بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی عمران

بررسی عملکرد سیستم‌های نگهداری ترکیبی در گودبرداری‌های عمیق

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مکانیک خاک و پی

سیداحمد سجادفر

استاد راهنما

دکتر محمدعلی روشن‌ضمیر

استاد مشاور

مهندس سعید مهدوری

۱۳۹۳

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی عمران

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مکانیک خاک و پی

آقای سیداحمد سجادفر

تحت عنوان

بررسی عملکرد سیستم‌های نگهداری ترکیبی در گودبرداری‌های عمیق

در تاریخ ۹۳/۱۰/۲۴ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر محمدعلی روشن‌ضمیر
۲- استاد مشاور پایان‌نامه	مهندس سعید مهدوری
۳- استاد داور	دکترعباس اسلامی حقیقت
۴- استاد داور	دکترلهراسب فرامرزی
۵- سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر عبدالرضا کبیری سامانی

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتـایج مطالعـات، ابتکـارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به

حضرت ولی‌عصر (عج)

و

پدر و مادر بزرگوارم

تقدیر

سپاس خدای را که سخنوران در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند؛ و سلام و درود بر محمّد(ص) و خاندان پاک او، طاهران معصوم؛ هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است . . .

بر خود لازم می‌دانم در این جا از زحمات بی‌پایان پدر و مادر بزرگوارم و کمک‌های دلسوزانه استاد راهنما و استاد مشاورم، آقایان دکتر روشن ضمیر و مهندس مهدوری تقدیر و تشکر به عمل آورم و آنان را به خداوند منان سپرده و برایشان دعای خیر مسئلت دارم.

چکیده

تاکنون سیستم‌های نگهداری گودبرداری زیادی گسترش یافته‌اند که چندین روش هم اکنون رایج‌ترند. این روش‌ها شامل تیرنگهبان و تخته‌گذاری، سپرزنی، دیوار شمعی حفرشده، دیوار دیافراگمی، مهار با خرپای فولادی، مهار متقابل و میخ‌کوبی در خاک می‌باشند که هرکدام دارای محدویت‌ها و مزایایی می‌باشند. اکثر تحقیقات به طور جداگانه به هر کدام از روش‌های سنتی مهار گود پرداخته‌اند و ترکیب آن‌ها کم‌تر مورد توجه بوده است. انکرها در سیستم‌هایی مانند دیوار دیافراگمی و سیستم شمع نگهبان و تخته‌گذاری، یک عامل فرعی محسوب شده و با هدف بهینه‌سازی نمودار لنگر به کار رفته است. در سیستم ترکیبی میخ‌کوبی- آنکراژ هم که اخیرا مورد توجه واقع شده، چینش یک در میان میخ و انکر صرفا در جهت قائم مد نظر بوده و با توجه به ساده‌تر بودن تحلیل دوبعدی، از ترکیب هم‌زمان میخ و انکر در راستای قائم و افق که مستلزم یک تحلیل سه‌بعدی است، چشم‌پوشی شده است. به علت شباهت میخ و انکر، می‌توان با یک تغییر حداقلی در مصالح، با به کار بردن انکرها همراه با میخ‌ها در چینش‌های مختلف، پارامتر حداکثر تغییرشکل جانبی دیوار را کاهش داد که این بررسی در این پژوهش مدنظر قرار گرفت. از جمله معایب سیستم میخ‌کوبی، نشست-های اضافی در زمین مجاور گود می‌باشد. سیستم پیشنهادی جدید شمع- میخ‌کوبی، تا حدی این مشکل را برطرف می-کند و می‌تواند در رفع محدودیت برخورد میخ‌ها با تاسیسات شهری نیز مدنظر قرار گیرد. در این پژوهش، روش تفاضل محدود با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ جهت بررسی عملکرد این سیستم‌ها به کار گرفته شد. در گودهایی به عمق ۲۰m و سربار ۶۰kPa در زمین مجاور گود، تحلیل‌هایی انجام شد و نتیجه‌گیری گردید که با چینش جدید در سیستم ترکیبی میخ‌کوبی- آنکراژ، تغییرشکل جانبی دیوار ۱۴٪ کاهش یافت. هم‌چنین شمع‌ها در سیستم ترکیبی شمع- میخ-کوبی، باعث کاهش ۲۵/۸٪ در حداکثر نشست زمین مجاور گود می‌گردند.در مطالعه پارامتری انجام شده در این پژوهش نیز حداکثر طول بهینه میخ‌ها برابر ۰/۸ عمق گود و حداکثر طول گیرداری شمع‌ها برابر ۰/۷۵ عمق گود به دست آمد و نتیجه شد که طول بیشتر میخ‌ها و گیرداری بیشتر شمع‌ها از این مقادیر، در کاهش نشست اثری ندارند.

واژه‌های کلیدی: گودبرداری، دیوار میخ‌کوبی‌شده، آنکراژ، شمع درجاریز، محدودیت‌ها، سیستم‌های ترکیبی، نرم‌افزار $FLAC^{3D}$

فهرست مطالب

چکیده ۱

فصل اول: کلیات

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ اهداف پایان‌نامه و ضرورت انجام تحقیق ۳

۱-۳ معرفی فصول پایان‌نامه ۴

فصل دوم: انواع روش‌های مهار گود

۲-۱ مقدمه ۵

۲-۲ روش‌های رایج مهار گود ۶

۲-۲-۱ میخ‌کوبی ۶

۲-۲-۲ سپرزنی ۷

۲-۲-۳ سیستم شمع نگهبان و تخته‌گذاری ۸

۲-۲-۴ سیستم دیوار دیافراگمی ۱۰

۲-۲-۵ سیستم دیوار شمعی حفرشده ۱۱

۲-۲-۶ خرپای فلزی ۱۳

۲-۲-۷ روش مهار متقابل ۱۳

۲-۲-۸ روش مهارسازی ۱۴

۲-۲-۹ دوخت به پشت ۱۴

۲-۳ جمع‌بندی ۱۵

فصل سوم: بررسی مطالعات گذشته

۳-۱ مقدمه ۱۶

۳-۲ بررسی تحقیقات مربوط به روش‌های رایج مهار گود ۱۶

۳-۲-۱ سیستم دیوار دیافراگمی ۱۶

۳-۲-۲ سیستم دیوار شمعی حفرشده ۲۲

۳-۲-۳ سیستم میخ‌کوبی در خاک ۲۶

۳-۳ بررسی تحقیقات مربوط به سیستم‌های ترکیبی یا اصلاح شده ۳۶

۳-۴ بررسی تغییرشکل‌های حاصل از حفاری‌های عمیق ۴۳

۳-۵ جمع‌بندی ۴۹

فصل چهارم: معرفی نرم‌افزار $\mathbf{FLAC^{3D}}$ و مدل‌سازی مساله

۴-۱ مقدمه ۵۲

۴-۲ آشنایی با نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ ۵۳

۴-۲-۱ مراحل حل مساله در $FLAC^{3D}$ ۵۳

۴-۲-۲ نحوه استفاده از نرم‌افزار ۵۳

۴-۲-۲-۱ ایجاد شبکه‌بندی (مش) ۵۳
۴-۲-۲-۲ تعریف شرایط مرزی ۵۴
۴-۲-۲-۳ المان‌های سازه‌ای موجود در $FLAC^{3D}$ ۵۵
۴-۳ انتخاب مدل رفتاری ۵۸
۴-۴ مدل‌سازی ۵۹
۴-۴-۱ ایجاد مدل اولیه ۶۰
۴-۴-۲ حفاری مرحله‌ای و میخ‌کوبی در هر مرحله ۶۱
۴-۴-۳ جداول مشخصات مدل‌های تحلیل‌شده ۶۳
۴-۵ صحت‌سنجی نرم‌افزار ۶۶
فصل پنجم: ارائه و تحلیل نتایج
۵-۱ مقدمه ۷۲
۵-۲ مقایسه عملکرد دو سیستم میخ‌کوبی و سیستم ترکیبی میخ‌کوبی- آنکراژ ۷۳
۵-۲-۱ بررسی نیم‌رخ تغییرشکل جانبی در این دو سیستم ۷۳
۵-۲-۲ بررسی نیم‌رخ نشست سطح زمین در این دو سیستم ۷۵
۵-۲-۳ بررسی نمودار فشار جانبی خاک در این دو سیستم ۷۶
۵-۲-۴ بررسی نیروی بیشینه میخ‌ها [و انکرها] در این دو سیستم ۷۷
۵-۳ مقایسه عملکرد دو سیستم میخ‌کوبی و سیستم ترکیبی شمع- میخ‌کوبی ۷۸
۵-۳-۱ بررسی نیم‌رخ تغییرشکل جانبی در این دو سیستم ۷۸
۵-۳-۲ بررسی نیم‌رخ نشست سطح زمین در این دو سیستم ۷۹
۵-۳-۳ بررسی نمودار فشار جانبی خاک در این دو سیستم ۸۰
۵-۳-۴ بررسی نیروی بیشینه میخ‌ها در این دو سیستم ۸۱
۵-۴ بررسی اثر عوامل مختلف بر روی پارامترهای طراحی در سیستم ترکیبی شمع- میخ‌کوبی ۸۳
۵-۴-۱ اثر طول میخ‌ها ۸۳
۵-۴-۲ اثر فاصله شمع‌ها ۸۵
۵-۴-۳ اثر صلبیت خمشی شمع‌ها (قطر شمع‌ها) ۸۸
۵-۴-۴ اثر میزان گیرداری شمع‌ها ۹۰
۵-۴-۵ اثر چسبندگی خاک ۹۳
۵-۴-۶ اثر زاویه اصطکاک داخلی خاک ۹۵
فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۶-۱ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۹۸
۶-۲ پیشنهادات برای تحقیقات آتی ۱۰۰
مراجع ۱۰۱

فصل اول
کلیات

۱-۱ مقدمه

به علت رشد روزافزون جمعیت و کمبود فضای مناسب در شهرها جهت احداث ساختمان‌های بلندمرتبه و تامین فضاهایی نظیر پارکینگ‌ها، انباری و غیره، نیاز به انجام حفاری[۱] در زمین و استفاده از فضاهای زیرزمینی به طور ملموسی احساس می‌شود. در این راستا، عدم رعایت اصول حاکم برگودبرداری‌ها با بروز ناپایداری‌هایی در توده خاک، ریزش دیواره‌های گود و تحمیل خسارت‌هایی به سازه‌های مجاور همراه بوده است. از مهم‌ترین اصول لازم در گودبرداری‌ها، طراحی یک سیستم نگهبان مناسب و کنترل مقادیر جابه‌جایی‌های دیواره گود[۲] و همچنین کنترل نشست‌های زمین[۳] مجاور گود می‌باشد.

تقریبا تمام پروژه‌های مهندسی عمران (نظیر ساختمان‌ها، جاده‌ها، تونل‌ها، پل‌ها، خطلوله‌ها و مجراهای فاضلاب) کم و بیش نیازمند گودبرداری و حفاری خاک هستند. سیستم‌های مهاربندی حفاری زیادی گسترش یافته‌اند که چندین روش هم اکنون رایج‌ترند. این روش‌ها شامل تیرنگهبان و تخته‌گذاری[۴]، سپرزنی[۵]، دیوار شمعی حفرشده[۶]، دیوار

۱-Excavation

۲-Wall Deflection

۳-Ground Settlement

۴-Soldier Beam and Lagging

۵-Sheet Piling

۶-Bored Pile Wall

دیافراگمی[۱](یا دوغابی)، مهار با خرپای فولادی، مهار متقابل[۲] و میخ‌کوبی در خاک[۳] می‌باشند. معمولا سیستم نگهبان مناسب، براساس ضروریات عملیاتی و امکانات ساخت و همچنین هزینه‌های اجرا انتخاب می‌گردد. سیستم نگهداری خاک معمولا فقط بخش کوچکی از یک پروژه بزرگ‌تر است. سیستم‌های مهاربندی‌ای که می‌توانند سریعا کامل شده یا به موازات عملیات دیگر ساخته شوند، در اولویت‌اند. سیستم مهاربندی می‌تواند موقت یا دائمی باشد و سیستم موقت ممکن است برچیده و یا در محل رها شود [۳].

۱-۲ اهداف پایان‌نامه و ضرورت انجام تحقیق

در اکثر مراجع مهندسی ژئوتکنیک و نشریات علمی معتبر، به هر کدام از روش‌های گفته شده در بالا به طور مجزا پرداخته شده و ترکیب آن‌ها کمتر مورد توجه بوده است. در سال‌های اخیر استفاده از سیستم‌های ترکیبی مطرح گردیده و مورد استفاده قرار گرفته است و ضروری به نظر رسیده تا روش‌های فوق در راستای قائم و افقی در وجوه مختلف گود با هم ترکیب شوند.

برای هر کدام از روش‌های مرسوم، یک روش دستی برای محاسبات مربوط به تحلیل پایداری (با استفاده از نمودارهای فشار محرک و مقاوم *کولمب* و *رانکین* و نیز نمودارهای تجربی *ترزاقی-پک*) موجود می‌باشد، اما توزیع واقعی فشار در حالتی ترکیبی از سیستم‌های رایج و همچنین ماهیت میدان تنش-کرنش در خاک پشت سیستم نگهبان همچنان مبهم است و به پژوهش‌های بیشتری در این زمینه نیاز است.

از جمله ترکیبات ممکن، ترکیب سیستم دیوار میخ‌کوبی‌شده و آنکراژ است. یک انکر به لحاظ مصالح مورد استفاده (یعنی عضو کششی فولادی و دوغاب[۴])، بسیار شبیه یک میخ می‌باشد؛ البته بسته به مقدار نیرویی که یک انکر قرار است تحمل کند و هم‌چنین مقدار نیروی پیش‌تنیدگی ایجادشده در آن، بایستی از مصالح فولادی با مقاومت‌های بالاتر در انکر استفاده کرد که این نیز مستلزم تکنولوژی اجرای پیشرفته‌تر، مخصوصا در حین پیش‌تنیده کردن انکرها می‌باشد. به علت این شباهت، کاربرد این عناصر در کنار یکدیگر کاملا معقول می‌باشد. منتها باید دقت کرد که اختلاف نیروی طراحی در این عناصر فاحش نباشد. سابقا، استفاده از انکرها در سیستم‌هایی مانند دیوار دیافراگمی و سیستم شمع نگهبان و تخته‌گذاری، به عنوان یک عامل کمکی تلقی می‌شده و بیشتر با هدف تغییر و بهینه‌سازی نمودار لنگر و نهایتا بهینه‌سازی طرح و کاهش هزینه همراه با یک سیستم اصلی به کار می‌رفته است. به عبارت دیگر، آنکراژ به صورت یک سیستم مجزا مطرح نبوده و بیشتر به عنوان یک عامل کمکی و بهینه‌ساز مورد استفاده واقع می‌شده است. در مواردی هم که از انکرهای زیاد در ترکیب با سیستم‌های دیگری نظیر میخ‌کوبی به کار رفته است، چینش یک در میان (و یا چینش-های نا منظم دیگر) صرفا در جهت در ارتفاعی مورد نظر بوده و ترکیب هم‌زمان انکر ومیخ در راستای قائم و افق مغفول مانده است. از جمله مزیت‌های چینش اخیر، توزیع یک‌نواخت‌تر تنش و کرنش در هر دو راستای قائم و افق می‌باشد که با هم‌زمان شدن با وجود نیروی پیش‌تنیدگی انکرها، کاهش جابه‌جایی جانبی دیوار را در پی دارد.

---

[۱]-Diaphragm/Slurry Wall

[۲]-Strut

[۳]-Soil Nailing

[۴]-Grout

سیستم ترکیبی دیگر، ترکیب دیوار شمعی حفرشده و میخ‌کوبی است. افزودن اجزای سازه‌ای مانند شمع، رفتار کلی خاک مجاور دیوار را به لحاظ توزیع تنش و تغییرشکل تحت تاثیر قرار داده و با ترکیب مناسب با میخ‌کوبی می‌تواند سیستمی با عملکرد مناسب‌تر و بازدهی بیشتر به دست دهد. در این‌جا، ایجاد یک *دیوار شمعی حفرشده با شمع‌های مجزا* مد نظر بوده و نهایتا بررسی توزیع جدید تنش و تغییرشکل و رفتار جدید دیوار در دستور کار قرار خواهد گرفت. از جمله نواقص سیستم میخ‌کوبی، نشست‌های اضافی در زمین مجاور گود می‌باشد که در این سیستم ترکیبی، رفع نقص یادشده و نیز مزایای احتمالی بیشتر، دنبال می‌شود.

۱-۳ معرفی فصول پایان‌نامه

پایان‌نامه حاضر شامل شش فصل به شرح زیر می‌باشد:

در فصل اول کلیاتی راجع به موضوع پایان‌نامه و ضرورت انجام تحقیق ارائه شده است.

فصل دوم انواع روش‌های مهار گود در مناطق شهری را خلاصه و با یکدیگر مقایسه کرده است.

در فصل سوم به تناسب موضوع پایان‌نامه، منابع تخصصی و مطالعات پیشین به طور فراگیری مورد بررسی قرار گرفته‌اند و به علت آن که روش‌های مهار گود متعددند، لازم بود تا گستره مناسبی از پژوهش‌های قبلی مورد توجه واقع شوند.

فصل چهارم، به معرفی نرم‌افزار $\mathrm{FLAC^{3D}}$ و قابلیت‌های آن، انتخاب مدل‌ها و نحوه مدل‌سازی مساله و صحت‌سنجی نرم‌افزار خواهد پرداخت.

فصل پنجم تجزیه و تحلیل داده ها و نتایج و نکات مختلف در این رابطه را در دستور کار قرار داده و نتایج تحلیل‌های انجام شده ارائه خواهند شد.

در فصل ششم نیز نتیجه‌گیری کلی این تحقیق خلاصه شده و پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی ارائه خواهد شد.

فصل دوم

انواع روش‌های مهار گود

۲-۱ مقدمه

در دنیای کنونی، با افزایش جمعیت کمبود فضای شهری به طور محسوسی رو به فزونی است. اجرای سازه‌های مختلف مهندسی همچون ساختمان‌ها، تقاطع‌های زیرسطحی و مترو نیاز به گودبرداری در شهرها را افزایش داده است. انجام عملیات گودبرداری ناگزیر موجب بر هم خوردن تعادل ژئواستاتیکی می‌گردد که این به نوبه خود موجب تغییرشکل‌ها و ناپایداری‌های زیر می‌گردد:

۱- جابه‌جایی جانبی دیواره‌های گود و به عبارتی ناپایداری دیواره‌ها

۲- نشست زمین مجاور گود و امکان تحمیل خسارت بر آن‌ها

۳- برآمدگی و تورم کف گود (که می‌تواند در شرایطی به جوشش و ناپایداری کف بیانجامد.)

با توجه به اهمیت، موقعیت و اقتصاد پروژه، روش‌های مختلفی مانند شمع نگهبان وتخته‌گذاری، میخ‌کوبی، سپرزنی، خرپای فلزی، دیوار دیافراگمی و... برای نگهداری دیواره گود به کار می‌روند که هر یک دارای مزایا و معایبی است. در ادامه، خلاصه‌ای از ویژگی‌های روش‌های فوق آورده شده است.

۲-۲ روش‌های رایج مهار گود:

۲-۲-۱ میخ‌کوبی

این روش برگرفته از روش تونل‌سازی اتریشی بوده و از آن ایده گرفته شده است. این روش اولین بار در سال ۱۹۶۰ در ونکوور[۱] در آمریکای شمالی به کار گرفته شد. در کشور فرانسه نیز طی سال‌های ۱۹۷۳-۱۹۷۲ در شهر ورسای[۲]، شرکت‌های بویگس[۳] و سلتاش[۴] این روش را در پروژه افزایش خطوط ریلی[۵] به کار بردند. در کشور آلمان نیز طی سال‌های ۱۹۸۱-۱۹۷۵ یک پروژه میخ‌کوبی با نام بودنورن لونگ[۶] با همکاری دانشگاه کارلسرو[۷] و شرکت پیمانکاری بائر[۸] انجام گرفت. با گسترش این روش در فرانسه و نبود یک روش قابل اعتماد برای طراحی، پروژه تحقیقاتی کلوتر[۹] در سال ۱۹۸۶ در دستور کار قرار گرفت[۱].

این روش بر پایه قرار دادن میله‌هایی در داخل زمین است که همانند آرماتور در بتن مسلح، نقش تقویت و مسلح کردن خاک را بر عهده دارند. در این روش برای دوختن توده خاک از مهارهای کششی فولادی با فواصل نزدیک به هم استفاده می‌شود. مهارهای کششی معمولا از آرماتورهای فولادی با قطر ۲۰ الی ۴۰ میلی‌متر بوده که درون یک چاله حفاری شده با قطر ۷۶ الی ۱۵۰ میلیمتر قرارگرفته و درون چاله تزریق می‌گردد. فواصل بین مهارهای کششی در حدود ۱ الی ۲ متر می‌باشد و طول هر کدام از آن‌ها نیز در حدود ۷۰ الی ۱۰۰ درصد ارتفاع گود می‌باشد و حداقل شیب آن‌ها نسبت به افق حدود ۱۵ درجه می‌باشد. در شکل ۲-۱، مراحل اجرا به‌صورت شماتیک نشان داده شده است. ابتدا بسته به نوع خاک، تا عمق ۱ تا ۲/۵m از سطح زمین حفاری صورت می‌گیرد (مرحله ۱). سپس دستگاه حفار وارد کف گود شده و معمولا با یک زاویه تمایل ۱۵ درجه‌ای زیر افق چاله‌ای در دیواره ایجاد می‌کند (مرحله ۲) و میلگرد درون این چاله قرار گرفته و تزریق دوغاب انجام می‌شود (مرحله ۳). در ادامه، نوارهای زهکش (جهت از بین بردن فشار آب تجمع‌یافته در پشت دیوار) نصب شده و بتن‌پاشی صورت می‌گیرد و صفحات فولادی تکیه‌گاهی نیز با مهره‌ای که به انتهای رزوه‌شده میخ‌ها پیچ می‌شود، بر روی رویه بتن‌پاشی‌شده مستقر می‌گردند (مرحله ۴). به همین ترتیب، مراحل گفته‌شده تا رسیدن به تراز کف گود تکرار می‌شوند (مراحل ۵ و ۶). باید توجه داشت که رویه شاتکریت شده روی ترانشه‌های حفاری شده نقش سازه‌ای نداشته اما می‌توان از آن جهت اطمینان برای پایداری موقت خاک بین مهارها استفاده نمود [۲].

۱-Vancouver

۲-Versailles

۳-Bouygues

۴-Soletanche

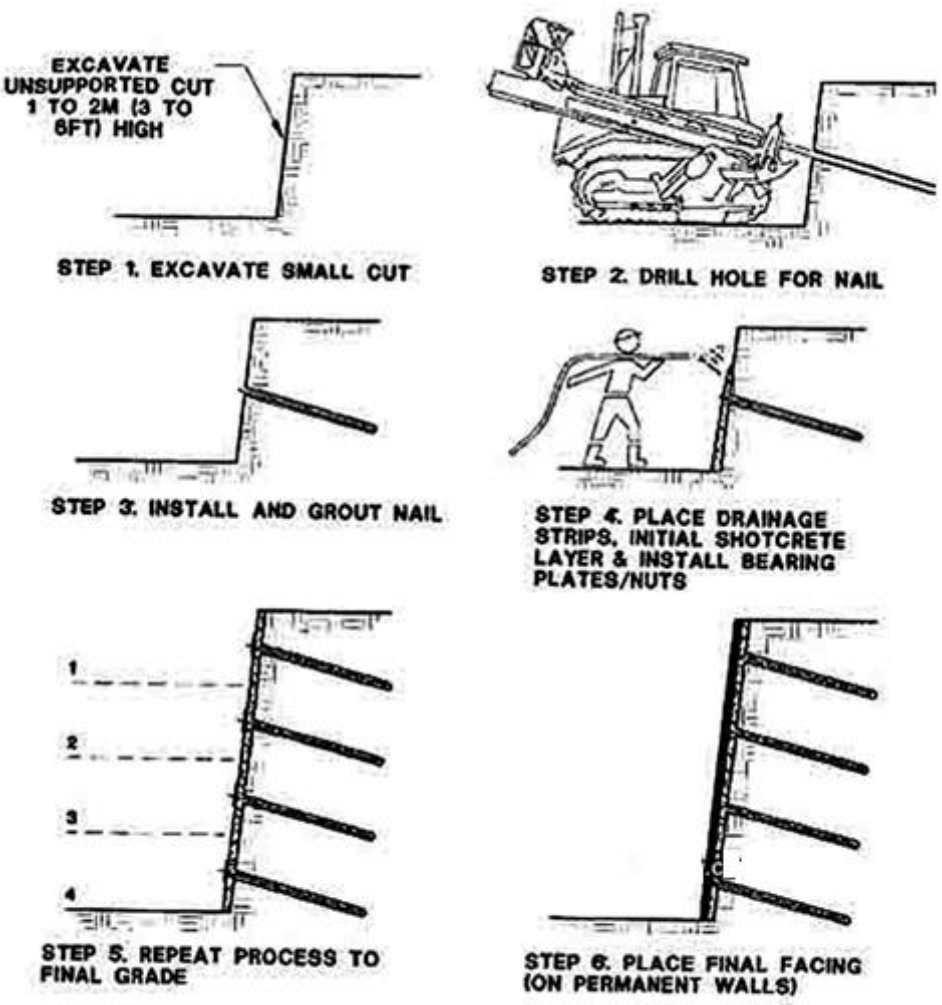
۵-SNCF

۶-Bodenvernahe Lung

۷-Karlsruhe

۸-Bauer

۹-Clouterre



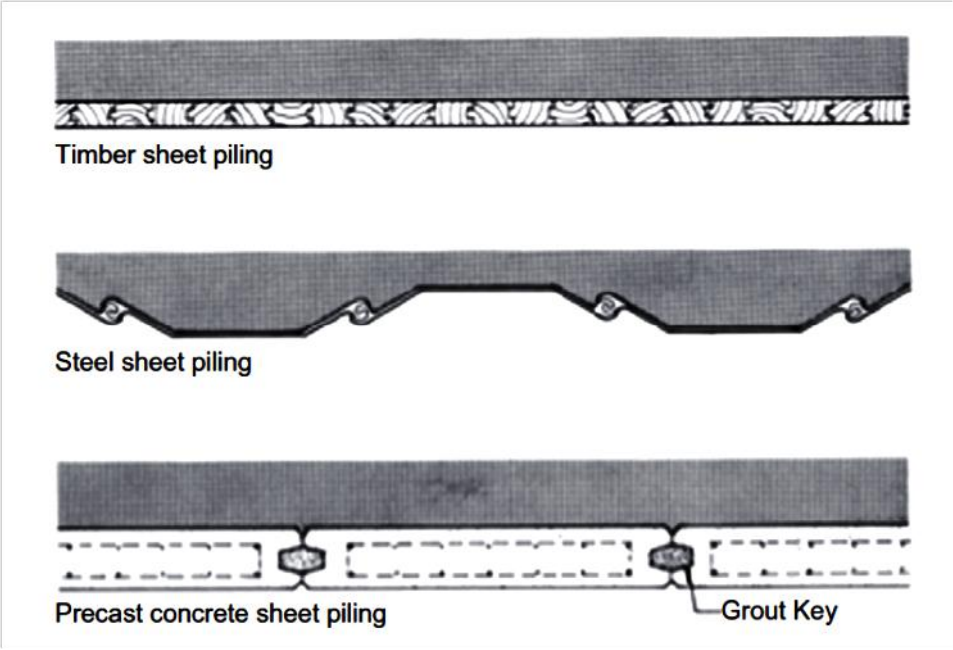
شکل ۲-۱: مراحل اجرای میخ‌کوبی در خاک [۳۰]

۲-۲-۲ سپرزنی

سپرها توسط رانش یا لرزش قطعات پیش‌ساخته به درون زمین احداث می‌گردند. اگرچه ممکن است طیفی از مصالح از قبیل الوار، فولاد و بتن پیش‌ساخته به عنوان سپر به کار روند، اما سپرهای فولادی از همه رایج‌ترند (شکل ۲-۲). این سیستم معمولا برای مهاربندی موقت گود قابل کاربرد است. اگر سپرها قابل بازیافت نباشند، خیلی پرهزینه‌اند. نصب این سیستم مهاربندی در خاک ماسه‌ای و رسی، بدون توجه به عمق سفره آب نسبتا آسان است. نصب در خاک-های حاوی قلوه سنگ و سنگ‌های بزرگ‌تر ممکن است بسیارمشکل یا غیرممکن باشد. سپرهای فولادی به راحتی انعطاف‌پذیرند. اگر حفاظت از ناحیه مجاور گود ضروری باشد، فقط ارتفاع‌های کم گودبرداری می‌تواند بدون مهار توسط این روش پشتیبانی شود.

بسته به شرایط خاک، سپرها با چکش‌های ضربه‌ای یا لرزشی به درون خاک رانده می‌شوند. قطعه سپر بعدی توسط در هم رفتن اتصالات در کناره‌های هر قطعه، به سپر موجود متصل می‌گردد. سیستم سپرزنی، یک مانع نفوذ ناپذیر را تشکیل می‌دهد. بیشینه عمق حفاری H که از لحاظ اقتصادی با این روش پشتیبانی می‌گردد، نوعا بین ۵ تا ۱۰ متر متغیر

است. عمق مدفون‌شدگی سپر در زیر گود، مقاومتی را در برابر نیروی جانبی و لنگر واژگونی ناشی از خاک به وجود می‌آورد. برای سپرزنی در خاک‌های دانه ای، مدفون‌شدگی پایه بسته به مقاومت نفوذ خاک، نوعا بین ۰/۷۵H و ۲H متغیر است.



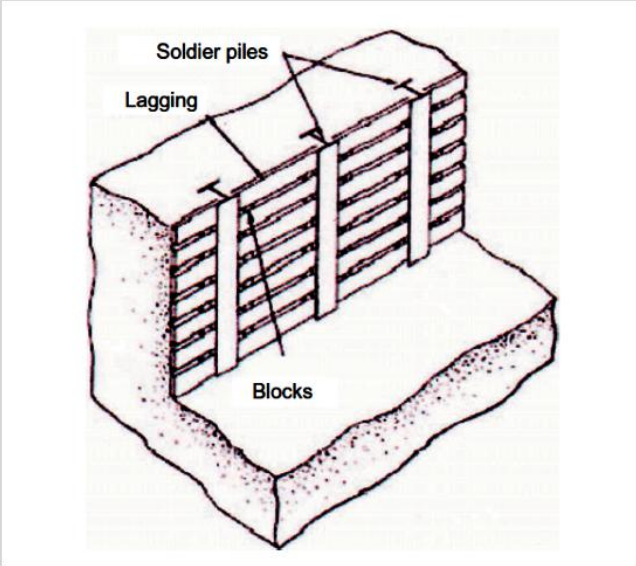
شکل ۲-۲: سپرزنی با مصالح مختلف [۳]

برای گودبرداری‌های عمیق‌تر ممکن است برای پایداری دیوار، مهارها (که tieback نیز نامیده می‌شوند) لازم باشند. وقتی سپرهای مهار شده با چند تراز از مهارها به کار می‌روند، حداقل عمق مدفون شدگی زیر گود، معمولا ۲m-۱/۵ می‌باشد. مهارها نوعا برای گودهای بیشتر از ۱۰m به کار می‌روند و معمولا در ردیف‌های طولانی طوری نصب می‌شوند که فضای بین‌شان ۲ تا ۴m در راستای قائم و ۱/۵ تا ۵m در راستای افق باشد. سپرها معمولا به عنوان سازه‌های نگهبان موقت به کار می‌روند و وقتی که دیگر به آنها نیازی نیست، برچیده می‌شوند. در این حالت اگر در سیستم از پس‌مهارها استفاده شده باشد، از سپرها جدا شده و در محل رها می‌شوند. حفاظت بلند مدت مهارها از زنگ‌زدگی برای بهره‌برداری موقت (معمولا ۲۴ ماه یا کمتر) ضروری نیست. معایب استفاده از این سیستم، شامل دشواری کسب اجازه از همسایه جهت نصب مهارها در زمین وی، اثر لرزش بر سازه‌ها و خاک‌های مجاور و نیز حضور تاسیسات زیرزمینی می‌باشد [۳].

۲-۲-۳ سیستم شمع نگهبان و تخته‌گذاری

این سیستم ممکن است برای ساخت و ساز موقت یا دائمی به کار رود (شکل ۲-۳). اغلب این سیستم اقتصادی‌ترین گزینه برای نگهداری خاک است. شمع‌های نگهبان (اعضای محافظ قائم که گاهی "تیرنگهبان" نیز نامیده می‌

شوند)، نوعا عبارتند از مقاطع فولادی و به فواصل مرکزتا مرکز ۳m-۱/۵ که جهت اجتناب از برخورد با تاسیسات زیرزمینی، قبل از حفاری در موقعیت‌های از پیش تعیین شده کوبیده شده یا حفر می‌شوند. تخته‌گذاری شامل اعضای افقی (به طور نمونه تخته‌های چوبی) است که بین تیرهای نگهبان نصب شده و بر بال‌های مقاطع فولادی تکیه می‌کند. بدین ترتیب فشار افقی خاک وارده بر تخته‌گذاری، به شمع‌های نگهبان منتقل می‌گردد. این سیستم مثلا در جایی که سفره آب زیرزمینی، پایین‌تر از گود پیشنهادی بوده و یا می‌تواند با توجیه اقتصادی توسط زهکشی پایین برده شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سیستم به طور گسترده‌ای در خاک‌هایی که چسبندگی کافی دارند به کار می‌روند، تا پایداری‌شان را در حین و بلافاصله پس از حفاری حفظ کنند. گودبرداری و اجرای تخته‌گذاری به صورت مرحله‌ای اجرا می‌شود، زیرا در هر زمان می‌تواند کمتر از ۱/۳m – ۰/۸ از ارتفاع گود، بدون حفاظ باشد.



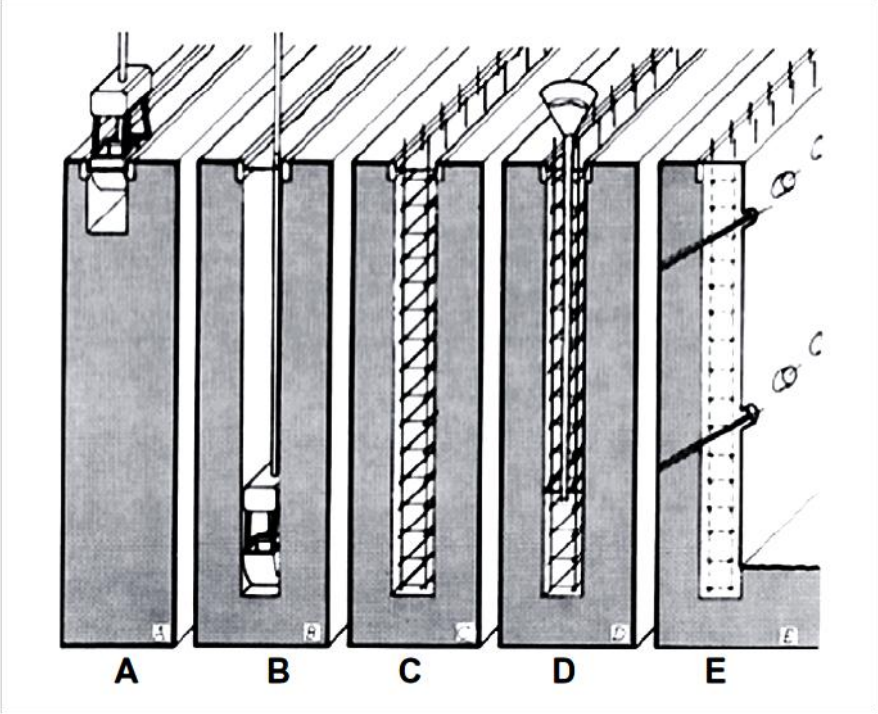
شکل ۲-۳: شمع نگهبان و تخته‌بندی [۳]

گودبرداری های سطحی (کمتر از ۵m عمق) می‌تواند با شمع نگهبان فولادی طره‌ای، حفاظت شود. شمع‌های نگهبان می‌توانند با تجهیزات مرسوم کوبش کوبیده شوند، هر چند این کار می‌تواند پر سر و صدا باشد. همچنین لرزش می‌تواند برای خاک‌ها و سازه‌های مجاور ایجاد مزاحمت کند. شمع‌های نگهبان می‌توانند با پایین بردن یک شمع به درون گودال از قبل حفرشده به اندازه طول کامل شمع نصب شوند، سپس بتن‌ریزی صورت بگیرد تا بخشی از شمع را که زیر تراز گودبرداری است، مهار نماید. به طور کلی، حفاری‌های عمیق‌تر (بیش از ۵m عمق) به شمع‌هایی بیش از ارتفاع‌شان نیازمندند تا از حرکت اضافی افقی و نشست متناظر با خاک تکیه‌گاه اعضا جلوگیری نمایند. ممکن است مهاربندی با استفاده از مهارهای قطری (یا عضو مایل[۱]) صورت گیرد. برای اجتناب از انسداد گود، مهارهای داخلی مایل می‌توانند با پس‌مهارها جایگزین شوند. به کارگیری چندین تراز از پس‌مهارها، اجازه گودبرداری‌های عمیق‌تر را می‌دهند [۳].

[۱]-raker

۲-۲-۴ سیستم دیوار دیافراگمی

دیوارهای دیافراگمی در گودبرداری‌های پایین‌تر از سفره آب زیرزمینی در نواحی خاک نرم به کار می‌روند. دیوارهای دیافراگمی به صورت ترانشه‌های مجاور هم هر یک به ضخامت تقریبی ۶۰۰-۹۰۰mm و ارتفاعی تقریبا معادل دو برابر عمق گود اجرا می‌شوند (شکل ۲-۴). ابتدا ترانشه‌ای در داخل زمین حفر شده و هم‌زمان با حفاری، دوغاب (که ترکیبی از بنتونیت، آب و افزودنی‌های مناسب است) به داخل آن پمپاژ شده تا از فروریزش و انسداد ترانشه جلوگیری کرده و پایداری آن را حفظ نماید. این دیوارها در قطعات ۶-۹ m در خاک‌های پایدار و ۲m در خاک‌های ناپایدار اجرا می‌شوند.



شکل ۲-۴: فرآیند ساخت دیوار دیافراگمی: (A) حفاری ترانشه؛ (B) استقرار گل بنتونیت؛ (C) قرارگیری قفسه تسلیح در ترانشه؛ (D) بتن-ریزی و بازیابی گل حفاری؛ (E) حفاری و نصب مهارهای دوخت به پشت. [۳]

قبل از بتن‌ریزی، قفسه‌های میلگرد درون شیار حفرشده‌ی پر از گل حفاری قرار می‌گیرند. بتن از پایین به بالا ریخته شده وبا گل بنتونیت که در حال پمپاژشدن به بیرون است، جایگزین می‌گردد و این چرخه تا بتن‌ریزی کامل ترانشه تکرار می‌شود. برای مدیریت مقادیر گل حفاری، جایگزینی بتن ممکن است به صورت مرحله‌ای انجام گیرد. ابتدا قطعات یک‌درمیان (قطعات اولیه) ساخته شده و روند با قطعات باقیمانده (ثانویه) دنبال می‌شود. قطعات تا عمق کامل دیوار گسترش می‌یابند. دیوارهای دیافراگمی معمولا در محل رها شده و به عنوان بخشی از سیستم سازه‌ای زیرزمینی دائمی مورد استفاده قرار می‌گیرند. اگر عمق گود زیاد باشد، بایستی جهت کاهش لنگر و بهینه شدن طرح و نیز پایداری دیوار و محدودسازی تغییرشکل‌ها، دیوار را توسط مهارهایی در ترازهای مختلف مهار نمود.

دیوارهای دیافراگمی در مقایسه با سپرزنی و سیستم دیوار شمعی حفرشده نیاز به تجهیزات نسبتا سنگینی دارد. هزینه حفاظت زیست محیطی مربوط به کاربرد و احیای دوغاب‌ها ممکن است این سیستم را کم جاذبه‌تر کند. هزینه‌های این سیستم از دیگرسیستم‌هایی که قبلا بحث شد، بالاتر بوده و بیشتر ناشی از هزینه کاربرد گل حفاری می‌باشد [۳].

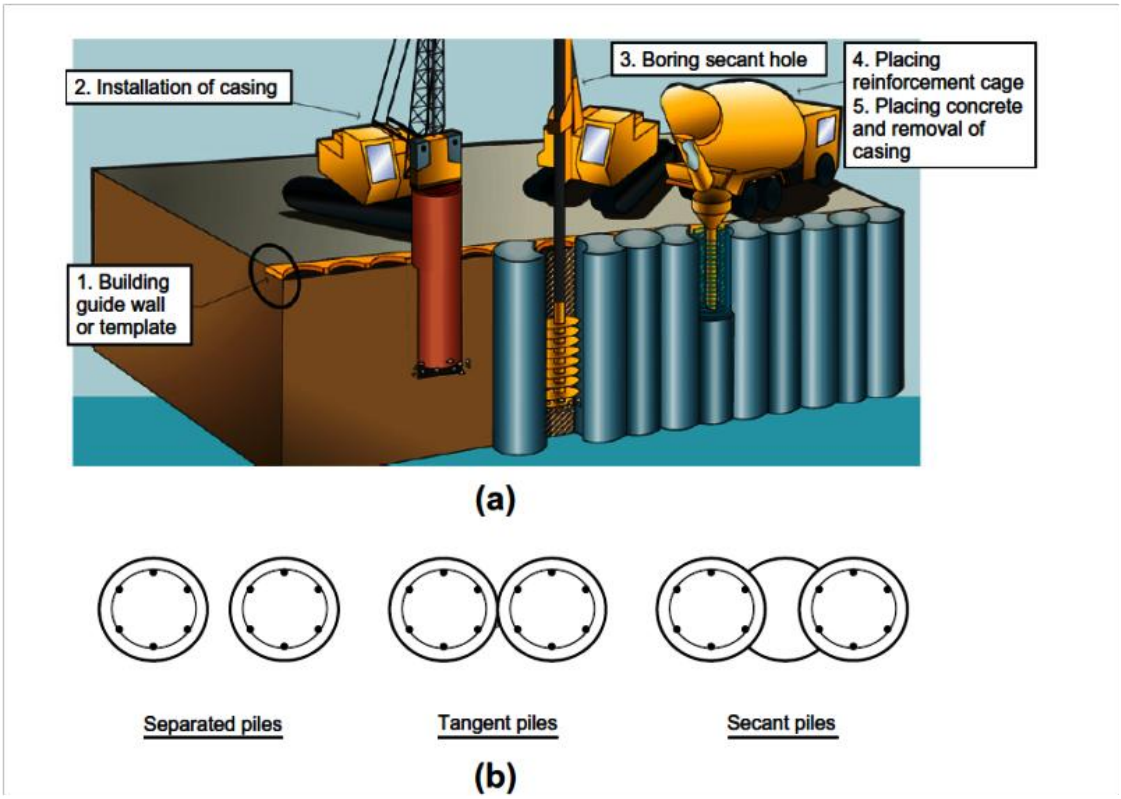
۲-۲-۵ سیستم دیوار شمعی حفرشده

دیوارهای شمعی حفرشده شامل استفاده از یک شمع بتنی ریخته شده در یک گودال حفرشده[۱] (CIDH) جهت به کارگیری در حفاری‌های نسبتا عمیق می‌باشند (شکل ۲-۵). عموما وقتی که اجرای تیر نگهبان (کوبشی) یا سپرزنی در خاک‌های سخت مشکل باشد و یا جایی که استفاده از مهارها در نزدیکی سطح زمین به دلیل وجود سازه‌هایی مانند شالوده‌های دیواری، تونل‌ها و لوله‌های فاضلاب و یا نداشتن مجوز از همسایه مجاز نباشد، یا جایی که سیستم مهاربندی دائمی مطلوب است، این روش مورد استفاده قرار می‌گیرد. از دیگر مزایای مهم این سیستم، تنوع در ارائه یک پوشش متناسب با ساخت و سازهای شهری می‌باشد. در این روش معمولا روش شمع‌زنی با حفاری دورانی به کار گرفته می‌شود. این روش، اجرای بیشترین قطر شمع را ممکن ساخته و اجازه ساخت شمع را مخصوصا در نهشته متراکم و سخت می‌دهد. در بعضی موارد ممکن است سیال حفاری (نظیر بنتونیت یا محلول‌های پلیمری) یا غلاف‌گذاری نیاز شود تا مغزه پایداری را برقرار نمایند. مته‌های دوار در قطرهای ۳۵۰ تا ۲۴۰۰mm (یا بیشتر) موجودند؛ قطرهای رایج بین ۳۵۰ تا ۱۵۰۰mm می‌باشند. در این روش، شمع با طول بیش از ۵۰m قابل دستیابی است.

در کاربردهای رایج، سه گزینه برای اجرای دیوار شمعی حفرشده وجود دارد: شمع‌های مجزا، شمع‌های متقاطع و شمع‌های مماسی (شکل ۲-۵). شمع‌های مجزا برای مقاوم کردن نهشته‌های ناپایدار یا لغزشی، یا حفاری در خاک‌های چسبنده که رویه نفوذ ناپذیری نیاز نیست، استفاده می‌شوند، در حالی که شمع‌های متقاطع یا مماسی می‌توانند برای حفاری در خاک‌های چسبنده یا دانه‌ای به کار روند. شمع‌های متقاطع، یک رویه بتنی یکپارچه با نفوذ ناپذیری عالی ارائه می‌نمایند. وقتی دیوار شمعی متقاطع به عنوان دیوار شالوده‌ای دائم برای ساختمان بلند مرتبه به کار می‌رود، بایستی هم‌راستا بودن ستون‌های ساختمان و شمع‌ها مورد ملاحظه قرار گیرد و جزئیاتی ارائه شود تا نیروها در این فصل مشترک، درست همانند دیوارهای دیافراگمی منتقل شوند.

در ساخت دیوار شمعی متقاطع (شکل ۲-۵ (a) را ببینید) برای تعیین موقعیت شمع‌ها در پلان، سه راه وجود دارد: (۱) پیمایش محلی، که دارای کمترین دقت است، (۲) استفاده از شیارهای راهنما و (۳) الگوی حاوی حلقه‌های پیش‌قالب بتنی، که دقیق‌ترین روش است. ابتدا نصب شمع‌ها به صورت یک در میان (شمع‌های اولیه) پیش می‌رود و روند با شمع‌های باقیمانده (ثانویه) دنبال می‌گردد. شمع‌های اولیه غیرمسلح‌اند، در حالی که شمع‌های ثانویه را مسلح می‌کنند. در جایی که غلاف لوله‌ای فولادی نیاز باشد، همان طور که با قالب‌های حلقوی راهنما معین شده است، (در صورت استفاده) در محل شمع‌های اولیه کوبیده می‌شوند. گمانه‌های اولیه درون غلاف‌ها حفر می‌شوند. سپس بتن در گمانه‌های اولیه غیر مسلح ریخته می‌شود و غلاف‌ها در حین بتن‌ریزی بیرون کشیده می‌شوند. بعد از دور اول بتن‌ریزی در شمع‌های

[۱]-Cast-in-drilled-hole



شکل ۲-۵: (a) ساخت دیوار شمعی متقاطع؛ (b) انواع دیوار شمعی حفرشده [۳]

اولیه، غلاف‌های لوله‌ای فولادی در موقعیت شمع‌های ثانویه کوبیده شده و گمانه‌های ثانویه درون غلاف‌ها حفر می‌شوند. در حین این مرحله، بخش‌هایی از شمع‌های اولیه نیز قطع شده و حذف می‌گردد. اگر نیم‌رخ‌های فولادی سازه‌ای (مقاطع W، H یا I) مورد استفاده قرار گیرند، هنگامی که بتن در گمانه ریخته شد، غلاف خارج می‌گردد و پس از پر شدن گمانه با بتن، مقاطع فولادی به درون گمانه پایین برده می‌شوند و اگر قفسه میلگرد به کار می‌رود، قفسه در محل مستقر شده و سپس غلاف در حین بتن‌ریزی خارج می‌گردد. این فرآیند در امتداد گسترش واحد دیوار تکرار شده تا دیوار متقاطع تکمیل گردد.

رواداری‌های (تلرانس‌های) استاندارد برای موقعیت محور در بالای شمع $\pm$۳in ($\pm$۷۵mm) و انحراف از قائم ۰/۵٪ (۱ در ۲۰۰) می‌باشند؛ در عین حال استفاده از الگوهای راهنما به طور معمول می‌تواند موقعیت مراکز $\pm$۱in (۲۵mm) را به دست دهد و استفاده از تجهیزات قدرتمند می‌تواند به ۰/۲-۰/۳٪ به طور قائم در گودالی ۱۰۰ft (۳۰m) دست یابد. هم‌چنین با استفاده از فناوری‌های مختلف، انحرافات در گمانه می‌تواند وارسی گردد (مانند انحراف‌سنج‌ها و فناوری آوانگاری).

سیستم دیوار شمعی مماس، از همه لحاظ شبیه سیستم دیوار شمعی متقاطع است، جز این که شمع‌ها به جای قطع کردن یکدیگر، برهم مماس‌اند. در سیستم دیوار شمعی مماس نسبت به دیوار شمعی متقاطع، زمان ساخت کاهش می‌یابد و با این روش، یک نمای بتنی یکنواخت ایجاد نمی‌شود. این نوع دیوار به عنوان یک مانع آب ایفای نقش نمی‌کند، بلکه فقط برای نگهداری خاک کافی است. اگر سفره آب زیرزمینی بالای کف گودبرداری باشد، اقداماتی جهت تخلیه