

正会員 加賀秀治 正会員 藤井正伸、松橋俊一 (大成建設株式会社技術研究所)

1 まえがき

現在、高炉スラグをコンクリート用骨材として利用するための研究が各方面でなされているが、本研究はこれまで主として高炉セメント用原料として供されてきた軽質の高炉水砕スラグ（以下軽水砕スラグという）を軽量コンクリート用の細骨材として使用することを目的として行ったものである。

軽水砕スラグは粒形が悪く、強度が弱いのでコンクリートとしたとき、ワーカビリティが得にくい、ブリージングが多い、強度が低い、収縮が大きいなどの問題点があるけれども、その反面、軽量である、2次加工が容易で発生微粉分が混和材として使える、ガラス化率が高く断熱性・耐火性がよいなどのメリットも考えられる。そこで、前記のような欠点を前処理や調合の面で改善し、軽量コンクリートとしての一連の物性を調べ、特殊な構造物に適用できる可能性をみいだした。

2 使用材料

(1) 軽水砕スラグ 高炉スラグは銑鉄1 tonに対して約300 kg廃出されるが、このスラグをどのように冷却するかによって徐冷さい、風さい、水さいに区別される。本研究の対象である水さいは水をかけて急冷するもので、スラグ温度・水温・水量・水圧などによって単位容積重量が1.5前後の川砂なみのものから0.3前後のバーライトなみのものまで製造される。本実験においては未加工時の単位容積重量が1.0前後の高炉セメント用原料スラグを使用した、その品質は表-1に示すとおりで、絶乾比重、単位容積重量、吸水率の3項を除くと、その他はすべて類似品のJISの規定値内に納まっている。

(2) その他の使用材料 セメントは普通ポルトランドセメント（日本セメント㈱）、混和材は軽水砕スラグの粉末（商品名セラメント、第一セメント㈱）、細骨材は軽水砕スラグ（粗粒率2.63、単位容積重量1.26 ton/m³、吸水率4.38%日本鋼管㈱扇島）、粗骨材は火山れき（粗粒率5.65、単位容積重量0.735 ton/m³、吸水率52.8%樺名産）、混和剤は大成建設㈱にて調製した起泡剤系のものである。

3 調合および供試体の作成

軽水砕スラグの難点であるワーカビリティの悪さ、骨材の分離傾向、ブリージング水の過多に対して、通常のコンクリートの場合よりも気泡を多く混入し、また強度、中性化、乾燥収縮などを考慮し、水セメント比を35~45%と通常より小さく押え、1 m³当りのセメント混入量は400 kg/m³程度に設定した。ただし、セメント量400 kg/m³のうちポルトランドセメントそのものは350 kg/m³程度とし、残りは細骨材と同じ軽水砕スラグをブレン3,600 cm/g程度に粉末にしたものを混和材として添加することにした。強度については日本建築学会のJASS-5（鉄筋コンクリート工事）に記載されている4種と5種軽量コンクリートの中間、気乾比重約1.5を一応の目安とし、圧縮強度90~135 kg/cm²を目標とした。またスランプはP C工場での平打ちを前提とし5 cm前後とした。実施した調合は表-2のとおりである。

表-1 骨材の品質

	構造用軽量骨材 JISA5002		スラグ 粗骨材 JISA5011	スラグ 水砕砂 品質規準	使用した 水砕砂
試験項目	人 工	天然副産	徐 冷 砕	重水砕※1	軽 水 砕
強 熱 減 量	1%以下	5%以下	—	—	0.8~1.2
無 水 硫 酸	0.5%以下	0.5%以下	0.5%以下	0.5%以下	0.03~0.04
塩 化 物	0.01%以下	0.01%以下	—	—	—
酸化カルシウム	—	50%以下	45%以下	45%以下	39.3
有機不純物	標準色濃度以下		—	—	—
安 定 性	—	20%以下	—	—	—
粘 土 塊	1%以下	2%以下	—	—	—
全 硫 黄	—	—	2%以下	2%以下	0.98~1.12
全 鉄	—	—	3%以下	3%以下	1.93~2.63
絶 乾 比 重	—	—	A 2.2%以上 B 2.4%以上	2.5%以上	2.07~2.27
単 位 容 重	—	—	A 1.25%以上 B 1.35%以上	1.45%以上	1.001
吸 水 率	—	—	A 6%以下 B 4%以下	3.5%以下	4~10

表-2 コンクリート調合（m³当り）

セメント	混和材	細骨材	粗骨材	混和剤	水	生容重	スランプ
347 kg	43.7 kg	516 kg	570 kg	0.43 ℓ	156 ℓ	1.633	5.0 cm

コンクリートの混練は50ℓアイリッヒ型ミキサーを用い空練り1分、本練り2分、打設後前置4時間、昇温15℃/h、本蒸気養生65℃/h-4時間以後槽内で徐冷、材令1日で強度測定用は高湿室(20℃-80%RH)、収縮測定用は低湿室(20℃-60%RH)に保存した。

試験項目および各供試体の形状寸法と数量は表-3に示すとおりである。

4 軽量コンクリートの物性

(1) 圧縮強度 試験はJISA1108(コンクリートの圧縮強度試験方法)に準じて行った。結果は表-4に示すとおりで脱型時の強度がやや低いとも思われるが脱型は可能であり、また材令2週以後には組立施工をしてもよいだけの強度に達する(設計強度90~135kg/cm²と仮定して)4週から6カ月にかけての強度の伸びが一見少ないように思われるが材令1ケ年の値を見ると心配はなさそうである。材令4週時の比強度は95kg/cm²程度で、図-1に示すように人工軽量骨材コンクリートと火山れきコンクリートの中間に位置する。

(2) 引張および曲げ強度 引張強度はJISA1113(コンクリートの引張強度試験方法)、曲げ強度はJISA1106(コンクリートの曲げ強度試験方法)に準じて行った。試験の結果は表-4の右辺に示すとおりで、圧縮強度に比較してバラツキが大きいのが平均値で引張強度は14.8kg/cm²、曲げ強度は21.6kg/cm²を示した。この値を圧縮強度との比率でとらえると引張強度は約1/10、曲げ強度は約1/6.5となり、一般のコンクリートと比較して大きな差は見られない。

(3) 付着強度 供試体の中央に13mmの鋼材を差し込んだ形状とし、インストロン万能試験機を使用して0.5mm/minの速度で引抜いた。試験の結果、丸鋼の最大付着強度は約30kg/cm²、0.25mmすべり時の付着強度は約26kg/cm²、異型鋼の最大付着強度は約102kg/cm²、0.25mmすべり時の付着強度は約88kg/cm²であった。

(4) ヤング率およびポアソン比 ヤング率、ポアソン比ともワイヤストレンゲージ(検長60mm)を各々対角面に貼り、50tonアムスラー試験機により荷重500kgごとにひずみを静歪計で読みとった。試験の結果は図-2に示すとおりで、ヤング率の値は平均86,000kg/cm²と^{※3}小阪氏が人工軽量骨材コンクリートの実験から導いた $E_{0.3F_c} = 4,500 \cdot k \cdot \rho_0^{1.5} \cdot F_c^{0.5}$ やACIの基準式 $E_c = W^{1.5} \cdot 10^3 \cdot 431 \cdot \sqrt{F_c}$ から算出した値よりやや小さい。これは「水砕スラグを用いたコンクリートのヤング率は河川砂を用いた場合より幾分小さ目である」という^{※4}長滝氏の報告と一致するように思われる。ポアソン比は2.0前後と類似の軽量コンクリートと大差はなさそうである。

(5) 乾燥収縮率と重量減少率 試験はJISA1129のコンパレータ法に準じて行った。試験結果は図-3に示すとおりで乾燥収縮は普通の川砂・川砂利コンクリートと比較して少し大きいのが日本建築学会JASS-5の4種・5種軽量コンクリートよりは小さいようである。重量減少は9~11%程度でまだ固まらないコンクリートの状態から気乾状態

表-3 供試体の形状と数量

試験項目	形状	材令	数量	養生	備考
圧縮強度	$\phi 100 \times h 200$	1, 15, 28, 182, 365日	各3本	高湿	
引張	"	28日	3	"	
曲げ	100×100×400	"	3	"	
付着	$\phi 100 \times h 100$	"	各3本	"	丸鋼・異型
ヤング率	$\phi 100 \times h 200$	"	3	"	圧縮と同 一供試体
ポアソン比	"	"	3	"	
乾燥収縮率	100×100×400	~182日	3	低湿	
重量減少率	"	"	3	"	乾燥と同一
吸水率	"	24時間	2		絶乾
凍結融解	"	28日~	3	高湿	28日後 300~
熱伝導率	200×200×25	"	各2本		絶乾(2種)
耐火性能	1250×950×120	12日	1	屋内	早強セメント
中性化	100×100×400	28日~	各2本	"	13週促進 (4種)
安定性(長さ)	"	1, 14, 28日	各3本	高湿	蒸気養生
"(強度)	$\phi 100 \times h 200$	5, 10, 15, 20~			

表-4 圧縮・引張・曲げ強度 (kg/cm²)

試験項目	圧縮強度					引張	曲げ
	1日	15日	28日	182日	365日	28日	28日
測定値	67.5	120	132	158	177	13.1	24.2
	70.1	127	146	149	180	12.7	19.9
	63.7	122	153	149	178	18.7	20.6
平均値	67.1	123	143	152	178	14.8	21.6
標準偏差	2.6	2.9	8.7	4.2	1.2	2.7	1.9

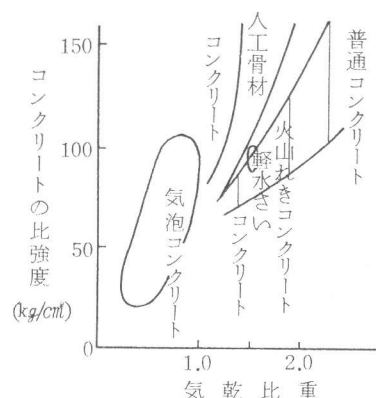


図-1 比強度と比重

のコンクリートになる間に約 0.15 t/m^2 減少した。

(6) 吸水率 乾燥収縮率を測定した供試体を 105°C の乾燥炉に入れ恒量になるまで乾燥してから、供試体作成時の打込面を横に向け成の $1/2 (5 \text{ cm})$ を水中に浸漬し、24 時間後の吸水量を求めた。試験の結果は重量比で $6.3 \sim 7.1 \%$ 、容積比で $9.4 \sim 10.2 \%$ 、気泡の多い軽量コンクリートにしては小さく普通コンクリートに比較してやや大きい程度である。これは使用した混和剤の特性に起因するものと思われる。

(7) 凍結融解試験 軽量コンクリートは一般に凍結融解作用に対する抵抗が劣るとされているため ASTM・C 666-75〔急速凍結融解に対するコンクリートの抵抗試験方法・方法 A（水中における急速凍結融解）〕にしたがって試験した。実施は（財）建材試験センターに依頼したがその結果は図-4 に示すとおりで 150 サイクルの時点でも動弾性係数百分率は 90% 以上あり、一般の普通コンクリートのそれよりも耐凍結抵抗は大きい。また類似の軽量コンクリートの実績から推察しても問題はないと思う。

(8) 熱伝導率 試験は JISA 413〔保温材の熱伝導率〕測定方法（平板直接法）で前項同様建材試験センターに依頼した。試験の結果は下記に示すとおりである。この値は^{*5}浜田氏の式、 $\lambda = 0.22 - 0.20\rho + 0.24\rho^2$ より算出した値や、同比重の人工骨材コンクリート^{*6}の実測値よりかなり小さい。この理由は細骨材として使用している軽水砕スラグが結晶質のものより熱伝導率の小さいガラス質であることに起因していると推察される。

軽水砕スラグ軽量コンクリートの熱伝導率測定結果

$$\lambda = 0.3 + 0.00017\theta \quad \text{絶乾比重 } 1.42 \quad (\text{気乾} \approx 1.50)$$

$$\lambda = 0.29 + 0.00030\theta \quad \text{絶乾比重 } 1.35 \quad (\text{気乾} \approx 1.43)$$

(9) 耐火性能試験 全厚 120 mm 、鋼材のかぶり厚さ 20 mm の壁体を作り、JISA 1304（建築構造部分の耐火試験方法）に準じ 1 時間耐火壁としての加熱試験を大成建設（株）豊洲実験所で行った。なお供試体は加熱試験に先立って約 100°C で 2 日間乾燥させた。試験の結果は図-6 に示すとおりで壁体の最高裏面温度は 75°C （合格値 260°C 以下）補強鋼材の最高温度 385°C （合格値 550°C 以下）試験後に測定して最大キレツ巾は 0.7 mm 、コンクリート面の爆裂現象は皆無であり、問題なく耐火建築になりうると判断される。

(10) 中性化試験 当軽水砕スラグ軽量コンクリートの気泡量は AE 剤による通常の軽量コンクリートよりもずっと多いこともあり、現在長期の屋内、外暴露試験を続

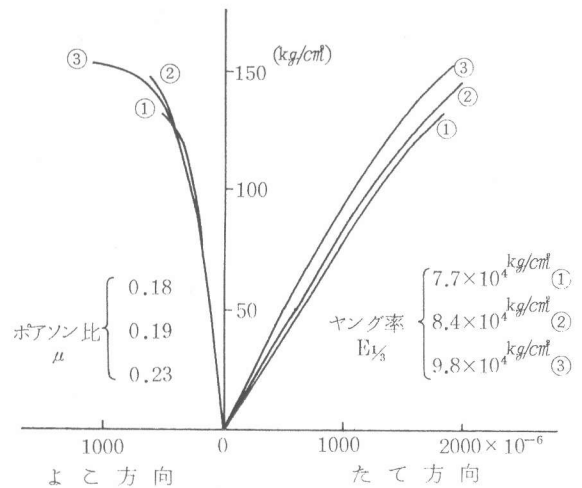


図-2 応力ひずみ曲線

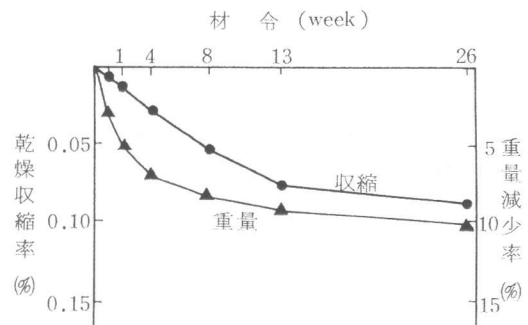


図-3 収縮と重量減少率

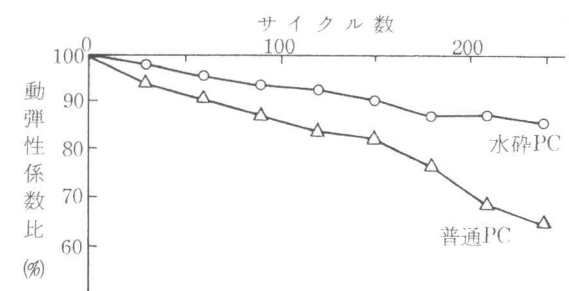


図-4 凍結融解試験結果

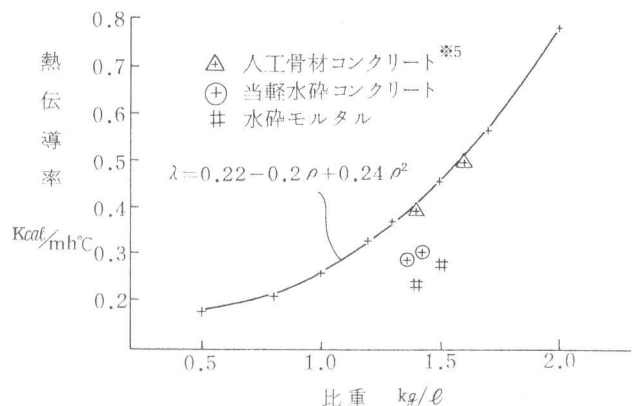


図-5 比重と熱伝導率

けているが、これと併行して5%濃度の炭酸ガスによる促進試験を行い、フェノールフタレンで中性化深さを調べた。また比較として普通コンクリートと軽水砕スラグ軽量コンクリートの表面に合成ゴム系吹付仕上を施したもの2種を加えた。促進材令13週で中性化深さを調べた結果は普通コンクリートの4~10mmに対して、軽水砕スラグ軽量コンクリートは5~12mmと幾分早い。吹付仕上を施したものは2種とも全く中性化していなかった。したがって、コンクリートの表面仕上を少し考えれば実用上問題はないと推定される。

(11) 安定性試験(蒸気養生の繰返しによる) 軽水砕スラグを用いた軽量コンクリートは実例がない。骨材自体が潜在水硬性を示すので、繰返し蒸気養生を行うことによって長期材令における安定性を試験した。また同時に鋼材をコンクリート中に埋設しておき発錆の有無も観察した。試験はコンクリート打設後、1日高湿室(20℃~80%RH)に保存した後、昇温15℃/h、本蒸気養生60℃~4時間、以後徐冷約20℃になった時点で再度高湿室に保存。材令14日目より1日1サイクル(昇温15~20℃/h、60℃~4時間、以後槽内で徐冷)で蒸気養生を繰返す。5、10、15、20サイクル目にはビニール袋に封入して24時間低湿室(20℃~60%RH)に保存し供試体の温度が一定になった時点で長さ変化をコンパレータにて測定した。また強度は20tonアムスラーによった。

長さ変化の試験結果は最初の10サイクルまでは膨張するが、それ以後は安定している。高炉セメントを使用した場合、蒸気養生によって膨張性を示すことは^{※7}「コンクリート用水砕スラグ細骨材の使用規準の作成に関する研究」からも推察されることであり、10サイクル以後、長さ変化が一定しているので問題ないと思われる。

強度試験の結果は軽水砕スラグが有する潜在水硬性が絡むためか、蒸気養生を繰返したものは、いずれも1回の蒸気養生後高湿室に保存した4週材令のものよりも高い強度を示した。

鋼材の発錆については20サイクル蒸気養生した後、母材をこわして表面を観察したが錆は全く見られなかった。また、コンクリートの中性化も見られなかった。

5 むすび

現在、わが国で実用化されている軽量コンクリートを構造部材とした一戸建工業化住宅としては、①硬質パーライトと軟質火山れき、②細粗骨材とも軟質火山れき、③人工軽量骨材と軟質火山れきの3種類のものがある。軽水砕スラグと軟質火山れきを組合せた本文の軽量コンクリートは前記の工業化住宅用構造部材と比較して多少の相違はあるものの、十分対抗できる物性を有し、また長期にわたる素材の安定供給、品質の安定、供給地の分散、経済性などからみても検討に値するものであることが判明した。またスラグの品質、粒度、形状などについて改良して行けば、もっと優れた軽量コンクリートが出来る可能性も実験を通してうかがえた。

最後に本実験を行うに当たり安定性試験等について東大 岸谷孝一教授より御指導を頂いたこと、また素材提供等で第一セメント(株)に協力を得たことを記し、紙上より感謝の意を表する。

参考文献 ※1、※4 長滝重義「新しい骨材(高炉スラグ水砕砂)」コンクリート工学 1978.9。 ※2 上村克郎「鉄筋コンクリート構造の軽量化と経済性」建築技術 1964.4。 ※3 奥島・小阪「人工軽量骨材コンクリートの力学的性質」材料 1966.10。 ※5 浜田 稔「軽量コンクリート構造」丸善 1956。 ※6 軽量骨材コンクリートハンドブック・日刊工業新聞社 1967。 ※7 建設省昭和52年度建設技術補助金研究・委員長 岸谷孝一。

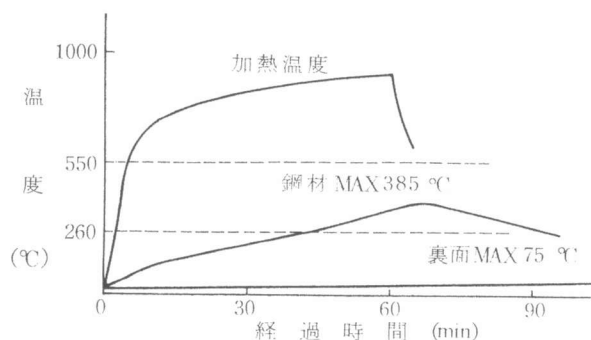


図-6 耐火壁試験結果

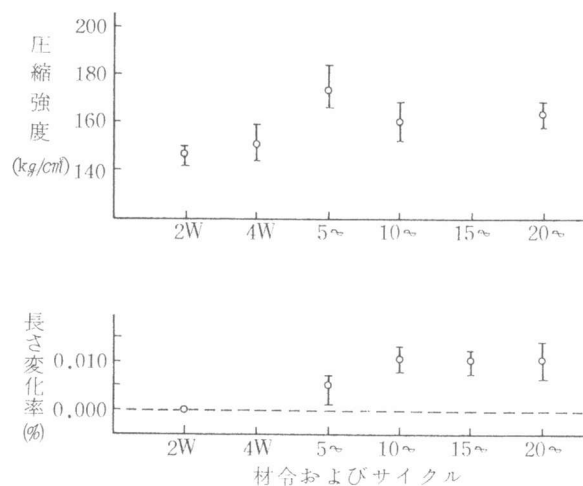


図-7 蒸気養生による安定性試験結果