等の方法の場合には少なくとも水和反応が十分進むまでの期間行うことが必要である。

5. あとがき

本文では高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を用いたコンクリートを空中養生した場合にその水和物組織がどのように変化するかを明らかにした。また、この表面劣化を防止する方法を提案したが、コーティングによる方法の有効性はすでに確認してある。

今後はさらにセメントの風化問題や凍結融解に対する抵抗性について検討する予定である。

(1980年5月16日受理)

参考文献

- 1) 魚本, 小林, 星野: 生産研究 Vol 32, No 7, 1980. 7
- 2) 小林, 魚本: 生産研究 Vol 32, No 3, 1980. 3
- 3) 魚本, 小林, 星野: 生産研究 Vol 32, No 2, 1980. 2