

[30] 高炉スラグ細骨材を用いた高炉セメントコンクリートの長期性状

正会員 ○奥村 博昭 (新日本製鉄スラグ事業開発室)

正会員 沼田 晋一 (新日本製鉄スラグ事業開発室)

野田 鉄平 (新日本製鉄名古屋製鉄所)

1. ま え が き

水砕スラグは、高炉セメントに古くから用いられ、使用実績も豊富であるが、コンクリート用細骨材としての歴史は10数年である。今回調査の対象とした高炉スラグ細骨材コンクリート構造物は、我が国で最初に用いられた一つで、JIS A 5012「コンクリート用高炉スラグ細骨材」、土木、建築両学会の指針作成の際に、高炉スラグ細骨材コンクリートの長期安定性を判断する上で、種々なデータを提供したものである。本構造物は、昭和49年7月に施工したものであり、10年以上経過したのを機にコンクリートの諸物性をさらに調査して考察した。

2. 構造物の概要

構造物の概要を図-1に示す。

名 称：新日鉄名古屋製鉄所

くすの木寮の塀

施 工：昭和49年7月ポンプ施工

コンクリート量 9 m³

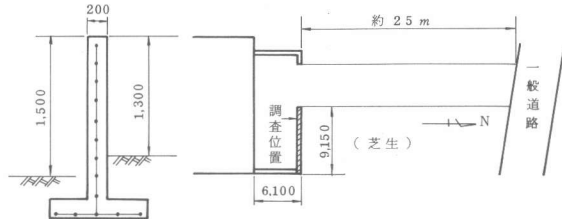


図-1 構造物(くすの木寮塀)の概要

3. 使用材料及び配合

使用材料及び配合を表-1, 2に示す。

表-1 使用材料

セメント	高炉B種(小野田社):比重3.06、CaO55.7%、比表面積3,910cm ² /g、圧縮強さ3日117、7日184、28日396kgf/cm ²
細骨材	高炉スラグ細骨材:絶乾比重2.50、吸水率2.5%、単位容積質量1,500kg/m ³ 、FM2.43、実積率61.6%
粗骨材	高炉スラグ粗骨材2505B:絶乾比重2.54、吸水率3.5%、単位容積質量1,520kg/m ³ 、FM6.60、実積率59.8%
混和剤	バリック61(オキソカルボン酸塩)

表-2 配合

σ_{ck} (kgf/cm ²)	σ_r (kgf/cm ²)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	b/b ₀ * (%)	単 位 量 (kg/m ³)					*単位粗骨材 容積
								水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	
180	271	25	11	6.8	72	4.20	0.655	208	289	718	995	0.578	

4. 調 査 結 果

長期材令のコンクリートの諸物性を調査するために、昭和59年7月(10年目)、昭和61年1月(11.5年目)の2回にわたって、構造物からコアを採取して圧縮強度、弾性係数、中性化深さ、鉄筋の発錆状況等を調査した。その結果を表-3.1、3.2に示す。発錆状況は、水平鉄筋の下端に2回の調査ともブリージング沈下によるすき間に沿った筋状の発錆がみられた。反発硬度の測定は、コア採取位置近傍で20か所実施した。圧縮強度を $F = -1.84 + 1.30 R_o$ (R_o : 反発硬度)で推定すると、材令10年は305kgf/cm²、11.5年は281kgf/cm²で、コアの圧縮強度を大きく下まわった。これは、構造物の厚さが20cmの薄い版で、十分な反発が得られなかったためと思われる。

表-3.1 10年目の調査結果

位置 [*] (cm)	推定強度 ^{**} (kgf/cm ²)	コア強度 (kgf/cm ²)	Ed ($\times 10^4$ kgf/cm ²)	Es ($\times 10^4$ kgf/cm ²)	中性化深さ (mm)	含水比 (%)
35	285	-	-	-	北 5.5、南 8.3	7.9
45	304	-	-	-	北 10.5、南 7.5	7.8
45	333	404	36.1	30.1	-	-
55	274	443	36.6	28.4	-	-
95	317	-	-	-	北 5.8、南 5.5	7.7
95	314	451	36.0	29.4	-	-
平均	305	433	36.3	29.3	北 7.25、南 7.08	7.8

* 位置は、コアの採取位置で胴天端からの距離、** 反発硬度から求めた強度

表-3.2 1.1.5年目の調査結果

位置 [*] (cm)	推定強度 ^{**} (kgf/cm ²)	コア強度 (kgf/cm ²)	Ed ($\times 10^4$ kgf/cm ²)	Es ($\times 10^4$ kgf/cm ²)	中性化深さ (mm)	含水比 (%)
45	263	-	-	-	北 7.8、南 10.0	7.8
45	258	437	42.1	30.9	-	-
45	258	-	-	-	北 6.5、南 9.8	8.0
90	300	-	-	-	北 6.3、南 5.8	8.1
90	284	451	43.7	30.4	-	-
90	328	477	43.7	32.6	-	-
平均	282	455	43.2	31.3	北 6.83、南 8.50	8.0

5. 考 察

5.1 強度特性

構造物コンクリートの標準養生供試体とコアの圧縮強度と弾性係数を図-2に示す。標準養生では、1年後の強度の伸びは緩やかであるが、現場コアは10年以上経過しても強度増加が見られ、今後も強度の伸びが続くと思われる。依田が行った普通骨材を用いたコンクリートの屋外養生強度を基準にして、今回の結果を図-3に示す。普通ポルトランドセメントコンクリートは、10年以上

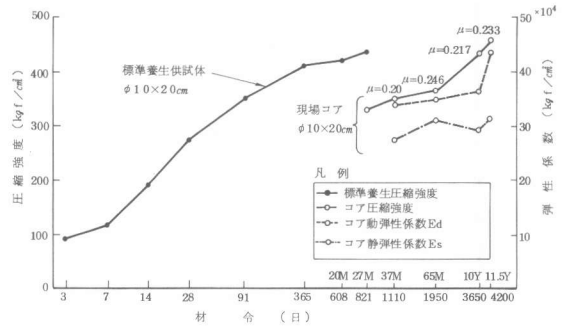


図-2 圧縮強度と弾性係数

降の強度の伸びは殆どな

いが、高炉セメントコンクリートは強度の伸びがある。しかし今回の現場コアは、これらに比較すると、絶対値だけでなく強度の増加割合も大きい。これは高炉セメントの影響だけでなく、細骨材に

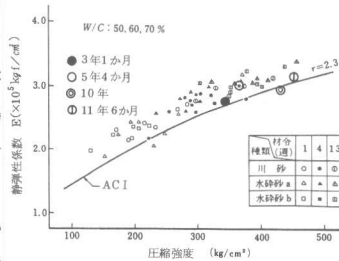


図-4 圧縮強度と静弾性係数の関係

水砕スラグを用いたために水硬性が発揮され²⁾、細骨材中の細粒部分がセメント質材料として作用したためと思われる。

コア強度は、採取位置が下方のものほど大きく、ブリーチングの影響が現われたと考えられる。

圧縮強度と静弾性係数の関係を福士³⁾が行った結果を基準として、図-4に示す。弾性係数は一般に標準養生に比べ、気中養生の方が小さい傾向⁴⁾があるが、本構造物は屋外環境条件にもかかわらず、ACIの $E = 4310 \rho^{3/2} f_c^{1/2}$ の式を満たしている、一般骨材の場合の標準養生と大差ない傾向を有している。

ポアソン比は0.2~0.25の範囲にあり、通常のコンクリートと大差なかった。

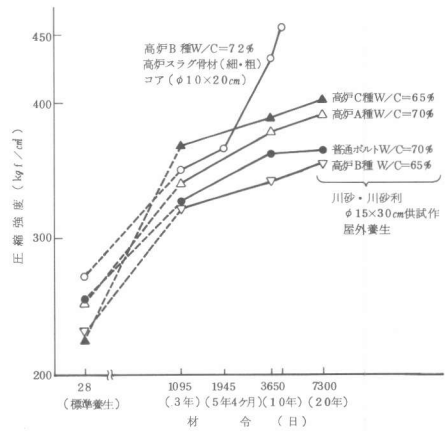


図-3 各種セメントを用いたコンクリートの長期強度

5.2 中性化

中性化は、1%フェノールフタレイン溶液をコンクリート表面に噴霧して、表面から赤着色部までの距離を測定した。図-5にその結果を示す。典型的な中性化速度は、式(1)で示されるが、 $t=0$ のとき $x=0$ とすると、今回の中性化深さは式(2)となる。

$$t = \frac{0.3(1.15+3w)}{R^2(w-0.25)} x^2; w/c > 60\% \dots\dots\dots (1)$$

$$x = 0.387(\sqrt{t})^{0.548}, (\tau = 0.994) \dots\dots\dots (2)$$

x : 中性化深さ (cm), t : 材令 (年), w : 水セメント比, R : 中性化率
式(2)に式(1)を代入し R を求めると式(3)となる。

$$R = \frac{\sqrt{0.15 \times 0.3(1.15+3w)}}{w-0.25} (\sqrt{t})^{-0.452} \dots\dots\dots (3)$$

依田¹⁾が実施した20年間屋外暴露した高炉セメントコンクリート(高炉B種、川砂、川砂利、 $w/c=0.65$)の結果では、平均中性化深さ x (cm)は $x=0.245(\sqrt{t})^{0.954} \dots\dots\dots (4)$

で表われ、中性化率は $R = \sqrt{0.06 \times 0.3(1.15+3w)} \times (\sqrt{t})^{-0.046} / (w-0.25)$

となる。図-6に R と \sqrt{t} の関係を示す。水和活性のない骨材を用いたコンクリートの中性化率は、材令に関係なくほぼ一定の値であるが、水硬性がみられる高炉スラグ細骨材では、中性化率は材令とともに小さくなっている。中性化率は圧縮強度の逆数に比例関係にある⁶⁾といわれ、図-2のように強度増加が大きければ、中性化率は小さくなると考えられる。圧縮強度(kgf/cm²)と材令(年)は、 $\sigma_c = 277(\sqrt{t})^{0.386}, (\tau = 0.979)$ で表われ、これを式(2)に代入し、高炉B種、川砂の式(4)に指数を合わせると、

$$x = 0.245(\sqrt{t})^{0.954} \times \{1.5 / (\frac{1}{277} \times \sigma_c \times (\sqrt{t})^{0.02})\} \text{となり、材令が大きくなっても、これに応じ圧縮強度が相当量増大すれば、透気性}$$

(CO₂の拡散係数)も小さくなり、中性化はあまり進行しないこととなる。同様に普通ポルトランドセメントコンクリート(川砂、川砂利、 $w/c=70\%$)について圧縮強度、中性化深さ、材令の関係を既応の報告¹⁾にしたがって求める。

$$\sigma_c = 306(\sqrt{t})^{0.123}; (\tau = 0.947), x = 0.245(\sqrt{t})^{1.167}; (\tau = 0.976) \dots\dots(5), x = 0.245(\sqrt{t})^{1.044} \times \sigma_c / 306$$

となり、時間とともに中性化深さは増加して行く。

式(3)、(4)、(5)とFickの拡散式とを比較すると、

Fickの拡散式 $dQ = D \cdot c_0 \cdot A \cdot \frac{C_1 - C_2}{x} dt$ Q : CO₂の拡散量, D : 拡散係数, A : 面積, x : 中性化深さ
 $dQ = a \cdot A \cdot dx$ C_1 : コンクリート外面のCO₂濃度, C_2 : 中性化境界面のCO₂濃度(=0)
 $x^2 = 2 \frac{D \cdot c_0}{a} C_1 t$ a : 中性化に必要なCO₂量, t : 時間

式(4)、(5)はほぼ $[x]^2 = k[t]$ の関係となり、Fickの式と一致するが、式(3)はほぼ $[x]^2 = k'(t)^{\frac{1}{2}}$ となり、中性化の挙動が異なるといえる。これは、材令とともにコンクリートの細孔組織が密実となり、CO₂の侵入が抑えられるためと考えられる。長期にわたり強度の発現する高炉セメントで、しかも水和活性のある高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの中性化を測定する場合、促進中性化試験(例えば、CO₂濃度5%)を行って判断すると、普通ポルトランドセメントなどの場合に比べ、中性化深さは相対的に大きな値となる。したがって屋外屋内などの環境条件と圧縮発現状況とを照合しながら実験を行う必要がある。

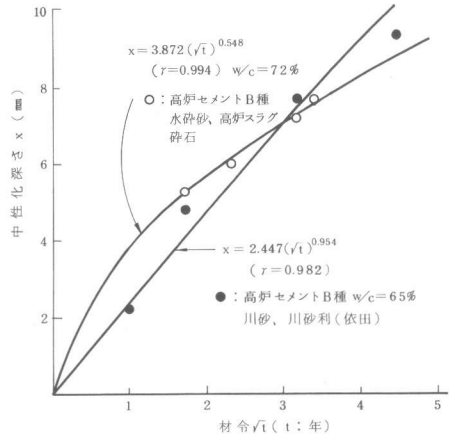


図-5 材令と中性化深さの関係

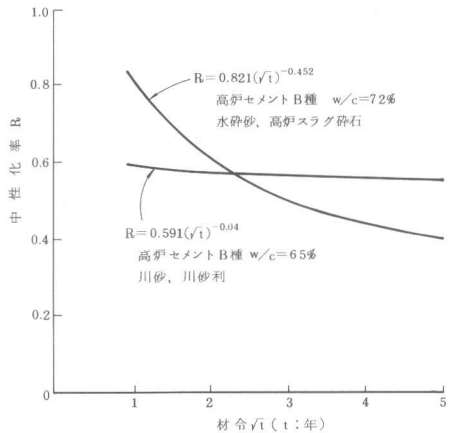


図-6 材令と中性化率の関係

今回のように水セメント比が72%で、一般のコンクリートよりも単位水量の多いコンクリートは、中性化が早いと考えられるが、材令が長期になると非常に中性化が遅くなるのは、コンクリートがち密化したためと推定できる。10年目の現場コアを長手方向に約1cmの厚さに切断し、その中央部から約4gの試料を採取して、水銀圧入計でポロジターを測定した。試料の位置と累積細孔量の関係を図-7に示す。中性化部と未中性化部を比較すると、前者の細孔量は後者よりも多かった。図-8に細孔径分布を示す。中性化部は、全ての径で未中性化部よりも細孔量が多く、特に240~270Åでの違いが顕著である。飛板は、微細なポロジターは中性化にあまり寄与せず、420Å以上の細孔量と中性化深さは比例関係にあるとし、今回の調査結果は一致した。

以上より、中性化はコンクリートのち密度、ひいては強度と関係が深い。中性化を抑制するために長期強度の増加は望ましいことであるが、最初に外気に接するまでに十分な水和水が進行しないと、初期劣化により中性化が進むとともに長期強度も発現しない恐れがある。今後この点についても研究を進めたい。

6. 結 論

屋外環境に暴露された薄い断面の構造物調査を、施工後2年目の昭和51年10月から11.5年目の昭和61年1月まで継続して実施し、次の結論を得た。

- (1) 高炉スラグ細骨材を使用すると、環境条件次第では、水と活性が有利に働き長期の強度増加がある。
- (2) 長期の強度増加が認められる場合は、セメントの種類に関係なく中性化は遅くなる。

$$x = 0.387(\sqrt{t})^{0.548}, \quad R = 0.821(\sqrt{t})^{-0.452}$$

- (3) ポロジター測定の結果から、長期にわたってち密なコンクリートが得られることが推察される。

(謝 辞)

昭和51年10月の調査は、東京大学 岸谷孝一教授が直接なされたものである。調査結果をまとめるに当たり、御助言をいただきました(財)建材試験センター 飛坂基夫氏に感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 依田：20年間自然暴露した高炉セメントコンクリートの中性化について、日本建築学会学術講演会梗概集、昭和57年10年
- 2) Numata, S.: "Properties of ultra-highly pulverized granulated blast-furnace slag-portland cements blends"; 2nd Int. Conf. on the use of fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, April 1986, Madrid Spain
- 3) 日本鉄鋼連盟：コンクリート用水砕スラグ細骨材の使用基準の作成に関する研究、1978. 3
- 4) 飛坂：低水セメント比コンクリートの圧縮強度及び静弾性係数に及ぼす養生方法の影響、建材試験情報10、1983年
- 5) 岸谷：鉄筋コンクリートの耐久性、鹿島建設技術研究所出版部、1963. 2
- 6) 和泉ら：コンクリートの中性化に及ぼすセメントの種類、割合および養生条件の影響について、第7回コンクリート工学年次講演会論文集、1985
- 7) 飛坂：高性能減水剤を使用した低水セメント比コンクリートの中性化、第6回コンクリート工学年次講演会論文集、1984

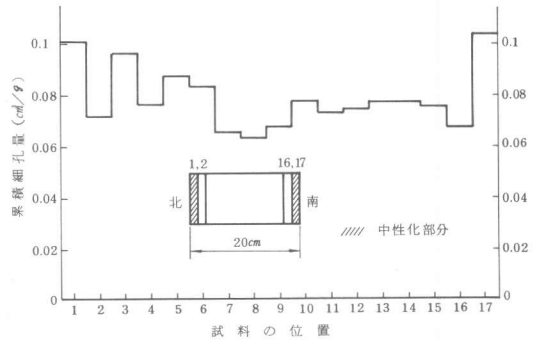


図-7 位置と累積細孔量の関係

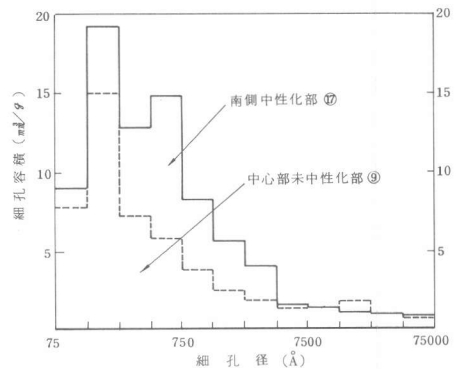


図-8 細孔径分布