

[16] 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RC部材への適用

正会員 ○ 魚 本 健 人 (東京大学 生産技術研究所)
 正会員 星 野 富 夫 (東京大学 生産技術研究所)
 正会員 野 口 哲 男 (東京大学 大 学 院)

1. は し が き

本研究は省資源・省エネルギーの観点から高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を構造用セメントとして、鉄筋コンクリートに適用することを目的として行ったものである。高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材は種々の点で普通ポルトランドセメントと異なった特徴を有するが、^{1)~3)} RC部材に適用する場合に問題となるものとしては、①コンクリート中の鋼材の腐食及び ②コンクリート表面の劣化があげられる。しかし、後者の問題に関してはその基礎的な性状について既に報告してあるため、²⁾ 本文では、特にコンクリート中の鋼材の腐食及び防食、コンクリート表面塗装による表面劣化防止方法、鉄筋コンクリート梁の曲げ及びせん断特性等に関する検討を行った。

2 実 験 概 要

コンクリート中の鋼材の腐食及び防食の検討では、図-1に示す供試体を用いた腐食実験と水溶液中に浸漬させた鋼材の分極曲線の測定を行った。腐食実験では、結合材素材である高炉水砕スラグ、排煙脱硫石こう(二水石こう)及び普通ポルトランドセメントの配合比を変化させ、温度30℃、湿度90% R.H.の条件で材令1年まで行い、平均発錆面積率、中性化深さ及びポロシチーの測定を行った。分極曲線の測定は、電位走査測定法(電位走査速度1mV/sec)で行い、試験鋼材にはφ10×100mmのみがき丸鋼をテフロン収縮チューブ及びアラルダイトで被覆(露出区間2cm)したものをを用いた。

コンクリート表面塗装による表面劣化防止方法の検討では、水結合材比55%のコンクリート供試体(φ10×20cm)を用い、初期養生期間及び塗装材の種類を変化させ、圧縮強度、重量変化、中性化深さを測定した。なお、初期養生は20℃(水中)とし、塗装後の養生条件は20℃、50% R.H.とした。

鉄筋コンクリート梁の曲げ及びせん断特性の検討では図-2、3に示す寸法及び形状の供試体を用い、2点載荷による載荷試験を行った。なお、水結合材比は55%及び70%とした。

実験に用いた結合材素材は表-1に示す通りであり、表面劣化及びRC梁の実験では最適結合材配合比(スラグ:石こう:普通ポルトランドセメント=85:13:2)で行った。

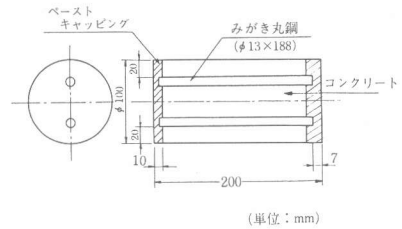


図-1 腐食実験用供試体

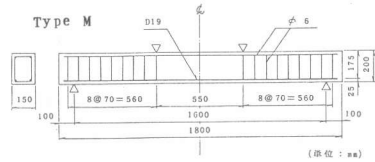


図-2 曲げ用供試体

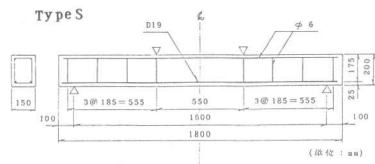


図-3 せん断用供試体

表-1 結合材料の品質

	比重	粉末度 (α/φ)	化 学 成 分 (%)								
			ig. loss	insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	T-S	合計
高炉水砕スラグ	2.89	4.320	1.0	2.4	32.9	12.3	0.9	6.0	41.0	1.0	97.5
排煙脱硫石こう	2.33	1.580	2.02	0.5	0.3	0.1	0.2	0.1	32.6	45.4	99.4
普通ポルトランドセメント	3.16	3.330	0.4	0.1	22.0	5.4	3.1	1.4	64.5	2.2	99.1

3. コンクリート中の鋼材の腐食及び防食

結合材配合比を変化させた場合、材令によってコンクリート中の鋼材の平均発錆面積率がどのように変化するかを示したものが図-4である。また、各材令におけるコンクリートの中性化深さを示したものが図-5である。

これらの図から明らか

ように、1) 材令4週において既にかんりの発錆が認められる。2) 材令4週及び13週においては石こうの割合が20%程度の時に最も腐食量が大きい。3) 材令52週では普通ポルトランドセメントの割合が10%程度の場合の発錆が増大する。4)

材令13週までは鋼材位置まで中性化されていない。5) 材令52週においては普通ポルトランドセメントの割合が10%程度の場合に中性化が大きい、等の傾向が認められる。

これらのことから、高炉水砕スラグ・セッコウ系結

合材を用いた場合、若材令時において認められる発錆はコンクリートの中性化により生じたものではなく、他の原因によるものであり、長期材令時においてはコンクリートの中性化による影響を受けていると推定される。

そこで、最も高い強度の得られる最適結合材配合比の場合について、pHの影響及び結合材素材の影響を調べたものを図-6及び図-7に示す。

これらの図より、1) pHの高い場合には不動態領域は広く腐食しにくい、pHが11.8以下になると急激に不動態領域は減少し孔食発生電位は低くなる、2) pHが11.5であってもスラグと普通ポルトランドセメントだけの溶液では不動態領域は広いが、石こうと普通ポルトランドセメントだけの場合には孔食発生電位が低下し、スラグ、石こう及び普通ポルトランドセメントを混合した溶液ではさらに孔食発生電位が低下することが明らかである。

これらの結果より、最適結合材配合比の場合には、スラグと石こうが反応し、その結果放出される生成物が発錆の原因になっていると推定され、pHが低くなるほど腐食しやすい。即ち、コンクリートが中性化される前であっても結合材そのものが発錆の原因となるため、若材令時においても鋼材は腐食し易い。

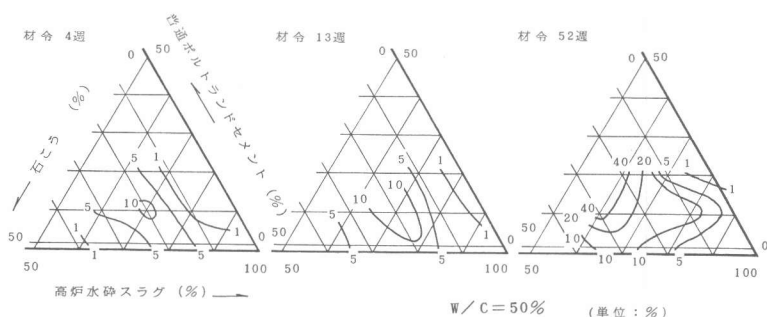


図-4 結合材配合比が発せい面積率に及ぼす影響 (30°C、90% R.H.)

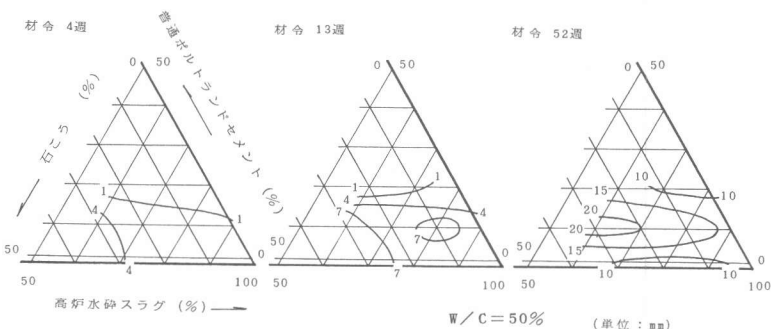


図-5 結合材配合比とコンクリートの中性化深さ

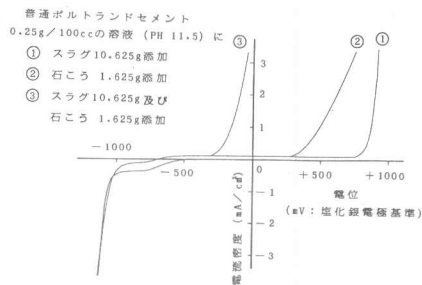


図-6 結合材素材の影響

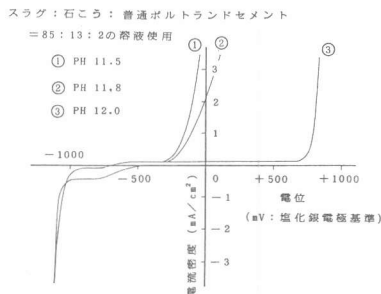


図-7 最適結合材配合比におけるPHの影響

このような現象は従来使用されている他のセメントには認められないもので、この結合材を実用化するためには防食対策が不可欠である。そこで、一般に海砂対策等に用いられているアノード反応抑制型防錆剤の主成分である亜硝酸塩の適用可能性を調べた結果を図-8に示す。この図から明らかなように、最適結合材配合比の場合には結合材の0.25wt%添加すれば材令52週においても十分な防錆効果が期待できる。ただし、さらに長い期間の場合にはコンクリートの中性化による影響を考慮する必要があることから、実際の構造物に適用するには鉄筋のかぶりを大きくすることが必要となろう。

4. コンクリート表面の劣化対策

この種の結合材を用いた場合にはコンクリートは空気中の炭酸ガスの浸透並びに水分の逸散によって劣化するが、その防止対策の1つとして初期養生期間の延長又はコンクリート表面の塗装が考えられる。そこで、コンクリート打設後2日で脱型し、コンクリート表面に塗装を施し、20℃、50% R.H. の条件で試験時材令まで養生した場合の強度並びに初期水中養生期間を変化させた場合のコンクリート圧縮強度を図-9及び図-10に示す。

これらの図から明らかなように、1) コンクリート表面に塗装を施せばコンクリート強度の低下を減少させることができる。2) 本実験の範囲では養生被膜剤を塗布した場合に最も良い効果が得られる。3) 初期水中養生期間を長くし、さらに養生被膜剤を塗布すれば、気中養生としても普通ポルトランドセメント以上の強度とすることが可能で、より水中養生時強度に近いものとなる。

一方、養生被膜剤の効果を調べるために図-9、10で示した各供試体について、中性化深さ及び重量減少率を測定したところ図-11及び図-12に示される結果が得られた。

これらの結果から、次の傾向が認められる。1) コンクリート表面に何ら処理を行わない場合、初期水中養生期間を1週間とすれば圧縮強度比と非中性化面積率はほぼ正比例するが、2日間の場合には同じ非中性化面積率であっても圧縮強度比はより小さなものとなる。2) 材令2日でコンクリート表面に塗装を施した場合でもほぼ同様の傾向が認められるが、塗装を施すことにより中性化の進行を遅くさせている。3) コンクリート表面に処理を施さない場合、コンクリートの

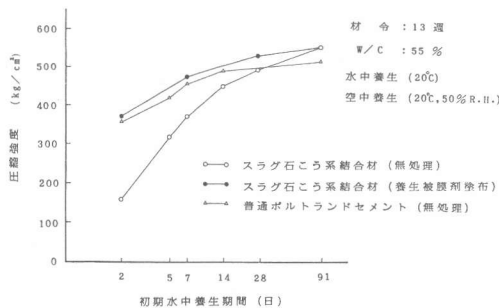


図-10 初期養生期間と圧縮強度

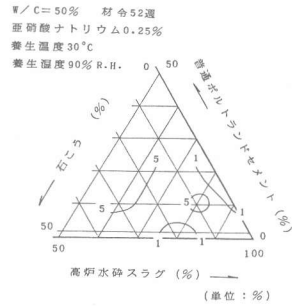


図-8 防せい剤の効果

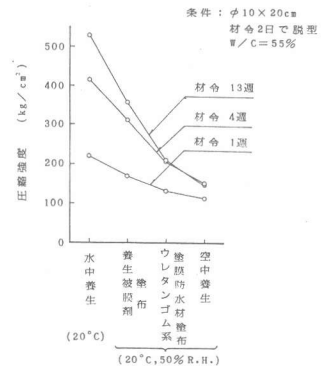


図-9 表面塗装の効果

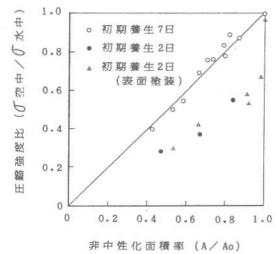


図-11 圧縮強度比と非中性化面積率

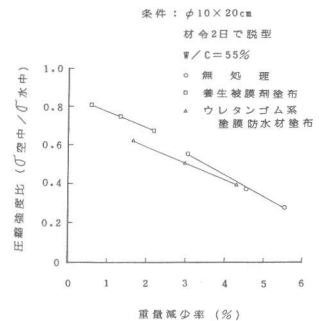


図-12 圧縮強度比と重量減少率

重量減少率は初期水中養生期間が長くなるほど小さくなり、また圧縮強度比の減少も小さい。4) コンクリートを材令2日で脱型し、コンクリート表面に塗装を施した場合、コンクリート重量の減少が少ないものほど圧縮強度比は高い。

以上の結果から、コンクリート表面に塗装を施す方法でコンクリートの表面劣化を防止するためには、コンクリートの中性化を防止すると同時に、表面から水分の逸散が生じないような塗装材を選定する必要があることが明らかである。これは、高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材の水和反応が他のセメントに比べ遅く、その反応を持続させるためには水分の供給が不可欠であること、また、中性化によるアルカリ分の減少が起ると水和反応が遅延されることなどが原因であると推定される。^{1,2,3)}

5. 鉄筋コンクリート梁の曲げ、せん断特性

鉄筋コンクリート梁の曲げ及びせん断特性を調べるため、上述の3及び4の結果を考慮して、亜硝酸ナトリウムを単位結合材量の0.3%添加したコンクリートを用い、材令1週で脱型し直ちに養生被膜剤を塗布した図-3及び図-4に示す梁の実験を行った。その結果を表-2、図-13及び図-14に示す。

これらの結果から明らかなように、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場合にも普通ポルトランドセメントを用いた場合とほぼ同様な結果が得られたが、養生条件の違いによりコンクリートの圧縮強度及びヤング率の異なることが注目される。このため、実構造物にこの結合材を適用する場合その断面寸法が十分大きな場合には水中養生供試体を用いてその品質を判断することができるが、断面寸法が小さい場合には実構造物²⁾と同じ条件の現場養生供試体を用いる方が望ましいと考えられる。なお、破壊試験後コンクリートをはつり取り鉄筋の発錆及び中性化深さの測定を行ったが3及び4で得た結果とほぼ同様であった。

6. 結論

本研究で得られた結果をまとめると次のようになる。

- 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では、若材令時においても鉄筋に発錆が認められ、その原因は、主にスラグと石こうの反応による生成物であると推定される。なお、この発錆を防止するためにはアノード反応抑制型防錆剤の主成分である亜硝酸塩を添加する方法が簡便である。
- 2) コンクリート表面の劣化を防止する一方法としてコンクリート表面に塗装する場合、中性化を防止するのみならず、水分の逸散をも防止する材料を選定し、十分な初期養生を行った後直ちに塗布すればより効果的である。
- 3) 鉄筋コンクリート部材に適用する場合、上記1)及び2)の対策を講ずれば、普通ポルトランドセメントコンクリート等とほぼ同様に取扱うことが可能であるが、部材寸法の小さい場合には現場養生した供試体でその強度等の判定を行うことが望ましい。

7. あとがき 本研究を行うにあたり終始御指導いただいた小林一輔教授に感謝いたします。

参考文献 1) 魚本、小林、星野：第1回J.C.I.年次講演会発表論文集、2) 魚本、小林、星野：第2回J.C.I.年次講演会発表論文集 3) 魚本、小林：土木学会論文集No.302、1980

表-2 コンクリートの物性と破壊荷重

水結合材比 (W/C)		55%	70%
圧縮強度 (kg/cm ²)	水中養生	425	320
	現場養生	352	258
	空中養生	341	235
ヤング率 ($\times 10^5$ kg/cm ²)	水中養生	2.98	2.74
	現場養生	2.94	2.63
	空中養生	2.30	2.06
ポアソン比		0.22	0.22
Type M 破壊荷重 (ton)	実験値	15.2	14.6
	計算値 [*]	13.6	12.8
	実験値/計算値	1.12	1.14
Type S 破壊荷重 (ton)	実験値	12.4	12.6
	計算値 ^{**}	9.8	9.1
	実験値/計算値	1.27	1.38

注) * 曲げ耐力の計算にはC.S. Whitneyの応力ブロックを用いた。

** せん断耐力の計算にはA.C.I.の耐力式を用いた。

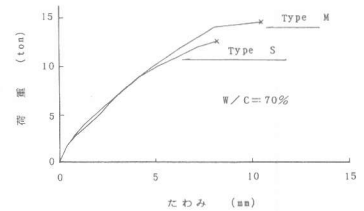


図-13 供試体中央のたわみ

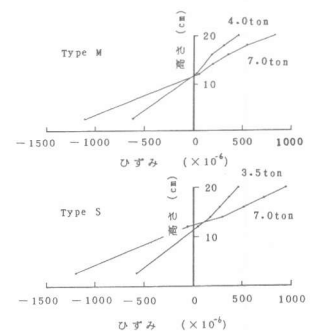


図-14 供試体中央断面でのひずみ分布