

بررسی عددی سه‌بعدی رفتار سیستم میخ‌گذاری خاک به روش تفاضل محدود

سید کاظم رضوی^۱، مسعود حاجی‌علیلوی بناب^{۲*}، امیرحسین رضایی‌فرعی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه ژئوتکنیک، دانشکده فنی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۲ استاد گروه ژئوتکنیک، دانشکده فنی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۳ استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

(دریافت: ۹۶/۱/۲۸، پذیرش: ۹۶/۱۰/۱۷، نشر آنلاین: ۹۶/۱۰/۱۸)

چکیده

سیستم میخ‌گذاری خاک یکی از روش‌های تسلیح خاک می‌باشد که امروزه به طور گسترده جهت پایدارسازی گودبرداری‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این میان مدل‌سازی صحیح سیستم میخ‌گذاری به واسطه روش‌های عددی یک شیوه مناسب جهت پیش‌بینی و کنترل تغییر شکل‌های خاک و نیروهای تولید شده در میخ‌ها می‌باشد. در این مقاله به بررسی رفتار سیستم میخ‌گذاری تحت شرایط سرویس و گسیختگی به واسطه روش تفاضل محدود سه‌بعدی در دو نوع خاک دانه‌ای و چسبیده پرداخته شده و از امان‌های سازه‌ای کابل و پوسته به ترتیب جهت اندرکنش صحیح میخ با خاک و رویه با خاک استفاده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده از مدل‌های ارائه شده، در شرایط سرویس طول نیل‌های ردیف‌های بالایی کنترل میزان نشست و تغییر شکل تولید شده در سطح دیوار را عهده‌دار می‌باشند در حالی که میخ‌های پایینی نقش اصلی را در پایداری سیستم میخ‌گذاری در شرایطی که سیستم میخ‌گذاری به سمت گسیختگی می‌رود دارد. در ضمن شکل سطح لغزش تولید شده در خاک دانه‌ای دوخطی و در خاک چسبیده دایروی همراه با ترک کششی می‌باشد. در نهایت نیز توصیه‌هایی در مورد نحوه انتخاب طول و قطر میخ و شکل سطح لغزش ارائه گردیده است.

کلیدواژه‌ها: سیستم میخ‌گذاری، تفاضل محدود سه‌بعدی، حالت سرویس، حالت حدی.

۱- مقدمه

ماکزیم تنش برشی که می‌تواند در محیط میخ تولید شود، می‌باشد. در نتیجه، روش تعادل حدی اولاً نمی‌تواند به بررسی مکانیسم رفتاری سیستم میخ‌گذاری و تغییر شکل‌های تولید شده در آن از شروع عملیات گودبرداری و پایدارسازی تا پایان عملیات آن تحت بارهای سرویس بپردازد و دوماً شرایط سرویس می‌تواند تفاوت بسیار زیادی با حالت ایده‌آل در نظر گرفته شده برای حالت گسیختگی داشته باشد. در نتیجه نیاز به روش‌های دیگری که بتوان از طریق آنها تغییر شکل خاک را کنترل کرد و نیروهای تولید شده در میخ‌ها را تحت حالت سرویس به دست آورد، دیده می‌شود.

مرحله دوم از طراحی سیستم میخ‌گذاری به این امر اختصاص دارد. با استفاده از روش‌های عددی دو بعدی و سه بعدی، رفتار سیستم میخ‌گذاری تحت بارهای سرویس مورد بررسی قرار می‌گیرد. مراحل گودبرداری نیز با استفاده از ساخت و ساز مرحله‌ای مدل می‌شوند. مدل‌سازی عددی سیستم میخ‌گذاری خاک به

مسئله پایدارسازی گودبرداری‌ها با سیستم میخ‌گذاری خاک و نحوه اجرای آن به منظور به حداقل رساندن اثرات آن بر سازه‌های مجاور، یکی از مهم‌ترین مسائل مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد. روش آنالیز و طراحی سیستم میخ‌گذاری خاک شامل دو مرحله اصلی است: مرحله اول: شامل یافتن ضریب اطمینان در برابر لغزش خاک پایدار شده با استفاده از روش تعادل حدی می‌باشد. روش تعادل حدی با انتخاب سطوح لغزش فرضی که در آنها توده خاک به صورت صلب در آستانه گسیختگی قرار دارد، نیروهای مقاوم در برابر لغزش و نیروهای محرک در جهت لغزش را یافته و اقدام به تعیین ضریب اطمینان در برابر گسیختگی می‌نماید. روش تعادل حدی تنها آستانه گسیختگی را در نظر گرفته و فرض می‌نماید که کل مقاومت بیرون کشیدگی در محیط میخ‌ها بسیج گردیده‌اند (Schlosser, ۱۹۹۱؛ Chen و همکاران ۱۹۸۱؛ Stocker و همکاران، ۱۹۷۹؛ FHWA، ۱۹۹۶). (مقاومت بیرون کشیدگی،

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۴-۴۰۲۰۰۴۵

دارای مقاومت خمشی و برشی نیز می‌باشد. بسیاری از محققین همانند Jewell (۱۹۹۰)، Schlosser و Guilloux (۱۹۸۱)، Jewell و Pedley (۱۹۹۰-۱۹۹۲) و Juran و Elias (۱۹۹۰) به بررسی توزیع سختی خمشی میخ و میزان بسیج آن برای پایداری یک سیستم میخ‌گذاری پرداختند. توانایی بسیج مقاومت خمشی و برشی تابعی از مشخصات مقطع میخ، سختی نسبی بین خاک و میخ، زاویه میخ و تغییر شکل‌های بزرگ می‌باشد. از این میان نقش زاویه و تغییر شکل‌های بزرگ در بسیج مقاومت برشی و خمشی بیشتر می‌باشد. اگر زاویه میخ‌ها به نحوی قرار گیرد که در راستای جابجایی خاک باشد (در دیوارها ۱۰ تا ۲۰ درجه)، عمده نیروی تولید شده در آن کششی خواهد بود. از دیدگاه تغییر شکل خاک اطراف میخ‌ها دستورالعمل کلاتره (Plumelle و همکاران، ۱۹۹۰) و آیین‌نامه FHWA (۱۹۹۶)، بیان می‌دارند که برای تغییر شکل‌های کمتر از ۰/۳ تا ۰/۴ درصد ارتفاع دیوار (حالت سرویس) مقاومت برشی و خمشی بسیج نمی‌شود. با توجه به در نظر گرفتن زاویه ۱۰ درجه برای میخ‌ها در این مقاله و همچنین بررسی حالت سرویس، می‌توان برای مدل‌سازی میخ از المان سازه‌ای تحت عنوان المان سازه‌ای کابل استفاده کرد که تنها قادر به تحمل نیروی کششی باشد. المان سازه‌ای کابل قادر به مدل‌سازی فصل مشترک بین میخ و خاک و بسیج تنش برشی در اثر جابجایی بین میخ و خاک در محیط میخ می‌باشد. سیستم ایده‌آل شده برای چنین المان سازه‌ای در شکل (۱) نشان داده شده است. رفتار فصل مشترک بین میخ و خاک ناشی از چسبندگی و زاویه اصطکاک بین میخ و خاک بوده و می‌تواند همانند مدل کولمب برای فصل مشترک به صورت عددی تعریف شود (راهنمای Flac 3D، ۲۰۰۶). پارامترهای عددی جهت فصل مشترک شامل: چسبندگی بین میخ و خاک (g_{coh})، زاویه اصطکاک بین میخ و خاک (g_{fric})، سختی برشی فصل مشترک در برابر جابجایی نسبی بین میخ و خاک (kg)، قطر میخ (pg) و تنش محصور کننده اطراف میخ (σ_m) می‌باشد. ماکزیم تنش برشی تولید شده در اطراف میخ از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد.

$$\tau_f = Pg(g_{coh} + \sigma'_m \tan(g_{fric})) \quad (1)$$

به ماکزیم تنش برشی تولید شده در محیط میخ، مقاومت بیرون کشیدگی گفته می‌شود. مقاومت بیرون کشیدگی بسته به روش اجرای میخ‌گذاری و تزریق گروت، می‌تواند وابسته به عمق (با افزایش عمق افزایش یابد) و یا غیر وابسته به آن (افزایش عمق تأثیر چندانی بر میزان آن نداشته باشد) باشد (Barley و همکاران، ۱۹۹۷؛ Cartier و Gigan، ۱۹۸۳؛ Franzen، ۱۹۹۸؛ Lou و همکاران، ۲۰۰۰). بررسی‌های وسیع‌تر آزمایشگاهی به بررسی اثر عمق قرارگیری میخ (فشار سربار و تنش مؤثر نرمال روی میخ)،

خاطر هندسه خاص خود فرضیات کرنش مسطح در روش عددی دو بعدی را ارضاء نمی‌کند. لذا با استفاده از معادل‌سازی، میخ‌ها به صورت صفحه مدل می‌شوند تا فرضیات لازم جهت ایده‌آل‌سازی تکمیل شود. این امر باعث جداسازی بین خاک‌ها می‌شود و اتصال بین خاک روی صفحه با خاک زیر صفحه قطع می‌گردد (Singh و همکاران، ۲۰۱۰). به واسطه این جدایش، خاک نمی‌تواند جابجایی آزادانه خود را، که ما بین میخ‌ها انجام می‌گیرد، انجام دهد. در نتیجه آنالیز سیستم میخ‌گذاری اساساً یک روش سه بعدی می‌باشد. بررسی سیستم میخ‌گذاری خاک به صورت سه بعدی برای اولین بار توسط Su و Smith (۱۹۹۷)، بر روی دیوار سیستم میخ‌گذاری خاک که در پلان به صورت قوسی بود انجام گرفت. بعد از آن در سال ۱۹۹۹، Zhang و همکارانش به بررسی سیستم میخ‌گذاری به روش عددی سه بعدی تحت بارهای سرویس پرداختند. در هر دوی این مدل‌سازی‌ها از روش اجزاء محدود سه بعدی استفاده شده بود. برای مدل‌سازی خاک، میخ و رویه از سیستم المان‌های مجزا بهره گرفته شده بود. منظور از المان‌های مجزا این است که در ابتدا المان‌بندی طوری صورت می‌پذیرد که موقعیت قرارگیری رویه، فصل مشترک بین میخ و خاک و خود میخ مشخص است و تمامی این المان‌ها در ابتدا دارای مدل رفتاری از نوع مدل رفتاری که برای خاک تعریف شده است را دارا می‌باشند. در هر فاز عملیات خاک‌برداری با تغییر در مدل رفتاری اختصاص یافته به هر یک از اجزای سیستم میخ‌گذاری (به غیر از خاک) مراحل نصب میخ و رویه مدل‌سازی می‌شود. همچنین در مدل‌سازی آنها به علت تکرار میخ‌ها در ارتفاع و طول دیوار، تنها یک تکه از دیوار از وسط میخ تا نصف فاصله افقی بین میخ‌ها مدل شده بود. در این مقاله ضمن معرفی و بهره‌گیری از روش‌های نوین جهت مدل‌سازی، رفتار سیستم میخ‌گذاری تحت بارهای سرویس و حدی با استفاده از روش تفاضل محدود سه بعدی و با استفاده از نرم‌افزار FLAC 3D مورد بررسی قرار خواهد گرفت. برای مدل‌سازی نیز برای میخ‌ها از المان‌های سازه‌ای که قادر به مدل‌سازی صحیح رفتار اندرکنشی بین میخ و خاک می‌باشند و هم برای رویه شاتکریت با ضخامت کم از المان سازه‌ای پوسته استفاده خواهد شد.

۲- بررسی المان سازه‌ای در نظر گرفته شده میخ و رویه

در تکنیک میخ‌گذاری خاک، جابجایی نقشی اساسی در تولید نیروها ایفا می‌کند و تا زمانی که تغییر شکلی روی ندهد نیرویی نیز در میخ‌ها تولید نخواهد شد. با جابه جایی انجام گرفته بین ناحیه مقاوم و ناحیه محرک، تنش برشی در اطراف میخ‌ها بسیج می‌شود تا در برابر جابجایی صورت گرفته از خود عکس‌العمل نشان دهد که این تنش‌های برشی به صورت نیروی محوری کششی به میخ منتقل می‌شود. سیستم میخ‌گذاری علاوه بر مقاومت کششی

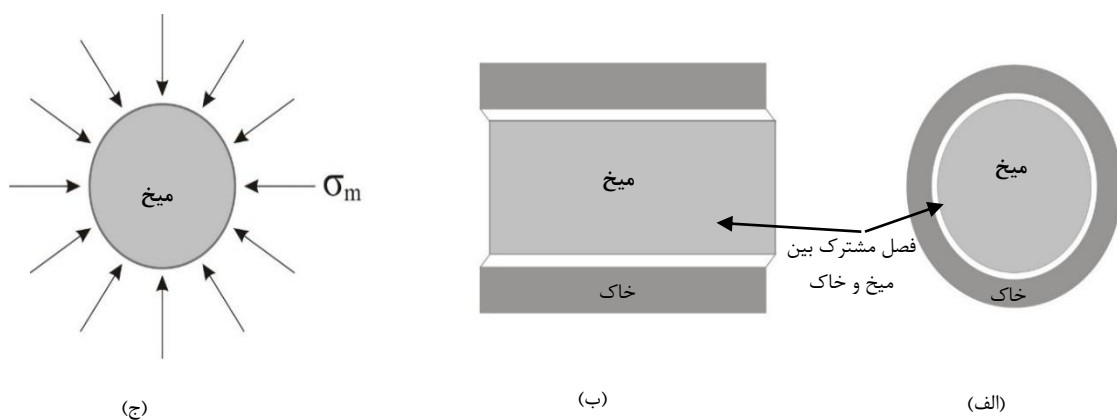
جنس میخ‌ها از آلومینیوم بوده و توسط تزریق با فشار کم در جای خود نصب گردیده‌اند. فاصله میخ‌ها از هم در راستای قائم و افق به ترتیب ۱ و ۱/۱۵ متر می‌باشد. نتایج آزمایشات SPT بر روی خاکریز تا عمق ۳ متر در حدود ۸ و تا عمق ۶ متری در حدود ۱۴ می‌باشد. در نتیجه برای مدل‌سازی عددی، سختی خاک در عمق متغیر در نظر گرفته شد. مشخصات لایه‌بندی خاکی که در آن میخ‌ها نصب گردیده‌اند و همچنین مشخصات خاک پایه، میخ‌ها و رویه که در تحلیل تفاضل محدود سه بعدی به کار گرفته شده است در جدول (۱) آورده شده است. مدل رفتار خاک موهر کلمب می‌باشد.

شکل (۳) مش‌بندی مدل عددی را نشان می‌دهد. در این مدل ابعاد مش‌ها یک‌نواخت و ۲۵ سانت در ۲۵ سانت انتخاب شده‌اند. جهت عدم تأثیر مرزها روی نتایج مدل، فاصله به اندازه کافی دور از محدوده اصلی انتخاب شده است. مراحل ساخت به وسیله حفاری یک متر به یک متر و انجام شاتکریت و میخ‌گذاری توسط المان‌های سازه‌ای شرح شده در بخش (۲) انجام گردیده است. مقایسه بین نتایج اندازه‌گیری شده در پروژه کلاتره و مدل عددی برای تغییر شکل افقی خاک به فاصله ۲ متر از پشت دیوار در انتهای عملیات پایدارسازی فاز ۳ (عمق ۳ متری) و فاز ۵ (عمق ۵ متری) در شکل (۴) نشان داده شده است. نتایج اندازه‌گیری شده اندکی بیشتر از نتایج حاصل از تحلیل عددی می‌باشد. همچنین در شکل (۵) ماکزیمم نیروهای بسیج شده در میخ‌ها و در شکل (۶) نحوه توزیع نیروی کششی در میخ در تحلیل عددی با مقادیر اندازه‌گیری شده آنها در انتهای عملیات پایدارسازی مقایسه شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که نتایج تحلیل عددی به صورت منطقی و معقولی نتایج اندازه‌گیری شده در پروژه کلاتره را پیش‌بینی می‌نماید.

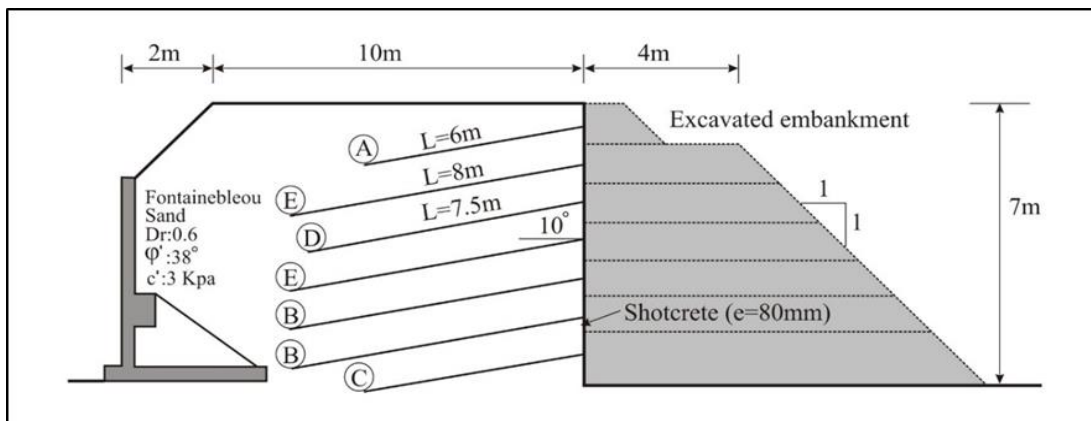
زاویه اتساع خاک و درجه اشباع خاک بر روی مقاومت بیرون-کشیدگی سیستم میخ‌گذاری خاک به روش حفاری و تزریق گروت با فشار کم انجام گرفته است (Su، ۲۰۰۶؛ Su و همکاران، ۲۰۱۰). این تحقیقات نشان می‌دهد که برای نوع تزریق ذکر شده، مقاومت بیرون‌کشیدگی مستقل از عمق قرارگیری میخ خواهد بود. بر اساس رابطه (۱)، در صورتی که زاویه اصطکاک فصل مشترک صفر انتخاب شود، می‌توان این عدم وابستگی را شبیه‌سازی نمود. جهت مدل‌سازی رویه سیستم میخ‌گذاری از المان سازه‌ای پوسته استفاده گردیده است. این المان سازه‌ای به خاک متصل شده و همراه با تغییرشکل خاک تغییرشکل می‌دهد. به علت این که ضخامت شاتکریت سازه‌های میخ‌گذاری موقت ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد، در هنگام تغییرشکل رویه با خاک همراه می‌گردد لذا از این المان سازه‌ای برای رویه سیستم میخ‌گذاری استفاده گردید.

۳- بررسی صحت مدل‌سازی

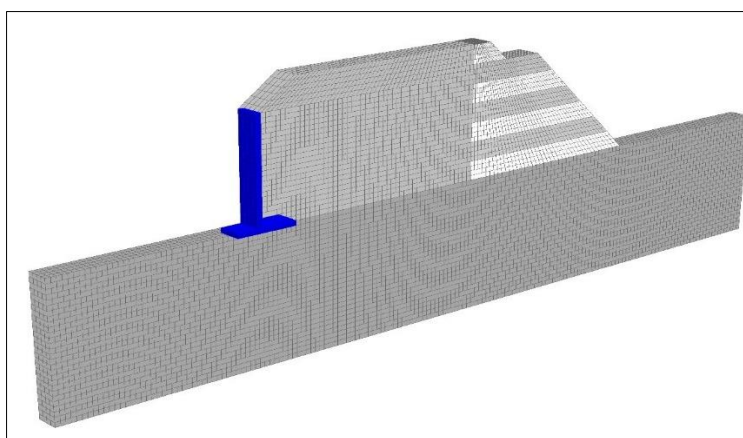
در سال ۱۹۸۶، تحقیقات ملی فرانسه، پروژه‌ای را جهت بررسی مکانیسم رفتاری سیستم میخ‌گذاری تحت عنوان کلاتره انجام داد. مقطعی از دیوار پایدارشده در این تحقیق در شکل (۲) نشان داده شده است. ارتفاع گودبرداری ۷ متر بوده و طول دیوار در راستای عمود بر صفحه ۷/۵ متر در نظر گرفته شده بود. دیوار پایدار شده به وسیله سیستم میخ‌گذاری بین دو دیوار جانبی قرار داشته تا از تغییرشکل دیوار در راستای طول آن جلوگیری به عمل آید تا شرایط کرنش مسطح در صورت استفاده از مدل‌سازی عددی، ارضاء گردد. برای سیستم پایدارسازی از ۶ نوع میخ تحت عنوان A، B، C، D و E استفاده شده بود. طول این میخ‌ها به ترتیب ۶، ۸، ۶، ۷/۵ و ۸ متر می‌باشد. گودبرداری و پایدارسازی در ۷ مرحله و به عمق یک متر انجام گرفته بود.



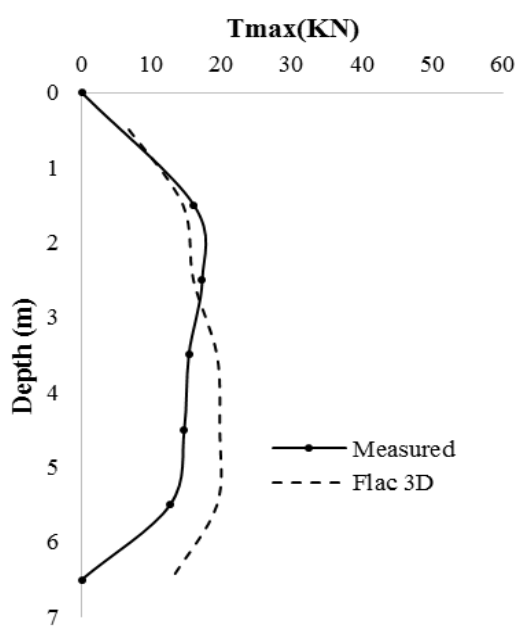
شکل ۱- سیستم ایده‌آل‌سازی شده جهت مدل‌سازی رفتار میخ در سیستم میخ‌گذاری: (الف) سیستم ایده‌آل شده، (ب) جایجایی نسبی بین میخ و خاک، (ج) تنش محصورکننده اطرف



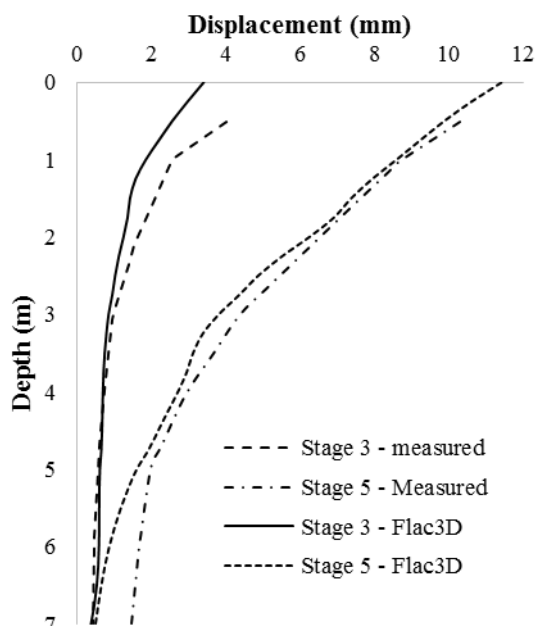
شکل ۲- مشخصات هندسی سیستم میخ گذاری در پروژه کلاتره



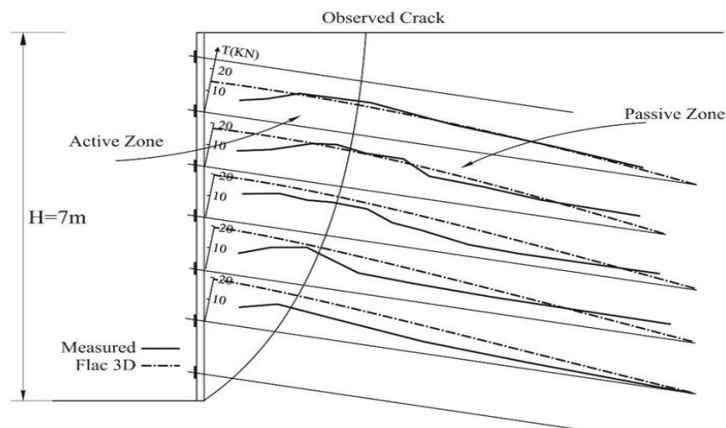
شکل ۳- مش بندی به کار رفته در تحلیل تفاضل محدود سه بعدی برای پروژه کلاتره



شکل ۵- مقایسه بین نیروهای ماکزیمم بسیج شده در تحلیل با مقادیر اندازه گیری شده در پروژه کلاتره



شکل ۴- مقایسه بین تغییر شکل افقی خاک حاصل از تحلیل با نتایج اندازه گیری شده در فاصله دو متری از دیوار در پروژه کلاتره



شکل ۶- مقایسه بین نیروهای کششی بسیج شده میخ‌ها در تحلیل عددی با مقادیر اندازه‌گیری شده در پروژه کلانتره

جدول ۱- مشخصات خاک، رویه و میخ به کار رفته در تحلیل تفاضل محدود برای سیستم میخ‌گذاری پروژه کلانتره

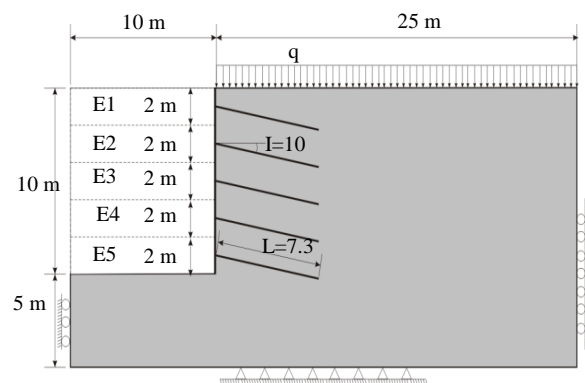
خاک					
پارامتر	تعریف	واحد	خاکریز	خاک پایه	
G	مدول برشی	MPa	۳/۲ - ۸/۴	۱۵/۳۳	
K	مدول بالک	MPa	۱۳/۳۲ - ۴۰	۵۳/۸۵	
C	چسبندگی	KPa	۳	۰	
ϕ	زاویه اصطکاک	degree	۳۸	۳۶	
ψ	زاویه اتساع	degree	۰	۰	
γ	وزن مخصوص	KN/m ³	۱۶/۶	۱۷	
رویه					
پارامتر	تعریف	واحد	مقدار		
E	مدول الاستیسیته	GPa	۲/۵		
ν	ضریب پواسون		۰/۳		
t	ضخامت	mm	۸		
γ	وزن مخصوص	KN/m ³	۲۴		
میخ					
پارامتر	تعریف	واحد	Type A	Type B	Type C-E
<i>emod</i>	مدول الاستیسیته میخ	GPa	۱۹/۹۹	۲۱/۸	۲۱
<i>gr_coh</i>	چسبندگی فصل مشترک بین میخ و خاک	KN/m	۳/۵	۰/۳۷۲	
<i>gr_k</i>	سختی فصل مشترک بین میخ و خاک در برابر تغییر شکل برشی	MPa/m		۰/۱۲۵۶	
<i>gr_per</i>	محیط میخ	m		۰/۰۰۳۱۲	
<i>xcarea</i>	مساحت میخ	m ²		۳۰	
<i>ytens</i>	ماکزیمم نیروی کششی تحمل شده توسط میخ	KN		۲۸	
τ_{pull}	مقاومت بیرون کشیدگی	KPa/m			

پارامترهای مقاومت برشی خاک، دو نوع خاک با پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک به ترتیب (۵ کیلوپاسکال، ۴۰ درجه تحت عنوان مدل ۱ و نمایانگر خاک دانه‌ای) و (۴۲ کیلوپاسکال، ۱۰ درجه تحت عنوان مدل ۲ و نمایانگر خاک چسبنده) انتخاب شد. در حالی که سایر پارامترهای خاک برای هر دو مدل یکسان می‌باشد.

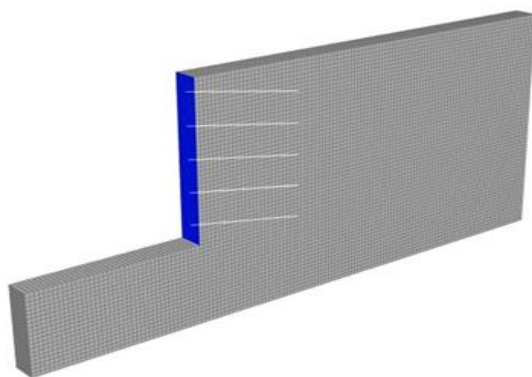
۴- بررسی رفتار سیستم میخ‌گذاری در خاک‌های دانه‌ای و چسبنده

در این بخش به بررسی مکانیسم جابجایی خاک پایدار شده با سیستم میخ‌گذاری در شرایط سرویس، مکانیسم گسیختگی و نیروهای تولید شده در میخ‌ها پرداخته می‌شود. مدل رفتار خاک مورد بررسی از نوع موهر کلمب می‌باشد. برای بررسی اثر

درجه می‌باشد. این سیستم بر اساس سطح لغزش دایروی و در نظر گرفتن ماکزیم نیروی کششی تولید شده در میخ بر اساس روش تعادل حدی برای ضریب اطمینان ۱/۳۶ طراحی شده است. گودبرداری در ۵ مرحله به ارتفاع ۲ متر انجام می‌گردد. مشخصات فنی برای خاک، میخ و شاتکریت، بر اساس پروژه‌هایی که در اکثر نقاط ایران برای پایدارسازی به روش میخ گذاری اجرا می‌گردد، انتخاب شده است. جدول (۲) این مشخصات را که در روش عددی استفاده شده است، نشان می‌دهد.



شکل ۷- مدل هندسی ارائه شده جهت بررسی رفتار سیستم میخ‌گذاری



شکل ۸- مش‌بندی مدل ارائه شده جهت بررسی رفتار سیستم میخ‌گذاری

مدول الاستیسته خاک، ضریب پواسون، زاویه اتساع و وزن مخصوص خاک به ترتیب ۲۰ مگاپاسکال، ۰/۳، ۰ و ۱۸ کیلونیوتن بر متر مربع می‌باشد.

شکل هندسی مدل مورد بررسی در شکل (۷) و مش‌بندی انجام شده به روش تفاضل محدود سه‌بعدی در شکل (۸) نشان داده شده است. ارتفاع گود ۱۰ متر بوده و فاصله میخ‌ها در راستای قائم ۲ متر و در راستای طول دیوار ۱/۵ متر می‌باشد. طول میخ‌ها ثابت و برابر با ۷/۳ متر انتخاب شده است. زاویه میخ‌ها نیز ۱۰

جدول ۲- مشخصات میخ و رویه به کار رفته در تحلیل تفاضل محدود برای بررسی اثر رفتار سیستم میخ‌گذاری

میخ			
۴۰	GPa	مدول الاستیسته میخ	<i>emod</i>
۱	KN/m	چسبندگی فصل مشترک بین میخ و خاک	<i>gr_coh</i>
۷۱/۴	MPa/m	سختی فصل مشترک بین میخ و خاک در برابر تغییر شکل برشی	<i>gr_k</i>
۰/۳۱۴	m ²	مساحت میخ	<i>xcarea</i>
۰/۰۰۷۸۵	KN	ماکزیم نیروی کششی تحمل شده توسط میخ	<i>ytens</i>
۱۳۵	KPa/m	مقاومت بیرون کشیدگی	<i>τpull</i>
۶۰			
رویه			
۲۰	GPa	مدول الاستیسته	<i>E</i>
۰/۲		ضریب پواسون	<i>ν</i>
۱۰۰	mm	ضخامت	<i>t</i>

طول تقریباً برابر با طول میخ‌هایی بالایی کم شده و به صفر میل می‌کند. جهت توضیح این رفتار از شکل (۱۰) می‌توان بهره جست. شکل (۱۰) بردارهای جابجایی سیستم میخ‌گذاری را تحت شرایط سرویس نشان می‌دهد. با توجه به این شکل برای خاک دانه‌ای، خاک اطراف میخ‌ها تمایل به حرکت در جهت ۱ نشان داده شده در شکل را دارد و خاک پشت میخ‌ها در اثر این حرکت رو به جلوی خاک مجاور میخ‌ها، تحت شرایط اکتیو قرار گرفته و تمایل به لغزش تحت زاویه‌ای نزدیک به $45 + \frac{\varphi}{2}$ دارد که باعث تولید گوه

۴-۱- حالت سرویس

شکل (۹) تغییر شکل‌های قائم روی داده در سطح زمین را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مکانیسم نشست سطح زمین برای خاک دانه‌ای و چسبنده متفاوت می‌باشد. برای خاک دانه‌ای (مدل ۱) دو مورد نشست قابل توجه است، یکی نشست در مجاورت گود و دیگری نشستی که تقریباً به صورت یکنواخت از فاصله ۵ متری از گود شروع و در فاصله ۱۵ متری از گود اتمام می‌یابد. برای خاک چسبنده نیز نشست در لبه دیوار ماکزیم بوده و تا

Stocker و همکاران (۱۹۷۹) پیشنهاد شد که به روش آلمانی معروف است. در این روش تنها نیروی کششی میخ در نظر گرفته می‌شود و تحلیل بر اساس رویکرد تعادل نیروها می‌باشد. در این شیوه با توجه به خطی بودن سطح لغزش نیازی به استفاده از روش قطعات نمی‌باشد. حداقل ضریب اطمینان متناظر با بحرانی‌ترین سطح لغزش با تکرار محاسبات در اثر تغییر زاویه سطح لغزش در پای شیب می‌باشد. در حالی که زاویه خط دوم ثابت و برابر با $45+\varphi/2$ می‌باشد. استفاده از سطح لغزش دایروی نیز توسط Schlosser و Guillox (۱۹۸۱)، پیشنهاد شده که به روش فرانسوی معروف می‌باشد. در این روش سطح لغزش دایروی بوده و پیدا کردن ضریب اطمینان با در نظر گرفتن نیروهای کششی و برشی میخ بر اساس روش قطعات- روش بیشاپ استوار می‌باشد. این دو روش در شکل (۱۴) نشان داده شده است. میزان سربار لازم در خاک دانه‌ای ۵۰ کیلوپاسکال و در خاک چسبنده ۲۸ کیلوپاسکال می‌باشد. این در حالی است که این دو مدل دارای ضریب اطمینان یکسان در حدود ۱/۳۵ را دارا می‌باشند. یک علت در سربار کم لازم جهت گسیختگی در خاک چسبنده را می‌توان به تولید ترک کششی اشاره نمود. در نتیجه در طراحی سیستم میخ گذاری در خاک‌های چسبنده توصیه می‌شود که ترک کششی نیز در تحلیل‌های تعادل حدی در نظر گرفته شود.

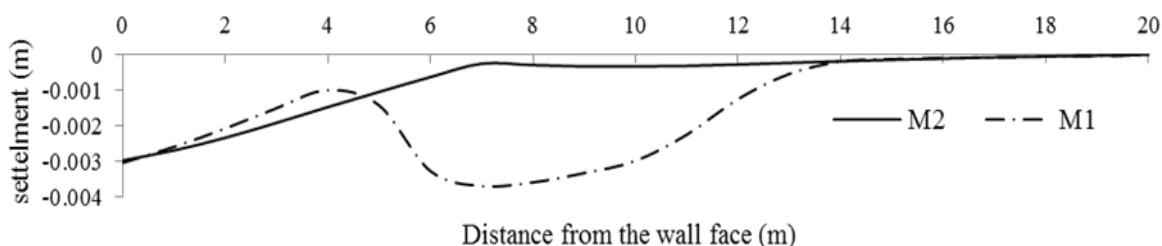
۴-۳- نیروی‌های تولید شده در میخ‌ها

بررسی موقعیت نیروهای کششی ماکزیمم تولید شده در میخ‌ها نیز به خصوص در حین گسیختگی از فرضیات اساسی به کار رفته در تحلیل‌های تعادل حدی می‌باشد. بدین صورت که فرض می‌شود زمانی که توده خاک در آستانه گسیختگی قرار دارد، مقاومت بیرون کشیدگی به طور کامل در طولی از میخ که در پشت سطح لغزش قرار دارد بسیج شده است (Byrne و همکاران، ۱۹۹۸)، این موضوع در شکل (۱۶) به وضوح نشان داده شده است.

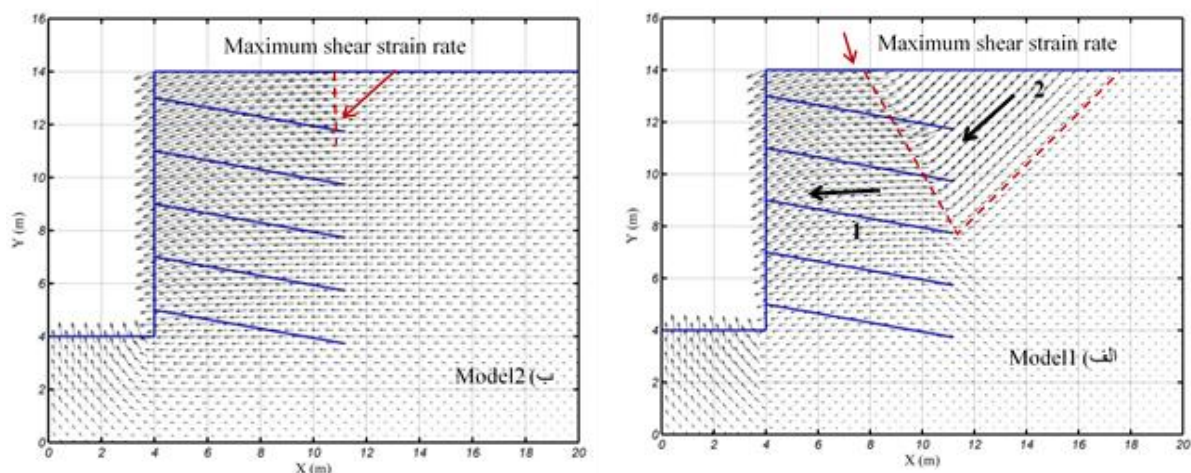
مثلث شکلی می‌گردد. اندازه این گوه بستگی بسیار زیادی به طول میخ‌های بالایی دارد. به طور مثال همین مدل برای آرایش‌های متفاوت طول میخ‌ها (شکل (۱۱)) نیز مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که با افزایش طول میخ‌های بالایی ابعاد گوه مثلث شکل کاهش می‌یابد. شکل (۱۲) نشست ایجاد شده در سطح زمین را برای مدل‌های نشان داده شده در شکل (۱۱) نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، هر چه طول میخ‌های بالایی بیشتر باشد، باعث می‌شود که نشست، منحنی آرامی را طی کند در حالی که برای مدل‌های دارای طول میخ کوتاه در بالا، این نشست غیریکنواخت بوده و در بعضی موارد می‌تواند کنترل کننده طراحی باشد، به خصوص در مواردی که تأسیسات زیرزمینی در مجاورت گود باشد. برای خاک چسبنده، در شکل (۱۰)، ماکزیمم نرخ کرنش برشی نشان داده شده است که می‌تواند منجر به ایجاد ترک‌های کششی در سطح زمین گردد. شعاع تأثیر نشست خاک در سطح زمین در اثر گودبرداری و پایدارسازی نیز، به این نقطه محدود می‌گردد. با توجه به مطالب ذکر شده، میخ‌های ردیف بالایی کنترل کننده میزان تغییرشکل‌های روی داده در سیستم میخ‌گذاری تحت شرایط سرویس بوده و با انتخاب طولی مناسب برای آن می‌توان نشست‌ها و تغییرشکل‌های دیوار را در حد قابل قبولی پایین آورد.

۴-۲- حالت گسیختگی

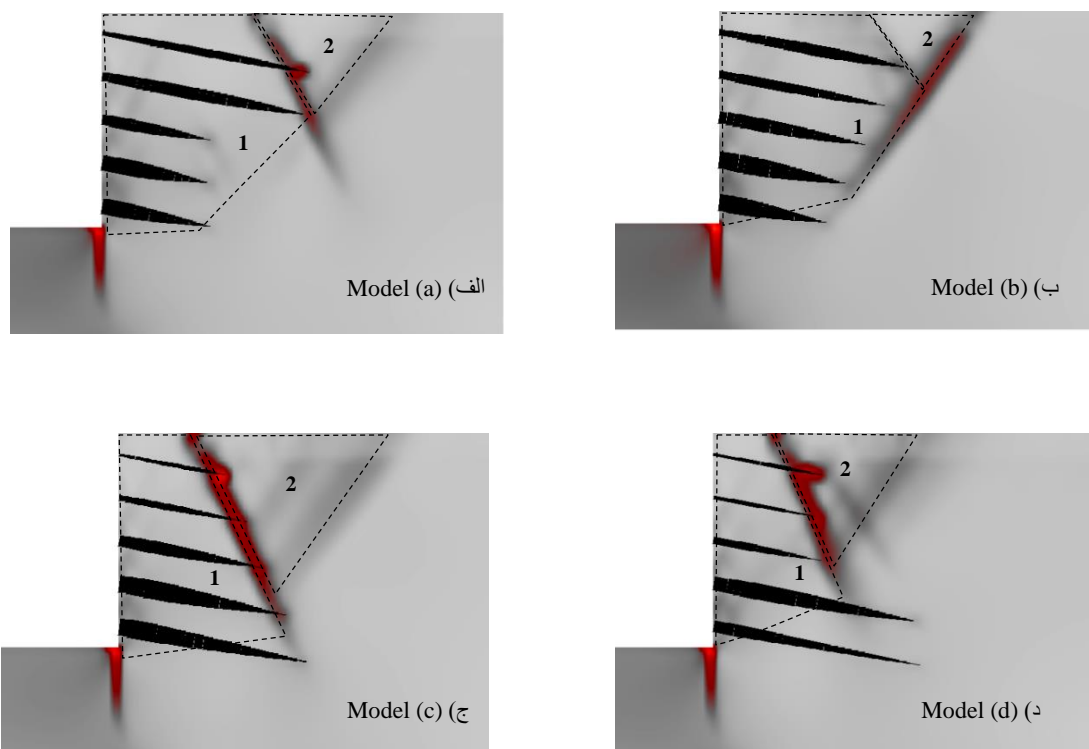
در ادامه جهت بررسی مکانیسم گسیختگی در سیستم میخ گذاری، سربار گسترده یکنواختی در بالای گود و در سطح زمین اضافه می‌شود و این سربار آنقدر افزایش داده می‌شود تا سیستم به آستانه گسیختگی برسد. سطح لغزش تولید شده ناشی از این امر در شکل (۱۳) نشان داده شده است. با توجه به این شکل، شکل سطح لغزش تولید شده برای خاک دانه‌ای دو خطی بوده و برای خاک چسبنده تقریباً دایروی همراه با تولید ترک کششی به اندازه ۲ متر می‌باشد. سطح لغزش دو خطی در اولین روش بررسی سیستم میخ‌گذاری خاک بر اساس روش تعادل حدی به وسیله



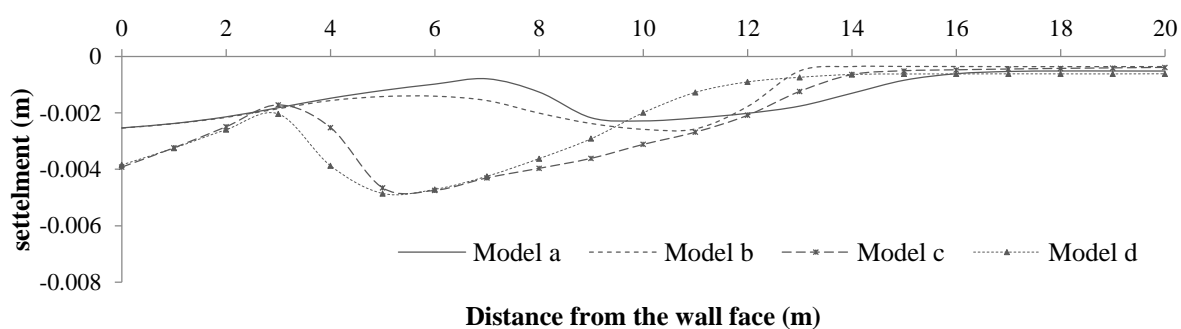
شکل ۹- تغییر شکل‌های روی داده در سطح زمین برای خاک دانه‌ای (مدل ۱) و خاک چسبنده (مدل ۳)



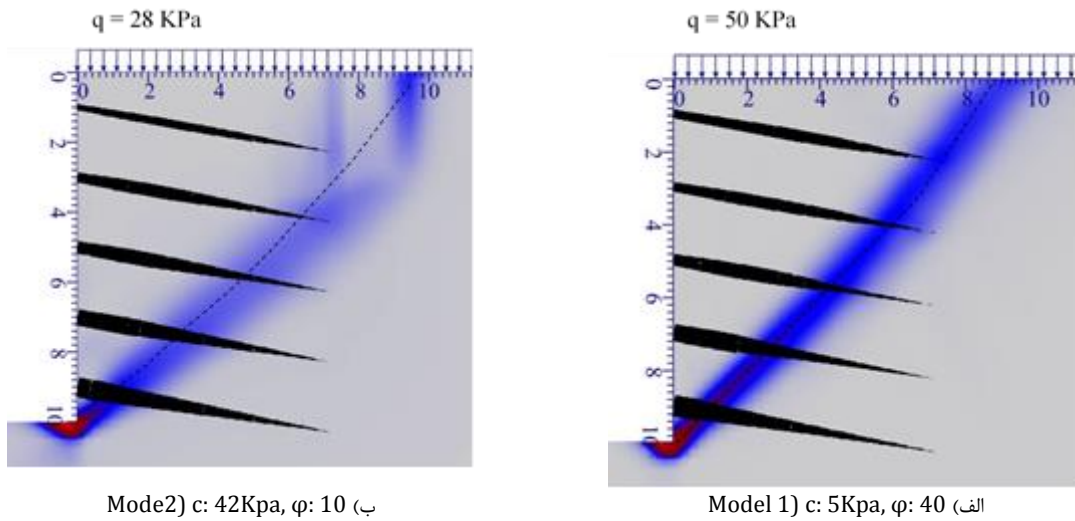
شکل ۱۰- بردار جابه جایی خاک در سیستم میخ گذاری برای خاک چسبیده و دانه ای



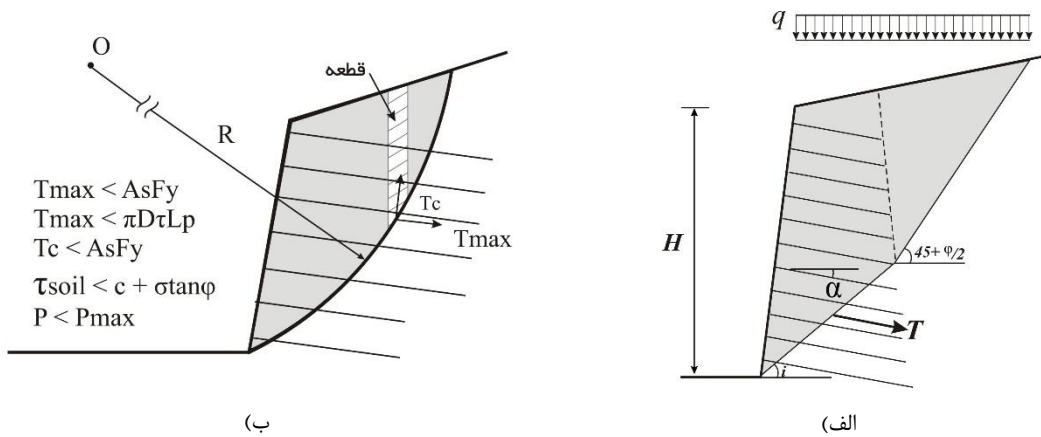
شکل ۱۱- نرخ افزایشی کرنش برشی برای سیستم میخ گذاری در خاک دانه ای با آرایش های مختلف طول میخ ها



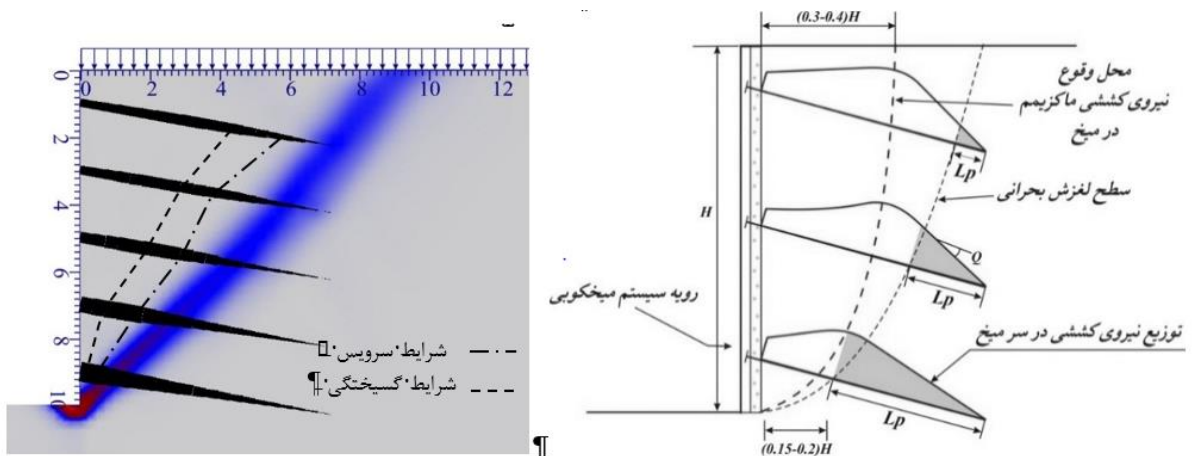
شکل ۱۲- تغییر شکل های روی داده در سطح زمین برای مدل های a تا d نشان داده شده در شکل (۱۱)



شکل ۱۳- سطح لغزش تولید شده ناشی از افزایش سربار در سطح زمین

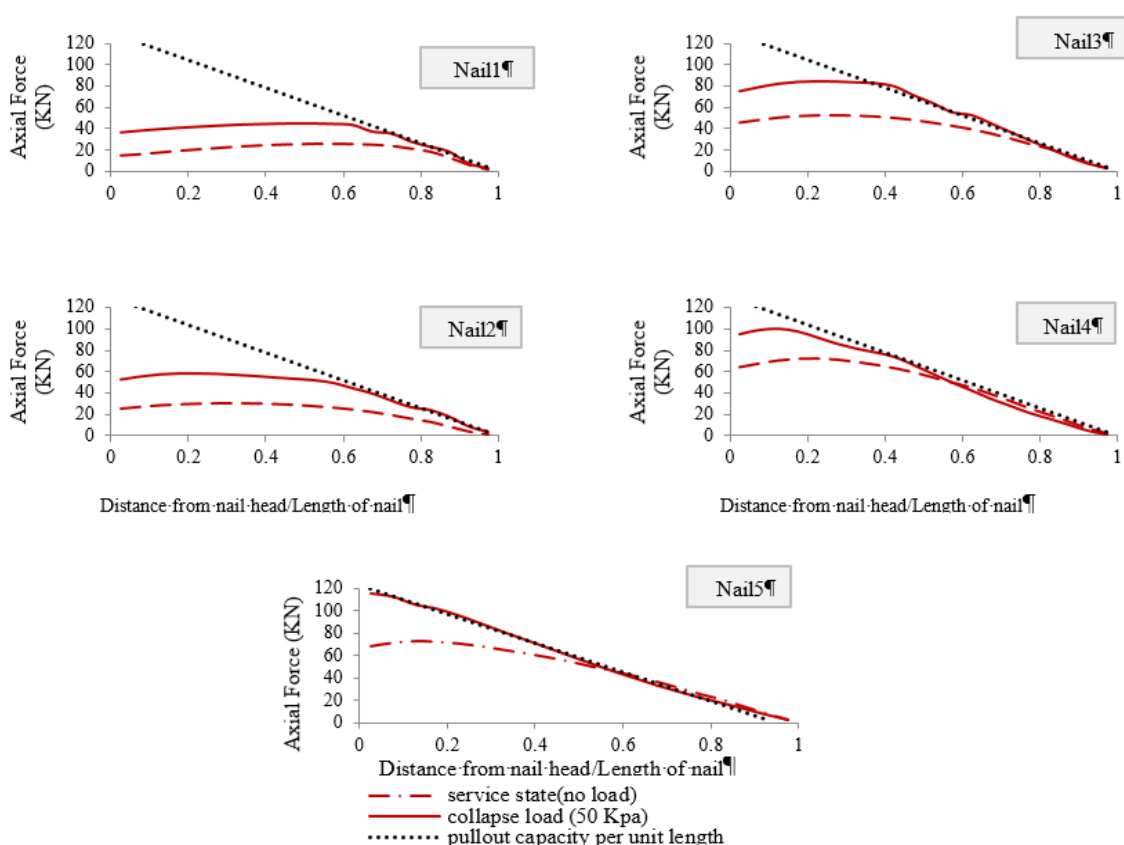


شکل ۱۴- روش‌های تعادل حدی جهت تحلیل سیستم میخ‌گذاری بر اساس انواع سطح لغزش: الف) سطح لغزش دوخطی (آلمانی - Stocker و همکاران، ۱۹۷۹) ب) سطح لغزش دایروی (فرانسوی Schlosser و Guilloux، ۱۹۸۱)



شکل ۱۶- مقایسه بین محل سطح لغزش با موقعیت نیروهای کششی ماکزیمم رخ داده در شرایط سرویس و گسیختگی

شکل ۱۵- موقعیت نیروهای کششی ماکزیمم تولید شده در میخ‌ها و محل سطح لغزش بحرانی (اصلاح شده بعد از Byrne و همکاران ۱۹۹۶)



شکل ۱۷- مقایسه بین نیروی کششی تولید شده در میخ‌ها برای مدل ۱ در حالت سرویس و گسیختگی با ماکزیمم نیروی کششی حاصل از مقاومت بیرون کشیدگی که می‌تواند در میخ بسیج شود

نتیجه میخ‌های پایینی سهم بیشتری در پایداری سیستم میخ-گذاری در شرایط گسیختگی دارند. در حالی که میخ‌های ردیف بالایی معیار کنترل تغییر شکل در شرایط سرویس می‌باشند. نکته قابل توجه دیگر در شکل (۱۷) این می‌باشد که در میخ‌های ردیف-های بالایی ماکزیمم نیروی کششی تولید شده در میخ با ماکزیمم نیروی کششی که میخ (ترکیب میلگرد با گروت) می‌تواند تحمل نماید فاصله زیادی دارد. در نتیجه در میخ‌های بالایی نیازی به در نظر گرفتن مقدار قطر میلگرد مساوی با قطر میلگردی که برای میخ‌هایی پایینی انتخاب می‌شود، نیست.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله رفتار سیستم میخ‌گذاری و تعدادی از ویژگی‌های اساسی در تحلیل مناسب بین اندرکنش خاک با میخ معرفی گردید و نشان داده شد که روش تفاضل محدود سه‌بعدی به همراه المان‌های سازه‌ای در نظر گرفته شده برای میخ و رویه، پیش‌بینی مناسبی از مکانیسم رفتاری سیستم میخ‌گذاری می‌دهد. جهت بررسی و اطمینان از نتایج ارائه شده، ضمن ارائه بررسی سیستم میخ‌گذاری پروژه کلاتره فرانسه، در هر مرحله نتایج با فرضیات ارائه شده در پیشینه‌های تحقیق مورد مقایسه قرار گرفت. از

جهت مقایسه، موقعیت نیروی کششی ماکزیمم در میخ در حالت سرویس و گسیختگی با سطح لغزش در شکل (۱۶) نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود با رفتن از شرایط سرویس به شرایط گسیختگی موقعیت نیروی کششی ماکزیمم نیز در طول میخ جابه‌جا شده و به سطح دیوار نزدیک‌تر می‌شود. جهت بررسی این که آیا مقاومت بیرون کشیدگی در شرایط گسیختگی به طور کامل بسیج شده است یا نه، نیروی بسیج شده در میخ‌ها در حالت سرویس و گسیختگی برای مدل ۱ در شکل (۱۷) رسم شده و با ماکزیمم نیروی کششی حاصل از بسیج مقاومت بیرون کشیدگی مقایسه شده است.

در میخ شماره ۵ که اکثر طول آن در ناحیه مقاوم قرار دارد، در حالت گسیختگی، کل مقاومت بیرون کشیدگی بسیج شده است در حالی که در حالت سرویس تنها نیمی از انتهای آن این مقاومت بسیج شده است. هر چه که از میخ شماره ۱ به میخ شماره ۵ می‌رویم، به دلیل این که طول میخ قرار گرفته در ناحیه مقاوم افزایش می‌یابد، در طول بیشتری از میخ مقاومت بیرون کشیدگی بسیج شده و نیروی کششی ماکزیمم در میخ افزایش می‌یابد. در

- Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden, 1998.
- Hajjalilue-Bonab M, Razavi SK, "A study of soil-nailed wall behavior at limit states", Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 2015, 169(1), 64-76.
- Jewell RA, "Review of theoretical models for soil nailing In Performance of Reinforced Soil Structures", Proceedings of the International Reinforced Soil Conference, Glasgow, 10-12 September, 1991 (265-275).
- Jewell RA, Pedley MJ, "Soil nailing design: the role of bending stiffness", Ground Engineering, 1990, 23(2), 30-36.
- Jewell RA, Pedley MJ, "Analysis for soil reinforcement with bending stiffness", Journal of geotechnical engineering, 1992, 118(10), 1505-1528.
- Juran I, Elias V, "Behavior and working stress design of soil nailed retaining structures in Performance of Reinforced Soil Structures", Proceedings of International Reinforced Soil Conference, British Geotechnical Society, September, 1990, 207-212.
- Luo SQ, Tan SA, Yong KY, "Pull-out resistance mechanism of a soil nail reinforcement in dilative soils", Soils and Foundations, 2000, 40(1), 47-56.
- Plumelle C, Schlosser F, Delage P, Knochenmus G, "French National Research Project on Soil Nailing: Clouterre. In Design and Performance of Earth Retaining Structures", American Society of Civil Engineers, 1986, 660-675.
- Razavi SK, Hajjalilue Bonab M, "Study of soil nailed wall under service loading condition", Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2017 170(2), 161-174.
- Schlosser F, "The multicriteria theory in soil nailing", Ground Engineering, 1991, 24(9), 30-39.
- Schlosser F, Guilloux A, "Le frottement dans le renforcement des sols", Revue française de Géotechnique, 1981, 16, 65-77.
- Shen CK, Herrmann LR, Romstad KM, Bang S, Kim YS, Denatale JS, "An in situ Earth reinforcement lateral support system", NASA STI/Recon Technical Report, N82, 1981.
- Smith IM, Su N, "Three-dimensional FE analysis of a nailed soil wall curved in plan", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1997, 21(9), 583-597.
- Stocker ME, Korcher GW, Gassler G, Gudehus G, "Soil nailing", international conference on soil reinforcement, January, 1979, 469-474.
- Su LJ, "Laboratory pull-out testing study on soil nails in compacted completely decomposed granite fill", Doctoral dissertation, The Hong Kong Polytechnic University, 2006.
- Su LJ, Yin JH, Zhou WH, "Influences of overburden pressure and soil dilation on soil nail pull-out resistance", Computers and Geotechnics, 2010, 37(4), 555-564.
- Singh VP, Babu GS, "2D numerical simulations of soil nail walls", Geotechnical and Geological Engineering, 2010, 28(4), 299-309.
- Zhang M, Song E, Chen Z, "Ground movement analysis of soil nailing construction by three-dimensional (3-D) finite element modeling (FEM)", Computers and Geotechnics, 1999, 25(4), 191-204.
- جمله مهم‌ترین فرضیات در تحلیل تعادل حدی سیستم میخ‌گذاری شامل شکل سطح لغزش و بسیج کامل مقاومت بیرون کشیدگی در طول میخ در ناحیه مقاوم می‌باشد. شرایط گسیختگی با اعمال سربار در سطح زمین و مجاور گود مورد بررسی قرار گرفت و این سربار آنقدر اضافه گردید تا سطح لغزش در خاک تشکیل گردد. در شرایط سرویس نیز تغییر شکل‌ها مورد آنالیز قرار گرفت و رفتار تغییر شکلی خاک در خاک چسبنده و دانه‌ای با یکدیگر مقایسه گردید.
- با توجه به نتایج به دست آمده، سطح لغزش محاسبه شده برای خاک دانه‌ای برای سیستم میخکوبی دوخطی بوده و برای خاک چسبنده به صورت دایروی می‌باشد. در زمان گسیختگی میخ‌هایی که در تراز پایین‌تری قرار دارند، مقاومت بیرون کشیدگی در طول بیشتری از این میخ‌ها بسیج شده و نقشی اساسی در پایداری سیستم میخ‌گذاری ایفا خواهند کرد. این در حالی است که در زمان تحت سرویس و تولید تغییر شکل‌ها، میخ‌های واقع در ترازهای بالاتر نقشی اساسی در کنترل تغییر شکل‌ها خواهند داشت. هر چه طول میخ‌ها بیشتر باشد، تغییر شکل‌ها کم و یکنواخت‌تر خواهند بود. تحقیقات وسیع‌تر در زمینه رفتار سیستم میخکوبی در حالت سرویس را می‌توان در مقاله رضوی و همکاران، (۲۰۱۷) و تحت حالت گسیختگی را در مقاله حاجی‌علیلو و همکاران (۲۰۱۵) انجام شده توسط همین نویسندگان یافت.
- ذکر این نکته نیز ضروری است که، اگر چه تحلیل سه بعدی برای بررسی رفتار سیستم میخکوبی انجام گردیده است، سطوح لغزش رخ داده دو بعدی می‌باشند. این ویژگی بیشتر به علت فاصله نسبتاً کم نیل‌ها از هم (به طور رایج بین ۱ تا ۲ متر) می‌باشد. اگر فاصله نیل‌ها به اندازه کافی افزایش پیدا نماید، یک سطح لغزش واضح سه بعدی نیز می‌تواند تحقق یابد و الزاماً کارکرد همه نیل‌های واقع در یک تراز مشابه نخواهد بود.

۶- مراجع

- Barley AD, Davies MCR, Jones AM, "Review of current field testing methods for soil nailing", Proc. of the third international conference on ground improvement geosystems, London, 3-5 June, 1997, 477-483. Proc 3rd
- Byrne RJ, Cotton D, Porterfield J, Wolschlag C, Ueblacker G, "Manual for design and construction monitoring of soil nail walls", (No. FHWA-SA-96-069), 1996.
- Cartier G, Gigan JP, "Experiments and observations on soil nailing structures", In Proceedings of the Eight European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki (Vol 2, 473-476), May 1983.
- Flac 3D version 3.1 User's guide, Minneapolis (Minnesota, USA), 2006, Itasca Consulting Group, Inc.
- Franzen G, "Soil nailing-A laboratory and field study of pull-out capacity", Doctoral thesis, Department of

EXTENDED ABSTRACT

Three Dimensional Finite Difference (3D FD) Analysis of Soil Nailing Wall

Seyyed Kazem Razavi^a, Masoud Hajjalilue Bonab^{a,*}, Amir Hasan Rezaei^b

^a Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

^b Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Iran

Received: 17 April 2017; Accepted: 07 January 2018

Keywords:

Soil Nailing, 3D Finite Difference analysis, Service state, Limit state.

1. Introduction

The technique of soil nailing as a method of soil reinforcement in situ has been increasingly used to stabilize open excavations. Analyzing of the soil nailed structure by numerical models is an appropriate method for predictions of the deformation behavior of a soil nailing wall and actual mobilized forces in the nail. In this paper, 3D FD analysis was used to investigate of soil nailing wall mechanism in cohesion and granular soils under service state and limit state. The behavior is investigated to study influence of: (1) shear strength of the soil, (2) distribution of nail lengths. The results can be useful for the design of soil nailed structures.

2. Methodology

Soil nails have bending and shear resistance, as well as tensile resistance. For typical soil-nailed walls, where the nails are inclined at 5–20°, the contribution of nail bending and shear resistance can be neglected for practical purposes. Hence, the nails can be modeled as cable elements, because cable elements provide a shearing resistance along their length. Cable structural elements are two-noded, straight finite elements with one axially oriented translational degree-of-freedom per node. Each cable structural element is interacted with FD grid by cable-soil interface. The system is idealized, as shown in Fig. 1(a). The shear behavior of the interface during relative shear displacement between the nail/soil interface as shown in Fig. 1(b), is described numerically by: (1) the interface shear stiffness k_g ; (2) the interface cohesive strength c_g ; (3) the interface friction angle φ_g ; (4) the nail exposed perimeter p_g ; and (5) the effective confining stress σ_m (Fig. 1(c)). By this structural element the shear stress will depend on the effective confining stress σ_m .

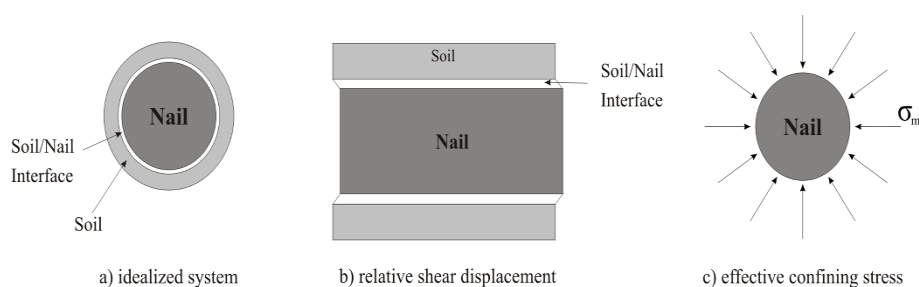


Fig. 1. Idealization of grouted nail system: (a) idealized system; (b) relative shear displacement; (c) effective confining stress

* Corresponding Author

E-mail addresses: skrazavi2010@gmail.com (Kazem Razavi), hajjalilue@tabrizu.ac.ir (Masoud Hajjalilue Bonab), www.SID.ir rezaei.ah@azaruniv.ac.ir (Amir Hasan Rezaei).

A 0.1 m thick continuous elastic surface (Shell structural element) is used to simulate the facing. Shell structural element is rigidly connected to the grid such that stresses develop within the shell as the grid deforms. Shell structural elements are used to model the structural support provided by any thin-shell structure in which the displacements caused by transverse-shearing deformations can be neglected.

To verify the numerical model, the full-scale test, conducted in 1986 for the French national research project (CLOUTERRE), is analyzed. The CLOUTERRE program involved a number of large-scale experimental walls related to understanding of soil nailed walls during in construction, in service loading condition and at failure. There is a reasonable agreement between the experimental results and those computed using the FD model employed herein.

3. Results and discussion

In order to better understanding of the soil nailed wall behavior, a typical 10 m high excavation with vertical face and horizontal backfill is considered for the present study. The soil nailed wall in this section and the following sections are designed based on the FHWA approach and have the factor of safety around 1.35 for the global stability. The designed 3D-FD soil nailed wall model with uniform length distribution of nails is shown in Fig. 2. Nail's length is 7.3 m inclined at 10 degrees and spaced at 2m V: 1. 5 m H in a grid pattern. Staged construction option is used to simulate the construction process in five stages E1, E2, ..., E5 as indicated in Fig. 2. In each excavation the placement of nails and facing is performed by inserting cable and shell structural elements. Two different shear strength properties are used for soil while the other soil properties are kept constant. The cohesion and friction angle of soil are considered (5Kpa, 40degree) as sand and (42Kpa, 10degree) Clay for models 1 (M1) and 2 (M2), respectively. Also, Young's modulus, Poisson ratio, dilation angle and specific weight of the soil are taken as 20 MPa, 0.3, 0 and 18 kN/m³, respectively.

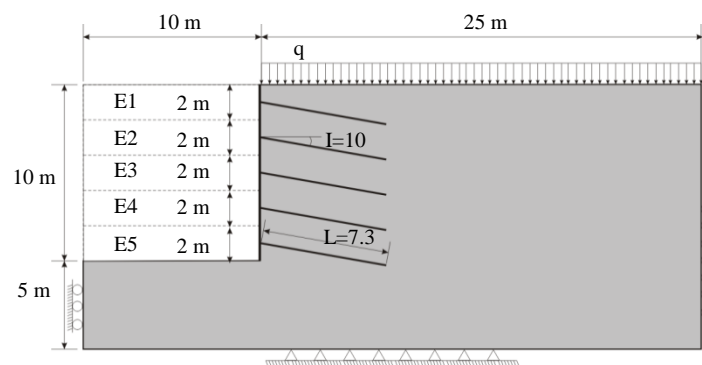


Fig. 2. Boundary conditions and model of the soil-nailed wall

Fig. 3 and 4 show the ground surface settlement and the vector of soil displacement respectively for sand, and clay. In addition, to prevent more figures, the maximum shear strain rate developed in each model is plotted in Fig. 4 with a dashed line. It can be found that the sand model with a high friction angle and low cohesion behaves completely different in comparison with the clay model. The ground surface settlement for clay is in a maximum value at the wall face and decreases to an insignificant settlement located in the maximum shear strain rate. In the other hand for the sand model, two kinds of settlements are generated: the first one is the settlement near the wall that its extension to the ground surface depends on the length of the nails at the top of the wall, and the second one is the settlement in the back of the nails. These settlements can be explained by the results illustrated in Fig. 4. In this Figure for the sand model, the soil nailed wall is divided by two zones using the line of the maximum shear strain rate: Zone 1 includes soil adjacent nails and facing, and the other zone is the triangular soil mass behind the zone 1. Because of the relatively small nail spacing used in this analysis, the zone 1 can be considered as a rigid body that tends to move horizontally toward the wall resulting in moving zone 2 rigidly in a direction that depends on the soil friction angle. The behavior of model 1 (Sand Model) is similar to the rigid retaining wall in active condition for cohesion-less soils. Therefore, ground surface settlement extends in a non-uniform trend and affects a larger distance behind the wall face in cohesion-less soils rather than cohesive soils. The results indicated that the upper nails control wall deformation in service state. Increasing the nail lengths at the top of the wall leading to decrease the wall displacement and ground surface settlement.

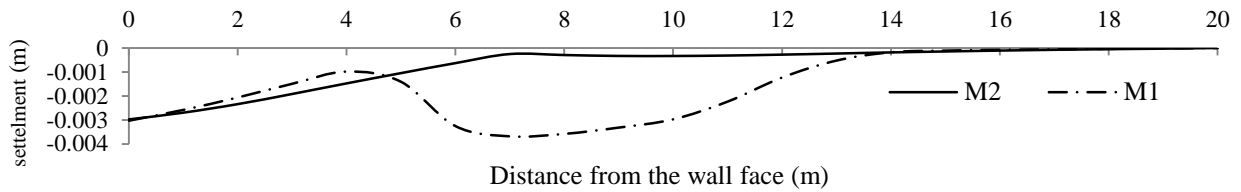


Fig. 3. Ground surface settlement due to excavation

Detailed studies have been performed to investigate several influence factors. Soil nailed wall shows different types of surface settlement for sand and clay. Surface settlement in granular soils is more extensive and non-uniform. The parametric study shows that every parameter which increases the area of zone 1, can cause uniform settlement, minimum surface settlement and minimum wall deformation. The study shows that by choosing longer nails at top of the wall rather than those are at the bottom of the wall leads to uniform settlement and consider one nail diameter for entire wall.

To simulate progressive failure and to study failure conditions by numerical modeling, a uniform pressure on top of the wall is added until the wall will be unstable, this method is famous as load collapse method (LCM). Slip surface obtained by the SRM is shown in Figure 5 and compared with the critical slip surface by LEM. Figure 5 illustrates that the shape of slip surface is almost bi-linear for sand model (M1) and circular for clay model (M2). At the bi-linear slip surface, the first plane begins at the toe and the point that the second plane begins located at the end of the second nail. It has been found that the shape of slip surface obtained by the numerical modeling and the LEM is very different for cohesion-less soils while it is similar for cohesion soil. Also, it has been resulted that longer nails at the bottom of the wall controls the stability of soil nailed wall at limit state while longer nails at the top of the wall controls the deformation of soil at service state.

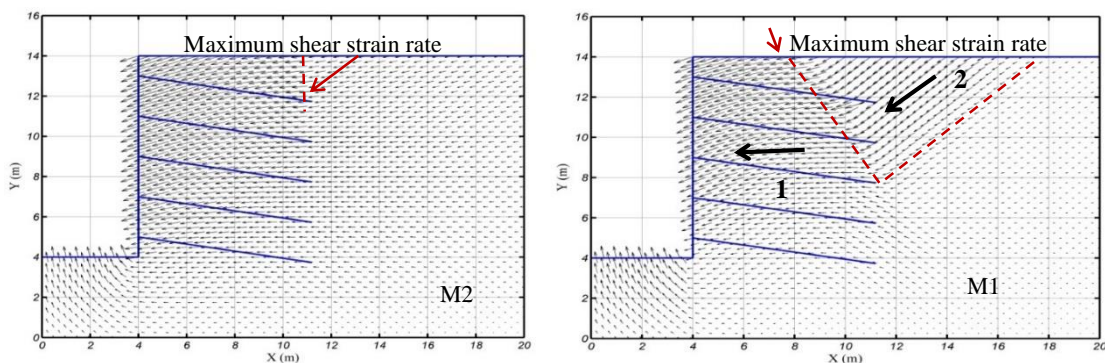


Fig. 4. Vector of soil displacement at service state

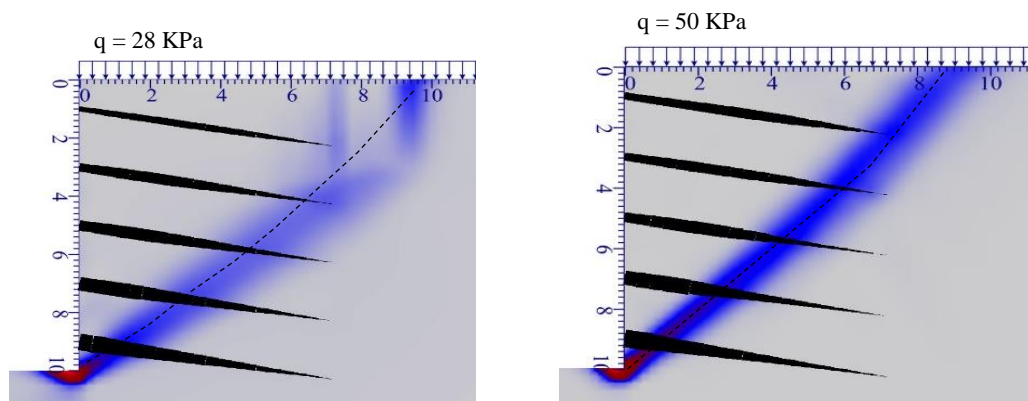


Fig. 5. Slip surface and tension force of soil nail obtained by the LCM (Mode2, c : 42Kpa, ϕ : 10 --- Model 1, c : 5Kpa, ϕ : 40)

4. References

Plumelle C, Schlosser F, Delage P, Knochenmus G, "French National Research Project on Soil Nailing: Clouterre. In Design and Performance of Earth Retaining Structures", American Society of Civil Engineers, 1986, 660-675.