

تحلیل دیوار خاک مسلح به روش تحلیل همگن محیط دوفازی

اورنگ فرزانه^۱، سید احسان سیدی حسینی نیا^{۲*}، شهرام وهدانی^۱

۱- استادیار، دانشکده عمران، پردیس دانشکده های مهندسی، دانشگاه تهران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

* eseyedi@ut.ac.ir

چکیده

با توسعه نقش سازه های دیوارهای خاک مسلح، پیش بینی تغییرشکل آنها درحین بهره برداری اهمیت پیدا می کند. بدین منظور از روش های عددی نظیر اجزای محدود و اختلاف محدود استفاده می گردد. بدلیل ساختار لایه ای توده خاک مسلح، بجای مدل سازی هر یک از اجزای خاک مسلح، می توان یک محیط همگن ولی ناهمسان معادلی را در نظر گرفت. در مقاله حاضر، با استفاده از یک فن جدید همگن سازی بنام محیط دوفازی، به مطالعه رفتار توده خاک مسلح پرداخته شده است. بدین منظور، معادله رفتاری فازهای خاک مسلح شامل فاز ماتریس (متناظر با خاک) و فاز جوشن (متناظر با تسلیح کننده) اصلاح شده اند. بدین ترتیب که تسلیح کننده بصورت یک عنصر صفحه ای (دو بعدی) لحاظ شده و برای خاک یک رفتار غیرخطی با در نظر گرفتن شرایط خاک در توده خاک مسلح معرفی شده است. در ادامه، رفتار یک دیوار خاک مسلح در مقیاس واقعی مطالعه شده و تغییرشکل جبهه دیوار حین ساخت شبیه سازی شده است. نتایج نشان می دهد استفاده از رفتار غیرخطی برای خاک بجای رفتار ارتجاعی خطی - خمیری کامل (موهر کولمب)، باعث می شود تا تغییرشکل های پوسته دیوار واقعی تر تخمین زده بشود.

کلمات کلیدی: دیوار خاک مسلح، محیط دوفازی، روش همگن سازی، تحلیل عددی، FLAC

۱. مقدمه

روش استفاده از لایه های تسلیح کننده در خاک جهت بالابردن مقاومت کششی توسط هانری ویدال پژوهشگر فرانسوی در دهه شصت میلادی ابداع شد. با توجه به نقش سازه ای خاک مسلح و اهمیت شناخت رفتار آن، روش های متنوعی جهت تحلیل رفتار خاک مسلح بکار گرفته شده اند. در طراحی دیوارهای خاک مسلح متعارف، معمولاً روش های تحلیل پایداری نظیر روش تعادل حدی و روش تحلیل حدی مورد استفاده قرار می گیرد. با پیشرفت در کاربرد دیوارهای خاک مسلح بعنوان دیوارهای باربر و کوله پل ها، نه تنها ضریب اطمینان در مقابل ناپایداری، بلکه تغییرشکل دیوار در مدت زمان بهره برداری نیز باید مورد توجه قرار گیرد. اهمیت توجه به تغییرشکل های دیوارهای خاک مسلح در دو دهه اخیر با گسترش کاربرد ژئوسینتتیک ها که اعطاف پذیری بیشتری نسبت به تسمه های فولادی دارند، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در بررسی این تغییر شکلهای از روش های عددی مختلفی نظیر روش اجزای محدود و روش اختلاف محدود بکار برده می شوند.

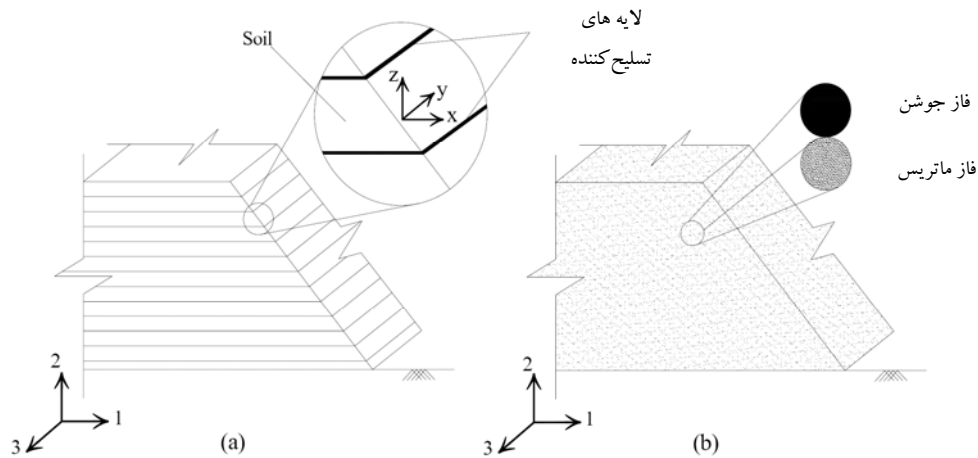
بکارگیری روشهای عددی برای محیطهای ناهمگن (نظیر خاک مسلح) که از عناصر مختلف با رفتارهای متفاوت تشکیل شده‌اند، مشکلاتی را به همراه دارد. به عنوان مثال، می‌توان به پیچیده شدن شبکه با المان‌های با رفتار مختلف و در نتیجه طولانی شدن مدت زمان تحلیل اشاره نمود. با توجه به سیستم لایه‌ای خاک مسلح و آرایش منظم لایه‌ها، محیط خاک مسلح را می‌توان بصورت یک محیط معادل همگن ولی ناهمسان در نظر گرفت. به این دسته از روش‌های تحلیل، روش‌های همگن‌سازی گویند. در ادبیات فنی، روش‌های همگن‌سازی متنوعی وجود دارند که هر کدام بر اصول و فرضیات مختص به خود استوارند. در اواخر دهه ۹۰ میلادی، یک چارچوب جدیدی بنام «محیط چندفازی» توسط پروفیسور دوبوهان و همکارانش [1]، [2] در مدرسه دولتی پل و راه فرانسه ارائه شد. روش مذکور بر پایه اصل کار مجازی در محیطهای پیوسته بنا نهاده شده است. محیط چندفازی را می‌توان به عنوان روش توسعه یافته روش‌های همگن‌سازی تلقی نمود. زیرا در روش‌های همگن‌سازی محیط موردنظر بصورت فقط یک ماده همگن ولی غیرهمسان معادل در نظر گرفته می‌شود. در صورتیکه یک محیط چندفازی، از روی هم قرارگیری تمام عناصرها تحت عنوان «فاز» تشکیل می‌شود.

در مدل‌های چندفازی ارائه شده تاکنون، رفتار خاک و تسلیح‌کننده به صورت یک ماده ارتجاعی خطی - خمیری کامل در نظر گرفته شده است. در این راستا می‌توان به تحلیل عددی گروه شمع [3] و تحلیل عددی تونل سنگی تقویت شده با بولت [4] اشاره نمود. اخیراً Thai et al. حالت حد نهایی و پایداری یک دیوار خاک مسلح را با در نظر گرفتن لغزش میان خاک و تسلیح‌کننده مطالعه نموده اند [5].

مقاله حاضر، با نگرشی نو به محیط دوفازی، به تحلیل دیوار خاک مسلح می‌پردازد. در این راستا، از یک طرف، برای توده خاک یک مدل رفتاری غیر خطی معرفی شده و از طرف دیگر، تسلیح‌کننده بصورت یک صفحه (عنصر دو بعدی) در نظر گرفته می‌شود.

۲. معرفی اجمالی محیط دوفازی

محیط چندفازی از رویهم قرارگیری چندین محیط پیوسته تشکیل شده است که به هر یک از این محیط‌ها «فاز» گفته می‌شود. با توجه به اینکه در خاک مسلح، معمولاً ردیف‌های منظم تسلیح‌کننده در یک راستا در میان خاک قرار می‌گیرند، توده خاک مسلح به صورت محیط دوفازی تعریف می‌گردد که شامل فاز ماتریس (متناظر با خاک) و یک فاز جوشن (متناظر با تسلیح‌کننده) می‌باشد. مطابق شکل ۱، یک سازه خاک مسلح از لایه‌های صفحه‌ای تشکیل شده که به فواصل یکسان از هم در میان توده خاک قرار گرفته است. اگر از این دید ریزمقیاس فراتر رویم و این محیط را بصورت بزرگ مقیاس (از فاصله دور) بنگریم، می‌توان این محیط لایه‌ای را با یک لایه همگن جایگزین نمود، بطوریکه فرض کرد که در هر نقطه هندسی از این محیط، هر دو ماده خاک و تسلیح‌کننده وجود دارد. به این محیط معادل جدید محیط دوفازی می‌گویند. زیرا در هر نقطه از آن همزمان دو فاز ماتریس (نشانهگر خاک) و فاز جوشن (نشانهگر تسلیح‌کننده) دارند. به عبارت دیگر، محیط جدید از رویهم قرار گرفتن دو محیط پیوسته که باهم اندرکنش دارند، تشکیل شده است. در مقاله‌ای دیگر که در همین کنفرانس به چاپ رسیده، صورت بندی (فرمولاسیون) محیط دوفازی معرفی شده است که بدلیل کمبود فضا از بیان دوباره آنها خودداری می‌شود [۶].



شکل ۱- نمایش توده خاک مسلح در مقیاس های مختلف: (الف) دید ریزمقیاس که در آن خاک و لایه های تسلیح کننده قابل تمایز از هم هستند. (ب) دید بزرگ مقیاس که در هر نقطه از آن دو فاز ماتریس و جوشن وجود

۱.۲. مدل رفتاری فاز جوشن

در تحقیقات گذشته، تسلیح کننده به عنوان یک عنصر یک بعدی (مثل بولت) در نظر گرفته می شد. در تحقیق کنونی، تسلیح کننده به عنوان یک صفحه (عنصر دو بعدی) که فقط در مقابل کشش تحمل می کند، لحاظ شده است. رابطه نمودی تنش - کرنش در فاز جوشن (دید بزرگ مقیاس به لایه های تسلیح کننده) عبارتست از:

$$\begin{Bmatrix} \dot{\sigma}_x^r \\ \dot{\sigma}_y^r \end{Bmatrix} = \frac{E^r}{(1-\nu^{r^2})} \begin{bmatrix} 1 & \nu^r \\ \nu^r & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_x^r \\ \dot{\epsilon}_y^r \end{Bmatrix} \quad (1)$$

که در آن، $(\dot{\sigma}_x^r, \dot{\sigma}_y^r)$ و $(\dot{\epsilon}_x^r, \dot{\epsilon}_y^r)$ به ترتیب مولفه های نمو تنش و کرنش در راستای x و y (در داخل صفحه تسلیح کننده) می باشند. معیار سطح تسلیم فاز جوشن به شرح زیر است:

$$f^r(\sigma_x^r, \sigma_y^r) = |\sigma_x^r - \sigma_y^r| \leq |\sigma_{yield}^r| \quad (2)$$

که در آن، σ_{yield}^r تنش تسلیم فاز جوشن می باشد.

۲.۲. فاز ماتریس

شبه سازی رفتار خاک با مدل های رفتاری ارتجاعی خطی - خمیری کامل نظیر مدل موهر-کولمب، قادر به تخمین دقیقی از تغییر شکل ها (کرنش های حجمی و برشی) در سازه های خاکی نمی باشد [7,8,9]. از طرف دیگر، مدل های رفتاری ارتجاعی - خمیری پیشرفته ای تاکنون معرفی شده اند که شبه سازی به کمک آنها مشکلاتی را نظیر تعیین پارامترهای مورد نیاز بوجود می آورند. نگارندگان این مقاله مدل رفتاری نسبتاً ساده ای را معرفی کرده اند که با بکار بردن آن در قالب محیط دوفازی، بتوان دیوار خاک مسلح را تحلیل نمود [۶،۱۰]. مدل رفتاری خاک بگونه ای تعریف شده است که اولاً تا حد امکان از پیچیده کردن مدل رفتاری جلوگیری شود و با در نظر گرفتن کمترین تعداد پارامتر الگو، بتوان رفتار خاک را تا حد ممکن

بخوبی شبیه سازی نمود. دوم اینکه پارامترهای خاک با کمک آزمایش های متداول موجود براحتی قابل اندازه گیری باشند. سوم اینکه امکان توسعه و ارتقای الگوی رفتاری برای شبیه سازی رفتار در شرایط مختلف بارگذاری وجود داشته باشد. مدل رفتاری مذکور در قالب خانواده الگوهای سطح مرزی معرفی شده است. در تعریف الگوی رفتاری موردنظر، شرایط خاک در سازه های خاک مسلح لحاظ شده است. مدل رفتاری پیشنهاد شده بر اساس فرضیات زیر استوار است: (۱) پارامترهای مدل تابعی از تراکم (و یا نسبت تخلخل) نمی باشند. (۲) الگوی رفتاری نمی تواند رفتار نرم شونده (بعد از مقاومت بیشینه) را پیش بینی کند. (۳) از تاثیر تنش همه جانبه بر تغییرات مقاومت نهایی خاک (زاویه اصطکاک داخلی) صرف نظر می شود. رابطه نمودی تنش و کرنش بصورت زیر حاصل می شود:

$$\begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_1 \\ \dot{\epsilon}_2 \\ \dot{\epsilon}_3 \end{Bmatrix} = \frac{1}{2G(1+\nu)K_p} \begin{bmatrix} K_p + (1-D)(1-\sin\phi_{mob})G & -\nu K_p & -\nu K_p - (1-D)(1+\sin\phi_{mob})G \\ -\nu K_p & K_p & -\nu K_p \\ -\nu K_p - (1+D)(1-\sin\phi_{mob})G & -\nu K_p & K_p + (1+D)(1+\sin\phi_{mob})G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\sigma}_1 \\ \dot{\sigma}_2 \\ \dot{\sigma}_3 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

در مجموع، مدل رفتاری پیشنهادی از ۷ پارامتر طبق جدول ۱ تشکیل شده است. روش تعیین این پارامترها در مراجع [۱۰] و [۱۱] ارایه شده است.

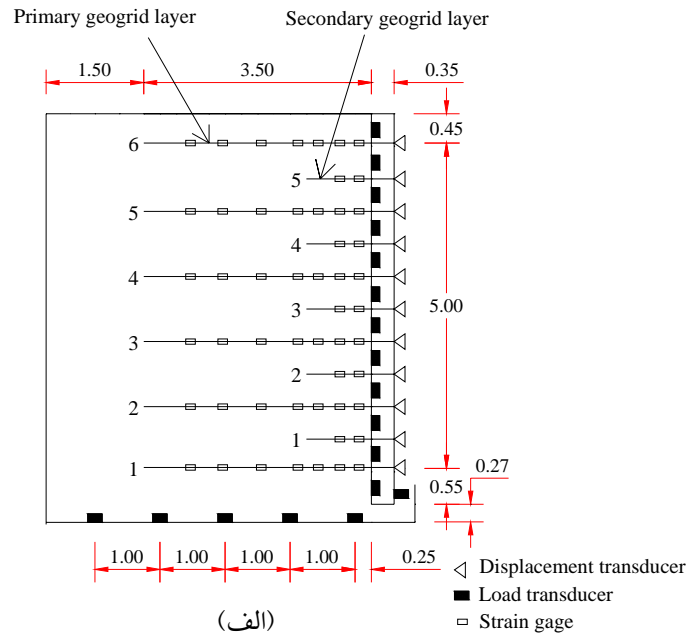
جدول ۱- طبقه بندی پارامترهای مدل رفتاری خاک پیشنهادی

مقاومت نهایی	سخت شونده گی	اتساع		ارتجاعی			طبقه بندی
زاویه اصطکاک نهایی خاک	ثابت مدول سختی	-	زاویه گذر فاز انقباضی به انبساطی	توان	ثابت پواسون	مدول برشی پایه	نام پارامتر
ϕ_{peak}	h_0	D_0	ϕ_{PTL}	n	ν	G_0	نشانه

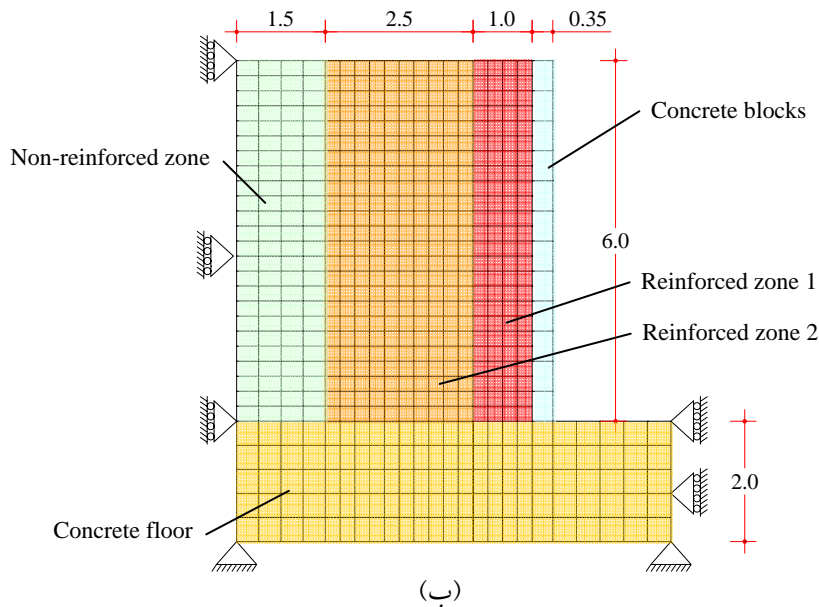
۳. مطالعه موردی رفتار دیوار خاک مسلح

صورت بندی محیط دوفازی به همراه معادله رفتاری فازهای ماتریس و جوشن در قالب یک مدل رفتاری در برنامه تحلیل عددی Flac2D- که بر مبنای روش اختلاف محدود تحلیل می کند- وارد شده است. در این بخش، با کمک الگوریتم نوشته شده، به تحلیل رفتار یک دیوار خاک مسلح در مقیاس واقعی پرداخته می شود. دیوار حایل مذکور یک دیوار خاک مسلح از نوع بلوکی قطعه ای بوده که رفتار آن حین مراحل ساخت در موسسه تحقیقاتی PWRI مستقر در تسوکوبای ژاپن پیمایش شده است. شرح کامل نحوه ساخت دیوار در [12] ارایه شده است. هندسه دیوار و ابزار دقیق نصب شده بر روی اجرای مختلف آن در شکل ۲-الف نشان داده شده است. دیوار فوق به ارتفاع شش متر بطور مستقیم روی یک کفه بتنی ساخته شده است. خاکریز پشت دیوار از شش لایه ژئوسینتتیک اولیه (P) به طول ۳/۵ متر و پنج لایه ژئوسینتتیک ثانویه (S) بطول یک متر مسلح شده است. لایه های ژئوسینتتیک به پشت بلوک های بتنی پیمانهای بوسیله قاب و مهره وصل شده اند. پوسته دیوار از ۱۲ بلوک با عرض ۳۰ سانتیمتر و ارتفاع ۵۰ سانتیمتر ساخته شده است، به غیر از بلوک های نوک دیوار و پای دیوار که به ترتیب ۴۵ و ۵۵ سانتیمتر ارتفاع دارند. جهت اندازه گیری کرنش محوری لایه های ژئوسینتتیک در مجموع از ۵۲ کرنش سنج استفاده شده است. تغییر مکان افقی پوسته دیوار در ۱۲ نقطه در

راستای ارتفاع دیوار اندازه گیری شده است. نیروی جانبی که از طرف خاک بر پشت دیوار وارد می شود، در ۱۱ نقطه نیروی قائم ناشی از وزن خاکریز در شش نقطه بر روی کف بتنی بوسیله نیروسنج اندازه گیری شده است.



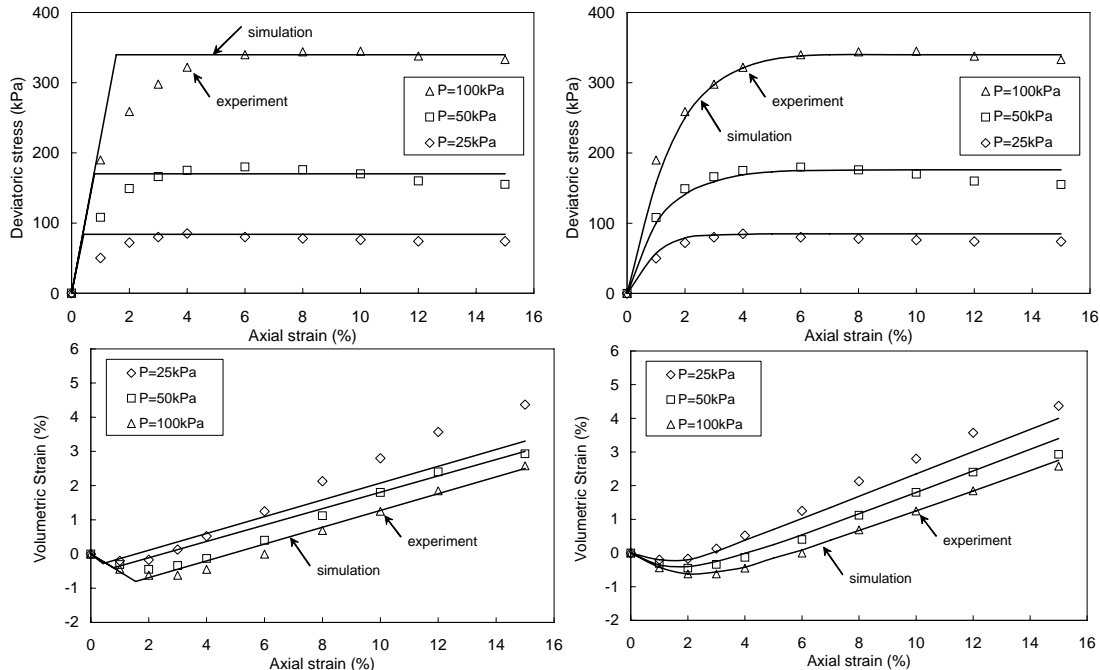
All dimensions in meter



شکل ۲- دیوار PWRI: (الف) نمایش الگوی عددی دیوار شامل منطقه (زون)های مختلف، (ب) نمایش هنده دیوار و ابزار دقیق.

خاکریز پشت دیوار از ماسه سیلتی با مشخصات $D_{50} = 0.42 \text{ mm}$, $\gamma = 16.0 \text{ N/m}^3$, $C_u = 4.6 \text{ kN/m}^2$ تشکیل یافته است. سه آزمایش فشاری سه محوری تحت فشارهای جانبی ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال روی ماسه انجام شده و نتایج آن

برحسب تنش انحرافی و کرنش حجمی به همراه رفتارهای شبیه‌سازی شده با مدل‌های رفتاری موهر کولمب و غیرخطی در شکل ۳ نشان داده است. پارامترهای مدل رفتاری غیرخطی خاک عبارتند از: $\phi_{peak} = 39^\circ$, $G_0 = 11.1 \text{ MPa}$, $\nu = 0.2$, $h_0 = 0.37$, 0.5 , $\ln = 0.37$, $D_0 = 1.6$ و $\phi_{PTL} = 33$. برای مدل رفتاری موهر کولمب، پارامترها عبارتند از: $E = 2.25 \text{ MPa}$, $\nu = 0.2$. لایه‌های ژئوسینتتیک مورد استفاده از ژئوگرید پلی اتیلنی (HDPE) بوده و سفتی و مقاومت کششی آن به ترتیب برابر با ۸۰۰ کیلونیوتن بر متر و ۵۵ کیلونیوتن بر متر می‌باشد.



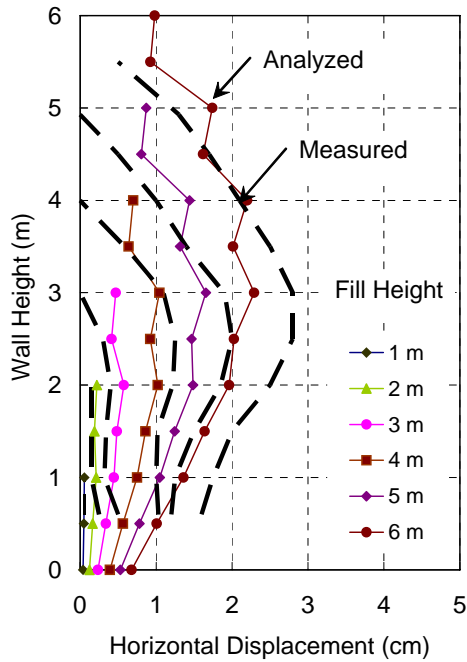
شکل ۳- نمایش رفتار ماسه سیلتی حاصل از آزمایش‌های سه محوری فشاری و شبیه‌سازی‌ها

شکل ۳- نمایش رفتار ماسه سیلتی حاصل از آزمایش‌های سه محوری فشاری و شبیه‌سازی‌ها

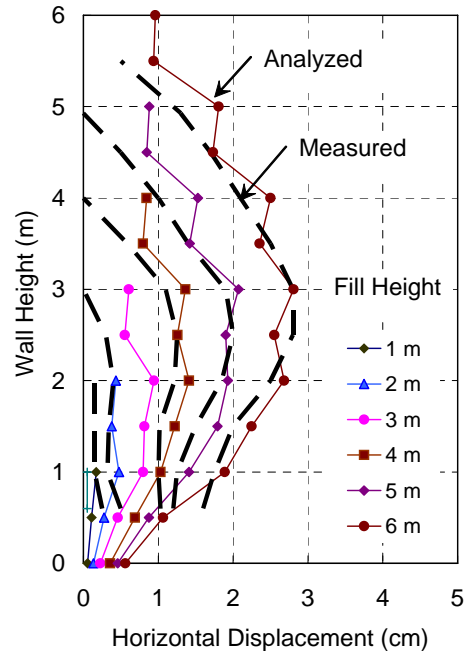
شکل ۳- نمایش رفتار ماسه سیلتی حاصل از آزمایش‌های سه محوری فشاری و شبیه‌سازی‌ها

شکل ۲-ب نمایش داده شده است، در مجموع از ۵۸۹ عنصر تشکیل یافته است. بخش‌های مختلف شبکه مشتمل بر کفه بتنی، بلوک‌های بتنی، خاکریز (که به عنوان محیط تک فازی در نظر گرفته می‌شود)، منطقه تسلیح شده (دوفازی) و عنصرهای فصل مشترک (میان بلوک‌ها و میان کفه بتنی و خاکریز) می‌باشد. در تحلیل حاضر، از فرض پیوند کامل میان فازها استفاده شده است. بتن کف و بلوک‌ها بصورت ماده ارتجاعی خطی با مشخصات مکانیکی $\nu = 0.17$ و $E = 2 \text{ GPa}$ و $\gamma = 23 \text{ kN/m}^3$ در نظر گرفته شده است. برای عناصر فصل مشترک، سختی‌های عمودی (kn) و برشی (ks) به ترتیب برابر با 1×10^7 و $2/4 \times 10^7$ پاسکال بر متر در نظر گرفته شده‌اند.

در این مقاله، فقط به ارایه تغییر شکل‌های پوسته دیوار پرداخته شده و برای مقایسه نتایج دیگر به [۱۰] رجوع داده می‌شود. شکل ۴ تغییر شکل پوسته دیوار در مراحل مختلف ساخت را نشان می‌دهد. شکل زیگزاگی پروفیل تغییر شکل جبهه دیوار بخاطر جابجایی بلوک‌ها می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، تطابق خوبی میان نتیجه شبیه‌سازی با الگوی رفتاری غیرخطی و واقعیت برای ارتفاع بیشتر از چهار متر وجود دارد. در صورتیکه این تطابق برای مدل رفتاری موهر کولمب ضعیف تر است. به عبارت دیگر، با این الگو بخش برآمدگی (تغییر شکل شکم) دیوار کوچکتر تخمین زده شده است.



(ب) الگوی رفتاری خاک: موهر کولمب



(الف) الگوی رفتاری خاک: غیرخطی

شکل ۴- نمایش تغییر شکل پوسته دیوار در مراحل مختلف ساخت و مقایسه شبیه‌سازی‌ها با اندازه‌گیری‌های محلی

۴. نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، به کمک مفهوم محیط دوفازی رفتار دیوار خاک مسلح مطالعه گردید. در شبیه‌سازی‌ها، رفتار فاز ماتریس (متناظر با خاک) به دو صورت مدل رفتاری موهر کولمب و مدل غیرخطی پیشنهادی در نظر گرفته شده و نتایج شبیه‌سازی‌ها باهم مقایسه شدند. با بررسی تغییر شکل پوسته دیوار در مراحل مختلف ساخت و مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها با واقعیت، مشاهده می‌شود که با بکارگیری مدل رفتاری غیرخطی، تغییر شکل‌های پوسته دیوار به نحو مطلوبی تخمین زده شده است، در صورتیکه بکارگیری مدل موهر کولمب تغییر شکل‌های بزرگتری را نتیجه داده است.

مراجع

1. Sudret, B. (1999). Modélisation multiphasique des ouvrages renforcés par inclusions, PhD thesis, Ecole nationale des ponts et chaussées, Paris, France (in french);
2. Sudret, B. and de Buhan, P. (2001). "Multiphase model for inclusion-reinforced geostructure: Application to rock-bolted tunnels and piles raft foundations." Int. J. Anal. Meth. Geomech. 25, 155-182;
3. de Buhan, P. and Sudret B. (2000). "Micropolar multiphase model for materials reinforced by linear inclusions". Eur. J. Mech. A/Solids. 19, 669-687;
4. Sudret, B. and de Buhan, P. (2001). "Multiphase model for inclusion-reinforced geostructure: Application to rock-bolted tunnels and piles raft foundations." Int. J. Anal. Meth. Geomech. 25, 155-182;
5. Thai, S.Q., Hassen, G., and de Buhan, P. (2009). "A multiphase approach to the stability analysis of reinforced earth structures accounting for a soil-strip failure condition", Computers and Geotechnics. 36, 454-462;
۶. سیدی حسینی نیا، س.ا.، فرزانه، ا.، (۱۳۸۹). "توسعه روش تحلیل محیط دوفازی با تعمیم مدل رفتاری خاک"، چهارمین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، تهران، ایران؛
7. Brinkgreve, R.B.J. (2005). "Selection of soil models and parameters for geotechnical engineering application, Soil Constitutive Models: Evaluation, Selection, and Calibration", Edited by Yamamuro A. and Kaliakin V.N., ASCE 128;
8. Hatami, K. and Bathurst, R.J. (2006). "A numerical model for reinforced soil segmental walls under surcharge loading". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132(6), 673-684;
9. Helwany, S.M.B., Reardon, G., and Wu, J.T.H. (1999). "Effects of backfill on the performance of GRS retaining walls." Getex. Geomem., 17(1), 1-16;
۱۰. سیدی حسینی نیا، س.ا.، (۱۳۸۸)، "توسعه مدل چندفاز برای تحلیل توده خاک مسلح"، پایان نامه مقطع دکتری، دانشکده عمران، پردیس دانشکده های مهندسی، دانشگاه تهران؛
11. Seyedi Hosseininia, E., Farzaneh, O. (2009). "Development and validation of a two-phase model for reinforced soil by considering non-linear behavior of matrix", J. of Eng. Mechanics (ASCE). (to be published);
12. Tajiri N, Sasaki H, Nishimura J, Ochiai Y, Dobashi K (1996). "Full-scale failure experiments of geotextile-reinforced soil walls with different facings." In: Ochiai H, Yasufuku N, Omine K (eds), Earth reinforcement. Balkema, Rotterdam, pp 525-530;
13. Ling, H. I., Cardany, C. P., Sun, L.-X., and Hashimoto, H. (2000). "Finite element study of a geosynthetic-reinforced soil retaining wall with concrete-block facing", Geosynthet., 7(3), 163-188;