

Study on Engineering Properties of Alkali-Activated High-Flow Concrete

Chang-Chi Hung¹, Zheng Wei Guo², Her-Yung Wang^{2,*}

¹School of Architecture and Civil Engineering, Huizhou University, Huizhou, China

²Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Sciences and Technology, Kaohsiung City, Taiwan

Email address:

a0266@hzu.edu.cn (Chang-Chi Hung), wangho@nkust.edu.tw (Her-Yung Wang)

*Corresponding author

To cite this article:

Chang-Chi Hung, Zheng Wei Guo, Her-Yung Wang. Study on Engineering Properties of Alkali-Activated High-Flow Concrete. *Science Discovery*. Vol. 10, No. 4, 2022, pp. 209-216. doi: 10.11648/j.sd.20221004.12

Received: May 18, 2022; Accepted: June 27, 2022; Published: June 29, 2022

Abstract: Furnace slag is an inevitable by-product of the steelmaking process, and the reuse of furnace slag resources is also an international trend. We used blast furnace slag powder as the alkali excitation material in this study. The alkali-activated binder is mixed with coarse and fine aggregates to form alkali-activated concrete. To meet the high-flow performance of alkali-activated pozzolanic concrete (AAPC), added the plasticizer in a proportion of 1.25%. The concrete was well mixed using a fixed base modulus ratio (Ms), three different liquid-solid ratios (LS) of 0.45, 0.50, and 0.55, and three different normalities (N) of sodium silicate solution of 5%, 6%, and 7% and remained them in the atmosphere. At 7, 28, and 56 days of age, carrying out the engineering properties tests such as hardness, durability, and mechanical properties, and using microscopic to verify the test data. The results show that the slump of AAPC is 550mm to 650mm, which has a longer setting time than the general proportion of concrete, but it has better workability. The high liquid-solid (LS) ratio influences engineering properties significantly, confirming that the proper LS ratio and the normality can improve the hardening properties and durability of high-fluidity AAPC. When the LS ratio=0.45 and the N is 7%, the interface of the furnace slag can destroy through more sodium silicate solution, and the polymerization behavior can stimulate. At 28 days, the compressive strength can reach 29.8Mpa, and the initial ultrasonic wave speed reach more than 3000m/s, which can meet the needs of engineering use.

Keywords: Alkali-Activated Pozzolanic Concrete (AAPC), Liquid-to-Solid Ratios (LS), Normality (N), Blast Furnace Slag (BFS), Engineering Properties

碱激发高流动性混凝土工程性质之研究

洪昌祺¹, 郭致维², 王和源^{2,*}

¹惠州学院建筑与土木工程学院, 惠州, 中国

²国立高雄应用科技大学土木工程系, 高雄, 台湾

邮箱

a0266@hzu.edu.cn (洪昌祺), wangho@nkust.edu.tw (王和源)

摘要: 炉石为炼钢过程必然产生之副产物, 炉石资源再利用亦是国际之潮流。本研究采用高炉渣粉作为碱激发材料。产生碱活化的粘合剂与粗细骨材混合形成碱激发混凝土。本研究采用高炉渣粉作为碱激发材料。为满足碱活化火山灰混凝土 (AAPC) 的高流动性能, 添加比例为1.25%的增塑剂。使用固定的基础模量比 (Ms)、0.45、0.50和0.55三种不同的液固比 (LS) 以及5%、6%、7%的三种不同硅酸钠溶液浓度(N)充分混合混凝土, 并保持在大气中。在7、28、

56天龄时,进行硬度、耐久性、力学性能等工程性能测试,并用显微镜验证测试数据。结果表明,AAPC的坍落度为550~650mm,比一般比例混凝土的凝结时间更长,但具有更好的和易性。高液固比(LS)对其工程性质有显著影响,适当的LS比和正态性可提高高流动性碱活化火山灰混凝土的硬化性能和耐久性。当LS比=0.45、N为7%时,炉渣界面可以通过更多的硅酸钠溶液破坏,促进聚合行为。28天抗压强度可达29.8Mpa,初始超声波速度可达3000m/s以上,可符合工程使用之需求。

关键词: 碱激发,高流动性混凝土,液固比,高炉渣,工程特性

1. 引言

全球暖化的议题日趋严重,在面对节能减碳的环境下,营建产业也必须达成环境保护与永续发展的目的。有别于以往的一线经济,循环经济更能达到消除废弃物或工业副产品的效益重新开启利用工业副产品的另一条道路[1]。

卜特兰水泥是土木营建业最主要的胶结材料,全球水泥制造业二氧化碳总排放量占全世界温室气体排放量5~7%,为了让环境减少冲击,必须要减少水泥用量[2, 3]。飞灰、硅粉、炉石粉等工业副产品为民生经济下所产生,每年所产出的数量高达数百万吨,在先进的欧美日国家,视这些工业副产品为可再利用之资源物质,大量使用于各种土木营建工程领域。钢铁工业为国家重要产业,炉石为炼钢过程必然产生之副产物,适材适用采用炉石资源取代天然资源之开采,才是真正达到保护国土环境之手段,此亦国际炉石资源循环之潮流[4]。然而,水泥减量使用的同时,必须找寻相关可取代水泥的胶结材料。其中碱胶凝材料为近年许多国内外学者积极投入研发之绿色水泥材料,可有效减少水泥使用,达到兼顾降低排碳量与对于环境之冲击。利用碱活化剂活化技术以产生碱活化的粘合剂,和粗细骨材混合并在适当的条件下固化以形成碱激发混凝土也可以达到工业副产物的再利用之目的[5, 6]。

过去研究结果表明,用矿渣代替水泥,用F级粉煤灰和废玻璃代替沙子具有更好的工程质量和经济效益。Puertas用碱性溶液活化矿渣粉制成碱性胶凝材料。混凝土的抗压强度和稳定性优于传统混凝土[7]。当碱性水泥质材料达到矿渣成分的50%时,其抗压强度分别为73.4MPa和74.4MPa,高于不含矿渣的碱性水泥质材料[8]。Escalante-Gar指出[9],当不使用活化剂时,用细度为 $2900\text{cm}^2/\text{g}$ 的矿渣粉代替混凝土中普通硅酸盐水泥的30%,50%和70%,混凝土的抗压强度随着矿渣添加量的增加而连续下降。然而,当使用碱活化剂时,碱水泥材料的抗压强度增加,即,渣基碱活化材料具有高强度。Davidovits指出,采用无机聚合技术制备的聚合物凝胶具有优异的阻燃性和绝热性能。它可以承受 1200°C 的高温。如果在结构材料中使用它,不仅可以增强结构的耐火性,还可以增强结构的安全性[10]。此外,废LCD玻璃还提高了矿渣基碱活化砂浆的可加工性[11]。如果使用不锈钢钢包炉渣(LFSG),则可加工性随碱剂浓度和液固比的增加而提高。增加碱性试剂的浓度会增强LFSG的活性,从而使内部结构更致密,并提高抗压强度和超声脉冲速度[12]。Robayo等[13]用碱活化的废红砖粉制造碱水泥材料。抗压强度提高。Tanakorn等[14]使用碱性胶凝材料作为混凝土

抗弯缝修补材料;28天后,粘合强度达到修复强度标准,并且比聚合物或树脂材料便宜。Wu等[15]使用矿渣和粉煤灰制造碱活化砂浆,研究了钢筋粘结结构的行为,发现,在滑动破坏模式下,试样的抗压强度越高,钢筋粘结性能越好,粉煤灰的添加有利于后期粘结应力的发展。Arie等[16]发现,与碱活化粉煤灰混凝土相比,矿渣混凝土具有更好的抗压强度,抗弯强度,弹性模量和较低的氯离子渗透性。从第90天到第540天,碱活化矿渣混凝土的抗压强度降低,而碱活化粉煤灰混凝土的抗压强度提高。根据微观分析,碱活化矿渣混凝土产生过量的C-S-H凝胶,从而在后期裂纹增加,而碱活化粉煤灰混凝土继续聚合并形成无裂纹的致密结构。综合言之,粉煤灰可代替总胶结剂量的15-20%,并使用高含量的粉煤灰代替沙子。矿渣可替代水泥的20~50%。正确使用上述废物可以增加其经济价值。但却未能正确建议最佳的碱激发胶体浓度。

另外,在实际混凝土材料的使用上,混凝土的质量是最容易在施工输送混凝土时,被任意加水,这将造成破坏混凝土出厂设定的设计配比,导致强度下降,使质量上有落差。为了防止这样的行为一再发生,可透过调整混凝土的配比,达到较好的流动性,因而研发出高流动性混凝土,为混凝土质量把关。本研究将以碱激发材料作为高流动性混凝土之胶结材料,透过实验来探讨在固定碱模数比、不同液固比和不同碱当量的配比参数的变化,对于碱激发高流动性混凝土之新拌性质、硬化性质、耐久性质以及微观性质之影响,了解碱激发材料应用于高流动性混凝土之适用性以及工程性质,并提出建议以水淬炉石粉、硅酸钠溶液及氢氧化钠溶液所制成的碱激发胶体浓度,应用在高流动性混凝土之最佳配比。

2. 试验计划

本研究利用水淬炉石粉作为碱激发材料,透过氢氧化钠溶液来激发水淬炉石粉,加入硅酸钠溶液,增加聚合反应。经由密实混合物设计法来堆积骨料压实混凝土,来提高混凝土的整体耐久性。初步试拌结果,配比中加入1.25%的强塑剂,能避免骨材与浆体产生析离与泌水的现象,以符合碱激发高流动性混凝土的性质,

本试验采用固定的碱模数比(M_s)1,以不同液固比(LS)0.45、0.5、0.55,不同碱当量(N)5%、6%、7%,进行拌制成碱激发高流动性混凝土,测定其工作性,并将其制作成直径10cm、高20cm之圆柱试体,并进行大气中养护,于龄期7天、28天、56天进行硬化性质(抗压强度、抗弯强度、劈裂强度、超声波波速、弹性模数)、耐久性

质（快速氯离子渗透、电阻系数）、以及利用微观性质（电子显微镜、EDS成分分析、）左证实验数据。

2.1. 试验材料

材料的化学和物理性能，如表1～表3所示。

(1) 矿渣粉：

颗粒状高炉矿渣由CHC资源公司研磨；比重为2.89，细度为4000g/cm²。粒状高炉矿渣中SiO₃，Al₂O₃和CaO的总含量高于80%。水泥熟料状水合C-S-H凝胶是在碱活化后形成的，其水硬性和凝结性与波特兰水泥相同。

(2) 硅酸钠溶液：

该溶液称为水玻璃或液体玻璃。使用市售的#3水玻璃，它是粘性，无色和无味的液体。硅酸钠是白色粉末，易溶于水，在水中呈碱性，进一步有助于碱性胶凝材料的聚合。

(3) 氢氧化钠溶液：

将市售的98%纯碱性钠和水以混合比例所需的浓度混合到氢氧化钠溶液中，然后储存在干净的耐酸碱的桶中。随着反应过程释放出大量的热量，溶液保持静止24小时。使用前。碱活化溶液的基本目的是使活性较低的材料产生更多的硅胶，从而使碱水泥材料具有强度。

(4) 粉煤灰：

使用台湾电力公司火电厂的F级粉煤灰；粉煤灰呈球形颗粒状，可通过对碱性胶凝材料的承载作用而提高新鲜流动能力，明显有助于其可加工性。

(5) 骨料

符合混凝土骨料规格的天然砂岩取自台湾屏东市利港区。通过筛分分析试验得到的粒度分布符合CNS1240。具体的总需求。

(6) 高效减水剂

尚德公司用于流化混凝土的II型化学外加剂（PCS1-H）有助于水泥浆或砂浆的流动性。

表1 材料的化学和物理性质。

Chemical composition (%)	Material			
	Slag	Liquid glass	Sodium hydroxide solution	Fly ash
SiO ₂	33.57	29.43	-	48.22
Al ₂ O ₃	14.71	-	-	37.21
Fe ₂ O ₃	0.36	0.01	-	4.69
CaO	41.18	-	-	2.88
MgO	6.42	-	-	2.99
SO ₃	0.57	-	-	0.71
K ₂ O	0.29	-	-	1.16
Na ₂ O	0.19	9.51	-	0.22
TiO ₂	0.52	-	-	-
P ₂ O ₅	0.01	-	-	-
LOI	0.58	-	-	-
NaOH	-	-	98.2	-
NaCO ₃	-	-	0.165	-
NaCl	-	-	0.0135	-
Fe	-	-	0.0004	-
Specific Weight	2.89	41.89	2.13	2.2

表2 骨料物理性能。

Materials	SSD Specific Weight	The Ratio of Hydraulic Absorption (%)	Unit Weight (kg/m ³)
Fine aggregate	2.63	2.2	1819
Coarse aggregate	2.64	1.4	1678

表3 减水剂的性能。

Item	Unit	Properties
Solid ingredient	%	19.8
Chloride ion content	ppm	176
Specific Gravity	—	1.05
PH Value	—	5
Color	—	Yellow-brown

2.2. 试验方法

就新鲜特性而言，坍落度遵循ASTMC143。设置时间遵循ASTMC4035。在硬化性能方面，抗压强度遵循ASTMC39。弯曲强度遵循CNS1234。抗拉强度试验遵循CNS3801。弹性模量和超声脉冲速度遵循ASTMC597。在耐久性方面，电阻率遵循ASTMC876。快速氯化物离子渗透性测试遵循ASTMC1202。使用SEM（扫描电子显微镜）进行显微镜观察，并且对固化28天的碱活化的高流动混凝

土样品进行采样，以观察碱活化后的粒状高炉矿渣中的结晶相变化。

2.3. 混合设计比例

本研究中的混合设计比例使用固定的碱模量比为1，液固比（LS）为0.45、0.5和0.55，正态比（N）为5%，6%和7%以及配比设计单位比例重量，如表4所示。测量AAPC的新鲜性能，然后制备样品并在室温下固化。其固化性能和耐久性在7天，28天和56天的固化年龄下得到了表征。

表4 AAPC配比设计单位重量比。

LS	Normality N (%)	Slag	Na ₂ SiO ₃	NaOH	Coarse aggregate	Fine aggregate	Fly ash	Water	Superplasticizer
0.45	5	373	62	16	918	949	129	219	6.28
	6	375	75	20	918	949	129	215	6.30
	7	378	88	23	918	949	129	212	6.34
0.50	5	347	58	15	918	949	129	234	5.95
	6	349	70	18	918	949	129	232	5.98
	7	350	82	22	918	949	129	229	5.99
0.55	5	325	54	14	918	949	129	248	5.68
	6	327	65	17	918	949	129	247	5.70
	7	328	76	20	918	949	129	244	5.71

※Ms=1 (Silicate Modulus, Ms)。

本研究采用填充密度比设计方法，将粉煤灰与天然细骨料混合，获得粉煤灰与细骨料的混合单位重量 (α) 比，然后得出最佳替代量 (α)。与三种单位的石材混合，以确定混合单位重量的最大比例 (β)，作为致密混合物设计的基础。

将粗骨料，细骨料，粉煤灰和混合水依次放入混合容器中。混合3分钟后，将粘合剂材料（矿渣粉），氢氧化钠溶液，硅酸钠溶液和高效减水剂依次混合3分钟，静置1分钟再混合1分钟，然后分析其新鲜性能，然后制作标本。

3. 结果与分析

3.1. 可加工性

图1显示了LS随AAPC的可加工性提高的情况。以LS为0.45到0.55，坍落度从255mm增加到281mm，坍落度从560mm到645mm时，以7%的正态性为例。以LS为0.55为例，当法线从5%增加到7%时，坍落度从268mm增加到281mm，坍落度流量从634mm增加到645mm，即LS的作用大于常态。可以观察到该结果，因为当LS增加时，炉渣粉末的剂量减少，并且混合水的剂量增加，导致流动性的较大变化。

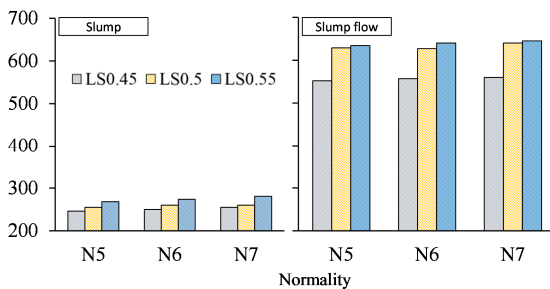


图1 AAPC的工作性。

3.2. 设定时间

图2显示设置时间随着LS的增加和正常度的降低而延长。当AAPC的正常值为7%，并且LS从0.45增加到0.5时，初始设置时间和最终设置时间分别增加了9.1小时和10.24小时。当LS从0.5增加到0.55时，初始设置时间和最终设置时间分别增加了17.4小时和8.5小时。设定时间随着LS的增加而延长，因为增加LS会减少炉渣粉和硅酸钠溶液的消耗，并且降低氢氧化钠溶液的浓度。因此，糊状物凝固缓慢。

当LS为0.45时，正常值从5%增加到6%，初始凝固时间从31.20小时缩短至21.9小时，而最终凝固时间从45.1小

时缩短至34.15小时。当正常值为7%时，初始凝固时间和最终凝固时间比正常5%的时间分别短19.2小时和23.12小时，即，正常度的增加有助于缩短凝固时间。

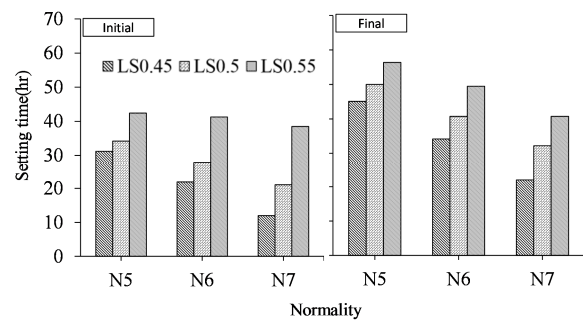


图2 AAPC的凝固时间。

3.3. 抗压强度

图3显示，随着LS的增加，AAPC的抗压强度降低。固化7天时，正常值定为5%，当LS为0.45~0.55时抗压强度变化不明显。当常态为6%和7%时，抗压强度明显降低，且LS值较高。

在28天的固化年龄下，正常值为5%，各种LS的抗压强度为16-17MPa；当常态为6%时，LS将从0.45增加到0.5和0.55，抗压强度分别降低15%和34%，即当常态为固定值时，AAPC的抗压强度随着LS的增加而降低。

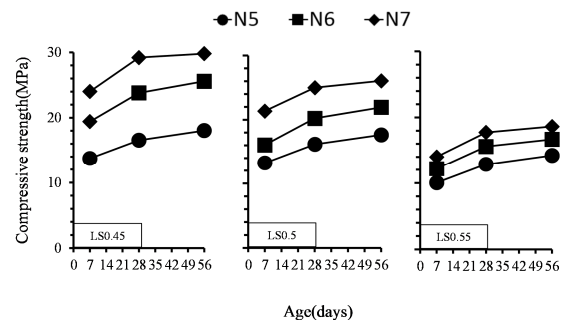


图3 正态性与AAPC抗压强度的关系。

图4表明，在7天的固化年龄下，当正常度为5%时，三个LS的不同年龄下的抗压强度彼此接近。当正常值为7%时，三个LS具有良好的抗压强度。当LS为0.55时，正态性的增加对抗压强度影响不大。Shih S. Y [17]证实，当LS为0.45和0.5时，抗压强度随常态增加。

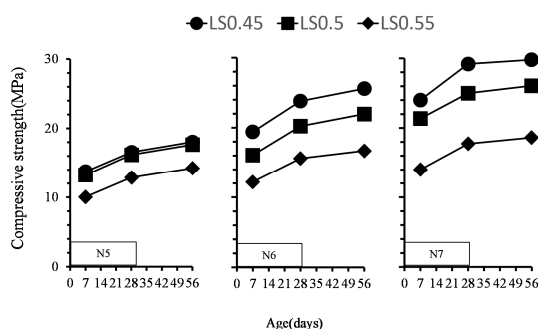


图4 LS与AACPC抗压强度的关系。

3.4. 抗弯强度

如图5所示, AACPC的抗弯强度趋势与抗压强度趋势相似。当法向固定时, 弯曲强度随LS的增加而降低。在28天的固化年龄下, LS从0.45增至0.55。当正常度为7%时, 活化的聚合反应良好, 但是在过度的活化过程中, 内部反应速率可能很高; 因此, 胶体的数量迅速增加, 导致破裂, 并且样品的致密性变差, 导致侧向阻力不足。在28天和56天的固化年龄下, 趋势彼此接近。

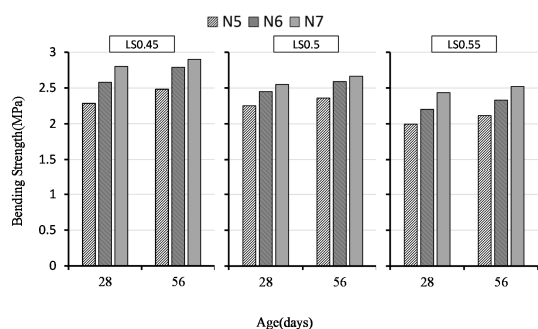


图5 AACPC的正态性与抗弯强度的关系

图6表明, 当LS固定为0.45时, 增加正态性有助于AACPC的抗弯强度。7%的当量度在各种LS中具有最高的挠曲强度, 即, 当当量的当量度为7%时, 硅酸钠溶液高于其他混合物设计比例, 并且活化的聚合反应良好。

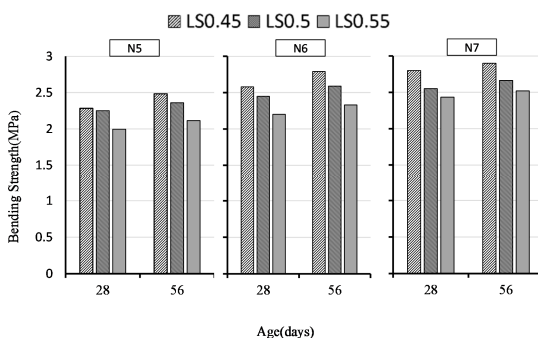


图6 LS与AACPC抗弯强度之间的关系。

3.5. 劈裂强度

图7显示, AACPC的分裂强度随年龄和正常水平的增加以及LS的降低而增加。在7天的固化期, LS为0.55时, 在

各种正常值之间的分离强度较低。在28天的固化年龄下, 各种混合比例的劈裂强度都高于1.90MPa。在56天的固化年龄下, 各种混合比例的劈裂强度都高于2.00MPa。碱性溶液的浓度随着LS的增加而降低, 并且劈裂强度的发展类似于抗压强度。

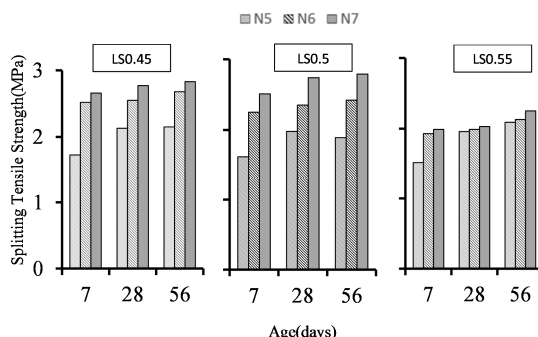


图7 正态性与AACPC分裂强度的关系。

图8表明, 混凝土劈裂强度的发展趋势与抗压强度和抗弯强度的趋势相似。在AACPC的不同标准值中, 7%的标准值可以在固化7天时为各种LS提供足够的碱溶液浓度和硅酸钠, 从而使各种LS具有更高的分裂强度。

在28天的固化年龄下, 各种混合比例继续进行活化聚合反应, 比7天的固化年龄高出最多12%, 而在80℃的固化年龄下, 各种混合比例增加了1%~11%。56天

所有混合料设计比例的劈裂强度均高于固化28天时的劈裂强度, 聚合反应持续至56天后期。

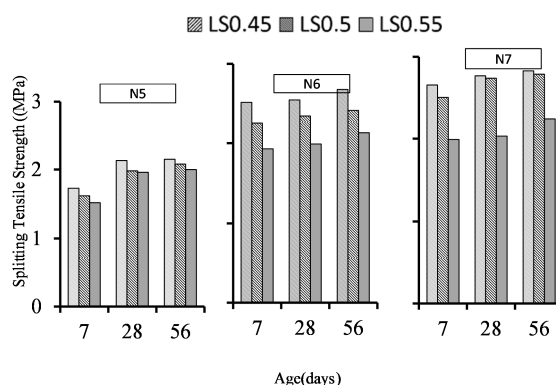


图8 LS与AACPC分裂强度的关系。

3.6. 弹性模量

图9表明, 在28天的固化年龄下, AACPC的弹性模量的发展趋势与抗压强度相同, 弹性模量随着LS的增加而降低, 而正态性降低。当法向为5%, 并且LS为0.45、0.5和0.55时, 弹性模量分别为6803MPa, 2395MPa和2301MPa。随着LS从0.45增加到0.5和0.55, 弹性模量分别降低了65%和66%。如果将LS固定为0.45, 并且正态性为5%, 6%和7%, 则弹性模量分别为6803MPa, 7175MPa和7223MPa, 即弹性模量增加5.5%和6%当正态性分别从5%增加到6%和7%时, 对于其他混合比例, LS为0.45, 正态性为7%表示最高的弹性模量。

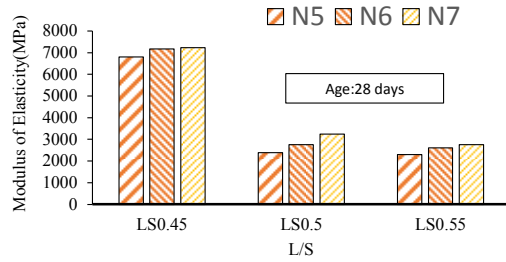


图9 AAPC的弹性模量。

3.7. 超声波脉冲速度

图10显示了不同的混合设计比例。AAPC在7天熟化时的超声脉冲速度可以高于28天熟化时的90%。随着LS的减小，在3~28天固化期的超声脉冲速度增加。通过降低LS而增加碱剂浓度和炉渣粉的体积，形成致密的胶体，样品内部致密，并且超声脉冲速度增加。

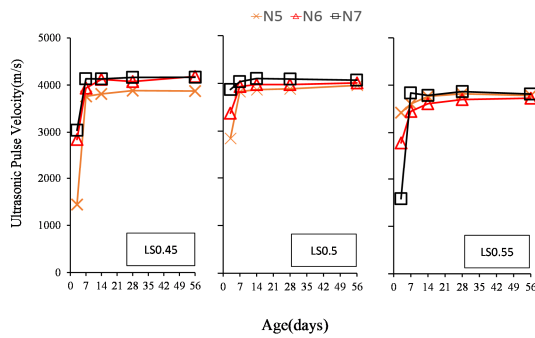


图10. AAPC的正态性与超声脉冲速度的关系。

如图11所示，对于5%，6%和7%的正态性，LS固定为0.5；在3~28天时，超声脉冲速度分别为2847~3885m/s，3376~3974m/s和3871~4090m/s。超声脉冲速度随常态而增加，这是因为可以通过增加常态性来增强活性炉渣的活性，完成内部结合，并且增加超声波脉冲速度。

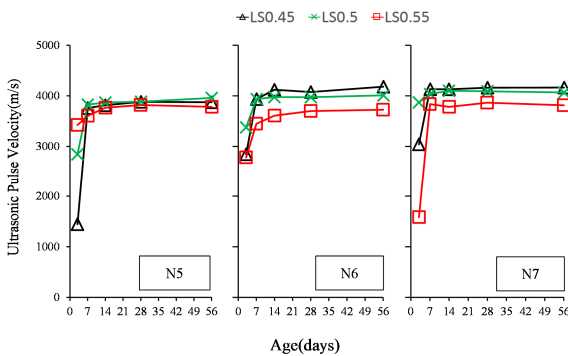


图11 LS与AAPC超声脉冲速度的关系。

3.8. 电阻率

混凝土的密度与孔隙率成反比，而电阻与导体的长度成正比。图12显示当在3天龄时正常值为5%，并且LS为0.45、0.5和0.55时，AAPC的电阻率为1.3kΩ-cm，1.8kΩ-cm和6.0kΩ-cm，分别。LS为0.55时具有最高的电阻率，因为

当混合水量很大时，早期样品中的水含量尚未分离，内部孔隙率低，并且电阻率性能优于其他混合设计比例。如Buenfeld, Newman和Page [18]所建议的，在固化7天后，电阻率高于20kΩ-cm，表明具有良好的耐久性。当法向为7%时，各个年龄段的电阻率按降序排列分别为LS的0.45、0.5和0.55。各种混合比例的56天龄时的电阻率为97~99kΩ-cm，比28天熟龄时的电阻率高21%~32%，即AAPC的耐久性在熟龄后仍在增长28天，如图13显示。

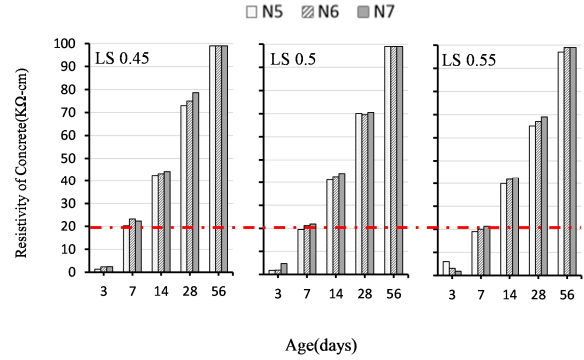


图12 AAPC的正态性与电阻率的关系。

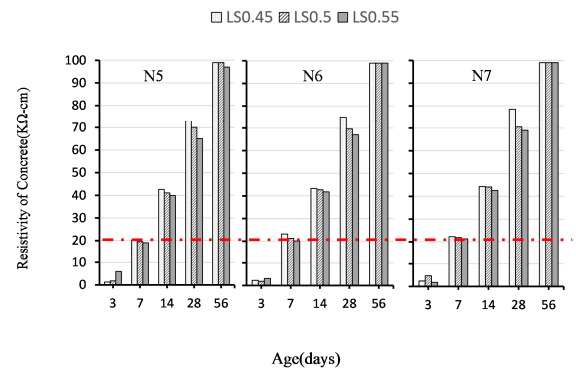


图13 LS与AAPC电阻率的关系。

3.9. 快速氯离子渗透性测试

如图14所示，LS为0.55，正态值为5%，AAPC的最大存储电荷。当正态性增加到7%时，存储的电荷量相应地减少。由于在高LS的情况下水的原始体积很大，因此脱水和固化后会有更多的孔，并且正常值较低，因此活化剂量不足以填充所有孔。因此，氯离子在样品中迅速扩散，并且在一段时间内存储的电荷量很大。

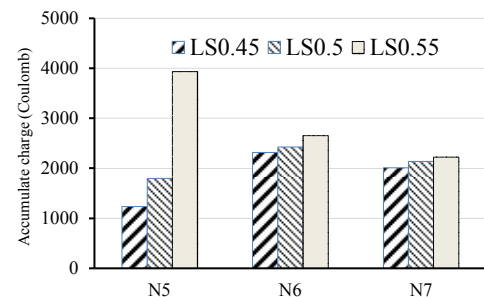


图14 AAPC的快速氯离子渗透率测试。

3.10. 微观结构

如图15所示，使用7%的正态性进行比较，AAPC试样中的胶结物随LS的增加而相对减少。图16显示LS为0.45，表明随着正态性增加而形成胶结物。另外，当当量为7%时，存在细小的裂纹，这可能是由于碱剂浓度增加，并且当当量正数增加时聚合加速，从而导致内部和外部之间的温差较大。

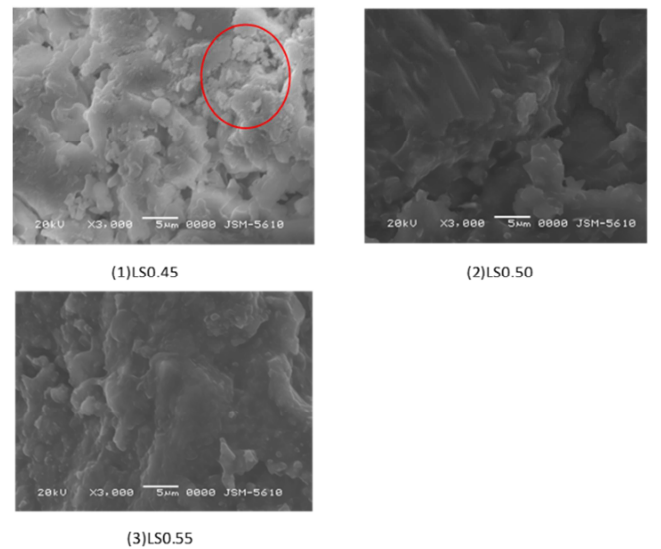


图15 AAPC正态性7%和LS的SEM晶相结构图（28天的年龄）。

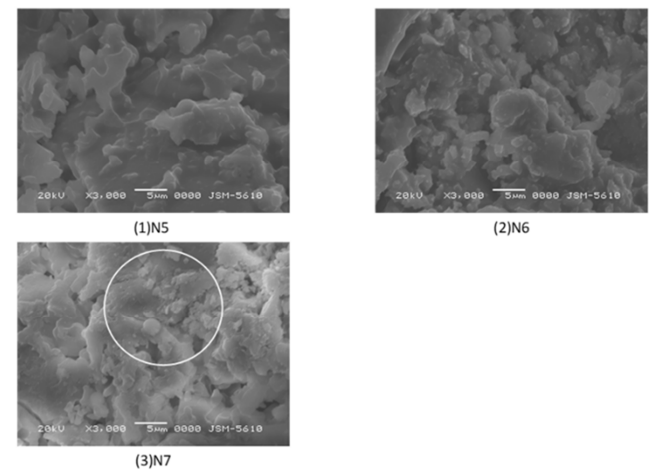


图16 LS为0.4和AAPC正态的SEM晶相结构图（28天的年龄）。

表5给出了EDS的组成分析，当常态为7%时，LS从0.45增加到0.55，硅和铝的含量分别为78.47%和6.97%。分别比0.5的LS高20.8%和4.18%，比LS的0.55高28.1%和3.79%。正常值为7%时，碱溶液浓度高；因此，铝硅酸盐材料可能被破坏，硅和铝被隔离，进行聚合反应，进入脱水阶段，从而获得了很高的抗压强度。

表5 AAPC的EDS成分分析。

Chemical composition (%)	LS		
	0.45	0.5	0.55
CaCO ₃	-	24.84	34.28
SiO ₂	58.79	49.08	38.55

Chemical composition (%)	LS		
	0.45	0.5	0.55
Mg	-	1.43	0.59
Al ₂ O ₃	6.97	4.79	3.18
TiO ₂	19.68	-	11.82
Ca	14.56	-	5.86
Fe	-	-	1.76
SrF ₂	-	-	1.43
Na	-	2.70	1.40
K	-	-	1.13

4. 结论

- (1) 碱活化火山灰混凝土（AAPC）的坍落度，坍落度和凝固时间随LS的增加而增加，且正态性降低。
- (2) 就AAPC的新鲜特性而言，LS是影响坍落度，坍落度流量和凝固时间的最重要因素。当LS为0.55且法向值为7%时，坍落度和坍落度流量分别高达281mm和645mm。
- (3) AAPC的抗压强度，抗弯强度和抗拉强度随年龄和正常情况而增加，并随着LS的增加而降低。弹性模量的发展趋势与抗压强度相同，即LS和正态分布的混合设计比例可以提高抗压强度。
- (4) AAPC的抗压强度随固化年龄和正常状态而增加。
- (5) 在LSA为0.45，常态为7%的AAPC的混合设计比例中，超声脉冲速度在早期阶段可达到3000m/s，并且在固化年龄达到24MPa以上的最佳抗压强度。7天，28天和56天。
- (6) AAPC的超声波脉冲速度随常态的增加和LS的减小而增加，碱剂浓度和矿渣粉增加，并形成致密的试样。
- (7) 具有较高LS的混合设计比例具有较高的电阻率。随着年龄的增长，水化完成，孔隙率降低，电阻率降低。快速氯化物渗透性测试结果表明，0.45的LS和5%的正态性具有较低的（1200 C）渗透电量，并且具有更好的耐久性。
- (8) AAPC的电阻率随正态性的增加而降低。当LS固定为0.5时，正态性的增加产生更多的C-S-H凝胶，导致电阻率降低。7天后，电阻率高于20kΩ-cm。
- (9) 根据AAPC的显微镜观察结果，当LS为0.45时，随着正态性的增加，会形成胶结水合物。EDS组成分析表明，当LS为0.45时，SiO₂（58.79）和Al₂O₃（6.97）较多。
- (10) 扫描电镜显示，当液固比为0.45，正态性为7%时，AAPC具有更好的碱活化聚合和微裂纹。
- (11) 根据EDS组成分析，低LS（0.45）和高正态性（7%）可以隔离78.47%的硅和6.97%的铝，分别比0.5和0.55的LS高28.1%和4.18%。炉渣的界面可以通过高碱性试剂浓度完全活化，并且通过增加硅酸钠溶液可以增强活化的聚合行为。

致谢

本文为惠州学院教博启动项目《利用不同含碱当量活化炉石及还原渣成效之研究》(2019JB032)和台湾科学技术部，根据 MOST 106-2221-E-151 -012 和 MOST 107-2221-E-992-040的合同的阶段性成果之一。

参考文献

- [1] Chou H. C., The Study on Engineering Properties of Alkali-Activated Waste LCD Glass Material. Master's Thesis. National Kaohsiung University of Applied Science, 2015.
- [2] Wang C. C., Wang H. Y., Chen B. T., Peng Y. C., Study on the engineering p properties and prediction models of an alkali-activated mortar material containing recycled waste glass, *Journal of Construction and Building Materials*, 132, pp 130-141. 2017.
- [3] Xian M. S., Ning X., Keith Fortune, Jing G., "Durability of steel reinforced concrete in chloride environments An overview", *Journal of Construction and Building Materials*, 30, pp. 125-138, 2012.
- [4] B. Lomborg, "The skeptical environmentalist: measuring the real state of the world Cambridge University Press", Cambridge, United Kingdom, pp. 512-40, 2011.
- [5] Mehta P. K., "Reducing the environmental impact of concrete", *Concr Int*, 23 (10), pp. 61-66, 2001.
- [6] Wang W. C., Wang H. Y., Hsin-ChiehTsai, 2016, Study on engineering properties of alkali-activated ladle furnace slag geopolymer, *Journal of Construction and Building Materials*, 123 pp. 800-805.
- [7] Puertas F., Palacios M., Gil-Maroto, A., Vázquez T., "Alkali-aggregate behavior of alkali-activated slag mortars: effect of aggregate type," *Cement and Concrete Composite*, Vol. 31, No. 5, pp. 277-284, 2009.
- [8] Zhu H. J., Yao X., Zhang Z. H., Effect of Slag Addition on Alkali-activated Process of Met kaolin and Performance of Its Product, *Non-Metallic Mines* Vol. 31 (4). 2008.
- [9] Escalante-Garia, J I, Wspinoza-Perez L J, and Gorokhovshy A., "Coarse blast furnace of Portland cement and as an alkali activated cement," *Construction and Building Materials*, 23, pp. 2511-2517. 2009.
- [10] Davidovits J., "Geopolymer chemistry and applications", Editors: J. Davidov its, *Institute Géopolymère*, Saint-Quentin, France, pp. 384-385, 2008.
- [11] Peng Y. C., Wang H. Y., Chen B. T., Add LCD glass waste impact on the hearth base mortar engineering properties of alkali gelling, *Taiwan Concrete Institute 2015 Conference on Concrete Engineering*, p 9. Tai-chung. 2015.
- [12] Tsai H. C, Study on Engineering Properties of Alkali-Activated Ladle Furnace Slag Geopolymer. Master's Thesis. National Kaohsiung University of Applied Science, 2016.
- [13] Rafael A. Robayo, Alexandra Mulford, Jorge Munera, Ruby Mejía de Gutiérrez, "Alternative cements based on alkali-activated red clay brick waste," *Construction and Building Materials*, 128, pp. 163-169. 2016.
- [14] Tanakorn Phoongernkham, Sakonwan Hanjitsuwan, Cherdasak Suksiripattanapong, Jaksada Thumrongvut, Jirayut Suebsuk, Sermak Sookasem, "Flexural strength of notched concrete beam filled with alkali activated binders under different types of alkali solutions," *Construction and Building Materials*, 127, pp. 673-678. 2016.
- [15] Wu T. H, Study on Bonding Behavior of Reinforcement in Alkali-Activated Slag-Fly Ash Mortar. Master's Thesis. National Kaohsiung University of Applied Science, 2013.
- [16] Arie Wardhono, Chamila Gunasekara, David W. Law, Sujeeva Setunge, "Comparison of long term performance between alkali activated slag and fly ash geopolymer concretes. *Construction and Building Materials*, 143, pp. 272–279. 2017.
- [17] Shih S. Y, The Manufacture Technique of Geopolymer Brick Made from Coffee Dross. Master's Thesis. National Kaohsiung University of Applied Science, 2016.
- [18] Buenfeld NR, Newman JB, Page CL., "The Resistivity of Mortar Immersed in Sea-Water," *Cement and Concrete Research*, 16 (3): 511-524, 1986.