1

فصل اول
کلیات

1-1 مقدمه

امروزه با توجه به رشد روزافزون جمعیت و نیاز به مسکن و سرپناه که اصلی‌ترین نیـاز بشـری مـی‌باشـد و کمبـود فضای مناسب شهری، بشر ناچار است به بلند مرتبه‌سازی روی آورد. ازاین‌رو به جهـت تـامین فضـاهای مناسـب بـرای سیستم‌های گرمایشی شامل موتورخانه‌ها و فضاهایی به منظور پارکینگ‌ها و انباری‌ها در این ساختمان‌ها بهترین گزینـه استفاده از طبقاتی در زیرزمین می‌باشد. ازاین‌رو در ساختمان‌های مرتفع به جهت تامین فضـاهای لازم و همچنـین بـالا بردن ظرفیت باربری خاک بستر در برابر فشار ناشی از ساختمان اقدام به گودبرداری می‌نمایند. در بحث نگهداری دیواره گود روش‌های مختلفی ارائه گردیده است که می‌توان به روش‌هایی مانند منبری‌زدن، اجرای خرپا، استفاده از تیرآهن یـا چوب به‌همراه ملات بنایی، استفاده از دیوار حائل، به‌کارگیری شمع، استفاده از میخ‌کوبی و یا استفاده از مهاری‌ها اشـاره کرد. در این تحقیق بر روی پایدارسازی گود با روش میخ‌کوبی در خاک تمرکز گردیده شده است. روش‌های سنتی برای عمق های زیاد (مثلاً 20 یا 30 متر) به هیچ وجه پاسخ‌گو نیستند و به همین خاطر استفاده از روش میخ‌کوبی بـه منظـور تثبیت گودهای درون شهری رواج یافته است که برای اجرای آن ابتـدا لازم اسـت انجـام مطالعـات ژئوتکنیـک جهـت شناخت جنس لایه‌های خاک و پارامترهای مقاومتی در دستور کار قرارگیرد.

2-1 هدف از تحقیق

در دیوارهای میخ‌کوبی شده، ظرفیت بیرون‌کشیدگی[1] میخ یک عامل مهم در تحلیل و طراحی دیوارهای میخ‌کوبی شده می‌باشد، که به دو عامل اصلی اندازه مجموعه میخ و مقاومت چسبندگی[2] بین خاک و ملات بستگی دارد. هدف از این تحقیق، بررسی اثر تغییرات در پارامترهای موثر بر ظرفیت بیرون‌کشیدگی میخ‌ها در گودبرداری‌های درون‌شهری می‌باشد. این پارامترها شامل تراکم خاک و نیز اثر سربار اعمالی به خاک می‌باشد.

3-1 ضرورت تحقیق

از بین دو عامل موثر در تحلیل و طراحی دیوارهای میخ‌کوبی شده، اندازه مجموعه میخ با توجه به فرضیات طراحی مشخص بوده ولی به دلیل عدم شناخت کافی در مورد رفتار اندرکنشی بین خاک و ملات در طول میخ نمی‌توان مقدار دقیقی برای این پارامتر مشخص کرد، و از طرفی یک فرآیند استاندارد آزمایشگاهی خاص نیز برای آن وجود ندارد. بنابراین مقدار آن توسط مهندس طراح با توجه به شرایط محل فرض گردیده و سپس بوسیله آزمایش‌های کنترلی در محل اصلاح می‌گردد. در نتیجه اگر بتوان یک روش آزمایشگاهی مناسب برای تخمین این پارامتر ارائه داد، می‌توان تا حد زیادی در طراحی بهینه این دیوارها کمک کرد.

4-1 مروری بر مطالب پایان‌نامه

فصل دوم این تحقیق به‌طور کلی در مورد مقاومت چسبندگی بین خاک و ملات در دیوارهای میخ کوبی شده می‌باشد. در این فصل ابتدا مقدمات میخ‌کوبی شامل تعاریف، تاریخچه، اجزاء تشکیل دهنده آن سیستم‌های مطرح می‌شود. سپس فرآیند احداث آن مورد بررسی قرار گرفته است. پس از آن به بحث مقاومت چسبندگی بین خاک وملات می‌پردازیم و مباحثی که در آن بیان می‌شود شامل تعریف مقاومت چسبندگی، پارامترهای موثر روی این مقاومت، مطالعات آزمایشی و عددی انجام گرفته روی آزمایش بیرون‌کشیدگی میخ، شبیه‌سازی یک روش آزمایشگاهی با توجه

1. Pullout Capacity
2. Bond Strength

به شرایط واقعی (جعبه آزمایش بیرون‌کشیدگی) و در پایان توضیحاتی در مورد مدل آزمایشی و نحوه انجام آن ارائه شده است.

در فصل سوم به طراحی آزمایشگاهی این تحقیق پرداخته می‌شود. در این فصل ابتدا مطالعه بر روی وسایل و تجهیزات آزمایشگاهی در دسترس بدلیل شناخت قابلیت‌ها و محدودیت‌های موجود در این تجهیزات و انتخاب مناسبترین آنها برای انجام آزمایشات بارگذاری و طراحی چیدمان[1] آزمایشات که شامل انتخاب نوع، جنس، ابعاد و موقعیت قرارگیری تجهیزاتی همچون قاب عکس‌العملی صلب، محفظه نگهدارنده خاک، جک هیدرولیکی، نیرو سنج[2]، تغییرمکان سنج[3] و دستگاه قرائت[4] می باشد بطور کامل توضیح داده شده است. در ادامه این فصل به شرح نحوه انجام آزمایشات این تحقیق پرداخته شده و پارامترهای مورد بررسی مشخص شده است. لازم به ذکر است این پارامترها بر اساس تحقیقات گذشته، امکانات موجود آزمایشگاهی و از همه مهم‌تر هدف‌گذاری انجام این پژوهش انتخاب شده تا بیشترین میزان کارایی را در رسیدن به نتایج مطلوب داشته باشند. بخش بعدی این فصل در مورد مصالح دانه‌ای بکار رفته در انجام آزمایشات می‌باشد و پارامترهای فیزیکی و مکانیکی این مصالح شامل درصد رطوبت، دانه‌بندی، Gs و.... که با استفاده از انجام آزمایشات مکانیک خاک تعیین شده است، در قالب جدولی به اختصار ارائه می‌شود.

روش انجام آزمایشات این پژوهش شامل چگونگی ساخت نمونه‌ها، متراکم کردن، تزریق ملات و استقرار مخزن حاوی خاک در زیر قاب عکس العمل صلب، نصب نیروسنج، جک هیدرولیکی و تغییرمکان سنج، اعمال بارگذاری و ثبت نتایج به همراه برنامه انجام آزمایشات مختلف و ترکیب پارامترهای موثر در ظرفیت بیرون‌کشیدگی با یکدیگر در آزمایشات مختلف برای تعیین تعداد آزمایشات مورد نیاز در این پایان‌نامه و رسیدن به اهداف از پیش تعیین شده برای این تحقیقات و همچنین طبقه‌بندی و منظم‌کردن روند انجام آزمایشات در انتهای فصل سوم آورده شده است.

معرفی نرم‌افزار استفاده شده در حین پژوهش موضوع اصلی فصل چهارم را شامل می‌شود. تحلیل به روش اجزاء محدود انجام می‌شود و نرم‌افزار مورد استفاده Plaxis 3D Foudation برای مدل‌سازی سه‌بعدی می‌باشد. لذا ضمن معرفی ویژگی‌های فنی نرم‌افزار، نحوه کاربرد آن در المان‌های محیطهای خاکی و سنگی مورد بررسی قرار گرفته است.

1. Setup
2. Load cell
3. L.V.D.T
4. Data logger

سپس به توصیف المان‌های صفحه استفاده شده در روند پژوهش پرداخته شده است. در ادامه فصل، ضمن معرفی مدل‌های رفتاری قابل مدل‌سازی در نرم افزار، مدل رفتاری موهر-کولمب که در روند پژوهش جهت مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است بطور مفصل توصیف می‌گردد. در نهایت با شرح مراحل مدل‌سازی در نرم افزار، فصل چهارم به پایان می‌رسد.

در فصل پنجم این تحقیق، نتایج بدست آمده از انجام آزمایشات مختلف و همچنین مدل‌سازی عددی بیان شده است. در بخش اول، نمودار نیرو– تغییر مکان مربوط به هر آزمایش به تفکیک وزن‌مخصوص خشک خاک و میزان فشار سربار اعمالی ارائه می‌شود و با مقایسه نتایج سه آزمایش مربوط به یک وزن‌مخصوص، رفتار بیرون‌کشیدگی میخ مورد نظر در حالت تراکم ثابت خاک تحت سربارهای مختلف مورد بررسی قرار می گیرد. همچنین با مقایسه نتایج کل آزمایشات، رفتار بیرون‌کشیدگی میخ مورد نظر در حالت‌های مختلف تراکم خاک مورد بررسی قرار می گیرد.

آخرین فصل پژوهش حاضر به "نتیجه‌گیری و پیشنهادات" اختصاص دارد. در این فصل به‌طور کلی روند تغییرات ظرفیت بیرون‌کشیدگی در برابر تغییر مکان میخ در اثر بیرون‌کشیدگی بر اثر تغییرات پارامترها در مدل‌سازی آزمایشی و عددی به‌عنوان نتیجه نهایی پژوهش بیان گردیده است.

2

فصل دوم

مقاومت چسبندگی بین خاک و ملات در دیوارهای میخ‌کوبی شده

1-2 مقدمه

دیوارهای مسلح در جا، از المان‌های مسلح کننده به منظور شکل دادن یک توده مرکب و پیوسته با خاک استفاده می‌کنند. المان‌های مسلح‌کننده عموماً میخ‌های (میلگردهای) فولادی، شمع‌های بتنی در جا با قطر کم یا لوله‌های فولادی با قطر کم هستند. یکی از متداول‌ترین دیوارهای مسلح در جا، دیوارهای میخ‌کوبی شده هستند. این دیوارها بوسیله حفاری چاهک‌های مایل با زاویه 15 درجه یا کمتر نسبت به سطح افق و در فواصل نزدیک به هم، قرار دادن میخ‌ها در داخل این چاهک‌ها و در نهایت تزریق ملات اجرا می‌شوند. تنش‌های برشی ناشی از جابجایی خاک به میخ‌ها منتقل شده و با تبدیل به نیروی کششی در میخ پایداری دیوار تضمین می‌شود. سطوح دیوارهای میخ‌کوبی شده معمولاً به‌صورت بتن‌پاشی، پانل‌های پیش‌ساخته یا بتن در جا می‌باشند. عموماً میخ‌کوبی در رس‌های نرم، خاک‌های آماسی[1] و رمبنده‌ای[2] که کنترل رطوبت وجود نداشته باشد، مواد آلی (مانند خاک مردابی)، خاکریزهای سست و ماسه های شل (N_{SPT} <10) انجام می‌گیرد [FHWA0-IF-03-017, 2003].

1. Expansive Soil
2. Collapsible Soil

2-2 تاریخچه میخ‌کوبی در خاک

مبدأ پیدایش میخ‌کوبی را می‌توان در یک سیستم نگهبان، برای حفاری‌های زیر زمینی در سنگ که به آن، شیوه تونل زنی اتریشی نوین[1] اطلاق می‌شد، دانست [Rabcewicz, 1964a, 1964b, 1965]. این روش مشتمل بر نصب آرماتور فولادی مقاوم (یعنی غیر پیش تنیده همانند مهار در خاک[2]) در سنگ می‌باشد که با اجرای یک ردیف بتن شاتکریت مسلح همراه می‌گردد. از اوایل دهه 1960 از این روش در پایدارسازی شیروانی‌های سنگی نیز بهره گرفته شده است [Lang, 1961].

میخ‌کوبی بر پایه فعال‌سازی مقاومت کششی مسلح‌کننده‌های فولادی در تغییر شکل‌های نسبتاً کوچک زمین و همچنین یکپارچگی ایجاد شده توسط شاتکریت استوار می‌باشد، و در صورت اجرا شدن در خاک به آن میخ‌کوبی در خاک[3] گفته می‌شود [FHWA0-IF-03-017, 2003].

یکی از نخستین کاربردهای میخ‌کوبی در خاک مربوط به سال 1972، جهت پروژه تعریض خط راه آهن در نزدیکی ورسایلز (Versailles) در فرانسه می‌باشد، که در آن یک ترانشه به ارتفاع 18 متر در ماسه توسط میخ‌های کوبیده شده در خاک پایدار گردید [Rabejac and Toudic, 1974]. از آن‌جا که این روش از نظر اقتصادی به صرفه بوده و عملیات اجرایی آن نسبت به دیگر روش‌های پایدارسازی سریع‌تر است، استفاده از آن در فرانسه و دیگر بخش‌های اروپا به سرعت افزایش یافت. در آلمان نیز برای اولین بار در سال 1975 از این روش استفاده شد [Stocker et al., 1979] و نخستین مطالعات اساسی بر روی دیوارهای خاکی میخ‌کوبی شده طی سال‌های 1975 تا 1981 توسط دانشگاه کالسروهه انجام گرفت [Gässler and Gudehus, 1981; Schlosser and Unterreiner, 1991].

در آمریکای شمالی نیز نخستین بار از دیوارهای خاکی میخ‌کوبی شده در کشورهای کانادا و مکزیک و در اواخر دهه 60 و اوایل دهه 70 میلادی استفاده شده است. یکی از اولین کاربردهای میخ‌کوبی در خاک در ایالات متحده آمریکا نیز مربوط به پایدارسازی گودبرداری با عمق 13/7 متری، در خاک ماسه سیلتی متراکم برای احداث بیمارستانGood Samaritan در پرتلند و در سال 1976 بود [Byrne et al., 1998]. در سال 1984، اداره حمل و

1. New Astrian Tunneling Method
2. Ground Anchore
3. Soil Nailing

نقل و بزرگراه‌های فدرال آمریکا (FHWA)[1] نخستین نمونه آزمایشی دیوار خاکی میخ‌کوبی شده با ارتفاع 12 متر را در نزدیکیCumberland Gap در ایالات کنتاکی ساخت و این اداره تاکنون بیشترین مطالعات و تحقیقات را بر روی این‌گونه دیوارها انجام داده است [Nicholson, 1986].

استفاده از دیوارهای خاکی میخ‌کوبی شده به‌صورت قابل توجهی در طول دهه گذشته در آمریکا افزایش یافته، زیرا این دیوارها در بسیاری موارد تنها جایگزین به صرفه برای دیوارهای حائل معمول به کار رفته در حفاری‌های از بالا به پایین و در کاربردهای موقتی و دائمی می‌باشند.

3-2 معرفی میخ‌کوبی در خاک

میخ‌کوبی خاک یکی از روش‌های مسلح کردن خاک با استفاده از میله‌های فولادی نزدیک به هم در داخل یک شیب یا گودبرداری، هم‌زمان با ساخت از بالا به پایین می‌باشد این میله‌ها معمولاً میلگردهای مسلح‌کننده‌ای به قطر 20 تا 30 میلی‌متر که در گمانه‌های از پیش حفر شده (قطر تا حدود 15 سانتی‌متر) همراه با تزریق ملات قرار می‌گیرند یا با استفاده از دستگاه حفاری ضربه‌ای تحت زاویه 10 تا 15 درجه زیر سطح افق رانده می‌شوند.

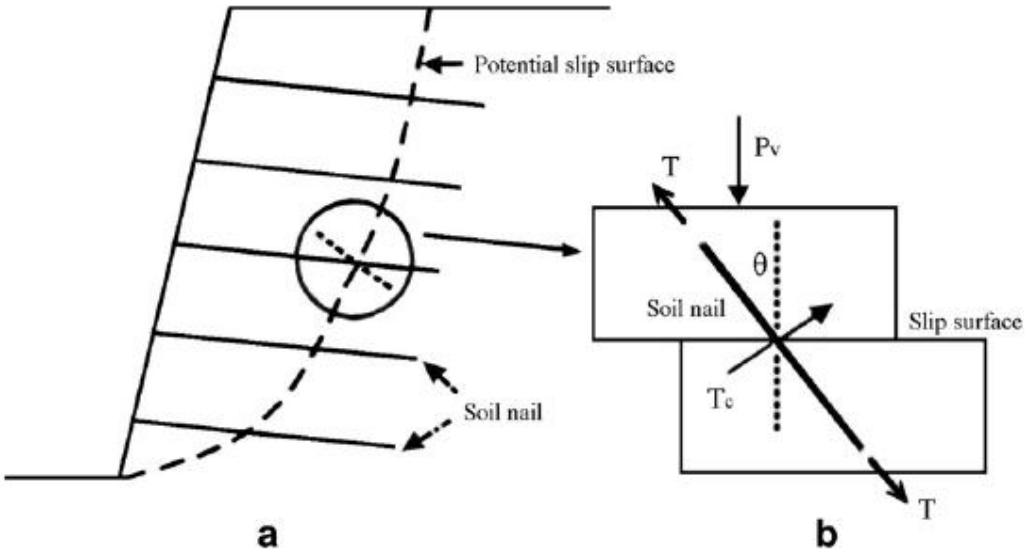
زهکشی خاک توسط زهکش‌های نواری فراهم شده و سطح حفاری هم‌زمان با ساخت از بالا به پایین توسط بتن شاتکریت یا پانل‌های بتنی پیش‌ساخته محافظت می‌گردد. هدف از میخ‌کوبی خاک کاهش تغییر مکان و افزایش پایداری شیروانی‌ها، شیب‌ها و حفاری‌ها توسط برخورد این میخ‌ها با صفحات دارای پتانسیل گسیختگی می‌باشد.

در پایداری یک دیوار میخ‌کوبی شده دو مکانیزم وجود دارد و دیوار میخ‌کوبی‌شده طبق این دو مکانیزم عمل می‌کند: (شکل 2-1)

1- نیروهای مقاوم کششی در میخ‌ها که بایستی در ناحیه مقاوم خاک به‌واسطه اصطکاک یا چسبندگی بسیج شده در سطح مشترک میخ و خاک انتقال یابد.

2- نیروهای مقاوم برشی که در محل تماس میخ‌ها با صفحات گسیختگی خاک در میخ‌ها به‌وجود می‌آیند.

1. Federal Highway Administration

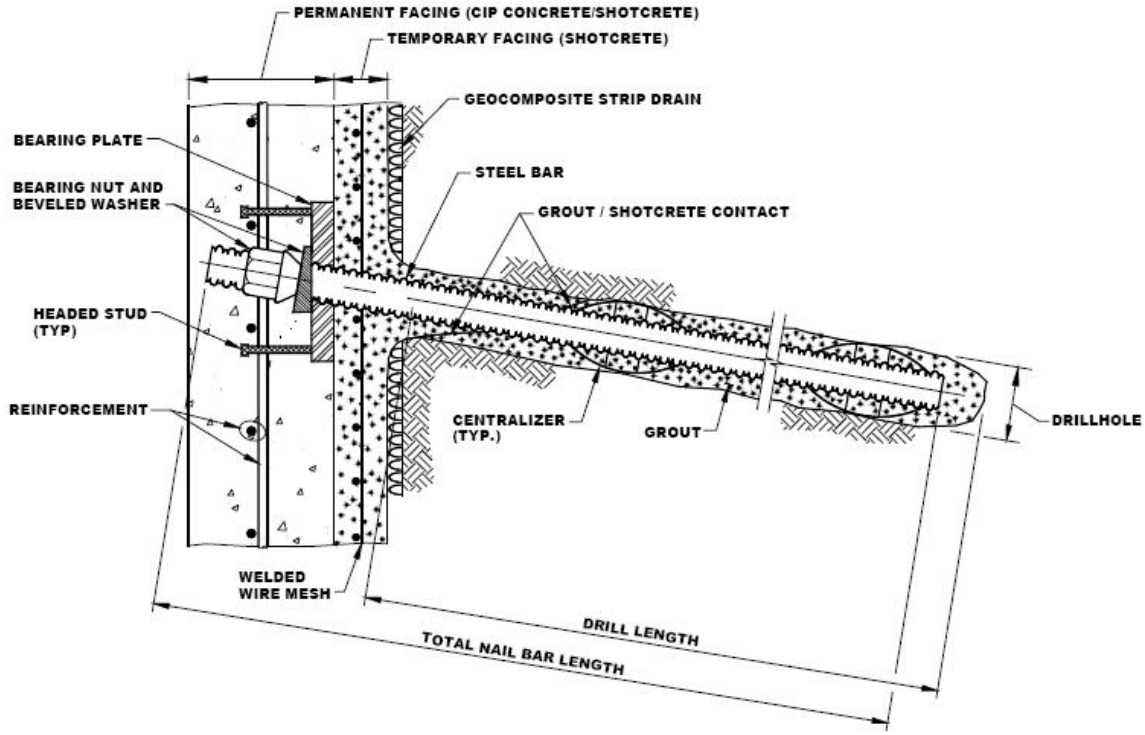


شکل 2-1 : نیروهای کششی و برشی در میخ

یکی دیگر از کاربردهای میخ‌کوبی، جهت پایدارسازی زمین لغزه‌ها می‌باشد که معمولاً در این حالت میخ‌ها تقریباً عمود بر پایه لغزش نصب می‌گردند و در اثر حرکت زمین لغزش تحت اثر نیروهای برشی قرار می‌گیرند. دیوارهای میخ‌کوبی شده به دلیل انعطاف پذیری، سرعت، سهولت اجرا و اقتصادی‌تر بودن نسبت به دیگر سیستم‌های پایدارسازی طی سه دهه اخیر مورد توجه بسیار قرار گرفته‌اند. همچنین این روش بیشترین کاربرد را در خاک‌های دانه‌ای یا سخت و خاک‌های رس سیلتی با پلاستیسته پایین دارد.

4-2 اجزاء اصلی یک دیوار میخ کوبی شده

همان‌گونه که در بخش قبل گفته شد، نصب میخ‌ها به‌وسیله حفاری و تزریق ملات پرکاربردترین روش میخ‌کوبی در خاک می‌باشد. حال به‌منظور آشنایی با اجزای تشکیل‌دهنده یک دیوار میخ‌کوبی شده، هر یک از این اجزاء در شکل 2-2 نشان داده شده‌اند:



شکل 2-2 : اجزای اصلی یک دیوار میخ‌کوبی شده [FHWA0-IF-03-017, 2003]

1- میله‌های مسلح‌کننده فولادی (میخ‌ها)

2- مجموعه سر میخ[1]

3- ملات

4- هم‌مرکزکننده‌ها[2]

5- رویه دیوار[3]

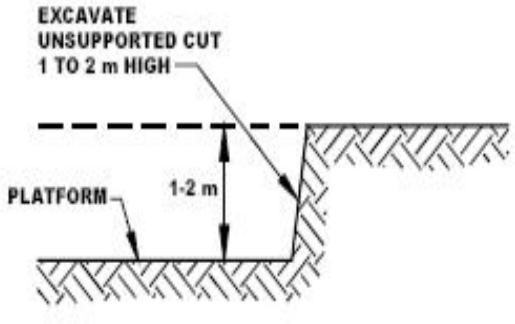
6- سیستم زهکش[4]

1. Nail Head
2. Centralizer
3. Wall Facing
4. Drainage System

5-2 فرآیند احداث

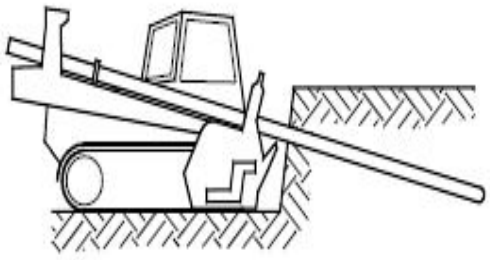
فرآیند متداول احداث دیوار میخ‌کوبی شده با استفاده از میله‌های (میخ‌های) فولادی با توجه به اشکال 2-3 تا 2-8 به‌صورت زیر می‌باشد [FHWA0-IF-03-017, 2003]:

- گام 1- خاکبرداری: خاکبرداری اولیه تا عمقی که در آن، سطح خاکبرداری شده توانایی پایداری بدون مهار برای مدت کوتاهی را داشته باشد (معمولاً 24 تا 48 ساعت)، انجام می‌گیرد. عمق هر بار خاکبرداری معمولاًبین 1 تا 2 متر و عرض آن به اندازه‌ای است که عملیات نصب به راحتی انجام پذیرد. (شکل 2-3)



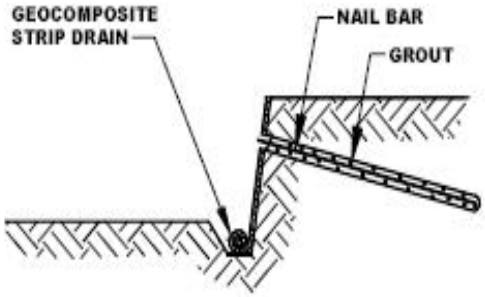
شکل 2-3 : خاکبرداری [FHWA0-IF-03-017, 2003]

- گام 2- حفاری سوراخ‌ها: سوراخ‌ها با یک طول (محاسبه می‌شود)، قطر (بین 10 تا 15 سانتی‌متر)، شیب (بین 0تا 15 درجه) و فواصل افقی و قائم معین (بین 1/25 تا 2 متر) حفاری می‌شوند. (شکل 2-4)



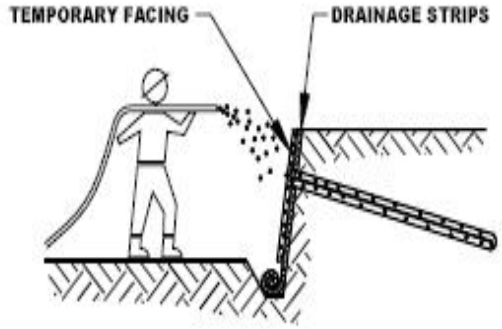
شکل 2-4 : حفاری سوراخ‌ها [FHWA0-IF-03-017, 2003]

- گام 3- نصب میخ‌ها و تزریق ملات: میله‌های فولادی (میخ‌ها) در سوراخ‌های حفاری شده قرار داده می‌شوند. قبل از داخل کردن میخ‌ها هم‌مرکزکننده دور آن‌ها قرار می‌گیرد تا به صحیح قرار گرفتن میخ‌ها کمک کند. همچنین این وسیله باعث ایجاد یک پوشش مناسب از ملات برای جلوگیری از خوردگی میخ‌ها می‌شود. لوله ترمی نیز در این مرحله وارد حفره می‌شود و تمام آن را با ملات سیمان پر می‌کند. ملات معمولاً با فشار تزریق کم یا به صورت ثقلی سوراخ را پر می‌کند. قبل از شروع گام 4 نوارهای زهکشی ژئوکامپوزیتی بر روی سطح خاکبرداری شده قرار داده می‌شوند. این نوارها در قسمت پایین دیوار نیز گسترده می‌شوند تا آب‌های جمع‌آوری شده را از پای دیوار بوسیله یک زهکش طولی خارج کنند. (شکل 2-5)



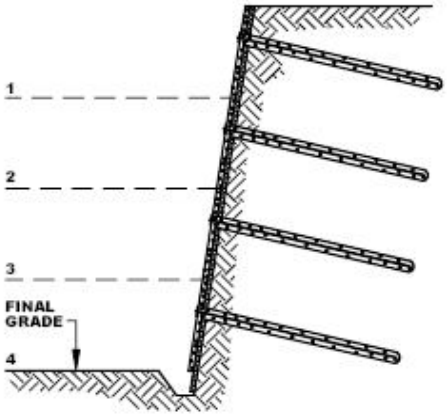
شکل 2-5 :نصب میخ و تزریق ملات [FHWA0-IF-03-017, 2003]

- گام 4- احداث سطوح شاتکریت شده موقت: پس از مراحل بالا یک سطح موقت به‌منظور نگهداری دیواره حفاری شده احداث می‌شود. معمول‌ترین روش، شامل یک لایه شاتکریت مسلح‌شده با مش سیمی و ضخامت 100 میلی‌متر است، که تقریباً در وسط ضخامت لایه قرار داده می‌شود. طول این مش سیمی باید به‌گونه‌ای باشد که حداقل یک ردیف از این مش با مش بعدی روی‌هم قرار گیرند. با توجه به زمان عمل‌آوری بتن در سطح موقت، صفحه باربر فولادی بر روی سر میخ که از حفره بیرون زده شده است، قرار می‌گیرد. سپس مهره و واشر بر روی سر میخ و صفحه محکم می‌شوند (این عمل معمولاً 24 ساعت پس از شاتکریت انجام می شود). قبل از انجام مرحله بعد، شاتکریت باید حداقل مقاومت فشاری 10/5 مگاپاسکال (حداقل مقاومت فشاری 3 روزه) را کسب کند. (شکل 2-6)



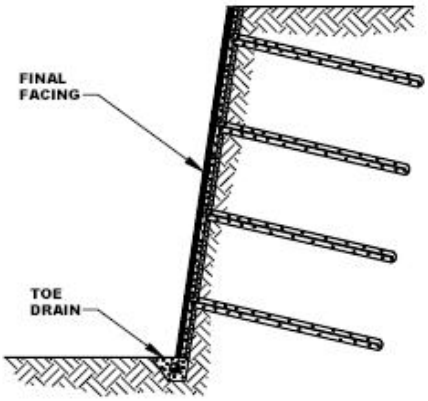
شکل 2-6 : احداث سطوح شاتکریت [FHWA0-IF-03-017, 2003]

- گام 5- احداث ترازهای بعدی: مانند گام های 1 تا 4 ترازهای بعدی نیز اجرا می‌شوند. (شکل 2-7)



شکل 2-7 : احداث ترازهای بعدی [FHWA0-IF-03-017, 2003]

- گام 6- احداث سطح نهایی (دائمی): پس از آن‌که خاکبرداری به انتها رسید و مراحل فوق انجام شد، سطح نهایی که شامل یک لایه بتن شاتکریت مسلح یا پانل‌های پیش‌ساخته بتنی می‌باشد، مطابق شکل 2-8 اجرا می‌شود.



شکل 2-8 : احداث سطح نهایی [FHWA0-IF-03-017, 2003]

2-6 کاربردهای دیوارهای میخ‌کوبی شده

دیوارهای میخ‌کوبی شده در پایدارسازی خاکبرداری‌های قائم یا نزدیک به قائم بسیار مناسب می‌باشند و از کاربردهای آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

1- احداث و پایدارسازی ترانشه‌ها در اطراف راه‌های برون‌شهری

2- تعمیر و بهسازی سازه‌های نگهبان موجود

3- خاکبرداری‌های دائمی و موقتی در محیط شهری (مثلا دیواره اطراف بزرگراه‌های درون‌شهری)

2-7 مقاومت چسبندگی بین خاک و ملات در دیوارهای میخ‌کوبی شده

ظرفیت بیرون کشیدگی[1] میخ یک عامل مهم در تحلیل و طراحی دیوارهای میخ‌کوبی شده می‌باشد، که به دو عامل اصلی اندازه مجموعه میخ و مقاومت چسبندگی[2] بین خاک و ملات بستگی دارد. از بین این دو عامل اندازه مجموعه میخ با توجه به فرضیات طراحی مشخص بوده ولی به دلیل عدم شناخت کافی در مورد رفتار اندرکنشی بین خاک و ملات در طول میخ نمی‌توان مقدار دقیقی برای این پارامتر مشخص کرد، و از طرفی یک فرآیند استاندارد آزمایشگاهی خاص نیز برای آن وجود ندارد. بنابراین مقدار آن توسط مهندس طراح با توجه به شرایط محل فرض

1. Pullout Capacity
2. Bond Strength

گردیده و سپس به‌وسیله آزمایش‌های کنترلی در محل اصلاح می‌گردد. در نتیجه اگر بتوان یک روش آزمایشگاهی مناسب برای تخمین این پارامتر ارائه داد، می توان طراحی را با دقت بهتری انجام داد. در ادامه این فصل یک روش آزمایشگاهی مناسب برای تخمین این پارامتر ارائه شده است.

8-2 مقاومت چسبندگی

ظرفیت بیرون‌کشیدگی میخ یک عامل مهم در تحلیل و طراحی دیوارهای میخ‌کوبی شده می‌باشد، و با توجه به اندازه میخ (یعنی قطر و طول میخ) و مقاومت چسبندگی، q_s ، بدست می‌آید. مقاومت چسبندگی را می‌توان مقاومت برشی بسیج شده در طول سطح مشترک خاک و ملات تزریقی در نظر گرفت. مقاومت چسبندگی به ندرت در آزمایشگاه اندازه‌گیری می‌شود و دارای فرآیند استاندارد آزمایشگاهی خاصی نیست. بنابراین در مرحله طراحی این پارامتر اغلب توسط مهندس طراح فرض می‌گردد (با توجه به شرایط میدانی و شرایط خاک) و سپس به‌وسیله آزمایش بیرون کشیدگی[1] در طی ساخت اصلاح می‌شود. البته فرض یک مقدار منطقی برای این پارامتر به علت عدم قطعیت‌هایی که در بررسی رفتار اندرکنش خاک-میخ وجود دارد، نیاز به تجربه مهندس طراح دارد [Franzen, 1998].

9-2 پارامترهای موثر بر مقاومت بیرون‌کشیدگی میخ

عواملی وجود دارند که روی مقاومت بیرون‌کشیدگی میخ تاثیر می‌گذارند مانند شرایط تنش، روش‌های نصب میخ، شرایط خاک و شرایط سطح میخ و ... که در ادامه به مهم‌ترین آن‌ها پرداخته شده است.

1-9-2 شرایط خاک

ویژگی‌هایی از خاک که روی مقاومت بیرون‌کشیدگی اثر می‌گذارند شامل مقاومت، اندازه ذرات، اتساع و درجه اشباع خاک می‌باشند.

1. Pullout Test

یکی از مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار بر مقاومت بیرون‌کشیدگی میخ، خاک اطراف میخ می‌باشد. برای مثال، اگر یک میخ با روش یکسان در رس سیلتی، ماسه و شن ماسه‌دار نصب شود، ممکن است مقادیر مقاومت بیرون‌کشیدگی به‌ترتیب حدود 40-80کیلوپاسکال، 100کیلوپاسکال و 200کیلوپاسکال حاصل شود [Bruce and Jewell 1987]. اندازه و شکل ذرات که بستگی به اتساع خاک دارند، به‌طور عمده روی رفتار بیرون‌کشیدگی و مقاومت بیرون‌کشیدگی موثرند. برای خاک‌هایی که دارای ذرات بزرگ‌تر و یکنواخت‌تر با اشکال نامنظم هستند، هنگام بیرون کشیدن میخ ذرات چرخیده و تغییر آرایش داده که منجر به اتساع خاک می‌شود. اگر اتساع خاک محدود شود، افزایش تنش قائم نتیجه می‌شود که آن نیز منجر به افزایش مقاومت بیرون‌کشیدگی می‌شود. [Luo *et al*., 2000] به مطالعه تاثیر اتساع روی مقاومت بیرون‌کشیدگی پرداخت. یک درجه اشباع متوسط خاک می‌تواند برای مقاومت بیرون‌کشیدگی مفید باشد. خاک خیلی خشک یا خیلی خیس خوب نمی‌باشد. [Chu and Yin, 2005a] و [Pradhan, 2003] راجع به تاثیر درجه اشباع خاک روی مقاومت بیرون‌کشیدگی تحقیق کردند که مشاهده شد در خاک‌های تقریبا اشباع، مقاومت بیرون-کشیدگی پائین است.

2-9-2 شرایط تنش

شرایط تنش که روی مقاومت بیرون‌کشیدگی تاثیر می‌گذارد، قاعدتا به تنش قائم وارد به سطح میخ برمی‌گردد. برخی از محققین بر این باورند که تنش قائم، به فشار سربار خاک در عمق مربوط است مانند [Jewell, 1990]. از طرفی، بعضی دیگر از محققین و نویسندگان بر این عقیده‌اند که تنش قائم مستقل از عمق خاک است.

[Cartier and Gigan, 1983 ; Schlosser and Guilloux, 1981]

2-9-3 روش‌های نصب میخ

میخ‌ها که با روش‌های مختلف نصب می‌شوند، دارای مقاومت بیرون‌کشیدگی متفاوتی هستند. عموما مقاومت بیرون‌کشیدگی میخ‌هایی که با حفاری و تزریق ملات سیمان به‌وجود می‌آیند و میخ‌هایی که به‌وسیله تزریق پرفشار ملات ایجاد می‌شوند بیشتر از آن‌هایی است که در خاک کوبیده شده ویا رانده می‌شوند. برای میخ‌های کوبیده‌شده و

فرورونده، مقاومت بیرون‌کشیدگی اولی 50% بزرگتر از مقاومت بیرون‌کشیدگی دومی است [Franzen, 1998]. برای میخ‌های تزریق‌شده، فشار تزریق بر مقاومت بیرون‌کشیدگی اثرگذار است [Milligan et al., 1997].

4-9-2 شرایط سطح میخ

زبری سطح میخ، یکی دیگر از پارامترهایی است که بر مقاومت بیرون‌کشیدگی تاثیرگذار است. [Tei, 1993] و [Milligan and Tei, 1998] یک سری آزمایش‌های بیرون‌کشیدگی در ماسه‌ها روی میخ‌های با سطح صاف و زبر انجام دادند. تغییرمکان‌های معمولی نیاز داشت که مقاومت بیرون‌کشیدگی بیشینه برای میخ‌های صاف نصف مقاومت بیرون‌کشیدگی بیشینه برای میخ‌های زبر بدست آید. برای میخ‌های صاف، مشاهده شد که مقاومت بیرون‌کشیدگی آن بسیار کمتر از مقاومت بیرون‌کشیدگی میخ‌های زبر تحت همان شرایط آزمایش است. همچنین از مقایسه قطر میخ با اندازه ذرات خاک مشخص شد که تاثیراتی روی مقاومت بیرون‌کشیدگی میخ دارند.

برای میخ‌های حفاری و تزریق شده در خاک غیرچسبنده، میزان فشار سربار و طبیعت خاک دانه‌ای بر روی زاویه اصطکاک خاک اثر می‌گذارد، که متعاقب آن مقاومت چسبندگی نیز تأثیر می‌پذیرد. همچنین اگر میخ‌ها در خاک‌های دانه‌ای کوبیده شوند، مقاومت چسبندگی به‌طور عمده اصطکاکی بوده و با توجه به مقاومت اصطکاکی خاک به عواملی نظیر فشار سربار در امتداد طول چسبندگی، تراکم نسبی خاک و روش نصب میخ بستگی دارد. زاویه اصطکاک ظاهری در سطح مشترک خاک و میخ تقریباً بین $0/75\ \tan\varphi'$ تا $\tan\varphi'$ است که φ' زاویه اصطکاک مؤثر خاک‌های دانه‌ای می‌باشد. [Elias and Juran, 1991]

برای میخ‌های حفاری و تزریق شده در خاک ریزدانه، مقاومت چسبندگی 0/25 تا 0/75 برابر مقاومت برشی زهکشی‌نشده این خاک‌ها می‌باشد [Shaw-Shong, 2005]. عموماً مقاومت چسبندگی با مقاومت برشی زهکشی نشده افزایش می‌یابد (اما نه لزوماً به‌طور خطی). برای خاک‌های نرم‌تر، نسبت مقاومت چسبندگی به مقاومت برشی زهکشی نشده ، q_s/S_u ، بیشتر از خاک‌های سفت‌تر می‌باشد.

مقادیر متداول مقاومت چسبندگی برای میخ‌های حفاری و تزریق شده در خاک‌های مختلف و با روش‌های مختلف حفاری در جدول 2-1 آورده شده است . باید توجه داشت که مقادیر این جدول فقط مربوط به تزریق ثقلی هستند، زیرا مقاومت چسبندگی می‌تواند به‌طور قابل توجهی با فشار تزریق افزایش یابد. برای فشارهای تزریق کمتر از 350 کیلوپاسکال در خاک، مقاومت چسبندگی تا 2 برابر بیشتر از مقاومت چسبندگی بدست آمده از طریق تزریق ثقلی می‌باشد. در سنگ افزایش مقاومت چسبندگی به‌خاطر فشار تزریق خیلی بیشتر است و نرخ افزایش مقاومت چسبندگی نسبت خاص با فشار تزریق ندارد، اما تمایل به رسیدن به یک مقدار محدود را دارا می‌باشد.

جدول 2-1 : تخمین مقاومت چسبندگی در خاک‌ها و سنگ‌های مختلف [FHWA0-IF-03-017, 2003]

Material	Construction Method	Soil/Rock Type	Ultimate Bond Strength, q_u (kPa)
Rock	Rotary Drilled	Marl/limestone	300 - 400
		Phyllite	100 - 300
		Chalk	500 - 600
		Soft dolomite	400 - 600
		Fissured dolomite	600 - 1000
		Weathered sandstone	200 - 300
		Weathered shale	100 - 150
		Weathered schist	100 - 175
		Basalt	500 - 600
		Slate/Hard shale	300 - 400
Cohesionless Soils	Rotary Drilled	Sand/gravel	100 - 180
		Silty sand	100 - 150
		Silt	60 - 75
		Piedmont residual	40 - 120
		Fine colluvium	75 - 150
	Driven Casing	Sand/gravel	
		low overburden	190 - 240
		high overburden	280 - 430
		Dense Moraine	380 - 480
		Colluvium	100 - 180
	Augered	Silty sand fill	20 - 40
		Silty fine sand	55 - 90
		Silty clayey sand	60 - 140
	Jet Grouted	Sand	380
		Sand/gravel	700
Fine-Grained Soils	Rotary Drilled	Silty clay	35 - 50
	Driven Casing	Clayey silt	90 - 140
	Augered	Loess	25 - 75
		Soft clay	20 - 30
		Stiff clay	40 - 60
		Stiff clayey silt	40 - 100
		Calcareous sandy clay	90 - 140

مقادیر جدول مقداری محافظه کارانه می‌باشند و فقط برای طراحی اولیه می‌تواند مورد استفاده قرار گیرند. مقاومت چسبندگی می‌توان با استفاده از نتایج PMT (آزمایش پرسیومتر[1])، که بصورت رابطه 2-1 می‌باشد:

[FHWA0-IF-03-017, 2003]

$$q_s\,(\text{kPa}) = 14\,P_L\,(\text{MPa})[\,6 - P_L\,(\text{MPa})\,] \qquad (1\text{-}2)$$

که P_L فشار حدی ثبت شده به مگاپاسکال است، که توسط پرسیومتر اندازه‌گیری می‌شود و q_s مقاومت چسبندگی است، که به کیلوپاسکال محاسبه می‌شود.

همچنین مقاومت چسبندگی بین خاک و ملات در خاک‌های برجا را می‌توان با استفاده از عدد SPT و با استفاده از رابطه 2-2 نیز بدست آورد: [FHWA0-IF-03-017, 2003]

$$q_s\,(\text{kPa}) = (5\text{-}6) \times \text{SPT-N} \qquad (2\text{-}2)$$

در حالت وجود سنگ، مقاومت چسبندگی را می‌توان از روابط بدست آمده از مقاومت فشاری نمونه سنگ بدست آورد. مؤسسه Post-Tensioning [PTI, 1996] پیشنهاد می‌کند که تنش چسبندگی نهایی بین سنگ و ملات می‌تواند تقریباً 10 درصد مقاومت فشاری محدود نشده سنگ باشد، که حداکثر آن را می‌توان به 4000 کیلوپاسکال محدود کرد. در هر حال پیشنهاد می‌شود که مقاومت‌های چسبندگی برای سنگ، از مقادیر جدول 2-1 فراتر نروند.

[FHWA0-IF-03-017, 2003]

2-10 آزمایش کنترلی بیرون‌کشیدگی میخ

آزمایش کنترلی بیرون‌کشیدگی میخ در محل، به‌منظور اصلاح بار طراحی میخ‌ها و بررسی صحت مقاومت چسبندگی فرض شده بین خاک و ملات، قبل و در حین نصب میخ‌ها انجام می‌گیرد، و معمولاً تعداد آن با توجه به بزرگی پروژه و تفاوت در پروفیل خاکی که میخ در آن نصب شده است، متغیر است. ولی بهتر است حداقل دو آزمایش کنترلی در هر لایه خاک و یا آزمایش بر روی 5% کل میخ‌های نصب‌شده انجام گیرد. با استفاده از این آزمایش اطلاعات زیر بدست می‌آیند:

1. Pressuremeter Test

1- تعیین مقاومت چسبندگی نهایی (اگر گسیختگی ناشی از بیرون کشیدگی رخ دهد)

2- درستی ضریب اطمینان در نظر گرفته شده در طراحی

از اطلاعات بدست آمده، بدین ترتیب می‌توان استفاده کرد که از حاصل‌ضرب ظرفیت بیرون‌کشیدگی مجاز طراحی در ضریب اطمینان، می توان حداقل بار آزمایش کنترلی را بدست آورد و این نیرو را به مجموعه میخ و ملات اعمال کرد و مشاهده کرد که آیا گسیختگی تحت اثر این نیرو رخ می‌دهد یا خیر. از طرفی می‌توان مجموعه میخ و ملات را با یک نرخ افزایش نیروی ثابت تا لحظه گسیختگی کشید، و از حاصل تقسیم نیروی بدست آمده از این روش بر ظرفیت بیرون کشیدگی مجاز طراحی، ضریب اطمینان را کنترل کرد. مثلاً اگر ضریب اطمینان بیرون کشیدگی 2 باشد (معمولاً ضریب اطمینان در این حالت 2 در نظر گرفته می‌شود)، حداقل بار آزمایش بایستی 200% ظرفیت بیرون‌کشیدگی مجاز باشد تا فرآیند میخ‌کوبی و مقاومت چسبندگی بین خاک و ملات مورد قبول باشد.

دیگر معیار کنترلی در این آزمایش، اندازه‌گیری جابجایی حداکثر (ΔL) می‌باشد که می‌بایست برای ضریب اطمینان 2 از 80% جابجائی الاستیک تئوری طول مهار نشده[1](UL) بیشتر باشد. این معیار به شکل $\Delta L > \Delta L_{min}$ بیان شده که ΔL_{min} حداقل جابجائی قابل قبول بوده که از رابطه 2-3 بدست می‌آید:

[FHWA0-IF-03-017, 2003]

$$\Delta L_{min} = 0.8 \frac{P^* UL}{EA} \qquad (3\text{-}2)$$

که :

P : حداکثر بار اعمالی در آزمایش

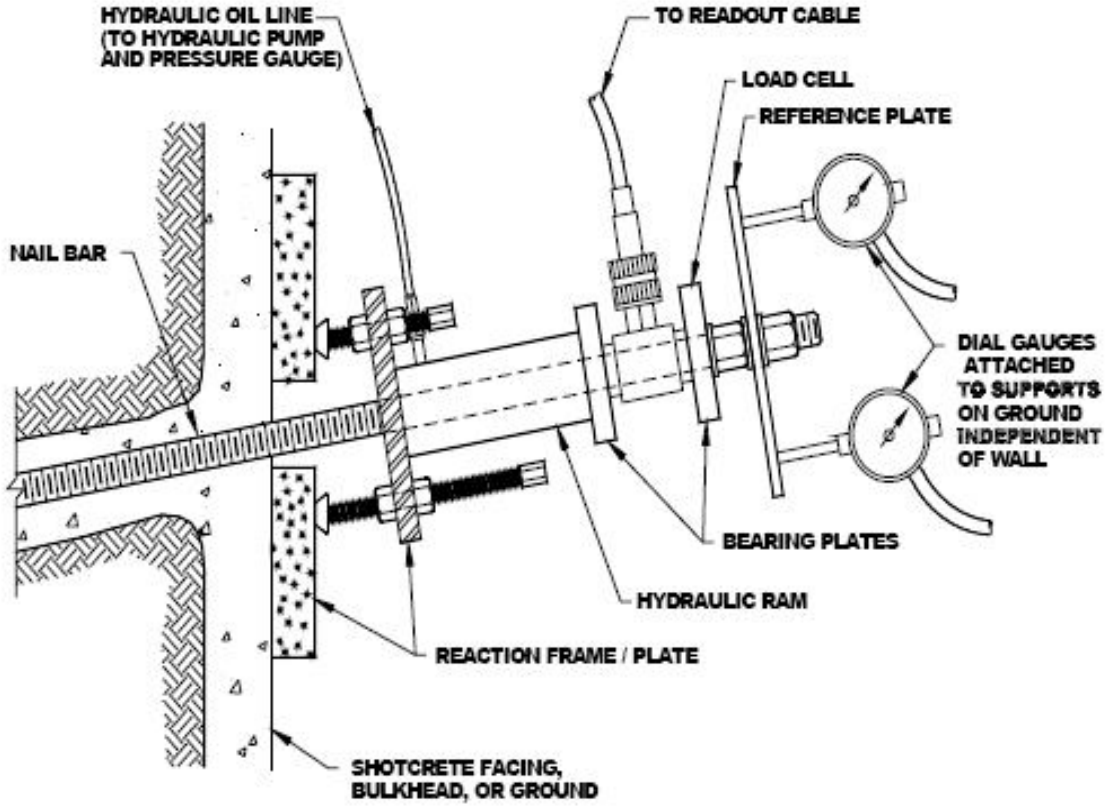
UL : طول مهار نشده (طولی که ملات ریزی نشده)

A : سطح مقطع آرماتور میخ

E : مدول یانگ فولاد (معمولاً 200000 مگاپاسکال)

1. Unbonded Length

فرآیند آزمایش بدین صورت است که همان‌طور که در شکل 2-9 دیده می‌شود، یک جک هیدرولیکی به میخ متصل شده به‌طوری که محور آن‌ها هم‌راستا باشند. همچنین یک قاب عکس العمل[1] بین سطح شاتکریت و جک نصب می‌گردد تا عکس العمل ناشی از فرآیند کشش به‌طور مستقیم بر مجموعه ملات و میخ تأثیر نگذارد. جابجایی سر میخ‌ها نیز توسط یک یا دو گیج که با زاویه حدود 5 درجه نسبت به محور میخ نصب شده‌اند، اندازه گرفته می‌شود. دقت گیج‌ها می بایست 0/02 میلی‌متر بوده و حداقل ظرفیتی به اندازه تغییرمکان طولی الاستیک میخ‌ها در حداکثر بار آزمایش که معمولاً بین 25 تا 50 میلی‌متر است، را داشته باشند. از طرفی برای کنترل ثابت بودن نرخ افزایش بار و اندازه آن یک نیروسنج[2] در کنار جک نصب می‌شود.



شکل 2-9 :آزمایش بیرون کشیدگی میخ [FHWA0-IF-03-017, 2003]

1. Reaction Frame
2. Load Cell