

高炉スラグ微粉末を使用した大型セグメント用コンクリートの性質に関する実験的研究

内田恵之助*・和佐勇次郎**・阿部廣二***・井上啓明****

東京湾横断道路シールドトンネルのRCセグメントの耐久性向上を目的として、高炉スラグ微粉末の適用性について、モデル供試体を中心に検討した。主な検討項目は、強度特性、耐海水性、塩分拡散性、透水性、および温度上昇量や振動締め条件とひびわれの関係である。また、各特性に及ぼす要因の把握と併せて、セグメント製作時における適用方法についても検討した。

Key Words : segment concrete, durability, steam curing, vibration, ground granulated blast furnace slag

1. ま え が き

東京湾横断道路トンネルは、海面下約60mの軟弱地盤中に建設される外径13.9mの大断面シールドトンネルである。このため、RCセグメントは高い止水性と耐久性を具備している必要がある。従って、コンクリートの特性として海水環境下で常時6 kgf/cm²の水圧に耐え得る止水性と塩分に対する耐久性を発揮し、且つ、セグメントは厚さが65 cm、幅1.5 m、弧長約4 mの大型であることから、マスコンクリートとして温度ひび割れの発生を抑制できる材料の選択と製作条件の選定が課題となる。

小林ら^{1),2)}は高炉スラグ微粉末を用いると塩素の侵入が抑制されると共に、酸素の拡散に対する抵抗性が向上するという結果を得、高炉スラグ微粉末使用による鉄筋腐食防止の有効性を指摘している。大即ら³⁾は各種セメントを使用したコンクリートを海洋環境下に暴露し、高炉セメントB種を用いたコンクリートはポルトランドセメントを用いたものに比較して、塩素の浸透が少なく鉄筋の腐食およびコンクリート強度の経年変化が少ないと報告している。以上のように、高炉スラグ微粉末を使用することにより、セグメントコンクリートの耐久性を向上できる可能性がある。また、高炉スラグ微粉末コンクリートの主として常温時の低発熱性については良く知られているが、国府ら⁴⁾の指摘にあるように、高炉スラグ微粉末コンクリートはその置換率や養生温度によって発熱性状が変化するため、セグメント製造時に行う蒸気養生の影響を明らかにする必要がある。

今回、高炉スラグ微粉末を使用したセグメントコンクリートについて、以下の点に着目して実験的研究を行いセグメント製作時における対策まで検討したので、ここにその研究成果を示す。

① 耐海水性の向上

セグメントは製作工程で蒸気養生を行うことが多い。既述文献で高炉スラグ微粉末の耐海水性の向上が確認されているものは、蒸気養生されていないものであり蒸気養生を行った場合、耐海水性が失われぬか検討する。

② 内部温度の抑制

大型セグメント製作において、高炉スラグ微粉末を使用した蒸気養生コンクリートの部材内部の発熱状態を把握する。

③ 強度特性の把握

蒸気養生を行った場合の高炉スラグ微粉末使用コンクリートの強度特性を把握し、セグメントコンクリートに要求される脱型時強度、設計基準強度が十分に確保できる配合条件、製造条件を明らかにする。

④ ひびわれ発生状況の把握

セグメントには、主に仕上げ面に発生する網目状のひびわれ、側面および仕上げ面に発生する規則性のある連続したひびわれ、シールド溝部に沿った水平方向のひびわれの3種類のひびわれが発生することがある。このようなひびわれがセグメント製造時にどのようにして発生するかを把握し、併せて振動条件とひびわれの関係を検討する。

2. 実験概要

本研究は、3つのシリーズに分かれている。シリーズⅠは室内試験により、高炉スラグ微粉末を使用したセグメントコンクリートの強度発現性について検討したものである。シリーズⅡは、東京湾横断道路シールドトンネルに使用するセグメントを対象に、モデル供試体を作製

* 正会員 東京湾横断道路(株)常務取締役
(〒102 東京都千代田区1番町15番地5号)

** 正会員 元東京湾横断道路(株)設計部 設計課長

*** 正会員 元東京湾横断道路(株)設計部 設計課長代理

**** 正会員 元東京湾横断道路(株)設計部 設計係長

Table 1 セメントおよび高炉スラグ微粉末の化学分析結果

Sym- bol	igloss (%)	insol. (%)	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)	MnO (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	Cl (%)
N1	1.0	0.4	63.4	5.8	3.0	21.8	1.4	0.1	2.0	0.32	0.46	0.006
N2	1.0	0.4	63.3	5.7	3.0	21.6	1.4	0.2	2.0	0.46	0.32	0.005
N3	0.9	0.2	63.1	5.6	3.3	22.1	1.3	0.1	2.1	0.52	0.44	0.005
S1	1.8	0.1	42.6	12.9	0.3 **	31.7	5.4	0.3	2.0	0.36	0.32	0.002
S2	1.7	0.1	42.3	13.4	0.3 **	32.4	5.9	0.3	2.0	0.23	0.32	0.002
S3	1.8	0.1	43.0	13.4	0.3 **	31.8	5.8	0.3	2.0	0.21	0.31	0.003

*1)FeO

Table 2 セメントの物理試験結果

Sym- bol	Specific gravity	Specific surface area (cm ² /g)	Setting time			Compressive strength (MPa)			
			W (%)	Initial (hr-min)		3d.	7d.	28d.	91d.
				Final (hr-min)					
N1	3.16	3250	28.1	2-37	3-52	15.1	21.7	41.0	47.6
N2	3.16	3200	27.8	2-34	3-52	13.7	23.7	41.1	48.7
N3	3.16	3350	28.0	2-33	3-50	15.7	23.7	41.9	47.0

し、高炉スラグ微粉末使用によるコンクリート内部温度の抑制の確認、強度および耐久性の確認、およびひびわれの発生状況の把握を実施したものである。シリーズⅢでは、セグメントコンクリート成形時の振動条件やコンクリートのスランプがひびわれに及ぼす影響について検討した。

土木学会「高炉スラグ微粉末規格(案)」では、高炉スラグ微粉末の置換率は、コンクリートの温度上昇を抑制する場合には50~70%、海洋コンクリートの場合には40%以上が望ましいとされている。一方、セグメント製造サイクル確保の面からは、なるべく初期強度の発現性が大きいこと(高炉スラグ微粉末の置換率が小さいこと)が望ましいと考えられる。そこで、本研究では、高炉スラグ微粉末の置換率50%を主に検討している。

(1) 強度特性の検討(シリーズⅠ)

a) 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント(記号N1)を、高炉スラグ微粉末は実機の堅型ミルで製造したもの(記号S1)を用いた。Table 1~3に、これらの化学成分と物理試験結果を示す。粗骨材には碎石(最大寸法20mm、比重2.71、粗粒率6.67)を用い、細骨材には砕砂(比重2.60、粗粒率2.78)を用いた。混和剤はJIS A 6204「コンクリート用化学混和剤」に規定されたⅠ種に適合する高性能減水剤(ナフタリンスルホン酸塩系)を用いた。

b) コンクリートの配合および供試体の成型

Table 4に示す配合のコンクリートを強制パン型ミキサー(容量:100リットル)で120秒間練り混ぜた。供試体の成型は振動台(振動数60Hz、振幅1mm)により行った。

なお、試験は全て恒温恒湿室で実施し、所定の温度で

Table 3 高炉スラグ微粉末の物理的性質

Sym- bol	Specific gravity	Grass content (%)	Specific surface area (cm ² /g)	basasity	Activity index		
					7d.	28d.	91d.
S1	2.89	99	4800	1.87	84	102	112
S2	2.89	99	4410	1.86	80	97	106
S3	2.89	99	4300	1.88	78	101	110

Table 4 コンクリートの配合(シリーズⅠ)

No	Slag cont- ent (%)	Temp. of concrete (°C)	C _m (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	Exit quantity (kg/m ³)					
								W	C	Slag	S	G	ad.
1	50	10.5	20	1.7	1.0	34.5	37.0	138	200	200	683	1207	4.3
2	50	10.5	20	1.8	1.1	31.1	36.0	140	225	225	655	1198	4.5
3	50	15.5	20	2.0	1.3	34.5	37.0	138	200	200	683	1207	4.3
4	50	15.5	20	2.0	1.3	31.1	36.0	140	225	225	655	1198	4.5
5	40	21.0	20	2.5	1.4	35.0	36.9	140	200	200	683	1207	4.3
6	50	21.0	20	2.6	1.1	34.5	37.0	138	200	200	683	1207	4.3
7	60	21.0	20	4.0	0.8	34.0	37.1	136	200	200	683	1207	4.3
8	50	23.6	20	2.8	1.0	34.5	37.0	138	200	200	683	1207	4.3

計量・練り混ぜ・成型を行った。

c) 養生方法

材料温度および雰囲気温度は、10°C、15°C、20°C、30°Cとし、前置時間2時間、昇温速度20°C/hr、降温速度15°C/hrの条件で蒸気養生を行った。蒸気養生の最高温度(以下、蒸気養生温度と記す)は45°C~65°C、継続時間は2hr~4hrの範囲で変化させた。

(2) 耐久性の検討(シリーズⅡ)

a) 使用材料

セメントは、セグメント製造工場で使用している市販の普通ポルトランドセメント(記号N2)を、高炉スラグ微粉末(S2)は、実機の堅型ミルで製造したものを用いた。Table 1~3に化学成分と物理試験結果を示す。その他の材料は、「シリーズⅠ」と同じである。

b) コンクリートの配合および供試体の成型

Table 5に示す配合のコンクリートを実機プラント(強制2軸ミキサー:容量1m³)で練り混ぜ、モデル供試体(厚さ65cm、長さ176cm、幅150cmの矩形)型枠に3層に分けて打ち込み、振動台(振動数60Hz、振幅0.17mm)で“1層目60秒+2層目60秒+3層目150秒”の振動締めを行った。

c) 養生条件

本試験は冬場を実施したもので、打ち込み温度、蒸気養生条件、後養生条件はTable 6に示すとおりである。

一般に、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは、初期の湿潤養生期間が耐久性等のコンクリートの品質に影響を与えることが考えられるため、水中養生期間を3日および7日と変化させた。

(3) ひびわれ防止方法の検討(シリーズⅢ)

a) 使用材料

使用したセメント(N3)と高炉スラグ微粉末(記号

Table 5 コンクリートの配合 (シリーズII)

Slag content (%)	C _{max} (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/s (%)	Unit quantity (kg/m ³)					
						F	C	Slag	S	G	ad.
0	20	3±1	2±1	34.5	37.0	138	400	—	688	1217	4.8
50	20	3±1	2±1	34.5	37.0	138	200	200	683	1207	4.3

Table 6 耐久性の検討 (シリーズII) の試験条件

Specimen	Slag content (%)	Temp. of concrete (°C)	Slump (cm)	VB (sec)	Air (%)	Condition of steam curing	Term of water-curing
M1	0	11.5	3.5	2.9	1.8	20°C/hr 15°C×2hr	7d
		12.0	3.0	16.0	1.5	45°C×2hr 15°C/hr	
M2	50	11.0	3.0	12.0	1.7	20°C/hr 12°C×2hr	7d
		11.0	3.0	12.4	1.6	45°C×3hr 15°C/hr	
M3	50	14.0	3.0	14.0	1.6	20°C/hr 13°C×2hr	3d
		14.0	2.5	16.6	2.2	45°C×3hr 15°C/hr	
M4	50	11.0	3.0	11.0	1.4	20°C/hr 14°C×2hr	7d
		12.0	4.0	6.0	1.8	65°C×3hr 15°C/hr	
M5	50	13.0	2.5	17.6	1.8	20°C/hr 12°C×2hr	7d
		13.0	4.0	12.6	1.8	45°C×3hr 5°C/hr	

Table 7 コンクリートの配合 (シリーズIII)

Slag content (%)	C _{max} (mm)	W/C (%)	s/s (%)	Unit quantity (kg/m ³)						Slump (cm)	Air (%)
				F	C	Slag	S	G	ad.		
0	20	33.5	46.0	134	400	—	864	1028	4.0	2.5	2.5
50	20	33.3	45.0	133	200	200	842	1041	3.2	0.8, 1.3	1.8, 2.3
50	20	34.5	45.0	138	200	200	837	1035	3.2	3.8 ~4.6	2.2 ~2.5

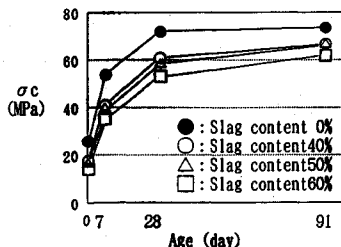


Fig.1 スラグ置換率が強度に及ぼす影響

S3)の化学成分および物理試験結果をTable 1~3に示す。粗骨材には、砕石(最大寸法20mm, 比重2.65, 粗粒率6.53)を用い, 細骨材には砕砂(比重2.63, 粗粒率2.85)を用いた。混和剤は, JIS A 6204「コンクリート用化学混和剤」に規定されたI種に適合する高性能減水剤(ナフタリンスルホン酸塩系)を用いた。

b) コンクリートの配合および供試体の成型

Table 7に示す配合のコンクリートを実機プラント(強制2軸ミキサー:容量1m³)で練り混ぜ, モデル供試体(厚さ60cm, 長さ120cm, 幅100cmの矩形)型枠に2層または3層に分けて打ち込み, 振幅1mmの振動台において振動数を40Hz, 50Hz, 60Hzと変化させた。また, 振動時間は2層打ちの場合「1層目60秒+2層目60秒」, 「1層目60秒+2層目90秒」, 「1層目180秒+2層目180秒」とし, 3層打ちの場合「1層目40秒+2層目40秒+3層目40秒」とした。

c) 養生条件

養生は, 高炉スラグ微粉末添加コンクリートについてはTable 6のM2と, スラグ無添加はTable 6のM1と同じ条件で行った。

3. 試験方法

本研究で実施した試験のうち, 主な試験項目の試験方法を以下に示す。

a) コンクリートの圧縮強度

試験は, 脱型時, 7日, 28日, 91日において, JIS A 1108に準じて実施した。ここでいう脱型時とは原則として18時間であるが, 一部においては15時間, 21時間においても試験を実施している。なお, 圧縮強度試験と併せて, ASTM C 469-65に準じて静弾性係数を測定した。

b) コアの圧縮強度

シリーズIIのモデル供試体から, 厚さ方向にφ10cm×65cmのコアを抜き, 各部位の圧縮強度を測定した。

c) モデル供試体の温度履歴

モデル供試体(厚さ65cm, 長さ176cm, 幅150cm)の厚さ方向に, 打設面から10mm, 167.5mm, 325mm, 482.5mm, 640mmの位置に熱電対を埋め込み, モデル供試体内部の温度履歴を測定した。併せて外気温度, 蒸気養生槽内温度, 養生水槽温度の測定を実施した。

d) 加圧塩分浸透

所定の養生の後, 3ヶ月間屋外暴露したシリーズIIのモデル供試体よりφ10cm×65cmのコアを抜き, 3日間20°C水中養生を行い, 温度20°C, R.H. 60%で14日間乾燥させてから, 加圧力6kgf/cm²で仕上げ面から人工海水を浸透させた。人工海水は, 土木学会規準「鉄筋コンクリート用防錆剤」に従って, NaCl: 24.5g, MgCl₂·6H₂O: 11.1g, Na₂SO₄: 4.1g, CaCl₂: 21.2g, KCl: 0.7gを全量が1リットルの水溶液(塩素イオン濃度: 18.3mg/リットル)になるように調整した。浸透期間は1年とし, 所定の期間浸透させた供試体の浸透面より1.5cm, 5cm, 10cm, 20cmの位置から試料を採取し, JCI-SC 4「硬化コンクリート中に含まれる塩分分析方法」により, 各深さの全塩分量を測定した。

e) 透水

海水浸透試験と同様に, 材令3ヶ月のモデル供試体よりφ10cm×10cmのコアを採取し, 浸透前に3日間20°C水中養生を行い, 温度20°C, R.H. 60%で14日間乾燥させてから, 加圧力10kgf/cm²で透水試験を行った。加圧期間は8日, 56日, 116日とした。

f) 海水浸漬

シリーズIIのモデル供試体と同じコンクリートでφ10

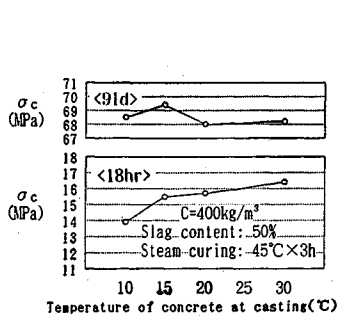


Fig.2 練り上がり温度と圧縮強度の関係

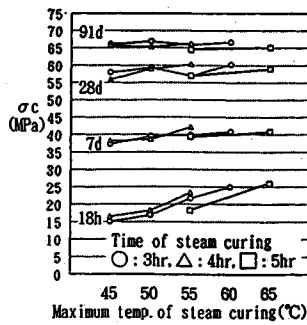


Fig.3 蒸気養生条件が圧縮強度に及ぼす影響

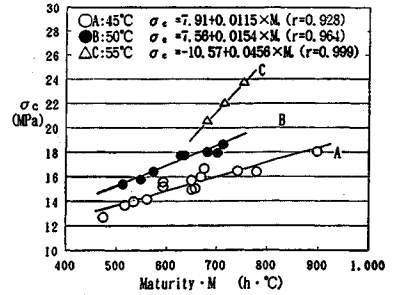


Fig.4 積算温度と圧縮強度の関係

×40 cm の供試体を作製し、所定養生後3ヶ月間室内気中養生を行った。その後3日間20°C水中養生し、温度20°C R. H. 60%で14日間乾燥させてから、人工海水および水道水に浸漬し、外観観察、長さ変化、重量変化、動弾性係数を浸漬後1, 2, 4, 8, 13, 26, および52週で測定した。また、浸漬後52週の供試体については、細孔径分布、X線解析、化学分析を行った。

9) ひびわれ調査

モデル供試体に1辺20 cmの格子を書き、クラックゲージで0.05 mm以上のひびわれについて、ひびわれ発生位置および幅を脱型後28日および91日で測定した。また、特徴的なひびわれについては、最大ひびわれ幅の部位からφ10 cmのコアを採取し、マキュロクロム液を常圧で浸透させ、割裂および研磨によりひびわれ深さを測定した。

4. 試験結果

(1) 強度特性の把握(シリーズI)

a) スラグ置換率の影響

Fig.1に高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。スラグ置換率が増加するほど脱型強度は小さくなったが、材令の経過に伴ってスラグ置換率の影響は軽減される傾向にあった。即ち、スラグ置換率が圧縮強度に及ぼす影響は、標準養生や気中養生について多くの報告がなされているが^{6),7)}、蒸気養生においても同様の傾向を示すことが判った。また、普通ポルトランドセメント単味では材令28日から91日の強度の伸びはほとんど認められなかったが、高炉スラグ微粉末使用コンクリートでは蒸気養生を行っても、強度の増加が認められた。

b) 練り上がり温度および後養生温度の影響

Fig.2に高炉スラグ微粉末使用コンクリート(置換率50%)の練り上がり温度と圧縮強度の関係を示す。本実験では練り上がり温度と蒸気養生を始めるまでの前養生温度は同一としている。高炉スラグ微粉末使用コンクリートは練り上がり温度および前養生温度が低い場合には、脱

型強度が低い傾向にあり、特に、15°C以上に比べて10°Cでの強度低下が顕著であった。

c) 蒸気養生条件の影響

Fig.3にコンクリートの練り上がり温度20°Cの場合の蒸気養生温度と、その継続時間が圧縮強度に及ぼす影響を示す。蒸気養生温度が高くなるほど、脱型時および材令7日、28日の圧縮強度は増加する傾向にあったが、材令91日では蒸気養生温度の影響は認められなかった。また、蒸気養生温度の継続時間が長くなるほど、脱型強度は増加する傾向にあったが、材令7日以降では継続時間による強度の差異はほとんど認められなかった。

d) 積算温度の影響

Fig.4に練り上がり温度:10°C~30°C、試験材令:15時間~21時間における積算温度(M)と圧縮強度の関係を示す。河野ら⁸⁾は、高炉セメントB種について蒸気養生温度一定の条件で継続時間を変化させ、積算温度1000°C·hrまでは積算温度と強度は同一直線で表されると報告している。本研究においても、蒸気養生温度が同一の場合には、練り上がり温度や蒸気養生温度の継続時間にかかわらず、積算温度と圧縮強度には直線関係が認められ、これらの要因は積算温度に包含できることが判る。しかし、蒸気養生温度が異なる場合には、積算温度と脱型強度の関係線は異なり、同一積算温度でも蒸気養生温度が高いほど圧縮強度は大きくなった。このような傾向が、高炉スラグ微粉末添加コンクリートに特有のものなのか、セメント全般に適合するものかは定かではないがRoy⁹⁾や国府ら⁴⁾が指摘している様に、高炉スラグ微粉末の水和反応の温度依存性が大きいことに原因しているものと考えられる。

e) 練り混ぜ水の温度の影響

高炉スラグ微粉末コンクリートの練り上がり温度の影響についての追加検討として、温水練りコンクリートの検討を実施した。Fig.5に練り混ぜ水温度(WO)およびコンクリートの練り上がり温度(CO)と圧縮強度の関係を、Table 8に練り混ぜ水温度がセメントペーストの性状に及ぼす影響を示す。なお、水以外の各材料の温度

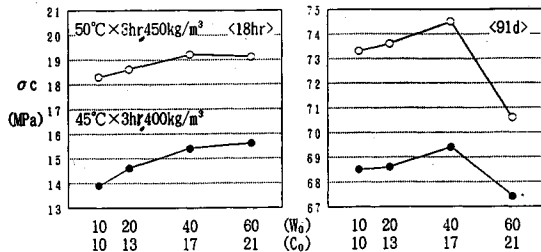


Fig.5 温水練りコンクリートの圧縮強度試験結果

Table 8 温水練りでの凝結・安定性試験結果

Temperature of water (°C)	Cement Past			Soundness
	Temperature (°C)	Setting time(vicat)		
		Initial (h-m)	Final (h-m)	
20	17	3-54	5-34	stable
40	28	3-51	5-21	stable
60	34	3-24	5-04	stable

Temperature of cement, aggregate, admixture: 10°C

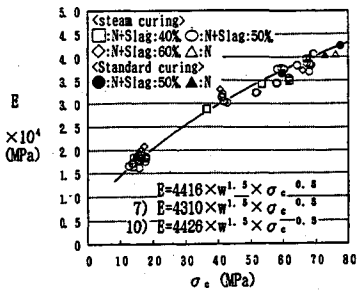


Fig.6 圧縮強度と静弾性係数の関係

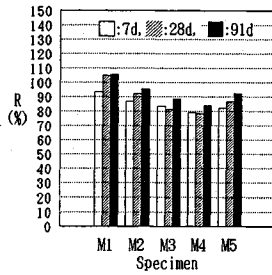


Fig.7 標準養生に対する所定養生の強度比

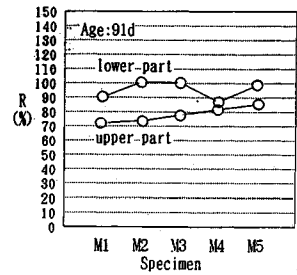


Fig.8 所定養生に対するコアの強度比

および雰囲気温度は 10°C とした。

腕型強度は、練り混ぜ水温度の上昇に伴って増加する傾向にあったが、練り混ぜ水温度 40°C 以上では圧縮強度はほぼ一定となった。材令 91 日の圧縮強度は、練り混ぜ水温度 60°C では他の温度に比べて低かった。強度発現性から見る限り、温水の使用効果は水温 40°C までは効果が認められた。また、練り混ぜ水温度 10~60°C の範囲では、セメントの凝結および安定性試験結果に異常は無くフレッシュコンクリートの性状も特に変化は認められなかった。温水練りがコンクリートの耐久性に及ぼす影響を調べるためにモルタルの細孔径分布を測定したが、細孔量 0.0561~0.0649 cc/g、平均細孔径 78.1~80.9 Å で、練り混ぜ水温度 10~60°C の範囲では細孔径分布に差異は無く、硬化体は健全なものであった。

f) 圧縮強度と静弾性係数の関係

Fig.6 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。普通ポルトランドセメント単味と高炉スラグ微粉末の置換率 10~60% は、蒸気養生・標準養生に係わらず、圧縮強度と静弾性係数の関係に差異は認められなかった。また、圧縮強度と静弾性係数の関係式は、遠藤ら⁷⁾や田沢ら¹⁰⁾の関係式とほとんど変わらなかった。

(2) モデル供試体試験 (シリーズII)

a) モデル供試体の各種養生条件とコア強度

Fig.7 に標準養生の圧縮強度を 100% とした場合の製品同一養生の強度比 (R) を示す。これは、シリーズII のモデル供試体作製時に併せて実施した試験結果であり、コンクリートや養生条件はモデル供試体と同じである。高炉スラグ微粉末使用コンクリート (M2, M3, M4,

M5) の強度比は、材令 7 日で標準養生の 79~87%、材令 28 日で 78~92%、材令 91 日で 84~95% であり、材令の経過とともに標準養生の強度に近づく傾向にあった。また、蒸気養生後の水中養生期間が 3 日の M3 は、水中養生期間 7 日の M2, M5 に比べて長期材令の強度比が小さく、初期の湿潤養生が重要であることが分かる。

Fig.8 に製品同一養生の供試体の圧縮強度を 100% とした場合のコア強度比 (R) を示す。一般にコア強度は、製品同一養生供試体強度の 80~90% 程度¹¹⁾と報告されている。測定の結果では、厚さ 65 cm の下部 (表面から 40~60 cm) のコア強度比は 90~100%、上部 (表面から 5~25 cm) のコア強度比は 70~85% であった。上下部のコアの強度差は、振動による締固めの程度や材料分離に起因するものと推察されるが、各モデル供試体のスランプ、VB 値、材料種別等がコア強度比に及ぼす影響は明確でなかった。

b) コンクリートの温度上昇

モデル供試体の内部温度履歴を Fig.9 に示す。モデル供試体内部の最高温度は、蒸気養生温度 45°C ではスラグ無添加の M1 が約 58°C、スラグ 50% 添加の M2, M3, M5 が 41~47°C であり、スラグ無添加に比べてスラグ 50% 添加の場合には約 11~17°C 最高温度が低下した。しかし、スラグ 50% 添加したものでも、蒸気養生温度が 65°C の M4 では、内部の最高温度は約 53°C となった。また、表面部と内部の温度差は、スラグ無添加の M1 と蒸気養生の温度 65°C の M4 で約 35°C、その他が約 23~27°C であった。コンクリートの温度上昇を抑え、表面部と内部の温度差を小さくするためには、スラグ微

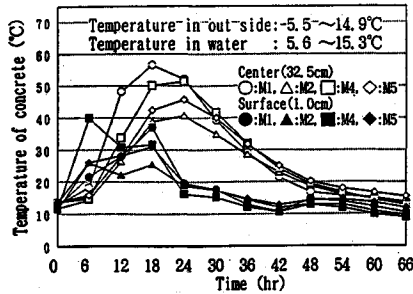


Fig.9 モデル供試体の温度履歴測定結果

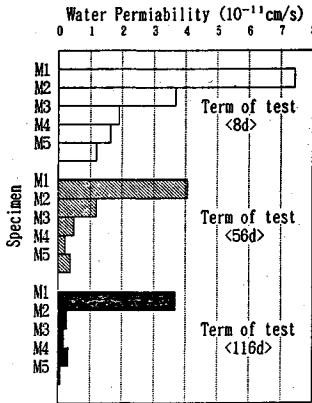


Fig.10 透水試験結果

粉末の添加が有効であり、蒸気養生温度を抑制することによって、温度上昇量と内外部の温度差を小さくできることが確認された。

c) 透水性

Fig.10 に各モデル供試体コアの透水試験結果を示す。スラグ無添加の M1 は、加圧期間 8 日では透過水量は計量できなかったが、供試体割裂断面は全面湿潤状態であり加圧期間 56 日、116 日で供試体を透過した。一方、スラグ添加の M2~M5 はいずれの加圧期間においても透過しなかった。そのためスラグ無添加 M1 の加圧期間 56 日、116 日はアウトプット法で、その他の供試体はインプット法で透水係数を算定した。

透水係数はスラグ無添加 M1 で $3.68 \sim 7.45 \times 10^{-11}$ cm/s で平均 5.07×10^{-11} cm/s、スラグ 50% 添加では $0.08 \sim 3.68 \times 10^{-11}$ cm/s で平均 0.97×10^{-11} cm/s となり、スラグ 50% 添加により平均で約 1/5 となった。加圧期間 8 日および 56 日では M2 が M3, M4, M5 より透水係数が大きかったが、加圧期間 116 日では差異は認められなかった。また、本試験の範囲内では、蒸気養生条件や後養生（水中養生期間）の差異は明確ではなかった。

Fig.11 に海水浸漬試験において測定した試験開始前、試験開始後 1 年の細孔径分布測定結果の一部を示す。スラグの添加により全細孔量は減少し、細孔径は小さく

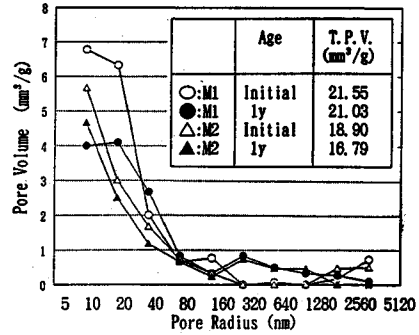


Fig.11 細孔径分布測定結果

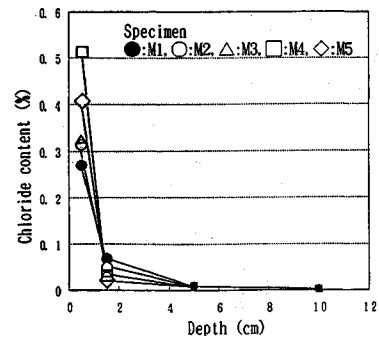


Fig.12 加圧面からの深さと全塩分量の関係

なっており、スラグの水和に伴う硬化体細孔の変化が透水係数の低減につながったものと考えられる。

d) 塩分浸透性

材令 1 年における加圧面からの深さと全塩分量の関係を Fig.12 に示す。浸透面から 0.5 cm では、高炉スラグ微粉末を 50% 添加した M2, M3, M4, M5 は、無添加の M1 より全塩分量が大きい値を示したが、1.5 cm、5.0 cm では逆に小さくなり、高炉スラグ微粉末が塩素イオンを加圧面表面に止まらせる傾向にあることが認められた。

Fig.13 に高炉スラグ微粉末を 50% 添加した M2 と、無添加の M1 の塩素に対する EPMA 測定結果を示す。Fig.12 の塩分量測定結果では、試料採取位置および採取厚さの影響により、高炉スラグ微粉末添加の有無による塩素イオンの浸透抑制硬化の差異は小さく測定された。しかし、EPMA 解析による塩素の浸透深さは、高炉スラグ微粉末無添加の M1 が約 22 mm、高炉スラグ微粉末 50% 添加の M2 が約 10 mm であり、高炉スラグ微粉末添加によって塩素イオンの浸透が明らかに抑制されていることが判る。

セメント水和物と海水浸透に伴い海水中の成分と反応して生じる各種生成物を調べるために、粉末 X 線回折を実施した。スラグ無添加の M1 とスラグ添加の M2 の結果を Table 9 に示す。なお M2 と M3, M4, M5 の差

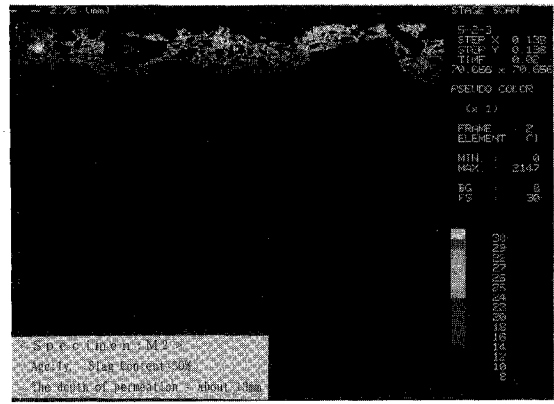
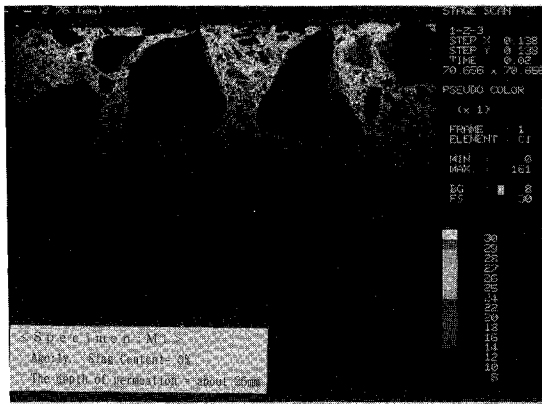


Fig.13 EPMA 測定結果 (CI)

Table 9 X線回折結果

Specimen	Depth (cm)		Ca(OH) ₂	CaCO ₃	Ettringite	Friedels salt
M1	1.5	Initial value	0.753	1.021	0.120	—
		Water	0.812	0.985	0.113	—
		Sea Water	0.787	1.021	0.123	—
	20.0	Initial value	0.737	1.132	0.114	—
		Water	0.823	0.769	0.132	—
		Sea Water	0.848	1.280	0.119	—
M2	1.5	Initial value	0.341	0.756	0.128	—
		Water	0.317	0.664	0.130	—
		Sea Water	0.362	1.257	0.133	—
	20.0	Initial value	0.261	1.831	0.124	—
		Water	0.335	0.752	0.125	—
		Sea Water	0.336	1.308	0.125	—

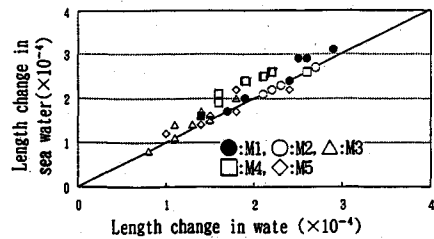


Fig.14 海水浸漬と水道水浸漬の長さ変化の関係

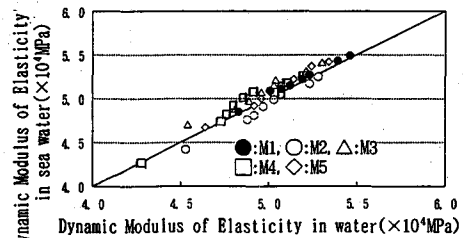


Fig.15 海水浸漬と水道水浸漬の動弾性係数の関係

異はほとんど認められなかった。ポルトランドイトの生成量は、M1がM2に比べて多く、スラグ添加によりポルトランドイトが減少した。カルサイトおよびエトリンサイトについては、スラグ添加の有無、浸漬条件、試料採取位置の差異は認められなかった。また、M1、M2ともモノサルフェート、フリーデル氏塩は同定されず、スラグ添加による塩分拡散の抑制に関する塩分の固定効果¹²⁾は本実験では明確ではなかったが、前項の透水性、硬体組織の緻密化およびEPMA解析結果などから、蒸気養生コンクリートにおいても、高炉スラグ微粉末添加による塩分浸透抑制効果が確認された。

e) 耐海水性

Fig.14に海水浸漬した供試体の長さ変化と水道水に浸漬した供試体の長さ変化の関係を、Fig.15に海水浸漬した供試体の動弾性係数と水道水に浸漬した供試体の動弾性係数の関係を示す。浸漬後52週までの結果では、M1と蒸気養生温度65°CのM4の海水浸漬が、水道水浸漬に比べて多少膨張（または膨潤）傾向にあったが、動弾性係数はほとんど差異が認められなかった。

Fig.16にモルタルの化学分析結果を結合材の化学分析値に置き換えた算定結果を示す。海水浸漬においてMg²⁺、SO₄²⁻、Na⁺、K⁺等のイオンの浸透は認められず、海水中の硫酸塩等による劣化は生じていないものと考えられる。

f) モデル供試体のひびわれ測定

ひびわれは、幾つかの原因により起こることが多く、その原因を特定する事は困難な場合が多い。本研究ではモデル供試体に発生したひびわれを、Fig.17に示すようなパターン別に3種類に分類し、検討を行った。

各ひびわれの特徴は以下の通りである。

Case 1: 鉛直方向に発生した規則性のある連続したひびわれで、主に脱型時または水中養生直後に発見された。

Case 2: 短く、不規則な網目状のひびわれで、脱型時または材令が経過して発見された。

Case 3: モデル供試体側面のシール溝上部に水平方向に発生した連続ひびわれで、主に脱型時に発見された。

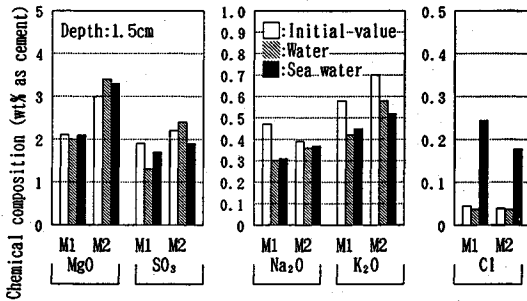


Fig. 16 海水浸漬供試体の化学分析結果 (セメント換算)

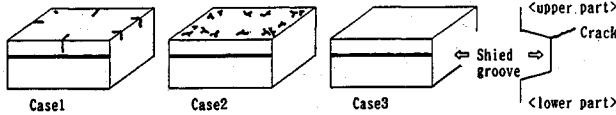


Fig. 17 モデル供試体に発生したひびわれのパターン

Table 10 ひびわれ深さ、幅の測定結果 (シリーズⅡ)

Specimen	Maximum Depth of Crack (mm)			Maximum Width of Crack (mm)		
	Case1	Case2	Case3	Case1	Case2	Case3
M1	30(X=20)	13	30(X=20)	0.05	< 0.05	0.05
M2	20(X=10)	10	25(X=15)	0.05	< 0.05	0.1-0.3

ひびわれ幅 0.05 mm 以上のものを対象に行ったひびわれ量 (ひびわれ長さ×幅) 測定結果をひびわれの種類別に Fig. 18 に、各ひびわれの中で最も大きかったひびわれの幅とその深さを Table 10 に示す。

Case 1 のひびわれは、モデル供試体の中心部と表面部の温度差が 23~26°C の M2, M3 にはほとんど認められなかったが、中心部と表面部の温度差が 35°C の M1 と M4 および温度差が約 27°C の M5 にひびわれが発生していた。これは主に温度ひびわれと考えられるが、ひびわれ量は少ないものの、ひびわれ深さは M1 で最大 30 mm, M2 で最大 20 mm あった。本研究で対象とした大型セグメントの場合、内部の温度上昇量や中心部と表面部の温度差が、通常のセグメントより大きくなる。そのため、蒸気養生温度を抑えたり、高炉スラグ微粉末を混合する事により、内部の温度上昇を低減させること、蒸気養生後急激な温度変化を与えないことが必要と考えられる。

Case 2 のひびわれは、スラグ無添加の M1 に比べてスラグ添加の M2~M5 が多く、特に蒸気養生後の水中養生期間が 3 日の M3 が多かった。蒸気養生では、雰囲気温度よりコンクリート温度が高くなる時期に、雰囲気の方が蒸気圧が低くなり、コンクリート表面から水分が蒸発する。Case 2 のひびわれはこの期間の収縮と水中養生後の乾燥収縮が原因と考えられるが、高炉スラグ微粉末を使用する場合には、蒸気養生中の水分の逸散を防ぎ、十分な水中養生を行う必要があるものと考えられる。

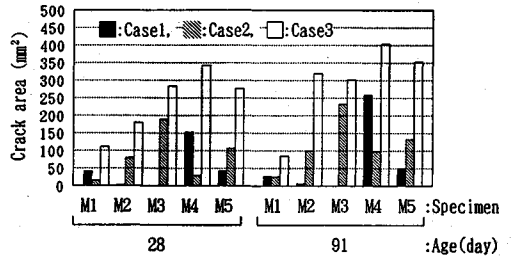


Fig. 18 ひびわれ量測定結果

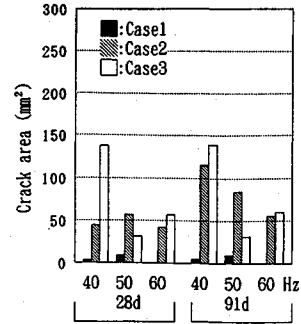


Fig. 19 振動数とひびわれ量の関係

Case 3 のひびわれは、各 Case の中では最もひびわれ量が多く、最大ひびわれ深さも M1 で 30 mm, M2 で 25 mm と最も深かった。このひびわれは、スラグ添加コンクリート、特に蒸気養生温度が 65°C の M4 に多く、シールド溝の上側の凹部の角に集中して発生していた。Case 3 のひびわれには、コンクリートの沈下や、蒸気養生開始後の型枠とコンクリートの熱伝達速度の違いから、型枠の熱膨張ひずみがコンクリートの界面に作用したものと考えられる。

(3) 振動締め条件とひびわれ (シリーズⅢ)

本研究で対象とした部材厚さの大きい大型セグメントを振動台で締める場合には、フレッシュコンクリートの性状や振動条件によって、過振動による分離や振動不足による内部欠陥がひびわれの原因になるものと考えられる。そこで、スランプ、振動数、振動時間とひびわれ量の関係について検討した。

Fig. 19 に振動台の振動数とひびわれ量の関係を、Fig. 20 にスランプおよび振動時間とひびわれ量の関係を示す。振動時間が“1 層目 60 秒 + 2 層目 90 秒”では明確でないが、“1 層目 180 秒 + 2 層目 180 秒”では Case 2 のひびわれ、Case 3 のひびわれとも、スランプ 4 cm の方がスランプ 1 cm の場合より少なくなった。また、振動数 40 Hz に比べて 50 Hz, 60 Hz の方がひびわれ量は少なかった。

振動による影響をマクロ的に捉えるため、Walz³³⁾により提案された振動エネルギー算定式を基に、単位コン

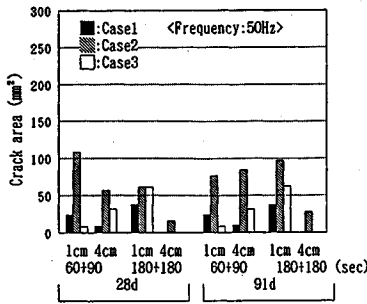


Fig.20 スランブ、振動時間とひびわれ量

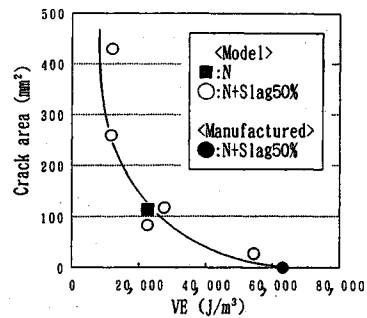


Fig.21 振動エネルギーとひびわれ量の関係

クリート当たりの振動エネルギーを算定した。

$$W = \frac{\sum m_i \cdot v_i \cdot a_i^2 \cdot f_i^3 \cdot t_i}{\sum v_i}$$

W: 単位コンクリート当たりの振動エネルギー (J/m³)

m_i: 各層のコンクリートの単位容積質量 (kg/m³)

v_i: 各層のコンクリートの容積 (m³)

a_i: 各層の振動台の振幅 (m)

f_i: 各層の振動台の振動数 (Hz)

t_i: 各層の振動時間 (sec)

この振動エネルギーと全ひびわれ量の関係を Fig.21 に示す。本研究の範囲内では振動エネルギーが増加するほど全ひびわれ量は減少する傾向にあり、Case 1, Case 2, Case 3 の各々のひびわれとも減少した。特に蒸気養生中および脱型直後の水分逸散や、その後の乾燥収縮が原因と考えられる Case 2 の網目状のひび割れについても、振動エネルギーが大きいほど、またスランブも 1 cm のものより 4 cm のものが少なかったことから、本実験の振動エネルギーでは、対象としたコンクリートの配合や部材厚さに対して締固めが十分ではなく、硬化体組織中に欠陥部が残ったために、それぞれの原因によるひびわれが助長されたものと推察される。

M2 の条件について、実機の大型振動台(振動数 60 Hz, 振幅 0.8 mm)で、“1 層目 90 秒 + 2 層目 300 秒 + 3 層目 180 秒”の振動締固めを行い、蒸気養生中にセグメント表面をシートで覆った試作実験では、ひびわれはほとんど発生せず 0.05 mm 以上のひびわれは皆無であった。また、この場合振動エネルギーは約 63,300 J/m³ であり、Fig.21 の振動エネルギーとひびわれ量の関係線にほぼ適合した。

以上のように、ひびわれ防止には、水分の逸散防止や振動締固めが重要な要因であり、コンクリートの配合や部材厚さ等により、最適な振動条件が存在し、本実験結果では 60,000 J/m³ 程度の振動エネルギーを確保することによって、ひびわれの発生を抑制できることが確認された。

5. 結論

高炉スラグ微粉末を使用したセグメントコンクリートの強度特性、耐久性、ひびわれ低減方法について検討した結果から得られた成果を列記すると以下の通りである。

(1) 高炉スラグ微粉末を添加したコンクリートは、蒸気養生を行った場合も通常の場合と同様に、置換率が增加するに従って初期の強度発現性は小さくなるが、材令の経過に伴って置換率の影響は軽減された。

また、高炉スラグ微粉末を添加したコンクリートは、低温時に初期の強度発現性は小さくなる傾向にあり、特に 15°C 以上に比べて 10°C で顕著であった。この場合には配合以外に前置時の温度、蒸気養生条件を調整したり、温水練りを実施することにより、初期強度改善が図れる。

(2) 蒸気養生の最高温度およびその継続時間が増大するほど、18 時間強度は増加する傾向にあったが、材令 91 日では最高温度と継続時間が圧縮強度に及ぼす影響は認められなかった。

(3) 練り混ぜ水温 40°C までは、練り混ぜ水温の上昇に伴って 18 時間、91 日の圧縮強度とも増加する傾向にあった。練り混ぜ水温 60°C では、18 時間の圧縮強度は 40°C と変わらず、材令 91 日の圧縮強度は低下した。強度面から見る限り、練り混ぜ水の温度は 40°C 程度以下が望ましいものと考えられる。また、練り混ぜ水温 10~60°C の範囲では、セメントの凝結および安定性に異常は無く、細孔径分布も差異は認められなかった。

(4) 高炉スラグ微粉末を添加することにより、蒸気養生を行うセグメントコンクリートにおいても、部材内の温度上昇量を低減することができた。また、蒸気養生の最高温度が高くなると、温度ひびわれと考えられるひびわれが増加するが、本試験条件(部材厚さ 65 cm, 単位結合材量 400 kg/m³, スラグ置換率(50%)では蒸気養生の最高温度 45°C の場合にはほとんど発生しなかった。

(5) 蒸気養生を行うセグメントコンクリートにおい

でも、普通ポルトランドセメント単味の場合に比べて、高炉スラグ微粉末を添加することにより、水密性や塩分拡散抵抗性が向上し、耐久性の高いコンクリートが得られることが確認された。

(6) セグメントコンクリートのひびわれは、蒸気養生中の水分蒸発の抑制、水中養生期間の確保、コンクリートのスランプおよび振動条件の適正化等により、その発生を抑制できることが確認された。

6. おわりに

東京湾横断道路(株)では、シールドトンネル防食基準⁴⁾を制定し、耐久性に優れたシールドトンネル用RCセグメントとするために、高炉スラグ微粉末の使用を規定している。

謝辞：本研究を進めるにあたり、適切なご指導を頂きました大即信明助教授(東京工業大学)、国府勝郎助教授(東京都立大学)ならびに、実験にご協力頂きました柳田力氏(土研センター)、セグメント工業会、新日鐵化学(株)の皆様深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小林一輔・白木亮司・星野富夫：高炉セメントコンクリートの塩化物遮へい性能，東京大学生産技術研究所報告41巻6号，1989.6.
- 2) 小林一輔・出頭圭三：各種セメント系材料の酸素の拡散性状に関する研究，コンクリート工学 Vol.24, No.12, 1986.
- 3) 大即信明・森 好生・関 博：海洋環境下におけるコンクリート中の塩素に関する一考察，土木学会論文集第332号，1983年4月.

- 4) 国府勝郎・村田芳樹・阿部立実：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの断熱温度上昇，高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集，1987年3月.
- 5) 土木学会基準：鉄筋コンクリート用防錆剤の塩分溶液.
- 6) 今井益隆・大橋 猛・斉藤敦志：高炉スラグ微粉末を混合したコンクリートの諸性質，高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集，1987年3月.
- 7) 遠藤裕悦・児玉和巳・中川 脩・高田 誠：高炉スラグ微粉末がコンクリートの配合と強度におよぼす影響について，土木学会・高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集，1987年3月.
- 8) 河野 清・新舎 博・荒木謙一：蒸気養生の際のマチュリティーと圧縮強度との関係について，セメント技術年報，XXVIII, 昭和49年.
- 9) D.M. ROY, C.A. LANGTON : Eary Stage Hydration of Slag-Cement, CEMENT & CONCRETE RESERCH, Vol.13, No.2, 1983.
- 10) 田沢雄二郎・石井明俊・伊藤隆彦：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの諸物性，土木学会・高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集，1987年3月.
- 11) Delmar L. Blone, Concrete Strength in Structures, ACI Journal, March 1968.
- 12) Kalousec, G.L. and E.J. Benton : Mechanism of Seawater Attack on Cement Paste, ACI Journal, Vol1. 67, No.2, 1970.
- 13) Walz, K. : Vibrated Concrete, 3rd Edition, Wilhelm Ernst & Son, Berlin, p. 147, 1960.
- 14) 東京湾横断道路シールドトンネル防食基準(案)，東京湾横断道路(株)，平成3年12月.

(1993.2.16 受付)

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE PROPERTIES OF CONCRETE FOR LARGE SEGMENT USING GROUND GRANULATED BLAST FURNACE SLAG

Keinosuke UTIDA, Yujirou WASA, Hiroji ABE and Hiroaki INOUE

It was investigated in this paper that the properties of the concrete using GROUND GRANULATED BLAST FURNACE SLAG in order to improve durabilities of RC Segment Concrete for the sheild tunnel in Trans-Tokyo Bay Highway. The investigated properties are as follows, durability for sea water, diffusion of NaCl, permeability, and the relation between compacting condition at casting and cracking of concrete, GROUND GRANULATED BLAST FURNACE SLAG is effective material to improving of durability in concrete segment.