

استحکام جت گروت و خواص تغییر شکل تک سیال

چکیده

استفاده از ستون‌های جت گروت زیر افقی در ساخت تونل‌های زمین نرم، روشی رایج برای پشتیبانی حفاری است. نصب متوالی ستون‌های جت گروت در یک محیط تونل زنی منجر به بارگیری ستون‌های جت گروت به صورت مرحله ای می‌شود که در نتیجه خواص مواد جت گروت و ترتیب نصب بر بزرگی و توزیع نشست‌های سطحی و تغییر شکل‌های صورت تأثیر می‌گذارد. یک برنامه آزمایشگاهی برای تعیین کمیت توسعه کوتاه مدت (کمتر از 24 ساعت) استحکام و سفتی یک دوغاب با ترکیبی شبیه به آنچه در ساخت ستون‌های جت گروت یافت می‌شود، انجام شد. آزمایشات آزمایشگاهی در دمای 8 درجه سانتیگراد برای شبیه‌سازی دمای زمین انجام شد. همچنین سیلندرهای آزمایش آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی تفاوت‌های شرایط مرزی بین ستون‌های جت گروت با قطر 600 میلی‌متر در خاک و نمونه‌های آزمایشگاهی با قطر 76 میلی‌متر عایق‌سازی شدند.

کلمات کلیدی: ستون‌های جت گروت؛ استحکام گروت؛ سفتی دوغاب

1. مقدمه

استفاده از تزریق جت در ساخت تونل‌های عمیق، خصوصاً تونل‌های بزرگ با پروفیلی غیر دایره ای در حال افزایش است. این روش از نصب تعدادی ستون‌های جت ملات برای تولید طاقی از ماسه سیمان شده در جلوی تونل به منظور

پشتیبان حفاری استفاده می کند. این طاق ها در چند مرحله نصب می شوند تا چند بخش مخروط ناقص روی هم افتاده تشکیل شود (شکل 1).

در محیطی شهری یکی از الزامات برای تونل های عمیق این است که روش تولید باید نشست سطح را در تولا رانسی مشخص نگه دارد. گرچه، با این روش یک تاخیر بین نصب دوغاب ملات جت و سفت شدن مخلوط ماسه-سیمان وجود دارد. اگر این سفت شدن به اندازه کافی به تاخیر بیافتد، ستون ملات جت استحکام برشی کافی برای تحمل بارهای اضافی را نخواهد داشت و باعث نشست زیاد در بالای تونل و تغییر شکل سطح می شود. از آنجایی که ستون های ملات جت در گروه های چهار تایی یا بیشتر نصب می شوند (شکل 1.C)، این روش باعث تحریک نشست سطح در صورت عدم وجود روش های سختگیرانه کنترل کیفیت خواهد شد.

بررسی نمو استحکام و سفتی در این روش می تواند در غلبه بر این مشکل کمک کند. با احاطه بر نحوه سخت شدن ملات جت، ترتیب نصب را می توان به گونه ای انجام داد که بارهای حفاری که توسط نصب ستون ملات جت ایجاد می شود توسط ستون قبلی سخت شده تحمل شوند. ترتیب دهی به شکلی که بارهای حفاری توسط ستون ها با بیشترین درجه سخت شوندگی تحمل بشود، باعث کنترل نشست سطح و پشتیبانی حفاری می شود.

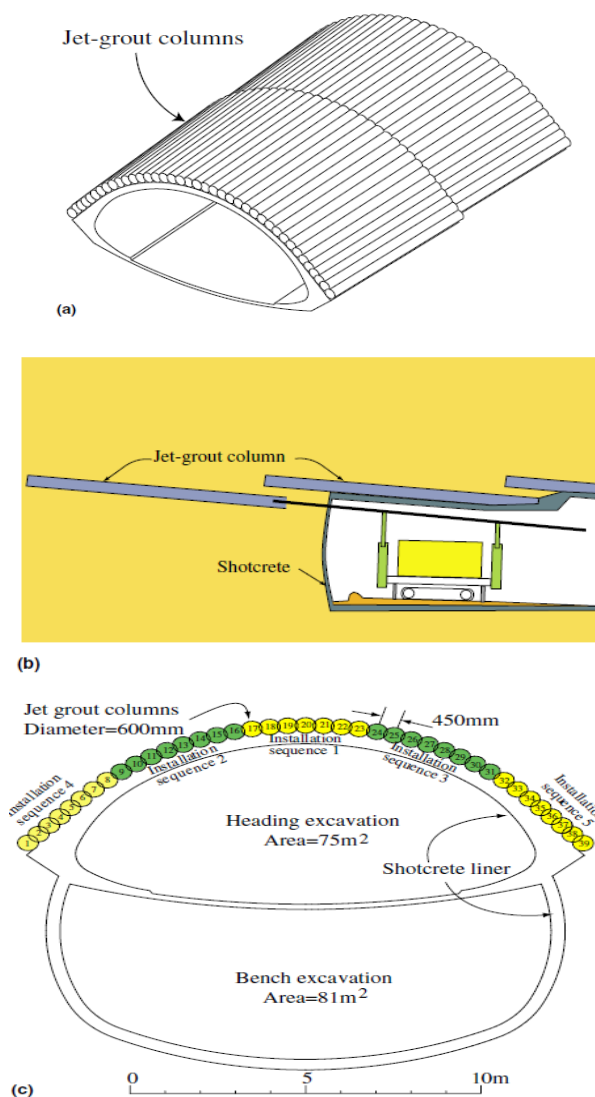
یک برنامه آزمایشگاهی برای تعیین نمو کوتاه مدت (کمتر از 24 ساعت) استحکام و سفتی مخلوط دوغابی مشابه آنچه در ساخت ستون های ملات جت برای پشتیبانی تونل استفاده می شود انجام شد. تست ها در دمای معمول زمین ($^{\circ}\text{C}$) 8 به جای دمای معمول اتاق انجام شد. همچنین استوانه های تست برای شبیه سازی تفاوت های ستون های 600 میلی متری ملات جت و نمونه های 76 میلی متری عایق کاری شدند. این مقاله مشخصات وابسته به زمان دوغاب جت این تست های آزمایشگاهی را خلاصه می کند.

2. تاریخچه تزریق جت

این روش در دهه 1970 در ژاپن ابداع شد و سپس در اروپا رونق گرفت و در دهه 1980 در آمریکا استفاده می شد. بر خلاف تزریق نفوذی، که نسبت به نوع ماسه استفاده شده بسیار حساس است، تزریق جت برای عملیات بر روی هر

نوع ماسه ای قابل استفاده است. سیستم اصلی از یک سیستم تک سیاله شامل سیمان پورتلند و آب تشکیل شده بود. سیستم تک سیاله می تواند ستون هایی با قطر 500 تا 1000 میلی متر تولید کند که معمولا برای تولید ستون های ملات جت در تونل استفاده می شود.

تزریق جت در دو فاز انجام می شود. در فاز اول، زه مته توسط حفاری چرخشی به جلو می رود. در فاز دوم، عمل جت شروع می شود و زه مته می چرخد و به عقب می رود.



شکل 1. یک چتر محافظ تزریق جت استفاده شده در تونل های بزرگ و عمیق. (a) نمای سه بعدی از چتر ملات جت. (b) مقطع طولی نشان دهنده ستون های ملات جت تهیه کننده چتر محافظ و (c) ترتیب نصب ستون های ملات جت.

2.1 ترکیب ملات جت

ترکیب ملات جت تا حدودی وابسته به ماسه مورد استفاده است. محاسبات عددی ملات جت به دلیل فرایندهای پیچیده سایش، اختلاط، جایگزینی، پر کردن منفذها و پارامترهای تزریق جت در عمل ممکن نیست. بنابراین پیش بینی ترکیب ملات جت باید بر اساس مشاهدات صورت بگیرد. کروچه و فلورا کشف کردند که درصد برداشت ماسه در آزمایش های میدانی تزریق جت تک سیاله در شن و ماسه بین 30 تا 60 درصد است (جدول 1 را ببینید).

2.2 رفتار ملات جت

ملات جت کاملا سفت شده همانند بتن سیمان پورتلند عمل می کند به عنوان مثال واکنشی الاستیک و غیر خطی دارد که بعد از آن شکست ترد رخ می دهد. استحکام آن یک بخش چسبنده و یک بخش اصطکاکی دارد به عنوان مثال، فنگ و همکارانش با استفاده از تست های سه محوره متوجه شدند که زاویه چسبندگی و اصطکاک ملات جت در شن و ماسه به ترتیب 4.2 MPa و 35° است. با وجود اینکه خواص ملات جت کاملا سخت شده را می توان تعیین کرد، ولی درک فرایند نمو استحکام در ملات جت نیازمند درک فرایند هیدراسیون سیمان پورتلند است.

جدول 1. پارامترهای معمول استفاده شده در حین تزریق جت

پارامتر	بازه	معمول
قطر سوراخ (mm)	115-76	
تعداد جت ها	4-2	
قطر نازل (mm)	3-1.5	2
فشار پمپ ملات (MPa)	60-30	40
میکس ملات (آب:سیمان)	0.8-1:2	1:1
نرخ چرخش میله حفاری (RPM)	20-10	15
نرخ عقب نشینی (m/min)	0.5-0.25	0.4
نرخ تزریق ملات (m^3/h)	8-5	

هیدراسیون سیمان پورتلند واکنشی گرمازا است و همینطور نرخ واکنش نسبتا وابسته به دمای واکنش است. با استفاده شدن واکنش دهنده ها (آب و سیمان پورتلند) حرارت به همراه محصولات هیدراته شده آزاد می شود. این محصولات هیدراته شده که ژل نامیده می شود، سهمی از استحکام سیمان پورتلند سفت شده دارند. گرچه مقدار حرارت آزاد شده به درجه هیدراسیون بستگی دارد، اما ترکیب محصولات هیدراته به دمای پخت بستگی دارد. این به این موضوع اشاره دارد که استحکام سیمان پورتلند به مسیر دما-زمان مرحله هیدراسیون بستگی دارد.

هیدراسیون چسب سیمان حداقل دو و گاهی اوقات سه سیکل از تولید حرارت را نشان می دهد (شکل 2). سیکل اول دقیقا بعد از مخلوط کردن سیمان با آب به دلیل هیدراسیون تری کلسیم آلومینیت (C_3A) رخ می دهد. نرخ تولید حرارت در حدود 5 دقیقه به ماکزیمم می رسد و بعد از آن به دلیل غنی شدن آب از سنگ گچ سریعاً کاهش می یابد. بعد از این سیکل یک دوره 1 تا 6 ساعته داریم که نرخ تولید حرارت در آن بسیار پایین است. در حین این دوره، رئولوژی چسب تقریباً ثابت می ماند. سیکل دوم به دلیل هیدراسیون تری کلسیم سیلیکات (C_3S) اتفاق می افتد. ماکزیمم انتقال حرارت در این سیکل بین 6 تا 10 ساعت رخ می دهد. کاهش در نرخ انتقال حرارت بعد از این ماکزیمم به دو دلیل است: 1) کاهش مقدار واکنش دهنده (C_3S) و 2) اثر بازدارنده ژل هیدرات کلسیم سیلیکات (CSH) که واکنش دهنده باقی مانده (ذرات سیمان) را پوشش می دهد. دوره اولیه هنگامی شروع می شود که ژل CSH در قسمت افزاینده سیکل دوم بین ذرات سیمان قفل ایجاد می کند. از آنجایی که این اثرات دمایی می تواند سفت شدن و خواص ملات جت را تحت تاثیر قرار دهد، برنامه آزمایشگاهی توصیف شده در قسمت بعدی به طور مشخص برای شبیه سازی تولید حرارت درجا طراحی شده است.

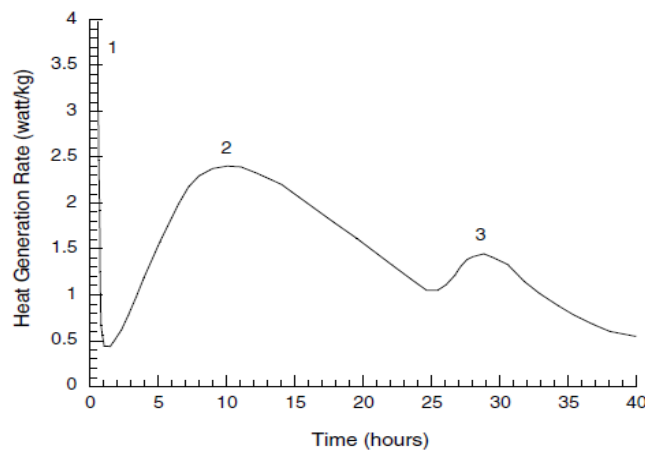
3. تست آزمایشگاهی خواص ملات جت

به منظور تعیین خصوصیات ملات جت، 41 نمونه برای تعیین نمو استحکام و سفتی بر حسب تابعی از زمان مورد تست قرار گرفتند. تمرکز تست از زمان شروع آن تا 24 ساعت بعد بود. مدول یانگ، استحکام فشاری تک محوره و

استحکام کششی برزلی در ساعت های 6، 7، 8.5، 10.5، 13.75، 18.5 و 24 و همچنین روزهای 3، 2 و 28 اندازه گیری شد.

3.1 رویه تست

نسبت آب به سیمان ملات جت تست شده 1 به 1 وزنی بود. ملات نیز همانند تزریق جت با 50 درصد برداشت ماسه بود. توده نیز شن و ماسه از ته نشین یخبندان در ادمونتون، منطقه کانادا و سیمان از انجمن استاندارد کانادایی (CSA) نوع 30 است که یک سیمان پورتلند با استحکام فوق سریع است.

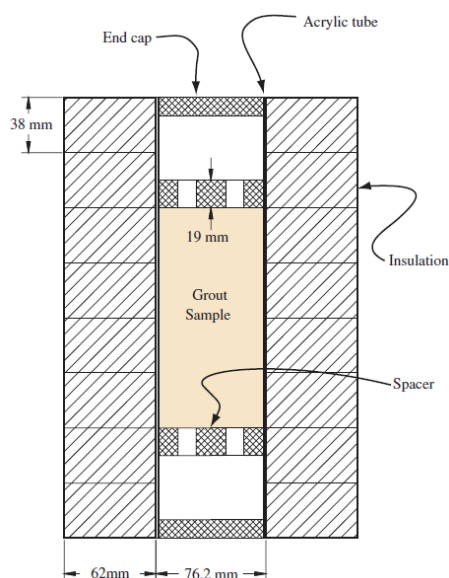


شکل 2. نرخ تولید حرارت برای هیدراسیون همدمما برای سیمان پورتلند نرمال در دمای اتاق.

نمونه های ملات در لوله هایی آکرلیک با قطر داخلی 76 میلی متر و طول 305 میلی متر قالب گیری شدند (شکل 3). لوله ها در روکش پولی استرن با قطر خارجی 200 میلی متر قرار گرفتند. جداکننده های پلاستیکی با ضخامت 19 میلی متر در فاصله 152 میلی متری لوله های آکرلیک طوری قرار داده شدند که نسبت 2 به 1 ارتفاع به قطر نمونه به دست آید. جدا کننده ها طوری استفاده شدند که نمونه هایی با لبه های مربعی صاف تولید شود. این نیاز به پوشش دار کردن و یا برش نمونه ها را از بین می برد. جدا کننده ها دو سوراخ 12 میلی متری داشتند تا جایگیری ملات را ممکن سازد. عیوب در انتهای نمونه ها که از این سوراخها ناشی می شود، به راحتی با یک لیسه فلزی برداشته شدند.

عایق پلی استرن برای اینکه تست های آزمایشگاهی پیشینه ای مشابه با ستون ملات جت نصب شده در کار داشته باشند، تامین شد. این کار به دلیل وابستگی استحکام سیمان سفت شده بر روی پیشینه دما-زمان تجربه شده ضروری است. پخت ملات در اتاقی با دمای کنترل شده با دمای محیط 8°C انجام شد و دمای ملات با مقاومت های گرمایی در حین هیدراسیون اندازه گیری شد. دمای 8°C به این دلیل انتخاب شد که مشابه دمای زمین در تونل های عمیق در بسیاری از کشورهای معتدل است.

ضخامت مورد نیاز عایق با استفاده از روش تفاوت محدود برای شبیه سازی جریان حرارت از یک منبع استوانه ای (ستون ملات جت 600 میلی متری در میدان کار در مقابل نمونه ملات با قطر 76 میلی متری در آزمایشگاه) به داخل یک عایق (ماسه در میدان کار در مقابل عایق کاری پلی استرن در آزمایشگاه) تعیین شد. کولتر نشان داد که قطر خارجی 200 میلی متری عایق برای دارا بودن یک پیشینه دمایی مشابه با ستون ملات جت در میدان کار برای 24 ساعت اول برای ملات آزمایشگاهی لازم است. این مقدار عایق کاری یک پیشینه دمایی آزمایشگاهی با دمایی 3.5 درصد بیشتر از دمای شبیه سازی میدان کار در 24 ساعت در پی دارد. خواص حرارتی در مدل تفاوت محدود در جدول 2 آورده شده است. کولتر یک آنالیز حساسیت از تکنیک تطابق تفاوت محدود برای خواص حرارتی استفاده شده انجام داد و نتیجه گرفت که خطاهای ایجاد شده کمتر از 10 درصد است.



شکل 3. پیکربندی قالب دوغاب مورد استفاده برای ایجاد نمونه آزمایشگاهی.

جدول 2. خواص حرارتی استفاده شده در مدل تفاوت محدود

ماده	$k \text{ kJ/(m}^2\text{C)}$	$C_p \text{ kJ/(m}^3\text{C)}$
دوغاب	0.00125	2625
عایق	0.000032	41
ماسه	0.0025	2500

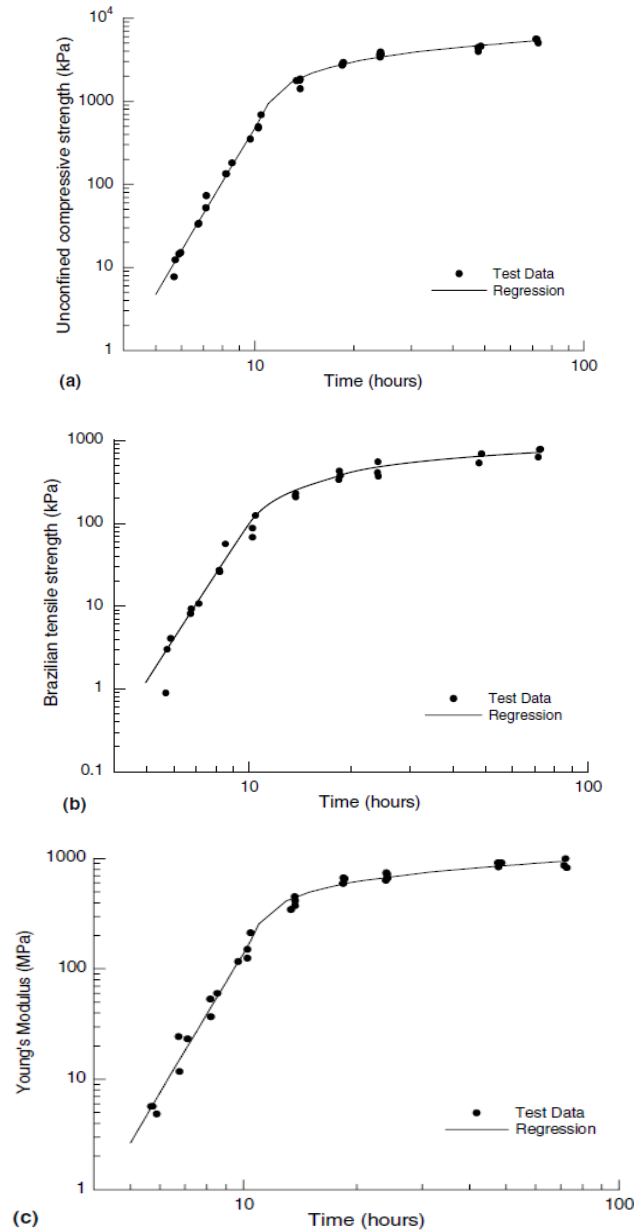
3.2 نتایج تست ها

نتایج تست ها نشان می دهد که دوغاب بعد از 6 ساعت از میکس اولیه، یک دوره اولیه را داراست. در این زمان دوغاب استحکام کافی را برای خارج کردن نمونه 76 میلی متری از قالب بدون آسیب قابل توجه داراست اما هنوز آنقدر نرم بودند که با جابه جایی بی دقت، آسیب می بینند. سفت شدن دوغاب بعد از این، با بیشترین نرخ سفت شدن در 24 ساعت اول رخ می دهد. علاوه بر این، در ساعت 11م تغییر در طبیعت دوغاب رخ داد. در این زمان رفتار ماده از پلاستیک به ترد تغییر کرد و نرخ افزایش مقاومت فشاری محصور نشده و مدول یانگ به ماکزیمم رسید و نرخ افزایش دما ماکزیمم بود.

مقاومت فشاری محصور نشده (UCS) در ابتدا با رابطه ای توانی با گذشت زمان افزایش می یابد، به طوری که نرخ ایجاد استحکام با زمان افزایش می یابد. این مورد در شکل 4.a دیده می شود که در آن قسمت خط صاف تا حدود 10.5 ساعت ادامه دارد که در این زمان نرخ ایجاد استحکام بیشترین است. بعد از 10.5 ساعت، نرخ ایجاد استحکام با گذشت زمان کاهش می یابد. استحکام 28 روز میانگین 14.2 MPa با انحراف از معیار 0.75 Mpa را دارد. معادله 1 نماینده استحکام برای زمان های کمتر از 10.5 ساعت است و معادله دو نماینده استحکام برای زمان های بیشتر از 10.5 ساعت است. واحد زمان (t) ساعت و واحد مقاومت فشاری محصور نشده (UCS) kPa است.

$$\text{معادله 1} \quad UCS = 1.088 \times 10^{-4} t^{6.638} \quad < 10.5 \text{ h}$$

$$\text{معادله 2} \quad UCS = 1.088 \ln(t - 8.34) - 408.7 \quad > 10.5 \text{ h}$$



شکل 4. نمو مقاومت فشاری محصور نشده، استحکام کششی برزیلی و مدول یانگ مماس با زمان. (a) استحکام

فشاری تک محوره، (b) استحکام کششی برزیلی و (c) مدول یانگ.

تست های برشی وین نیز برای تعیین استحکام برشی بین 3.5 تا 5.5 ساعت انجام شد. این تست ها استحکام برشی در بازه تقریباً 1 kPa در 3.5 ساعت تا تقریباً 20 kPa در 5.5 ساعت را می دهند. استحکام ایجاد شده از معادله 3 تخمین زده می شود.

معادله 3

$$\text{Vane Shear Stress} = 1.1 \times 10^{-4} t^{7.1}$$

که واحد زمان (t) ساعت است و واحد استحکام برشی وین kPa است.

نمو استحکام کششی با زمان (شکل 4.b) شکلی مشابه نمو استحکام فشاری محصور نشده در شکل 4.a دارد اما داده ها کمی بیشتر پراکندگی دارند. نسبت میانگین استحکام کششی به استحکام فشاری 0.133 است.

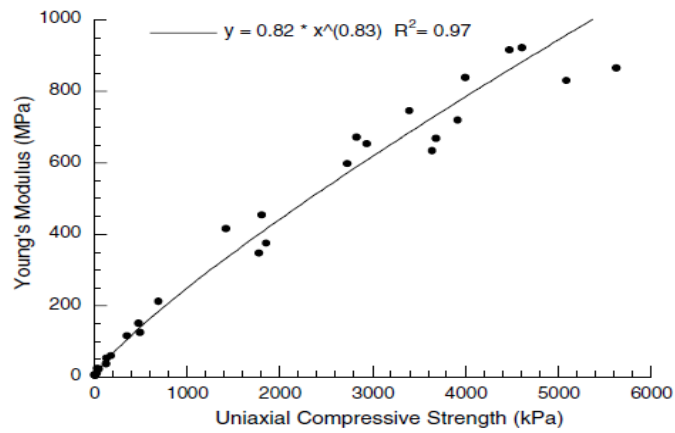
مدول یانگ با عنوان مماس بر سفتی در 50 درصد استحکام ماکزیمم محاسبه می شود. نمو مدول یانگ با زمان شکلی مشابه با نمو UCS با زمان (شکل 4.c) دارد. معادله 4 نماینده مدول یانگ برای زمان های کمتر از 10.5 ساعت است و معادله 5 نماینده مدول یانگ برای زمان های بیشتر از 10.5 ساعت است. واحد زمان (t) ساعت است و واحد مدول یانگ (E) MPa است.

$$\text{معادله 4} \quad E = 1.088 \times 10^{-4} t^{5.697} < 10.5 \text{ h}$$

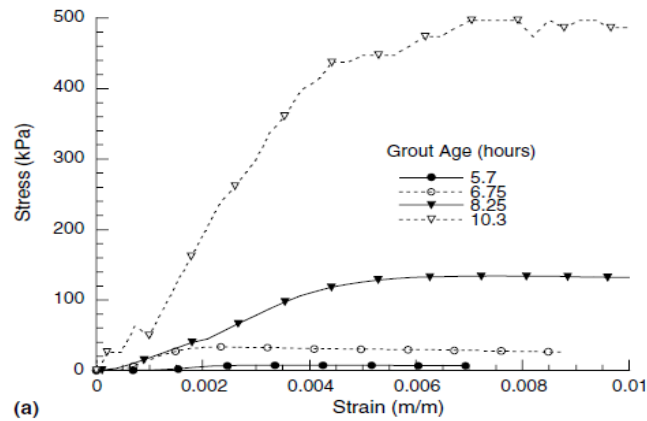
$$\text{معادله 5} \quad E = 184.3 \ln(t - 9.51) + 183.7 > 10.5 \text{ h}$$

رابطه بین استحکام فشاری تک محوره با مدول یانگ در شکل 5 نشان داده شده است. این رابطه همچنین در نمودارهای تنش- کرنش در شکل 6 دیده می شود. رفتار تنش-کرنش نمونه های تست شده در زمان های کمتر از 10.5 ساعت در شکل 6.a نشان داده شده است. این نمونه ها یک رفتار انعطاف پذیر با ماکزیمم تاخیر افتاده دارند. تبدیل به شکست ترد در 10.5 ساعت رخ می دهد که در آن استحکام فشاری محصور نشده تقریباً 650 kPa است. شکل 6.b به طور واضحی واکنشی ترد را نشان می دهد و کرنش تا شکست با افزایش استحکام ماکزیمم افزایش می یابد که نشان می دهد که چگونه نرخ کسب استحکام بیشتر از نرخ کسب سفتی است.

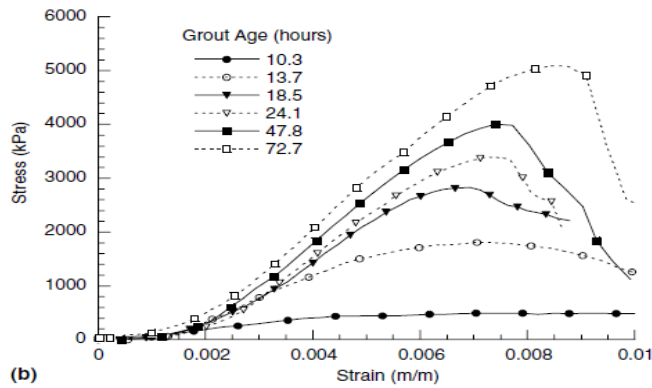
میانگین دمای اتاق در حین تست 8.3°C با انحراف از معیار 0.25°C بود. همان طور که در شکل 7.a نشان داده شده است، سیکل اول هیدراسیون دمای دوغاب را تا 8.8°C افزایش می دهد و در ساعت اول بعد از میکس کردن رخ می دهد. بعد از این، 5 ساعت دما ثابت است و سپس بین ساعت 5 تا 15 افزایش دما رخ می دهد. نرخ افزایش دما در ساعت 11 به مقدار ماکزیمم می رسد (شکل 7.b).



شکل 5. رابطه بین استحکام فشاری تک محوره با مدول یانگ.



(a)



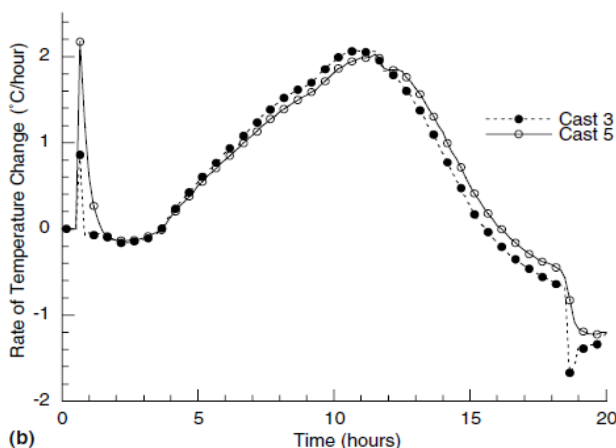
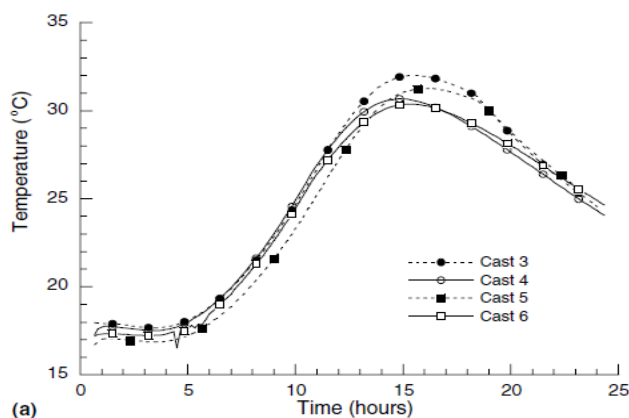
(b)

شکل 6. نمودار های تنش- کرنش ثبت شده برای استحکام فشاری محصور نشده برای دوغاب در زمان های مختلف.

(a) کمتر از 10.5 ساعت و (b) بیشتر از 10.5 ساعت.

رابطه قوی بین تغییر در استحکام دوغاب و تغییر دما را می توان از مقایسه شکل های 4 و 7 متوجه شد. کسب استحکام قابل توجه در حین سیکل دوم هیدراسیون و به طور مشخص بین ساعت 5 تا 15 رخ می دهد. محتمل است

که در زمان های کمتر از 6 ساعت هیدراسیون باعث کسب استحکام قابل توجه نشود چرا که ژل سیمان هنوز غیر پیوسته است.



شکل 7. تغییر دمای دوغاب ثبت شده در زمان های مختلف. (a) تغییر دما با زمان و (b) نرخ تغییر دما.

4. بحث

یک برنامه تست آزمایشگاهی برای بررسی خواص ملات میکس شده ای انجام شد که در نصب ستون های افقی ملات جت به منظور ایجاد حفاظ برای ساخت تونل، استفاده می شود. تفاوت اندازه بین ستون ملات جت 600 میلی متری و نمونه های آزمایشگاهی 76 میلی متری توسط قرار دادن نمونه های آزمایشگاهی در یک سیلندر عایق در اتاقی با دمای ثابت جبران شد. تکنیک تفاوت محدود برای تعیین ضخامت عایق استفاده شد به طوری که تولید حرارت و انتقال

به خاک در شرایط آزمایشگاهی شبیه سازی شدند. دمای اولیه نمونه های آزمایشگاهی و اتاق پخت در 8°C نگه داری شد تا دمایی که در تونل زنی عمیق در بسیاری از کشورهای معتدل تجربه می شود، شبیه سازی شود. نتایج آزمایشگاهی به وضوح دوره ای 6 ساعته قبل از شروع سفت شدن را نشان می دهد. در این مرحله ملات هیچ استحکام فشاری تک محوره یا سفتی قابل اندازه گیری ندارد. بعد از این دوره 6 ساعته، افزایش شدیدی در استحکام و سفتی رخ می دهد که تا 12 ساعت بعد از میکس اولیه ادامه دارد. بعد از آن، فرایند سفت شدن با نرخ کمتر ادامه می یابد. خواص استحکام و سفتی رابطه قوی با دما را نشان می دهند و بنابراین اندازه گیری دما در میدان کار می تواند شاخصی مفید برای تخمین استحکام و سفتی باشد.

نشست سطح و تغییر شکل نما با استفاده از ستون های ملات جت افقی برای پشتیبانی از حفاری کنترل می شود. با این وجود، همان طور که این تحقیق مشخص کرد، ترتیب نصب ستون های ملات جت باید مرتبط با خواص استحکام و تغییر شکل ملات باشد. باید زمان کافی بین نصب ستون های مجاور داده شود تا ملات طوری سفت شود که تقویت کافی تونل توسط حفاظ ملات جت فراهم گردد. خواص آزمایشگاهی به دست آمده از این تحقیق به طراحان و پیمانکاران برای بهینه سازی ترتیب نصب حفاظ ملات جت کمک خواهد کرد. گرچه، باید به خاطر سپرد که با وجود کیفیت این تست های آزمایشگاهی، شرایط کاری می تواند تفاوت های قابل توجهی از خود نشان دهد.

References

- Brill, G.T., Burke, G.K., Ringen, A.R., 2003. A ten year perspective of jet-grouting: advancements in applications and technology. In: Johnsen, L., Bruce, D.A., Byle, M. (Eds.), Proceedings of the 3rd International Conference – Grouting and Ground Treatment, New Orleans, vol. 1 of Geotechnical Special Publication No. 120, American Society of Civil Engineers, pp. 218–235.
- Bruce, D.A., Boley, D.L., Gallavresi, F., 1987. New developments in ground reinforcement and treatment for tunnelling. In: Proceedings of 1987 Rapid Excavation and Tunnelling Conference, New Orleans. Society of Mining Engineers, Littleton, CO, pp. 811–835.
- Bye, G.C., 1983. Portland cement: composition, production and properties. Pergamon Press, New York, 149p.
- Coulter, S.N.P., 2004. Influence of tunnel jet-grouting on ground deformations at the Aescher Tunnel, Switzerland. Master's thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alta., Canada.
- Croce, P., Flora, A., 2000. Analysis of single fluid jet-grouting. Géotechnique 50 (6), 739–750.
- Fang, Y.-S., Liao, J.J., Lin, T.-K., 1994. Mechanical properties of jet-grouted soilcrete. Quarterly Journal of Engineering Geology 27 (3), 257–265.
- Kauschinger, L.J., Hankour, R., Perry, E.B., 1992. Methods to estimate the composition of jet-grouted bodies. In: ASME Special Publication No. 30, American Society Mechanical Engineers, New Orleans, LA, USA, pp. 194–205.
- Mussger, K., Koinig, J., Reischl, S., 1987. Jet-grouting in combination with NATM. In: Proceedings of Rapid Excavation and Tunnelling Conference, New Orleans. Society of Mining Engineers, Inc., Littleton, CO, pp. 292–308.
- Pelizza, S., Peila, D., 1993. Soil and rock reinforcements in tunnelling. Tunnelling and Underground Space Technology 8 (3), 357–372.
- Taylor, H.F.W., 1990. The Chemistry of Cements. Academic Press Inc., New York, 459p.