

روابط بین ساختار و ویژگی های مکانیکی بتون هوادهی شده اتوکلاو

چکیده

نمونه های آزمایشگاه بتون هوادهی شده اتوکلاو تحت شرایط متغیر، عمدتاً با سیمان و چسب به عنوان چسبنده ها ساخته شده است. نوع و میزان محصولات واکنش، تخلخل و توزیع اندازه منافذ مطالعه شده است. انقباض و استحکام فشردگی اندازه گیری شده است. محصولات واکنش متعلق به گروه tobermorite برای هیدرات های سیلیکات کلسیم و تبلور واحد به صورت درصد 11.3 tobermorite خارج از میزان کلی هیدرات های سیلیکات کلسیم تعریف میشود. انقباض با افزایش تبلور کاهش می یابد در حالی که استحکام تا حدود مقدار بهینه افزایش یافت. استحکام با افزایش محصولات واکنش افزایش یافت که حاکی از رفتار گرمایی و توزیع اندازه ریزمنافذ بوده و می تواند دارای اهمیت در ویژگی های مکانیکی ماده باشد.

مقدمه

بتون هوادهی شده اتوکلاو، یک محصول سلولی است که در آن ماده چسبنده شامل هیدرات های سیلیکات کلسیم می شود که می تواند از مواد خام مختلف از قبیل سیمان، آهک، خاکستر بلاست گرانول کوره، ماسه و خاکستر ساییده شده سوخت ساخته شود. ساختار سلولی به طور نرمال توسط گنجاندن پودر آلومینیوم نرم در ترکیب تشکیل می شود. این ماده با آهک یا دیگر مواد آلكائین برای تولید هیدروژن واکنش می دهد که سبب خیزش ترکیب می شود. بعد از خیزش، بتون هوادهی شده باید برای چند ساعت سفت شود قبل از اینکه بتواند اتوکلاو شود. این کار گزارش شده در اینجا مربوط به مسائل مرتبط با ساختار ماده برای ویژگی های مکانیکی، انقباض و استحکام فشردگی است. ساختار ماده توسط ماده جامد و منافذ آن مشخص می شود. منافذ دارای دو نوع هستند؛ منافذ

ماکرو، که حاصل خیزش بتون هستند وزیرمنافذ که در دیواره ها بین منافذ ماکرو پدیدار می شوند. ریزمنافذ باقیمانده فضای از آب پر شده هستند که به طور جزئی توسط محصولات واکنش در مدت اتوکلاو اشغال می شوند. ساختار ماده می تواند توسط نوع محصولات واکنش، میزان محصولات واکنش، تخلخل و توزیع اندازه منفذ مشخص شود.

روش ها

نمونه های آزمایشگاه تحت شرایط مختلف شامل تغییرات در مواد خام، افزودنی ها، ویژگی های ترکیب، چگالی ها و شرایط اتوکلاو ساخته می شوند. در بیشتر نمونه ها، سیمان و آهک به عنوان چسبنده ها استفاده شده اند و منبع سیلیکا ماسه کوارتز استفاده شده است. آلومینا حاوی موادی از قبیل خاکستر کوره بلاست گرانول، بائوکسیت و سیمان با آلومینای بالا به عنوان افزودنی استفاده شده اند. چگالی بلوک ها تقریباً 500 کیلوگرم بر مترمربع ساخته شده است. به جز برای مجموعه ای که در آن چگالی بین 315 و 265 کیلوگرم بر متر مربع متغی بوده است. فشار اتوکلاو در $1\text{MN}/\text{m}^2$ بالای فشار اتمسفر ثابت نگهداشته شد در حالیکه زمان اتوکلاو متغیر بود. شرایط تولید ورای هدف و دامنه کاربرد این گزارش است، از اینرو هدف یافتن روابطی بین ساختار ماده و ویژگی های مکانیکی بوده است نه مطالعه تاثیر شرایط مختلف برای تولید.

محصولات واکنش به روش های مختلف تحت مطالعه قرار گرفته اند، شکست اشعه X از همه مهمتر بوده است. فیلم ها با دوربین متمرکزکننده Nonius با استفاده از تابش Cu Ka صورت گرفته است. فیلم ها به طور کمی با اندازه گیر چگالی ارزیابی شده اند. با استفاده از 10 درصد CaF_2 به عنوان استاندارد داخلی، مقادیر کوارتز بدون واکنش و توربومریت میتواند تعیین شود. چهار مواجهه برای هر نمونه در نظر گرفته شد و ضریب تغییر برای ارتفاع های پیک نسبی در متوسط 4 درصد برای کوارتز و 8 درصد برای توربومریت بوده است. A 4.26 و A 11.3 پیک به ترتیب استفاده شده اند.

محصولات واکنش نیز توسط تحلیل گرمایی دیفرانسیل (DTA) مطالعه شده اند. برای تعداد کمی از نمونه های، سطوح خاصی توسط جذب نیتروژن با استفاده از روش BET اندازه گیری شده اند و برخی نمونه ها در میکروسکوپ

انتقال الکترون با استفاده از تکنیک معکوس مطالعه شده اند. میزان کلی هیدرات سیلیکات کلسیم توسط تحلیل شیمیایی با استفاده از روش Stock اندازه گیری شده است.

تخلخل با روش پیکنومتر با استفاده از آب به عنوان محیط اندازه گیری تعیین شده است. بسیاری از مطالعات محدود برای اندازه توزیع ماکروذرات با استفاده از تحلیلگر تصویری برای توزیع اندازه ریزذرات با استفاده از پروسیمتر مرکوری صورت گرفته است. انقباض توسط روش استاندارد استفاده شده در سوئد، یعنی خشک نمودن منشورهای 40 در 40 در 160 میلی متر در 43 درصد رطوبت نسبی بعد از سه روز خیس نمودن با آب اندازه گیری شده است. استحکام فشرده‌گی نیز با استفاده از روش استاندارد سوئدی اندازه گیری شده است که از مکعب های 150 در 150 در 150 میلی متر استفاده می نماید. نتایج استحکام برای معتبر بودن در محتوای رطوبت 10 درصد و چگالی 500 کیلوگرم بر متر مکعب تصحیح شده است (به جز در مجموعه ای که در آن چگالی متغیر است). اصلاحات مطابق با فرمول تجربی صورت گرفته است که مبتنی بر تجربه در آزمایشگاه های Siporex بوده است:

$$\tau_{\text{corr}} = \tau_{\text{act}} \times \frac{\log_{10} (2466 / (2680 - D_{\text{nom}}))}{(0.87 + (2.02 / (5.7 + f))) \times \log_{10} (2466 / (2680 - D_{\text{act}}))}$$

که در آن T_{corr} (Mpa) استحکام مقایسه ای معتبر در چگالی D_{nom} (کیلوگرم بر متر مکعب) است که در این مورد 500 کیلوگرم بر متر مکعب انتخاب شده است و محتوای رطوبت 10 درصد است. T_{act} در واقع استحکام واقعی اندازه گیری شده در چگالی D_{act} (کیلوگرم بر متر مکعب) و محتوای رطوبت f درصد است.

نوع محصولات واکنش

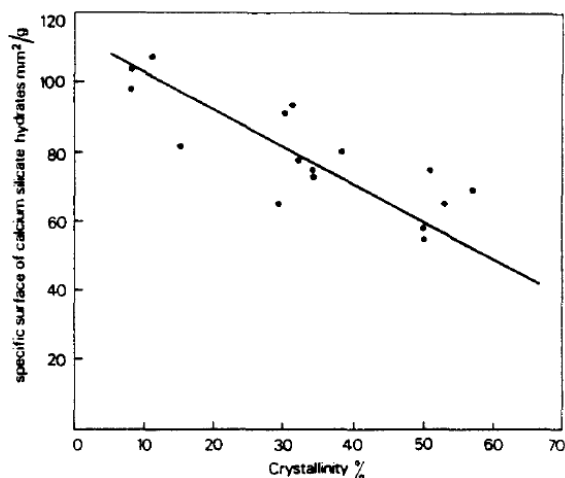
شکست اشعه X

از نتایج XRD دریافتیم که عمده ترین محصولات واکنش در تمام موارد متعلق به گروه توبرموریت برای هیدراتهای سیلیکات کلسیم است. این گروه می تواند به کریستالین، نیمه کریستالین و نزدیک به توبرموریت های امورفوس تقسیم شود (2). برای توبرموریت های کریستالین تنها 11.3 توبرموریت بزرگتر یا کمتر از محدوده در نمونه ها بود. برای سادگی، توبرموریت در مورد بعدی برای نشان دادن 11.3 توبرموریت استفاده خواهد شد.

با مقایسه شدت های نسبی 3.08 بازتاب ها در نمونه ها با همین موارد برای بازتاب های یکسان در آماده سازی استاندارد برای توبرموریت، می توان دید که 3.08 پیک نمی تواند توسط توبرموریت به تنهایی به کار گرفته شود. به علت اینکه قویترین بازتاب برای توبرموریت های نیمه کریستالین نزدیک به 3.08 است به نظر می رسد این فرض منطقی باشد که بتون های هوادهی شده شامل مخلوطی از کریستالین و ماده نیمه کریستالین باشد. تحلیل شیمیایی نشان داد که بیشتر نمونه ها دارای نسبتی بین 0:8 و 1:0 است که حاکی از اینست که ماده نیمه کریستالین می تواند به صورت C-S-H طبقه بندی شود (1).

بنابراین می تواند گفت که محصولات واکنش شامل مخلوطی از توبرموریت و C-S-H (I) می شود. به طور عادی این مورد به صورت مخلوط مکانیکی برای دو جزء در تناسب های معین تفسیر خواهد شد. هرچند، یک تفسیر جایگزین امکانپذیر است. از اینرو، توبرموریت و C-S-H (I) تقریباً مرتبط هستند، با تفاوتی عمدتاً در تبلور آن، می تواند این مواد را به عنوان اعضای نهایی مجموعه مواد با درجات مختلف تبلور ملاحظه نمود. یک نمونه که از آن تحلیل XRD به نظر می رسد مخلوطی مکانیکی از توبرموریت و C-S-H (I) باشد می تواند مطابق با تفسیر بعدی ترجیحاً متوسط باشد، ماده همگن با درجه ای از تبلور جایی در بین توبرموریت و C-S-H (I). از نتایج XRD تمایز قائل شدن بین دو تفسیر ممکن نیست. احتمالاً باید با ترکیبی از دو مورد ارتباط داشته باشد، یعنی مخلوط مکانیکی برای مواد میانه با تغییر درجات تبلور. منطقی مشابه در (3) ارائه شده است.

بر مبنای منطقی بالا، اصطلاح تبلور به صورت زیر تعریف می شود:



شکل 1. رابطه بین سطح خاص هیدرات سیلیکات کلسیم و تبلور



FIG. 2

شکل 2 میکروگراف بتون هوادهی شده

تبلور بر حسب درصد = توپرموریت × هیدرات سیلیکات کلسیم / 100 یا، اگر فقط توپرموریت و C-S-H(I) حاضر باشند:

تبلور بر حسب درصد = توپرموریت × (توپرموریت بر حسب درصد + C-S-H (I) / 100

مقادیر توپرموریت و C-S-H (I) باید به عنوان موارد معادل توجه شود، نه موارد صحیح، از اینرو مطابق با منطق بالا، می تواند فرض نمود که بیشتر از دو نمونه ماده می تواند حاضر باشد

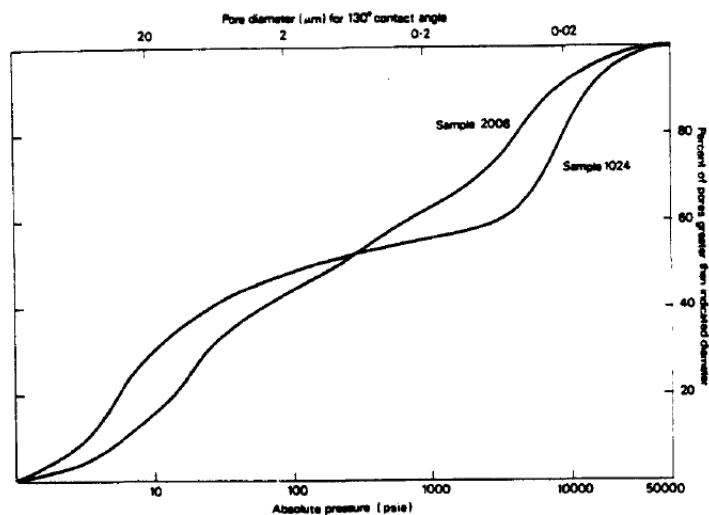
سطح خاص

از اینرو هیچ فاز دیگری از هیدرات های سیلیکات کلسیم آشکار نشد، ناحیه سطحی خاص برای این فازها می تواند از کل آن ماده محاسبه شود. رابطه بین تبلور و ناحیه سطح ویژه در شکل 1 نشان داده شده است که حاکی از اینست که هیدرات سیلیکات کلسیم کریستالین دارای سطح ویژه بیشتر از ماده به خوبی متبلور شده است.

تحلیل گرمایی دیفرانسیل

تقریباً در تمام نمونه ها، یک اگزوترم بالای 800 درجه در ترموگرم ها به نظر می رسد. این احتمالاً ناشی از تشکیل وولاستونیت بتا است. مطابق با Kalousek (4)، توپرموریت خالص آن را ارائه نمی دهد در حالیکه تمام توپرموریت های جایگزین شده این مورد را ارائه می دهند. Kalousek نیز دارای این عقیده بود که C-S-H (I) یک پیک اگزوترم در حدود 800 درجه سانتیگراد (5) را ارائه می دهد اما (6,7) شک دارند که اینگونه باشد.

در بررسی کنونی، ارتفاع پیک اگزوترم می تواند مرتبط با محتوای C-S-H (I) باشد، که این مورد آخر به صورت تفاوت بین میزان کلی هیدرات های سیلیکات کلسیم و محتوای توپرموریت محاسبه می شود، از اینرو هیچ هیدرات سیلیکات کلسیم دیگری آشکار نمی شود. برای مخلوط سیمان و آهک بودن افزودن آلومینای حاوی مواد (به جز برای سیمان)، ارتفاع پیک به طور خطی با محتوای C-S-H (I) بنابراین پشتیبان این دیدگاه است که C-S-H(I) سبب یک



شکل 3 توزیع اندازه میکروذرات برای دو نمونه بتون هوادهی شده اندازه گیری شده توسط تخلخل سنجی مرکوری

اگزوترم بالای 800 درجه می شود. هنگامی که مواد حاوی آلومینا افزوده می شوند، ارتفاع پیک به علت برخی مواد غیر از C-S-H(I) افزایش می یابد، احتمالاً توپرموریت های جایگزین شده با Al همانگونه که در (4) بیان شده است. دمای پیک با افزایش تبلور افزایش یافت اما مخلوط های حاوی افزودنی های بائوکسیت یا سیمان با آلومینای بالا در

این حالت غیرعادی بودند، که دماهای پیک بالاتری را نسبت به دیگران ارائه می داد. در برخی نمونه ها، یک اثر اندوترمال شناسایی نشده کوچک نیز در حدود 410 درجه یافت شد.

میکروسکوپی الکترون و توزیع اندازه میکروذرات

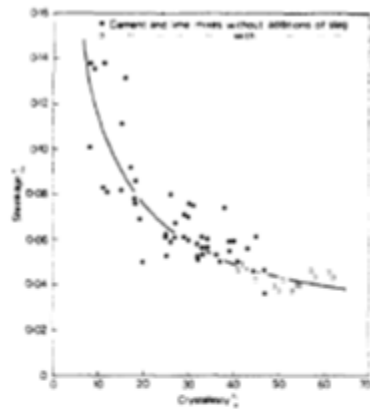
برخی از نمونه ها توسط میکروسکوپی الکترون مطالعه شد. صفحات متبلور از توپرموریت بعلاوه ماده کریستالین کمتر دیده شده است (شکل 2). شکل اندازه و دیگر خصایص صفحات بین نمونه های مختلف، متفاوت بود. دو نمونه توسط تخلخل سنجی مرکوری اندازه گیری می شود. نمونه های توزیع های اندازه متفاوت را نشان داد (شکل 3)، برخلاف این حقیقت که آنها دارای نمونه های XRD مشابه بودند که نشان از تبلور به صورت تعریف شده در بالا بود، که برای توصیف محصولات واکنش کافی نیست.

روابط بین ساختار، انقباض و استحکام

تأثیر تبلور

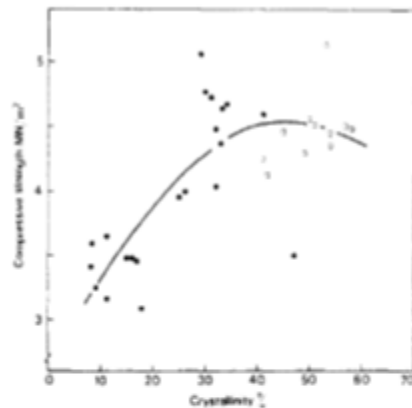
تبلور، دارای اثر گول زننده در انقباض و استحکام است. در شکل 4، انقباض در ازای تبلور برای مخلوط مبتنی بر سیمان و آهک ترسیم شده است. شکل شامل مخلوط هایی با افزودنی هایی به خاکستر است اما نه با بائوکسیت یا سیمان با آلومینای بالا. این مورد شامل مخلوط هایی با تغییر تخلخل می شود هرچند بیشتر دارای تخلخل متناظر با چگالی در حدود 500 کیلوگرم بر متر مکعب است.

در مورد استحکام، متوجه شدیم که جدا از تبلور، میزان کلی هیدرات سیلیکات کلسیم و تخلخل دارای تاثیر است. در شکل 5، این تاثیر با ترسیم نمونه ها با تقریباً همان میزان از هیدرات کلسیم (50-60 درصد) و همان چگالی (500 کیلوگرم بر متر مکعب) مستثنی شده است. به نظر می رسد یک تبلور بهینه در حدودی وجود دارد که استحکام افزایش می یابد. برخی نمونه ها به طور قابل توجهی از منحنی میانگین انحراف دارند، که احتمالاً به علت مشخصات ساختاری است که در تبلور در نظر گرفته نشده است.



شکل ۴

رابطه بین تبلور و انقباض برای مخلوط
سیمان و آهک بدون افزودنی های خاکستر



شکل ۵

رابطه بین تبلور و استحکام فشردگی برای
سیمان و آهک برای مخلوط های سیمان و
آهک بدون افزودنی های خاکستر و میزان
کلی هیدرات کلسیم سیلیکات ۵۰ تا ۶۰
درصد چگالی ۵۰۰ کیلو گرم بر متر مکعب

مخلوط هایی که حاوی افزودنی های بائوکسیت یا سیمان با آلومینای بالا بودند انحراف سیستماتیک از روابط توصیف شده در بالا را از خود نشان دادند. در شکل 6، رابطه بین تبلور و انقباض برای مخلوط های مبتنی بر سیمان و آهک با افزودنی های بائوکسیت یا سیمان با آلومینای بالا نشان داده شده است. به دلیل مقایسه، رابطه یافت شده در شکل 5 گنجانده شده است. می توان دید که انقباض به طور کلی کمتر است، برخی اوقات بسیار کمتر هنگامی که این مواد حاوی آلومینا اضافه می شوند. همچنین استحکام فشردگی برای این ترکیبات کمتر است. یک توضیح ممکن برای این رفتار می تواند در نتایج DTA یافت شود، که در آن دماهای بالای قابل ملاحظه برای تشکیل وولاستونیت بتا برای چند ترکیب دیگر مشاهده شده است. این باید حاکی از تغییرات در ساختار ماده باشد.

تاثیر میزان گرمای هیدرات های سیلیکات کلسیم

به طور عجیبی، دریافت شد که انقباض به طور چشمگیری از میزان کلی هیدرات سیلیکات کلسیم تاثیر نمی پذیرد زمانی که در محدوده به دست آمده تغییر می کند (38 تا 79 درصد). استحکام مقایسه ای از میزان کلی هیدرات ها تاثیر نمی پذیرد. اثر ترکیبی تبلور و میزان کلی هیدرات های سیلیکات کلسیم توسط چندین تحلیلگر رگرسیون

مطالعه شده است, که منتج به معادله زیر شده است (با چشم پوشی از برخی ترسیم کنندگان شامل مواردی با افزودنی های بائوکسیت یا سیمان با آلومینای بالا):

$$\tau = 0.0386 \cdot T + 0.0831 \cdot C - 0.00087 \cdot C^2 + 0.39$$

که در آن τ استحکام مقایسه ای (MN/m²) = میزان کلی هیدرات های سیلیکات کلسیم (%), و C = تبلور, %.
ضریب همبستگی 0.90 بوده و معادله به ترکیبات با چگالی 500 کیلوگرم بر متر مکعب اشاره دارد.

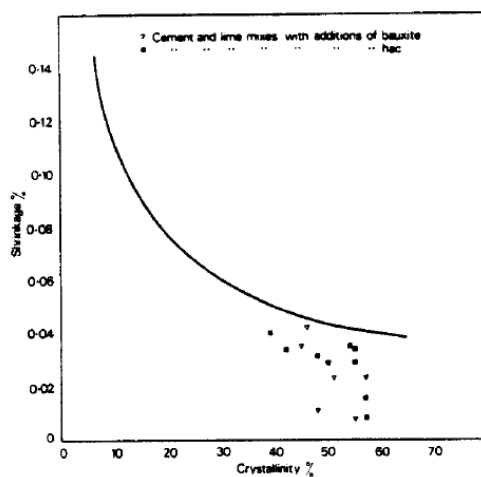


FIG. 6

شکل 6. رابطه بین تبلور و انقباض برای مخلوط سیمان و آهک با افزودنی های بائوکسیت یا سیمان با آلومینای بالا

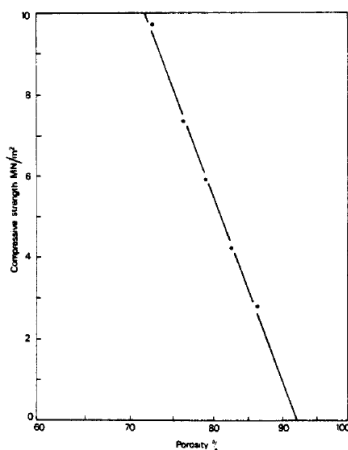


FIG. 7

شکل 7. رابطه بین تخلخل و استحکام فشردگی

تأثیر تخلخل و توزیع اندازه ماکروذرات

مهمترین عامل تعیین کننده استحکام فشردگی، تخلخل است. در شکل 7، تأثیر تخلخل در استحکام فشردگی برای مخلوطهایی مبتنی بر سیمان و آهک بدون افزودنی های نشان داده شده است که در آن تنها تخلخل تغییر یافته است.

رابطه خطی با معادله شیلر تطابق دارد که حاکی از اینست که تخلخلی بحرانی در حدود 92 درصد وجود دارد که در آن هیچ استحکامی به دست نمی آید. انقباض افزایش می یابد هنگامی که تخلخل کاهش می یابد؛ این مورد می تواند عجیب نباشد زیرا تخلخل کمتر بدین معنی است که فضای کمتری وجود دارد که در آن کریستال می تواند توسعه یابد. نمونه ها با تخلخل متغیر در شکل 8 گنجانده شده است.

یک مطالعه بسیار محدود در مورد تأثیر توزیع اندازه ماکرو ذرات در استحکام فشردگی صورت گرفته است، اما چنین تأثیری نمی تواند مشاهده شود.

نتایج

محصولات واکنش در بتون های هوادهی شده اتوکلاو در این بررسی متعلق به گروه توپرموریت برای هیدرات های سیلیکات کلسیم مطالعه شده است. یکی از مهمترین مشخصات این محصولات اینست که آنچه تبلور نامیده می شود، به صورت درصد 11.3 توپرموریت از میزان کلی هیدرات سیلیکات کلسیم تعریف می شود. دیگر عوامل مهم که روی رفتار آنها تأثیر می گذارند، توزیع اندازه ماکرو ذرات و اهمیت شیمیایی آنها است همانگونه که توسط تحلیل صورت گرفته توسط DTA نشان داده شده است.

انقباض با افزایش تبلور کاهش یافت در حالیکه استحکام تا مقدار بهینه افزایش یافت بعد از اینکه کاهش یافت.

انقباض وابسته به میزان کلی هیدرات سیلیکات کلسیم است در حالیکه استحکام با افزایش مقادیر افزایش یافت.

هنگامی که بائوکسیت یا سیمان با آلومینای بالا به ساختار اضافه شدند بدین صورت تأثیر گذاشتند که انقباض و استحکام کمتری حاصل شد.

یک رابطه خطی بین لگاریتم تخلخل و استحکام فشردگی استنتاج شد. انقباض با کاهش تخلخل ناشی از تبلور کاهش یافته افزایش یافت. توزیع اندازه ماکروذرات، به علت هوادهی، روی استحکام تاثیر نگذاشت.

قدردانی

نویسنده می خواهد از دکتر H G Midley و آقای Mr N Hara برای بررسی های با ارزش در مدت دوره بررسی تشکر نماید. این قدردانی ها بیشتر ناشی برای شرکت Euroc, شرکت مادر از شرکت Siporex است که اسپانسر بررسی گستره وسیعی از فلوشیپ نویسنده است. این کار به عنوان بخشی از برنامه تحقیقاتی برای سازمان تحقیقات ساختمان برای سازمان محیط انجام شده و این مقاله با اجازه از هدایت کننده منتشر شده است.

References

1. K.R. Stokes. PhD Thesis, University of London, 1971.
2. H.F.W. Taylor. The Chemistry of Cements, 1, p181, Academic Press, London and New York, 1964.
3. J.R.L. Dyczek and H.F.W. Taylor. Cem. Concr. Res. 1, 589 (1971).
4. G.L. Kalousek. Proc. 5th. Int. Symp. Chem. Cement, Tokyo, 1968, 3, 523 (1969).
5. G.L. Kalousek. J. Am. Concr. Inst. 25, 365, (1954).
6. R.W. Nurse. Proc. 3rd. Int. Symp. Chem. Cement, London, 1952, 356 (1954).
7. H.G. Midgley and S.K. Chopra. Mag. Concr. Res. 12, 73 (1960).