خاك مسلح

نوشتهٔ :

Francois Schlosser

استاد دانشکده پلی‌تکنیک و دانشکده پل و شوسه پاریس رئیس

دپارتمان مکانیک خاك آزمایشگاه مرکزی پل و شوسه فرانسه .

ترجمهٔ :

کامبیز بهنیا

استادیار دانشکده فنی

چکیده :

دراین مقاله ازخاك مسلح که یکی‌ازمصالح جدید ساختمانی‌است و تکنیک آن بحث میشود. بسیاری از ابنیه فنی بخصوص دیوارهای نگهبان و پایه‌های پل و غیره را میتوان با خاك مسلح بنا نمود .

روشهای محاسبه ابنیه خاك مسلح و نیز نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی و بالاخره مثالهائی ازآنچه با خاك مسلح ساخته شده است دراین مقاله آورده شده .

مقدمه مترجم :

استفاده ازخاك برای ساختمانهای گوناگون‌درتمام ادوارمتداول‌بوده وخاك همیشه چون ارزانترین مصالح ساختمانی موردتوجه قرار داشته است . موارد استفاده از خاك تا بامروز نیز برای ساختمان سدهای بزرگ خاکی و دیگر انواع ساختمان متداول است . با این‌احوال ناچیز بودن خواص مکانیکی خاك نقطه ضعف مهم آن میباشد . از نظر اینکه ابعاد ساختمانهای خاکی بمراتب بیشتر از ابعاد ساختمانهای مشابه بتنی یا فولادی میباشد ترمیم خواص مکانیکی خاك همیشه مورد توجه بوده و سعی مهندسین براین بوده است که بکمك مواد دیگر مقاومت درونی خاك را درمقابل فشارهای مختلف وارد برآن بیشتر نمایند. یک

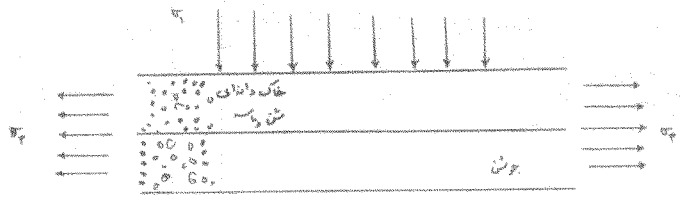
مثال بسیار ساده ازاین امر کاهگل است که وجود قطعات کاه درخاك باعث همبستگی بیشتر آن میشود . البته باید درنظر داشت که اضافه نمودن مواد دیگر بخاك نباید قیمت آنرا بیش از اندازه گران نماید تا استفاده ازآن مقرون بصرفه باشد .

یکی ازجدیدترین مصالح ساختمانی که جزء مهم آنرا خاك تشکیل میدهد و در ردیف بتن و بتن مسلح وفولاد وخاکهای عمل‌آورده قرار دارد ودرساختمانهای مورداستفاده قرارمیگیرد خاك مسلح میباشد .

خاك مسلح همانطوریکه از نام آن پیدا است متشکل است ازخاك وجوشن های فلزی که بصورت نوار در داخل خاك جای میگیرد . درنتیجه استقامت مجموعه خاك و جوشن دربرابر نیروهای کششی قابل ملاحظه امکان‌پذیر خواهد بود .

باین ترتیب جوشن های درون خاك مانند آرماتورهای بتن مسلح که برای تقویت استقامت بتن مورداستفاده است بطرزی با صرفه و اقتصادی خواص مکانیکی ماده اصلی‌را که خاك میباشد ترمیم مینماید . میدانیم که استقامت خاکها درمقابل کشش خیلی‌ضعیف وحتی دربعضی‌موارد (خاکهای دانه‌ای ـ ماسه ها) ممکن است بصفر برسد . درخاك مسلح بعلت اصطکاك درونی نیروهائی که در داخل جسم تولید میشوند ازخاك بجوشن ها منتقل گشته و درنتیجه خاك مسلح درمقابل نیروهای کششی مقاومت میکند .

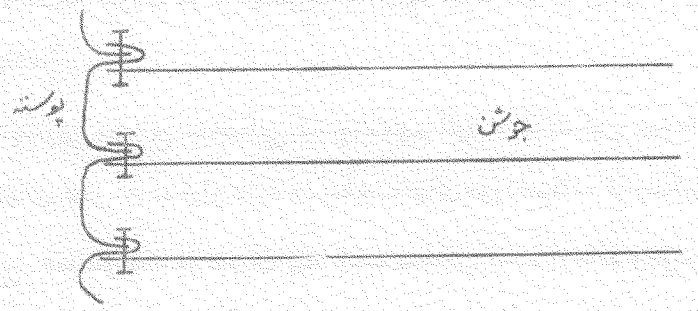
دریک ساختمان با خاك مسلح تأمین پایداری و ثبات درونی آن عبارت از تعیین طول جوشن ها و مقاومت کششی آنها و همچنین طرز توزیع جوشن ها درون خاك با یک ضریب اطمینان کافی درمقابل تلاشهای خارجی و با توجه بخطر زنگ زدن آرماتورها میباشد .



نظریه محاسبه پایداری‌درونی ساختمانهای معمولی که باخاك مسلح ساخته میشودمانندد یوارهای نگهبان برفرضیات ساده‌ای استوار میباشد . این نظریه بطور رضایتبخش با آزمایشهائی که صورت گرفته منطبق است .

درنمای‌آزاد ساختمانها لازم‌است پوسته‌ای قرار داده شود تا ازحرکت‌خاك بین‌آرماتورها جلوگیری کند . این پوسته که باید بحد کفایت مقاوم و قابل انعطاف باشد از استوانه های افقی بمقطع نیم بیضی بلندی ۲۰ سانتیمتر تشکیل شده‌است ـ جوشن هائی که درفوق ذکر شد بدین‌قطعات پوسته متصل‌میگردند .

اخیراً پوسته‌های بتنی نیز مورداستفاده قرار می گیرد .



تحقیقات درباره ساختمانهای خاك مسلح شامل دیوارهای نگهبان و طاقها درآزمایشگاه برروی مدلهای دوبعدی وهمچنین درمحل روی دیوارهای ساخته شده انجام گرفته است . نتایج حاصله با تئوری توافق کامل دارد .

کارهای انجام شده با استفاده از تکنیك جدید خاك مسلح .

۱ ـ دیوارهای حفاظتی و خاکریزهای بلند شوسه شاهراه ساحل لاجوردی فرانسه . این شاهراه چون از نقاط کوهستانی که درعین حال سختی لازم را برای تحمل بار خاکریز شاهراه ندارد عبور میکند و پس ازمطالعه بسیار راه حل خاك مسلح را برای آن درنظرگرفته‌اند (رجوع شود به عکسهای بروشور) .

۲ ـ دیوارهای بندری درجنوب فرانسه .

۳ ـ دیوار بزرگ بارانداز بندر دنکرك (فرانسه) که ازطرفی تکیه گاه سنگهای معدن آهن و ذغال سنگ است و ازطرف دیگر ریل جراثقال بزرگ برروی آن نصب شده است. طول این دیوار از ۶۰۰ متر متجاوز است عرض آن ۱۶ متر و ارتفاع آن نیز بیش از ۵ متر است .

٤ ـ ساختمانهای مربوط براهسازی و سدسازی دراسریکا و کانادا ودیگر کشورها .

* *
*

درسال ۱۹۶۶ درجریان کنفرانسی درحضور کمیته فرانسوی مکانیک خاك هانری‌ویدال* مخترع خاك مسلح برای اولین بار این تکنیک جدید را معرفی کرد [۱۴] بهمین مناسبت آزمایشگاه مرکزی پل و شوسه فرانسه که‌درآن زمان مشغول بررسی چگونگی ساختن خاکریزهای مرتفع بمنظور ایجاد شاهراههائی بردامنه‌هائی با شیب‌های تند و ناپایدار کوهستانی بود با این نوآورد و امکاناتی که برای حل مسائل مشکل فنی ارائه میگردد آشنا شد . درسال ۱۹۶۷ تحقیقاتی برروی خاك مسلح انجام گرفت که براساس آن فرمولهای اولیه تعیین ابعاد برای دیوارهای نگهبان عرضه شد و نتیجه گرفته شد که خاك مسلح ممکن است خواه بعلت گسستن جوشنها و خواه بعلت از بین رفتن چسبندگی سطحی بین خاك و جوشن‌ها از هم گسیخته گردد [۳] . این تحقیقات هنوزهم ادامه دارد وآزمایشهائی برروی بناهای‌حقیقی انجام میگیرد. [۸] و [۹] .

اولین‌دیوارهای بزرگ‌خاك مسلح درطول شاهراه A53 واقع درجنوب فرانسه‌درقسمتی که بشکل کمان دایره دراطراف شهر مانتون Menton واقع بود ساخته شد . بهنگام اجرای‌طرح (۱۹۶۷ - ۱۹۶۶) عبور از یک منطقه سنگریزناپایدار و با شیب زیاد (از ۲۰° تا ۳۰° نسبت بافق) مجریان با مسایل فنی بسیار مشکلی مواجه شدند که برای حل آن دو راه پیشنهاد گردید :

یکی ازآنها ظاهراً با طرح واجرای پی‌های مخصوص عملی‌مینمود ولی متضمن هزینه زیادی بود .

دیگری عبارت ازاجرای خاکریز نسبتاً بلندی بود که انجام آن از لحاظ فنی بکمک روشهای سنتی بسیار مشکل و حتی غیرعملی بنظر میرسید . پس از بررسی عمیق که بدنبال بحث‌هائی بین مسئولین امر و آزمایشگاه مرکزی پل و شوسه انجام گرفت ، تصمیم براین شد که از تکنیک خاك مسلح استفاده شود زیرا باین نتیجه رسیدند که این تنها راه حل ممکن برای انجام آن عملیات خاکریزی است . دراین زمان هیچ تجربه‌ای درساختمان باخاك مسلح دردست نبود وصحت فرضیات بکار برده شده در روشهای تعیین‌ابعاد اثبات نشده بود .

آزمایشگاه مرکزی پل و شوسه (پاریس) بسرعت اولین تحقیقات را برروی این مصالح جدید انجام داد و پس از حصول اولین نتایج و بحث‌های زیادی که برروی این طرح صورت‌گرفت تصمیم گرفته شد که دراین منطقه شاهراه را برروی دیواری از خاك مسلح بنا کنند .

درشاهراه نیس ـ مانتون هفت دیوار از ٤ تا ۲۳ متر ارتفاع و از ۱۰ تا ۲۰۰ متر طول و با حجم کل ۶۰۰۰۰ مترمکعب ساخته شد .

---

* Henri Vidal

مشخصات پوسته‌ها :

دربک بنای‌خاك مسلح هرچنداهمیت نقش مکانیکی پوسته از جوشن‌ها کمتر است معذالك بعلت اینکه پوسته باید دارای مشخصات خاصی باشد مورد تحقیقات فنی متعددی قرارگرفته است .

مشخصات مذکور عبارتند از :

۱) در وهله اول پوسته باید مقاوم باشد تا بتواند نیروهائی راکـه به مجاورت سطح قدامی دیوار وارد میشوند تحمل نماید .

۲) برای آنکـه خاصیت انعطاف پذیری خاك مسلح حفظ شود پوسته‌هم میبایست قابلیت انعطاف درخور توجهی را دارا باشد .

۳) پوسته باید زیبا باشد زیرا حالت نمای یک ساختمان ازعناصر مهم معماری است .

٤) بالاخره باید آنرا بصورت عناصری درآورد تا ساختن آن ساده باشد .

دونوع پوسته درحال حاضر بکار برده میشود که دومی کاملاً جدید است .

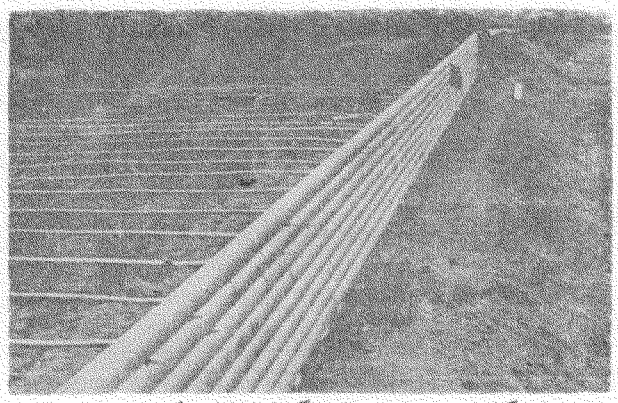
- پوسته‌های متشکل از عناصر فلزی

- پوسته‌های متشکل ازصفحات بتنی

- در دیوارهائی کـه جدار خارجی آنها قائم است این پوسته‌هـا از عناصر فلزی بمقطع نیم بیضی بارتفاع ۲۵ سانتی‌متر و بطول چندین متر تشکیل شده‌اند فلز پوسته‌ها از نوع فلزی است که جوشن‌ها را از آن ساخته‌اند .

این جوشن‌ها به‌انتهای بالائی و پائینی پـوسته متصل میشوند . ساختمان یک دیـوار با خاك مسلح از لایه‌های ۲۵ سانتیمتر خاك تشکیل شده و در میان این لایه‌ها بسترهای افقی جوشن قرار دارند .

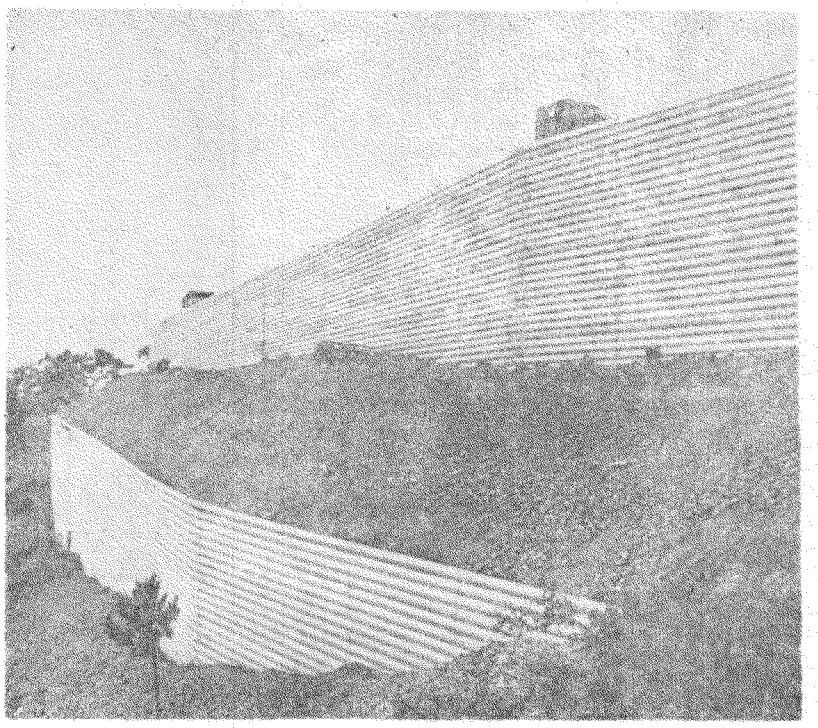
از بدوامر این‌نوع پوسته‌ها مورداستفاده قرار گرفت و بعلت انعطاف‌پذیری ومخصوصاً مقاومت آنها میتوان دیوارهای بسیار بلندی بنا کرد . بلندترین دیواری که تاکنون ساخته شده درپاکستان واقع است و ارتفاع آن ٤۰ متر میباشد .



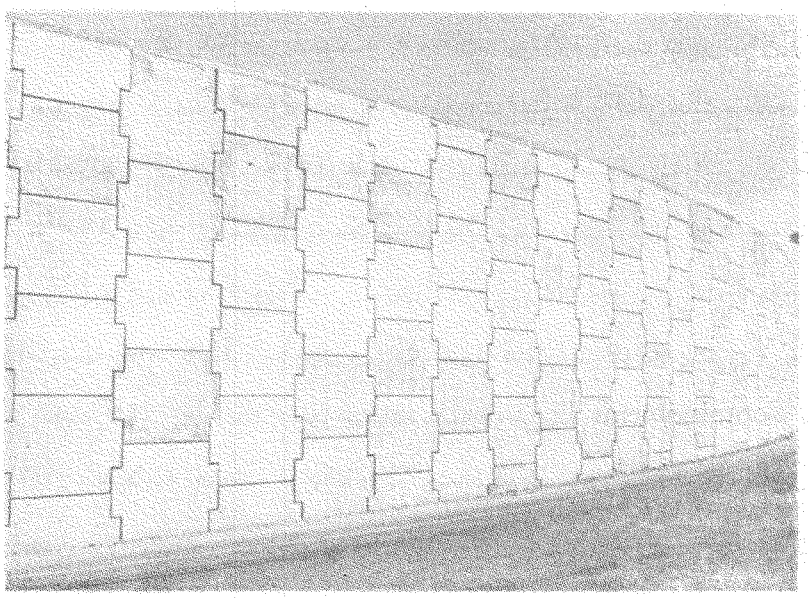
شکل ۱ — ساختمان یک دیوارخاك مسلح

ـ ساختمان پوسته‌های بتنی تحول فنی مهمی در تکنیک خاک مسلح میباشد .

ابعاد آن تقریباً ۱٫۵ × ۱٫۵ متر وضخامت‌آن متغیراست وزن این‌صفحه درحدود یک تن‌میباشد . ساختمان یک‌دیوار خاك مسلح با استفاده ازاین نوع پوسته بالایه‌های۳۷ سانتیمتری‌صورت میگیرد و وجود درزها و امکان حرکت یک صفحه نسبت بدیگری انعطاف‌پذیری زیادی به‌این پوسته میدهد تا حدی که میتوان دیوارهائی بجدار خارجی منحنی نیز برپا نمود .

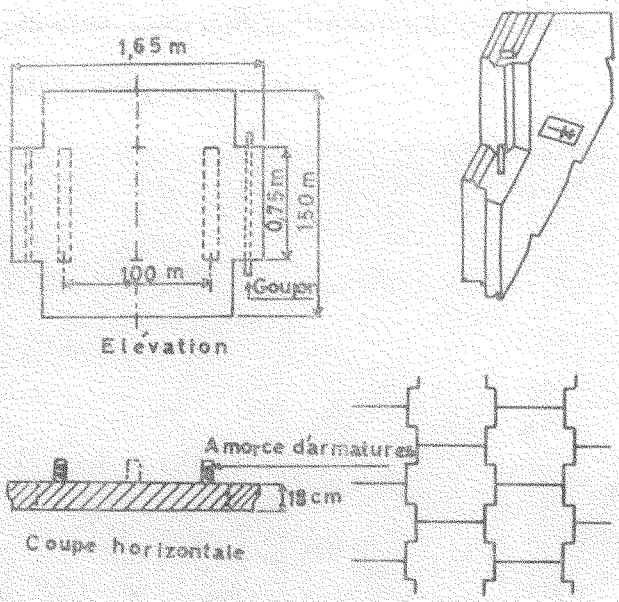


شکل ۲ — دیوار خاك مسلح Vigna درجنوب فرانسه



شکل ۳ — دیوار خاك مسلح با پوسته بتنی

(شکل ۳ و ٤) . حالت ظاهری بسیار زیبای پوسته‌های بتنی باعث توسعه قابل توجه تکنیک خاك مسلح در داخل شهرها شده است .



شکل ٤ — پوسته‌های بتنی

طرز کار دیوار خاك مسلح

در روشهای محاسبه‌ایکه تا کنون برای تعیین ابعاد دیوارهای خاك مسلح مورداستفاده قرار گرفته خاك و جوشن را بطور جداگانه درنظر میگیرند و هنگامیکه بعلت گسیختگی جوشن‌ها بهم‌خوردگی درتوده خاك پدید میآید چنین فرض میشود که بلافاصله قبل از گسیختگی ، خاك بین جوشن‌ها در حالت تعادل حدی بوده است . این فرض در بدو امر با توجه به متفاوت بودن ضرایب تغییر شکل خاك و فلز تشکیل دهنده جوشن‌ها درست بنظر نمیرسد . از این رو برای شناخت بهتر طرز کار خاك مسلح و بهبود روشهای تعیین ابعاد دیوارها مطالعاتی پیرامون طرز کار جمعی خاك مسلح برحسب پارامترهای مشخصه آن بعمل آمد . این پارامترها عبارتند از : مشخصات مکانیکی خاك ـ مقاومت کششی R_T جوشنها ـ فاصله ΔH میان دولایه جوشن [٦] و [۱۰] .

تمامی آزمایشها با دستگاه سه محوری وبرروی نمونه‌های استوانه‌ای بقطر ۱۰ سانتیمتر و به‌ارتفاع ۳۰ و ۲۰ سانتیمتر انجام گرفت . خاك مورد استفاده ماسه فونتن‌بلو Fontainebleau بود که دانه بندی بسیار فشرده‌ای دارد . هرلایه جوشن از یک و یا چند دیسک مدور با قطری مساوی قطر استوانه که در ورقهای آلومینیومی بریده بودند تشکیل شده بود . ضخامت ورق آلومینیوم ۱۸ μ و مقاومت کششی متوسط آن ۱٫۱۵ کیلوگرم برسانتی‌متر عرض بود .

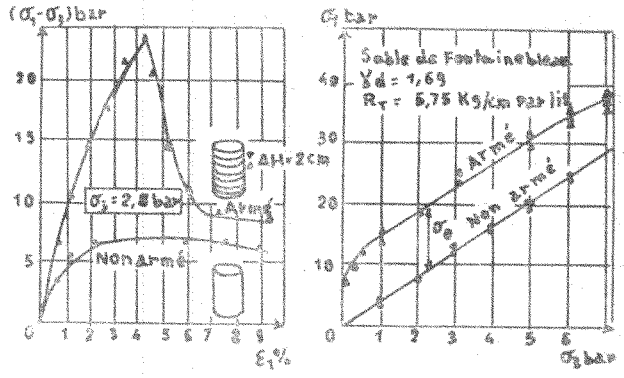
لایه‌های جوشن همگی یکسان و بصورت افقی قرار گرفته بودند و فاصله میان آنها ۲ یا ۳ و یا ٤ سانتیمتر بود .

بدین‌ترتیب نمونه‌ها بصورت دو بعدی مسلح شده بودند که تا حدودی با آنچه که عمل میشود متفاوت است چه درعمل لایه‌های جوشن پیوسته نمیباشد و بلکه از تسمه‌های فلزی که با یکدیگر فاصله دارند تشکیل میگردد .

آزمایشهای انجام شده اغلب آزمایشهائی با تنش جانبی σ_3 ثابت بودند . درهرمورد بموازات آزمایش برروی ماسه مسلح آزمایش مشابه برروی ماسه غیرمسلح با همان تراکم انجام شده است .

ـ نتایج آزمایشها

نمودارهای شکل ٥ از یکطرف منحنی‌های تنش ـ تغییر شکل وازطرف دیگر منحنی‌های گسیختگی درصفحه تنشهای اصلی (σ_1 , σ_3) را برای ماسه مسلح و ماسه غیر مسلح نشان میدهد .



شکل ٥ — نتایج آزمایشهای N محوری روی ماسه مسلح وغیرمسلح

مهمترین‌قسمت منحنی گسیختگی نمونه مسلح خطی‌است که موازی‌خط گسیختگی ماسه غیرمسلح میباشد . این قسمت به‌حالتی مربوط میشود که طی آن صفحه گسیختی درنمونه باگسسته شدن جوشن‌ها بوجود میآید .

نتایج فوق میرساند که ازیکطرف زمانیکه جوشن‌ها گسیخته میشوند هردومصالح (خاك و جوشن) درحالت تعادل حدی میباشند و ازطرف‌دیگر درحالت خاصی که تنش‌های‌اصلی یکی عمود برصفحه‌جوشن‌ها و دیگری برروی آن واقع است مقطع صفحه منحنی شکست خطی است به معادله :

$$\sigma_1 = tg^2\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\varphi}{2}\right)\sigma_3+\sigma_0(R_T\ ,\ \Delta H\ ,\ \varphi)$$

که درآن σ_1 تنش اصلی حداکثر و σ_3 تنش اصلی حداقل φ زاویه اصطکاك داخلی ماسه و σ_0 تابعی از مقاومت کششی R_T جوشن‌ها و ΔH فاصله دو بستر جوشن میباشد .

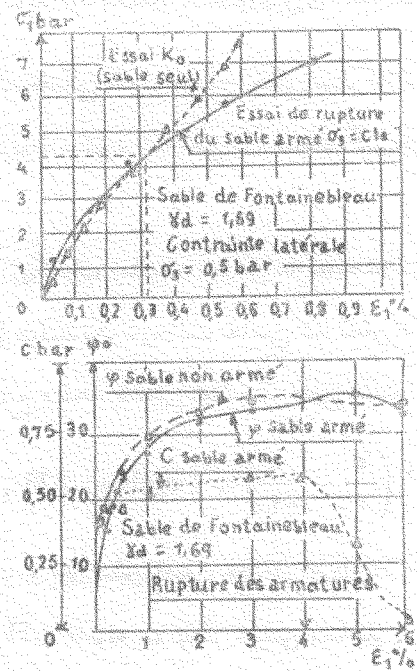
تنش σ_0 که نشان دهنده چسبندگی درماسه مسلح است دارای خصوصیات غیرایزوتروپ میباشد و مقدار آن بحسب امتداد تنش اصلی σ_1 و بحسب امتداد لایه جوشنها تغییر میکند . هرگاه σ_1 عمود برصفحه جوشن ها باشد مقدار σ_0 حداکثر است . و درصورتیکه امتداد σ_1 موازی صفحه جوشن ها شود σ_0 صفر خواهد شد .

ـ طرز کار خاك مسلح قبل از گسیختگی

آزمایشهائی که برروی دیوارهای حقیقی خاك مسلح انجام شده [۹ و ۱۳] نشان میدهد که در قسمت فوقانی دیوارهای نگهبان و درنزدیکی پوسته خاك درحال سکون است و این حالت با ضریب K_0 مشخص میشود ولی درپائین دیوار خاك درحالت فشار عامل میباشد و ضریب مشخصه آن K_a است .

بررسی منحنی‌های تنش تغییر شکل (ε_1 , σ_1) درآزمایشهای با تنش جانبی σ_3 ثابت درمورد ماسه مسلح و مقایسه آنها با منحنی مشابهی حاصل از آزمایش برماسه غیرمسلح باهمان چگالی درآزمایش تغییر شکل جانبی صفر (آزمایش K_0) این پدیده را کاملاً تشریح مینماید (شکل ۶ الف) .

ماسه درنمونه خاك مسلح تا زمانیکه تغییر شکل محوری از ۳ر۰ درصد تجاوز ننماید درحالت سکون میباشد . پس ازآن ماسه بتدریج بحالت گسیختگی درمیاید تا بتعادل حدی برسد و این در زمانی است که برش درنزدیکی جوشنها بحد کافی زیاد شده باشد . از آنچه گفته شد نتیجه میشود که دریک دیوار نگهبان از خاك مسلح ضریب K (نشان دهنده حالت خاك) را باید درمناطق کم فشار (بالای دیوار) برابر K_0 و درمناطق تحت فشار زیاد (وسط و پائین دیوار) برابر K_a گرفت .



شکل ۶ — منش خاك مسلح قبل از گسیختگی

با مطالعه تحول زاویه اصطکاك φ و چسبندگی C (که مقدار آن برابر است با $\sigma_0/2\sqrt{K_p}$) در مدت تغییر شکل میتوان نتایج قبلی را درمناطق نزدیك به گسستگی کامل نمود . نمودار شکل (٦ ب) تحولات φ را برای یك نمونه ماسه جوشن‌دار (یك ورق جوشن درلایه) و یك نمونه ماسه غیرمسلح که هردو یك چگالی دارند و درحین آزمایش تنش جانبی σ_3 درآنها ثابت نگاهداشته شده نشان میدهد .

این تحولات با رسم منحنی پوش دوایر موهر «هم‌تغییرشکل» Isodéformation بدست میآیند .

تحول چسبندگی یا بعبارت دیگر مقاومت کششی جوشنها بسیار سریع است (٨٠٪ مقدار نهائی بازای ٢٪ درصد تغییر شکل محوری ε حاصل میشود) . درصورتیکه زاویه اصطکاك داخلی ماسه بسیار کندتر تحول می‌پذیرد و این تحول تقریباً معادل تحول درمورد ماسه غیرمسلح است . از ٢٪ تغییرشکل محوری ببعد میتوان فرض نمود که مقاومت برشی ماسه کاملاً بکار گرفته شده است . گسستگی جوشن‌ها بازای $\varepsilon_1 = ٤\%$ رخ میدهد .

بدین‌ترتیب درحالت نمونه‌های ماسه مسلح مطالعه شده ($\Delta H = ٢$ cm ، $\gamma_d = ١٦٩$) میتوان تنش (طرزکار) ماسه مسلح را دریك آزمایش با تنش جانبی ثابت بوسیله مقادیر مختلف ضریب که حالت ماسه بین جوشن‌ها را مشخص میکند نشان داد (جدول یك) .

TABLEAU I

Déformation axiale ε_1	Coefficient K
$\varepsilon_1 < 0{,}3\ \%$	$K = K_0$
$0{,}3\ \% < \varepsilon_1 < 2\ \%$	$K_a < K < K_0$
$2\ \% < \varepsilon_1 < 4\ \%$ (rupture des armatures pour $\varepsilon_1 = 4\%$)	$K = K_a$

مقدار حداکثر σ_1 بازای $\alpha = \frac{\pi}{٤} + \frac{\varphi}{٢}$ حاصل میشود . بنابراین منحنی گسستگی ماسه مسلح درصفحه (σ_1 , σ_3) خطی است راست بمعادلهٔ :

$$\sigma_1 = K_p \sigma_3 + K_p \frac{R_T}{\Delta H}$$

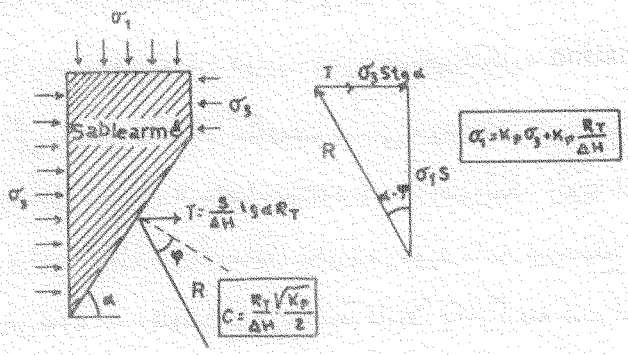
که درآن $K_p = tg^2\left(\frac{\pi}{٤} + \frac{\varphi}{٢}\right)$ میباشد .

با استفاده ازاین فرمول میتوان عبارت σ_0 را که دربررسی تجربی وارد شده بود بدست آورد :

$$\sigma_0 = \frac{R_T}{\Delta T}\, tg^2\left(\frac{\pi}{٤} + \frac{\varphi}{٢}\right)$$

درصفحه گسستگی ، تنش برشی τ و تنش قائم σ بوسیله رابطه زیر بیکدیگر مربوط میشوند :

$$\tau = \sigma tg\varphi + \frac{R_T}{\Delta H}\cdot\frac{\sqrt{K_p}}{2}$$



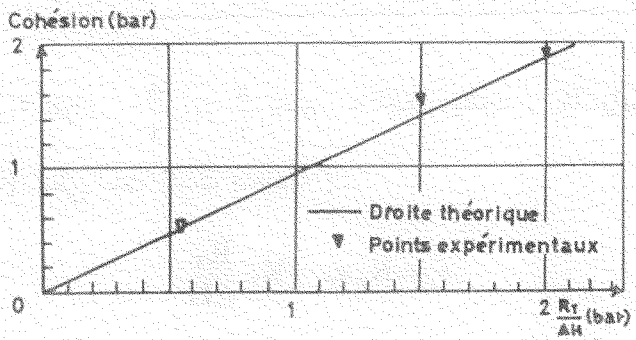
شکل ۷ — تعیین نظری چسبندگی ناشی از وجود جوشن ها دریک نمونه ماسه مسلح

و درنتیجه چسبندگی حاصل از وجود جوشن ها عبارت زیر را خواهد داشت :

$$C = \frac{R_T}{\Delta H}\cdot\frac{\sqrt{K_p}}{2}$$

درشکل ۸ منحنی نظری $C = f\left(\frac{R_T}{\Delta H}\right)$

و نیز نقاط تجربی حاصل از اندازه گیری σ_3 برده شده‌اند و مشاهده میشود که تطابق بین آنها رضایت‌بخش است .



شکل ۸ — مقادیر تجربی و نظری چسبندگی ناشی از جوشن ها

چسبندگی که بدین‌صورت عیان شد تابعی است از میل صفحه برش گسیختگی نسبت به امتداد لایه های جوشن . این چسبندگی الزاماً غیر ایزوتروپ است. مقداری که در بالا محاسبه شد مقدارحداکثر این چسبندگی است منطقه‌ای هم وجود دارد که درآن مقدار این چسبندگی صفر است .

نتیجه‌گیری

نتایج بررسی فوق نشان میدهند زمانیکه گسیختگی درجوشن‌ها رخ میدهد زاویه اصطکاك داخلی ماسه مسلح زاویه اصطکاك داخلی همان ماسه غیرمسلح میباشد و حداکثر چسبندگی آن که درهرحال غیرایزوترپ است تابعی است از مقاومت کششی جوشن‌ها .

بهنگام گسستن حالت ماسه میان آرماتورها دچار تحول‌شده وازحالت سکون به‌حالت حدی‌میرسد . با استفاده از نتایج بالا میتوان روشهای جدید محاسبه برای تعیین ابعاد بناهای خاك مسلح درنظرگرفت و همچنین روشهای موجود را بهبود بخشید .

منش (طرزکار) بناهای خاك مسلح

توزیع کشش درطول جوشن‌ها :

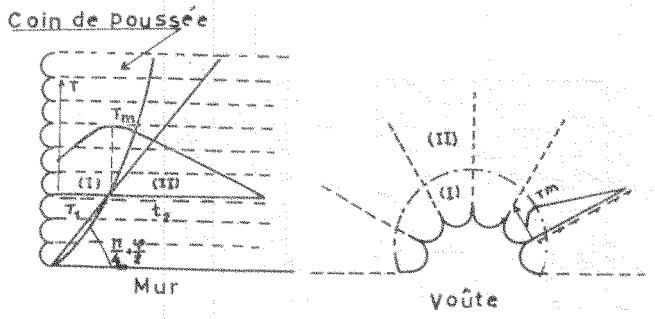
دو تجربه حاصل [٤ و ٩] یکی ازآزمایش برروی دیوارهای واقعی (دیوار نگهبان خاك مسلح بارتفاع ١٠ تا ١٥ متر) ودیگری از آزمایشهای انجام شده برروی ماکت در لابراتوار [٢] نشان میدهند که کشش‌های پدید آمده درجوشن‌های یک بنای خاك مسلح مقدارحداکثر خود را درجوار پوسته ندارند بلکه توزیع آنها بنابرشکل (٩) میباشد . تنش برشی ناشی از خاك برروی جوشن برابر است با :

$$\tau = \frac{dT}{dl}$$

که درآن :

T کشش درجوشن‌ها

و l طول از مبداء آنها یعنی از پوسته میباشد .



شکل ٩ — توزیع تنش درطول جوشن‌ها

بدین‌ترتیب دو منطقه در تودهٔ خاك مشخص‌میشود [١١] : اولین آنها درمجاورت جدار خارجی توده قرار دارد و درآن تنش برشی درجهت خارج دیوار میباشد . خاك سعی دارد که جوشن را با خود به‌

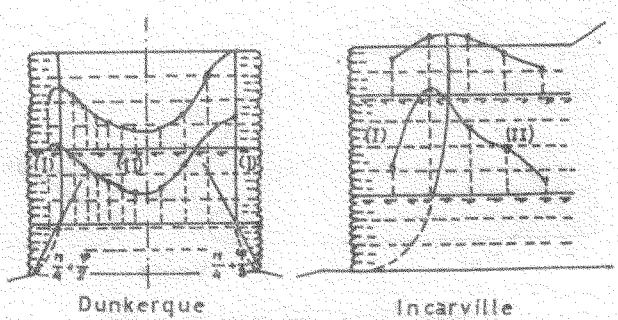
بیرون بکشد. دومین منطقه پشت منطقه‌اولی قرار دارد و درآن تنش‌های کششی درجهت داخل میباشند. دراین منطقه خاك جوشن را نگه میدارد. مرزمیان دومنطقه I و II مکان هندسی کشش‌های حداکثر میباشد. این مرزدرحالت دیواری بسطح آزاد افقی تقریباً قائم‌است و درآن حجم محدوده I کمتر از حجم گوشه کولمب محدود بخط مایل بزاویه $\frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4}$ با افق میباشد.

طول آن قسمت از جوشن‌ها که درمنطقه II قرار دارند طول چسبندگی سطحی⊕ نامیده میشود. یکی از خصوصیات مشخصه بناهای با خاك مسلح آنست که مرز بین دو منطقه I و II اصولاً برحسب شکل بنا و بارهائی که بآن وارد میشود و نشست زمین پی و اصطکاك میان خاك و جوشن متغیر است. دریك بنای خاك مسلح این مرز باید بخصوص تابعی از ضریب اطمینان مربوط به پایداری داخلی باشد.

بطوریکه میدانیم دریك بنای نگهبان مهار شده (مانند سپر فلزی مهار دار) منطقه فشار عامل و منطقه مهار کاملاً مجزا میباشند درصورتیکه دریك بنای‌خاك مسلح این دومنطقه بهم متصل بوده ومرز میان آنها درشرایط مختلف قابل تغییر است.

درشکل ۹ حالت و موقعیت مکان هندسی نیروهای کششی حداکثر دریك دیوار نگهبان و یك طاق قوسی نشان داده شده است ازسوی دیگر شکل ۱۰ نمایانگر نتایج حاصل در دو دیوار آزمایشی بندر دنکرك* و اینکارویل* میباشد.

همین نتایج اولیه بفهم طرز کار ابنیه خاك مسلح کمك زیادی مینماید و اختلاف مشهود میان نتایج نظری و تجربی را توجیه میکنند. درحال حاضر آزمایشهائی برروی مدلهای کوچك سه بعدی دیوار خاك مسلح (مقیاس $\frac{1}{4}$) دردست اجرا میباشد. نتایج این آزمایشها که امید است دقیق‌تر باشند مسلماً در بهتر شناختن مکانیسم خاك مسلح و محاسبات ابنیه آن مثمرثمر خواهد بود.



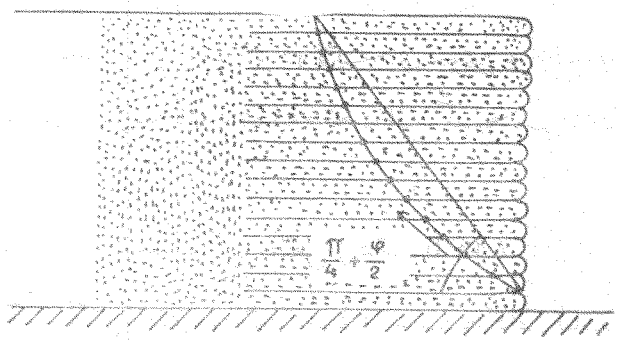
شکل ۱۰ — توزیع تجربی تنش کشش درجوشن‌ها

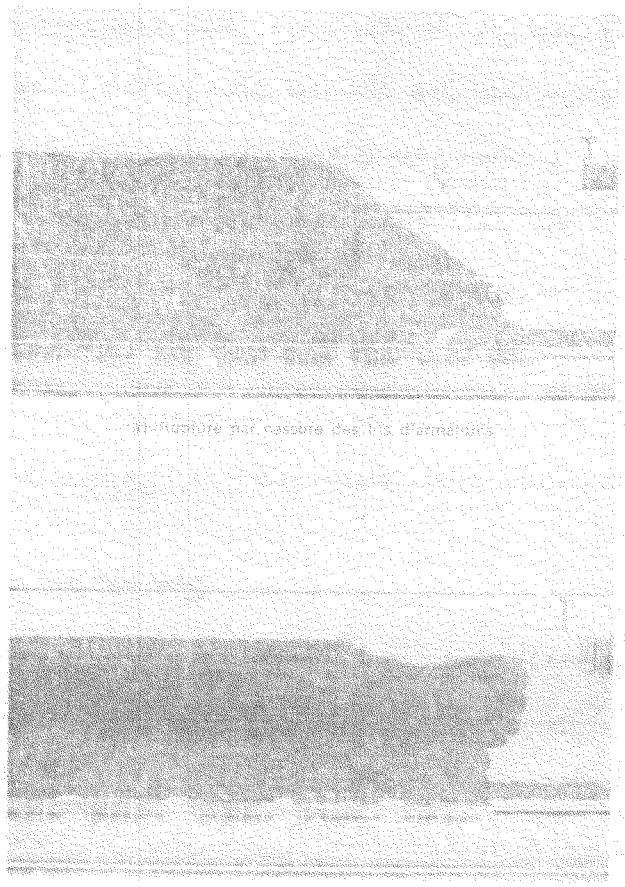
Incarville , Dunkerque * Longueur d'adhérence ⊕

گسیختگی ابنیه خاك مسلح

آزمایشهای متعدد روی ماکت‌های دو بعدی (که درآنها از روش استوانه‌های اشنبلی* استفاده شده) نشان دادند که در یک توده خاك مسلح دونوع گسیختگی امکان‌پذیر میباشد (۳) .

۱ ـ گسستگی بنا دراثر گسیختگی جوشن‌ها (شکل ۱۱) .





b)

شکل ۱۱ ـ انواع شکست دریک توده خاك مسلح

* Schneebeli

گسیختگی بنا مثلاً یک دیوار تدریجی است و از محلی شروع میشود که درآن اولین جوشن پاره میشود و سپس بتدریج گسیختگی به دیگر جوشن ها سرایت میکند . منحنی گسیختگی را میتوان بچشم دید و آزمایش نشان میدهد که دریک مدل کوچک دیوار که مقاومت جوشنها در لایه های مختلف آن یکسان است گسیختگی جوشن ها از پائین شروع شده و به بالا سرایت میکند و خط گسیختگی از خطی بزاویه $\frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4}$ با افق ، چندان دور نمیباشد . پس مشاهده میشود که تفاوت فاحشی میان منحنی گسیختگی پتانسیل مربوط بمکان هندسی نقاط کشش حداکثر در لایه های جوشن و سطح واقعی گسیختگی که مربوط است به نقطه کشش حداکثر تغییر مکان داده شده تحت اثر گسیختگی جوشن های لایه های زیرین وجود دارد .

۲ - گسیختگی دراثر کمبود چسبندگی سطحی (شکل b ۱۱) .

این نوع گسیختگی هنگامی اتفاق می‌افتد که طول جوشن ها کافی نباشد . دراین صورت اصطکاك میان خاك و جوشن ها برای ایجاد نیروی کششی لازم درجوشن ها کافی نیست و میتوان گفت که در توده خاك مسلح چسبندگی وجود ندارد در این حالت توده خاك بدون اینکه جوشنها دچار گسیختگی گردند می‌ریزد و گسیختگی توده دراثر لغزش خاك میان لایه های جوشن میباشد .

اگر این دونوع گسیختگی نتواند حاصل شود پایداری داخلی بنای خاك مسلح تأمین است ولی بررسی پایداری خارجی (کلی) بنا درهرصورت ضروری است چه درصورتی که این پایداری تأمین نباشد بنا میتواند در روی سطح زمین بلغزد و یا واژگون شود ویا در زمین فرو رود .

نتایج بالا اصول اساسی تعیین و محاسبه ابعاد یک بنای خاك مسلح را در برابر پایداری داخلی عرضه مینماید و بررسی پایداری خارجی (کلی) طبق روشهای متداول مکانیک خاك میباشد .

نرمش و انعطاف‌پذیری ابنیه خاك مسلح

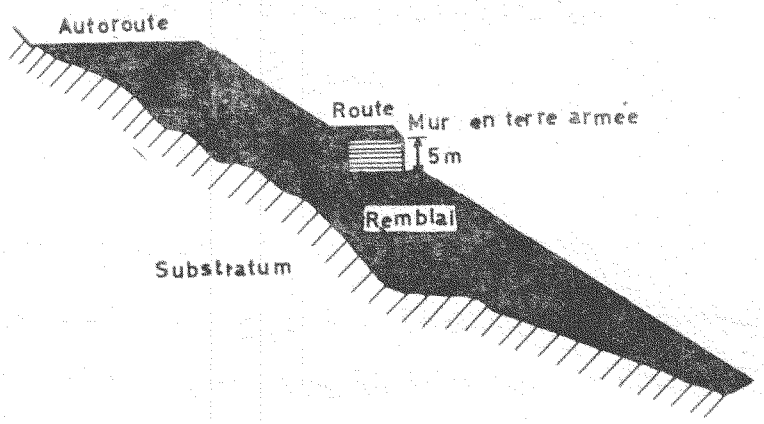
بعکس غالب مصالح ساختمانی (بتن ها مثلاً) خاك مسلح از مصالح غیرقابل انعطاف نمیباشد و میتواند محتمل تغییر شکلهای قابل توجهی بشود بدون اینکه دچار گسیختگی گردد . درنتیجه میتوان گفت که بناهای خاك مسلح قابلیت تغییر شکل پذیری زیادی رادراثر نشست های نامساوی دارند بدون اینکه ساختمان دچار اشکالی گردد . این نرمش تابعی از انعطاف‌پذیری پوسته است و میتوان گفت که پوسته یکی از عوامل اساسی خاك مسلح میباشد .

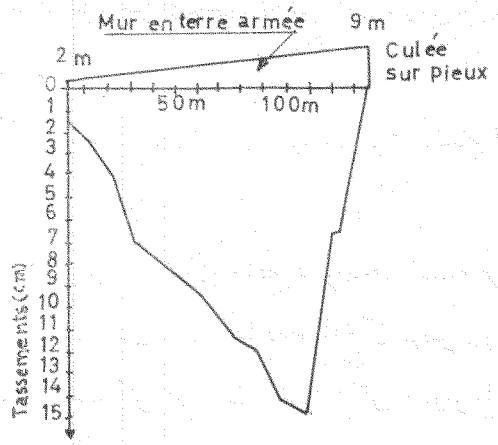
دراینجا باید متذکر شد که نشست درصورتیکه بطور نامساوی حاصل شود میتواند اشکالاتی ایجاد نماید .

در زیر سه مثال مربوط به نشست دربناهای خاك مسلح آورده شده است :

۱ ـ یک دیوار نگهبان بارتفاع ۵ متر که برروی تورب بنا شده بود خاکریز راهی درفوس Fos (جنوب فرانسه) به‌آن متکی بود تقریباً ۱۱۰ متر بطور مساوی نشست کرد و آسیبی بدیوار وارد نشد . پوسته‌ها دراین دیوار فلزی بودند .

۲ ـ درشاهراه مانتون Menton درجنوب فرانسه (A53) دیواری با پوسته‌های فلزی بارتفاع ۵ متر برروی‌خاکریز بلندی بارتفاع ۳۰ متر درمیانه شیب بنا شده‌است تاراه فرعی‌محلی برروی‌آن‌ایجاد شود . (شکل ۱۲)





شکل ۱۲ — تغییر شکل درنشست ساختمانهای خاك مسلح

دوسال بعد از ساختمان شاهراه خاکریز دچار تغییر شکلهای قابل توجهی دراثر نفوذ آب بداخل خاك شد . دیوار در دوقسمت انتهائی خود برروی زمین بکر قرار داشت و مهار شده بود . دربین این دو قسمت نشست‌های نامساوی قابل توجهی که تا ۰/۱۰۰ ارتفاع هم میرسیدند ایجاد شد . این نشست‌ها هرچند باعث پاره شدن قسمتهائی از پوسته آلومینومی شدند تأثیر سوئی درپایداری بنا نداشتند .

۳ - برای احداث راهی ارتباطی درشهرست Sète واقع درجنوب فرانسه [۱۲] دیواری منحنی با پوسته بتنی بارتفاع متوسط ۶ متر برروی ماسه‌های شل و لجن‌دار ساخته شده بود . این دیوار دریکی از دو انتهایی به بنائی متصل شده بود و این بنا برروی شمع مستقر بود و درنتیجه عملاً نشست نکرده بود . علیرغم نشست نامساوی که حداکثر برابر ۷ر. درصد بود (شکل ۱۲ ب) دراین محل هیچگونه اختلالی بوجود نیامد و بجهت وجود صفحه‌های پوسته که بصورت موزائیک قرار گرفته‌اند این نشست نامساوی در ظاهر بنا قابل رؤیت هم نیست .

از روی ملاحظه وضع دیوارهای نگهبان خاك مسلح که تغییر شکل داده‌اند میتوان قواعد زیر را درمورد نشست‌های نامساوی مجاز ΔW_a درطول جدار دیوار بیان نمود .

- دیوار با پوستهٔ فلزی $\Delta W_a \geqslant ۲$ درصد
- دیوار با پوسته بتنی $\Delta W_a \geqslant ۱$ درصد

تعیین ابعاد دیوارهای خاك مسلح

تعیین ابعاد دیوار خاك مسلح از مطالعه پایداری داخلی و پایداری خارجی آن نتیجه میشود . دراین‌جا فقط مسأله پایداری داخلی مورد بررسی قرار خواهد گرفت و نتایج مربوط بآن عرضه خواهد شد . با درنظرگرفتن دوطریقه ممکن گسیختگی یک توده خاك مسلح تعیین ابعاد بنا عبارت خواهد بود ازمحاسبه نیروهای حداکثر کشش در لایه‌های جوشن و سپس تعیین طول جوشن‌ها بطوریکه توده خاك مسلح دچار کمبود چسبندگی سطحی نگردد .

این دومحاسبه کاملاً از یکدیگرمستقل نمیباشند چه برای انجام اولین‌آنها شناخت طول لایه‌های جوشن لازم است .

بهمین دلیل است که در روش‌اول شکل مقطع دیوار را دانسته فرض‌میکنند : مثلاً فرض میکنند دیوار دارای‌مقطع مستطیلی بوده نسبت طول جوشن‌ها به‌ارتفاع‌آن برابر ۸ر. باشد واضح است که درصورت لزوم و با درنظرگرفتن نتایج محاسبات ممکن است لازم شود شکل دیوار را تغییر داد .

- نیروی کشش دربسترهای جوشن‌ها

اولین رابطه‌ای که جهت محاسبه کشش درجوشنها بوسیله ویدال درسال ۱۹۶۶ [۱۴] ارائه شد برپایه تعادل حدی کولمب (شکل ۱۳) استوار بود . آزمایشگاه مرکزی پل و شوسه پاریس LCPC درسال ۱۹۶۷ فرمول دیگری پیشنهاد نمود که برفرضیات بسیار سهل زیر استوار است .

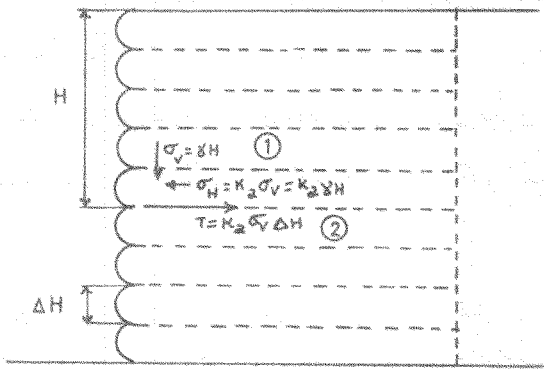
۱ - حداکثر کشش درجوشن‌ها درنقاط اتصال آن با پوسته میباشد .

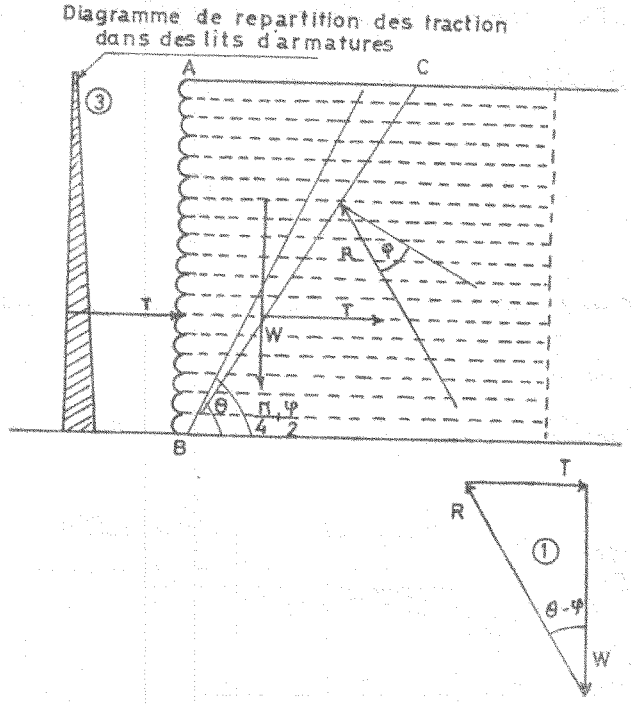
۲ ـ درتمام نقاط جدار تنش‌های اصلی درامتداد قائم و افق اثر میکنند .

۳ ـ برروی جدار مقدار تنش قائم برابر است با $\sigma_v = \gamma H$ که درآن γ وزن مخصوص خاك و H ارتفاع خاك تا سطح آزاد میباشد. دراین روش تعادل پوسته بصورت موضعی منظور میشود یعنی برای یک جزء پوسته بارتفاع ΔH رابطه تعادل تحت اثر فشار خاك و نیروی کشش جوشن‌ها عبارت است از :

$$T = K_a \sigma_v \Delta H$$

و یا $T = K_a \gamma H \cdot \Delta H$ برای واحد طول پوسته





شکل ۱۳ — فرمولهای اولیه تعیین ابعاد دیوارهای خاك مسلح

حال اگر فرض کنیم که تمام بسترهای جوشن‌مقاومت کششی یکسان‌دارند و آن مقاومت را برمتر طول با R_T نشان دهیم ارتفاع گسیختگی و یا ارتفاع بحرانی H_c دیوار مقدار زیر را خواهد داشت :

$$H_C = \frac{R_T}{K_a \gamma \Delta H}$$

مقایسه نتایج عملی حاصل ازآزمایش برمدل‌های کوچک و نتایج نظری‌حاصل از رابطهٔ بالا نشان میدهد (شکل ۱٤) که طول آرماتورها درمقدار H_C مؤثر بوده وازطرف دیگر اختلاف قابل ملاحظه‌ای در حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد میان نتایج تجربی و نظری موجود است .

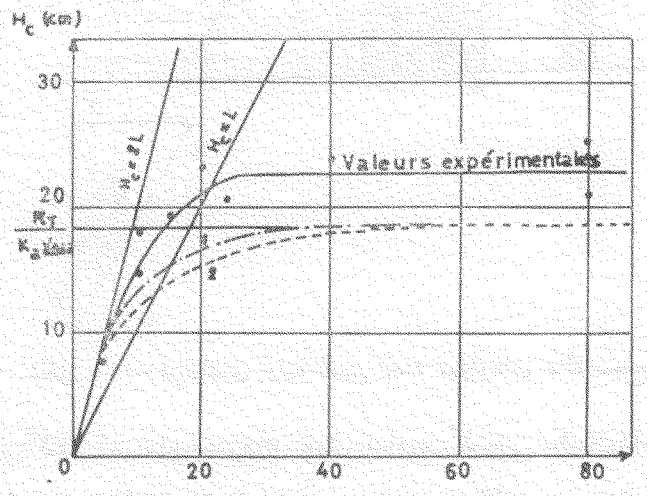
ازاینرو درحال حاضر کشش حداکثر T دریک لایه جوشن را با روشی مشابه روش فوق محاسبه مینمایند با این تفاوت که فشار عامل‌وارد بردیوار را نیز درنظر میگیرند (شکل ۱۵) [۷] . درحالت کلی این نیروی فشار برمقدار تنش قائم σ_v نزدیک پوسته می‌افزاید (درمقایسه با γH) برای حل‌مسئله لازم است فرضیاتی‌درمورد توزیع تنش‌های برروی‌لایه‌های مختلف بنمائیم . معمولاً توزیع میرهوف Meyerhof را که توزیعی است یکنواخت درطول $L-2e$ (e خروج از مرکز عکس‌العمل برروی لایه موردنظراست) درنظر میگیرند .

در پاره‌ای حالات نیز توزیع تنش‌ها را ذوذنقه‌ای فرض مینمایند .

درهردوصورت برای محاسبه σ_v باید تعادل توده‌ای از خاك مسلح بارتفاع H را درنظرگرفت که لایه مورد نظر جهت محاسبه نیروهای کشش قسمت تحتانی آن توده باشد . با این فرض برای دیواری که تحت اثر خاکریزی باسطح آزادافقی قراردارد (خاك خاکریز دیوار یکی‌است) رابطه زیر را خواهیم‌داشت:

(توزیع میرهوف)
$$\sigma_v = \gamma H \frac{1}{1 - \frac{1}{3} K_a \left(\frac{H}{L}\right)^2}$$

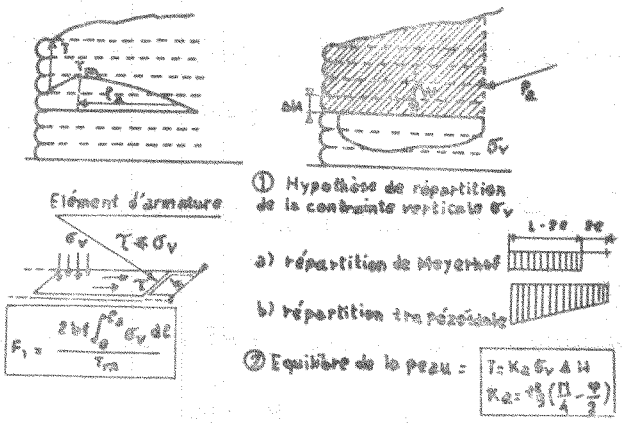
با وجود درنظرگرفتن فشار عاملی دیوار بازهم تفاوت میان نتایج عملی و نظری قابل ملاحظه میباشد



شکل ۱٤ — مقایسه مقادیر تجربی و نظری ارتفاع بحرانی H_C

و نشان میدهد که رابطه فوق بدبینانه است . (شکل ١٤)

برای توجیه این امر میتوان گفت کـه فرضیات محاسبات قبلی براساس نظریه کولمب بوده است . بنابراین نظریه صفحه گسیختگی با افق زاویه $\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$ تشکیل میدهد ومیدانیم که آن قسمت ازخاك که میان جدار خارجی وجدار گسیختگی قرار گرفته است گوشهٔ گسیختگی و یا گوشهٔ کولمب نامیده میشود . درحالت خاك مسلح گوشه گسیختگی کوچکتر ازگوشهٔ کولمب میباشد .

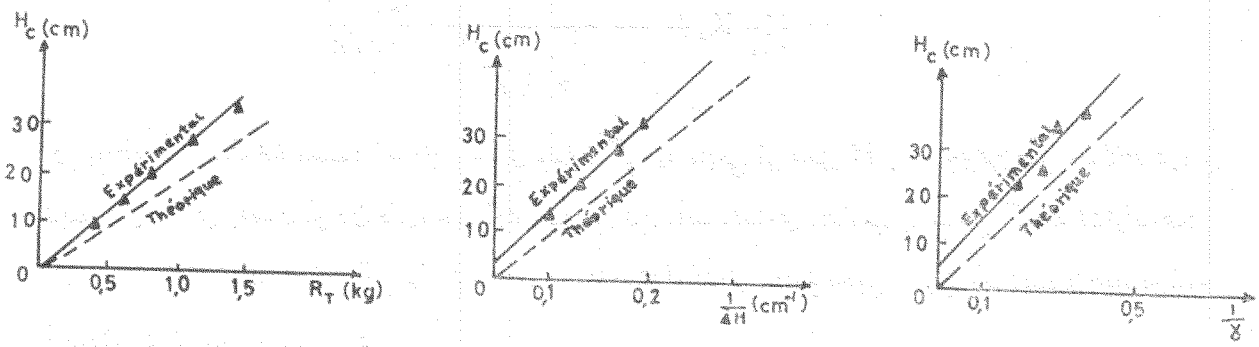


شکل ١٥ — تعیین ابعاد داخلی

عملاً برای بدست آوردن گوشهٔ گسیختگی میتوان کشش درجوشن ها را اندازه گرفت .

نقاط حداکثر کشش درصفحه گسیختگی قرار دارند .

آزمایشهای انجام شده برروی مدل های کوچك دوبعدی [٧] که طی آن تأثیر پارامترهای R_T و ΔH (شکل ١٦) موردمطالعه قرارگرفت توجیه بالا را تأیید مینماید . درحالاتی که طول جوشن ها زیاد میباشد ارتفاع بحرانی H_C با R_T و $\frac{1}{\Delta H}$ و $\frac{1}{\gamma}$ متناسب میباشد . پس ملاحظه میشود کـه عبارت فشار عامل یا K_a را باید تغییر داد .



شکل ١٦ — تأثیر پارامترهای R_T , ΔH , γ برارتفاع بحرانی H_C

طول جوشن‌ها

بعد ازمحاسبه مقادیر حداکثر در بسترهای مختلف جوشن (این‌مقادیر تابع شکل دیوار میباشند) باید ازکافی بودن طول جوشن ها نیز اطمینان حاصل نمود تا قسمت قدامی دیوار بعلت کمبود چسبندگی سطحی جدا نشود و دیوار خراب نگردد. چنین محاسبه‌ای مشکل میباشد چون مکانیسم چسبندگی سطحی درخاك مسلح هنوزکاملاً روشن نشده است. روال براین است که بتوپسند طول چسبندگی سطحی L_a بیش ازطول حد چسبندگی سطحی l_a میباشد.

درصورتیکه تنش قائم σ وارد برجوشن ها یکنواخت و تقریباً برابر مقدار γH حاصل از وزن خاك باشد شرط چسبندگی سطحی چنین نوشته میشود :

$$T_m < \int_0^{l_a} \gamma b f \gamma H dl = \gamma b f \gamma H L_a$$

که درآن T_m کشش حداکثر درجوشن و b عرض جوشن و f ضریب اصطکاك جوشن با خاك میباشد :

$$L_a > \frac{T_m}{\gamma b f \gamma H} \sim \frac{K_a \triangle H}{\gamma b f n}$$

n عبارت است از تعداد جوشن ها دریک متر طول

پس ملاحظه میشود که با تقریب اول طول حدی چسبندگی سطحی l_a از محل بستر جوشن ها مستقل میباشد. برای محاسبه دقیق‌تر لازم است که توزیع واقعی تنش قائم σ درنظرگرفته شود. اگر توزیع میرهوف را که برای محاسبه T_m بکار رفته درنظر بگیریم خواهیم داشت.

$$l_a = \gamma e + \frac{K_a \triangle H}{\gamma b f n \left[۱ - \frac{K_a}{۳} \left(\frac{H}{L} \right)^۲ \right]}$$

و یا :

$$l_a = \frac{H^۲}{\gamma L} K_a + \frac{۱}{۱ - \frac{K_a}{۳} \left(\frac{H}{L} \right)^۲} \cdot \frac{K_a \triangle H}{\gamma b f n}$$

در رابطه بالا ملاحظه میشودکه طول حدی چسبندگی l_a تابعی از عمق H بستر جوشن ها از بالای دیوار میباشد. برای بدست آوردن طول حد یک بستر جوشن باید مقداری متناسب با عرض گوشه فشار درعمق موردنظر بطول حدی چسبندگی l_a اضافه نمود. این‌مقدار اضافی هنوز بخوبی معین نگردیده و باید بوسیله آزمایش دقیقاً آنرا بدست آورد.

معمولاً مقدار $\frac{K_a \Delta H}{2bfn}$ را بعنوان طول حد جوشن‌ها درنظر میگیرند .

موارد استفاده ازخاك مسلح

سه نکته زیر که از تکنولوژی خاص خاك مسلح نتیجه شده‌اند موارد استفاده آنرا درکارهای ساختمانی نمایانتر مینماید :

۱ ـ انعطاف پذیری خاك مسلح خاصیت تغییرشکل‌پذیری قابل ملاحظه‌ای درساختمانها بوجود میآورد و درنتیجه این نوع ساختمانها قادر به تحمل نشست‌های کلی و موضعی قابل توجهی میباشند .

۲ ـ اجرای خاك مسلح لایه‌لایه صورت میگیرد وازاین نظر شباهت کامل بایجاد یک خاکریز دارد .

۳ ـ میتوان درصورتیکه زمین زیر پی شست باشد ساختمان ازخاك مسلح را درچند مرحله انجام داد تا نشست لایه به‌تدریجی که ساختمان ادامه دارد صورت گیرد .

درحال حاضر میتوان بعضی ازابنیه مخصوصاً دیوارها و پی‌ها را با خاك مسلح بنا نمود و بهترین مورداستفاده ساختمان دیوار نگهبان میباشد [۱۰] . دراین قسمت چند مثال از دیوارهای نگهبان ساخته شده درحالت عادی و درحالتی که تحت بارهای تمرکزی میباشند داده میشود .

ـ دیوارهای نگهبان برروی شیب‌های ناپایدار درشاهراه نیس ـ مانتون درجنوب فرانسه شاهراه A53 درارتفاعات شهر مانتون درفرانسه برکوهستانی مشرف برمناطق مسکونی قرارگرفته و قسمتی ازمسیر آن درمارنهای دوران دوم زمین‌شناسی که پوشیده از خاکهای ریزشی و دارای شیب نسبتاً زیاد (۲۰ تا ۳۰ درجه با افق) میباشند قرار دارد . پایداری این قسمت بسیار کم است. برای عبور ازاین منطقه دو راه حل درنظرگرفته شده بود :

الف ـ راه حل سنتی مشتمل براحداث دیوارنگهبان وپل ـ این راه‌حل گران‌ولی بظاهرعملی بنظرمیامد .

ـ لیکن ازنظر ساختمان پی اشکالاتی داشت . چون میبایست پایه‌های بتونی در داخل چاه‌هائی که تا مارن پائین برده باشد احداث کنند و امکان برش آنها دراثر ریزش و لغزش خاکهای سست دامنه وجود داشت .

ب ـ راه حل احداث بدنه راه با عملیات خاکی که ارزانتر ولی از نظر مکانیک خاك با اشکالات فراوانی مواجه بود .

این عملیات بدوصورت ممکن بود اجرا شوند :

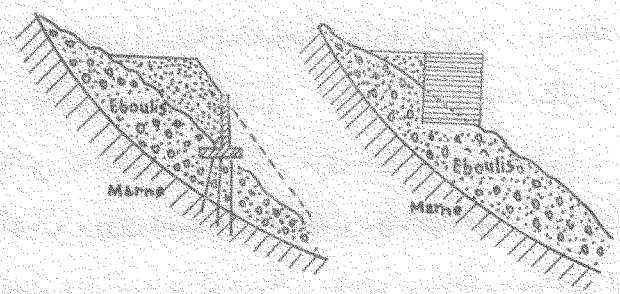
ـ یکی اینکه شاهراه درخاکبرداری در زمینهای سست ومارن قرارگیرد . برای این کار لازم بود شیروانی‌هائی‌بارتفاع ۳۰ متر ایجاد شود ومسأله پایداری این‌شیروانی‌ها حتی اگر مارنها راکاملاً زهکشی میکردند عملاً غیرقابل حل بود .

- دوم اینکه محور شاهراه را چندین‌متر بالا برده ودرنتیجه آنرا روی‌خاکریز قرار داد این‌خاکریز برروی زمین شیب‌دار طبیعی قرار میگرفت و ارتفاع آن ۱۰ تا ۱۵ متر میشد دراین‌حالت مسأله تعادل شیروانی خاکریزها ظاهراً قابل حل میبنمود ولی با مشکل دیگری مواجه بودند و آن تجاوزهای خاکریز از اراضی آزاد بود و درنتیجه لازم میشد دیوارهای نگهبان به‌ارتفاع تا ۲۰ متر ساخته شود که این خود مسائل دیگری را از نظر پی‌سازی دیوار مطرح میکرد.

دراین شرایط ایجاد دیوار نگهبان باخاك مسلح موردتوجه قرار گرفت.

چه با این نوع دیوارها بعلت‌انعطاف‌پذیری واردکردن فشار زیاد متمرکز برزمین زیر پی بسیاری از مشکلات مرتفع میگردید و پایداری کلی دیوارهم قابل قبول بود.

شکل ۱۷ اصول بنای دیوار خاك مسلح و دیوار سنتی بتنی را برزمینهای شیب‌دار نشان میدهد.



شکل ۱۷ — شاهراه جنوب فرانسه راه حل‌دیوار نگهبان متجاوز دیوار خاك مسلح

مثال دوم - دیوارهای نگهبان راه ورودی به شاهراه ست Sète (شهری درجنوب فرانسه) برای احداث این ورودی لازم بود بموازات یک کانال موجود [۱۲] شوسه‌هائی درسطوح مختلف بدون قطع ترافیک ساخته شود.

محدود بودن عرض زمین قابل استفاده و بدی جنس آن (تابلو ۲) ایجاب میکرد که دیوارهای

Epaisseur (m)	Nature	Caracteristiques de cisaillement rapide		Caractéristiques pressiométriques	
				pl (bar)	E (bar)
4 à 5	Sables lâches et vasarde	C = 0 bar	φ = 25°	2,5	45
		← caracteristiques médiocres →			
3	Argile plastique normalement consolidée	C_u = 0,7 bar	φ_u = 0°	4	45
Substratum	Marne altérée	C_u = 1,6 bar	φ_u = 0°	8	120

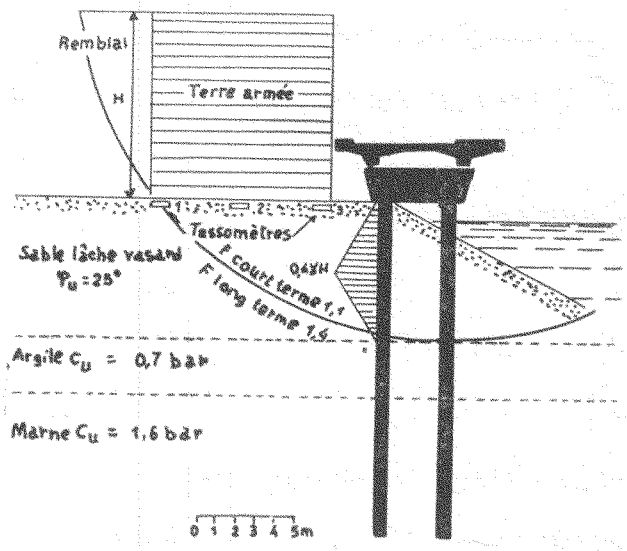
جدول شماره ۲ — مشخصات زمین پی راه ست Sète

نگهبان برروی پی‌های عمیق (شمع) ساخته شوند . ولی پس از مطالعه و مقایسه تمام این دیوارها را بالاخره از خاك مسلح با پوسته بتنی ساخته و بدین‌ترتیب بهای گراف پی صرصه‌جوئی شد .

جالب‌ترین مسأله‌ای که دراین ساختمان مطرح شد مربوط بقسمت کناره کانال بود چه درآنجا یکی از شوسه‌های راه را میبایست بطور پیشرفته در روی کانال بنا نمود . برای اینکار در بدوامر راه حل سپر فلزی با مهار در رأس درنظر گرفته شده بود ولی این راه حل بعلت اینکه قراردادن مهارها موجب تخریب راه موجود درکنار کانال‌وبستن ترافیك میگردید موردقبول قرار نگرفت . راه حلی که بالاخره اتخاذ گردید این بود که شوسه‌ای بصورت پل طولی روی شمعهای گیرداده درسارن ، درعمق تقریباً ۶ متر ، احداث گردد و بعد دیواری از خاك مسلح برای ایجاد خاکریز شوسه بالائی ساخته شود .

پایداری کوتاه مدت این دیوار بارتفاع حداکثر ۹ متر و بهمین عرض تامین نمی‌بود چه ضریب اطمینان درمقابل فرو رفتن دیوار در زمین پی (ماسه شل) و همچنین ضریب اطمینان درمقابل گسیختگی دایره‌ای خاکریز پشت دیوار درحدود یک بود . ضریب اطمینان درمقابل همین گسیختگی دایره‌ای درازمدت با توجه به مشخصات زمین که یکنواخت فرض شده بود ($c'=0$, $\varphi'=30^\circ$) برابر ۱٫۴ میشد که ناشی از تحکیم ماسه‌های شل زیر دیوار بود . با توجه به نفوذپذیری نسبی این ماسه‌ها احتمال داده میشد که اضافه فشارهای حفره‌ای بتدریجی که ساختمان مجموعه دیوار و خاکریز پیشرفت میکرد از بین بروند و لازم نبود که مانند مورد ساختمان دیوار روی زمینهای شل عملیات اجرائی درچندمرحله انجام شود که درهرمرحله قسمت انجام شده نشست کافی بنماید .

برای اطلاع از تحول وضع دیوار درطول مدت ساختمان پیزومترها و نشست سنج‌هائی در داخل



شکل ۱۸ — بنای دیوار و شوسه روی پل درکناره کانال ست Sète

آن کار گذاشته شدند . نتایج اندازه گیریها نشان دادند که اضافه فشارهای حفره‌ای بلافاصله از بین میرفتند و اندازه متوسط نشست درحدود ۱۳ سانتیمتر بوده است .

نشست دیوار درطرف پشت کانال بیش ازطرف جلوی کانال میبود و این اختلاف تغییر شکل زمین زیر پی را درامتداد سطح گسیختگی دایره‌ای پتانسیل نشان میداد .

دراثر این تغییر شکلها رانش های جانبی به شمعهای پل وارد میآید و از روی حساب لازم شد که ابعاد شمعها را برای مقاومت درمقابل لنگر ۲۰ تن متر تعیین نمایند . شکل ۱۲ نشست‌های نامساوی زمین پی را درطول دیوار خاك مسلح نشان میدهد . حداکثر اختلاف نشست ۰٫۷ سانتیمتر دربتر میباشد و هیچ نوع خسارتی ازآن نتیجه نشده است .

مثال سوم ـ پایه کناری پل تیون‌ویل Thionville (شمال شرق فرانسه)

دربین ساختمانهائی که درسالهای اخیر مطالعه وطرح شده‌است پایه های جانبی پلها را میتوان ذکر نمود و دراینجا یک نمونه ازآنها راکه ساختمان آن در ژوئیه ۱۹۷۲ آغازگردیده ذکر میکنیم :

شاهراه A۳۱ بین ایلانژوتیونویل به پایه کناری پل بتون‌ویل ختم میشود رعایت عرض زیر خط ساختمان دیوار نگهبان برای نگاهداری خاکریز ورودی پل لازم بود . دو راه حل برای ساختمان پایه کناری پل و دیوارها موردمطالعه قرارگرفت :

ـ یکی عبارت ازساختمان پایه کناری با بتن مسلح روی شمع و ساختمان دیوارهای نگهبان با بتن مسلح .

و دیگری ساختمان پایه کناری با خاك مسلح بارتفاع ۱۲ متر از روی زمین طبیعی تا زیر تکیه گاه پل . برای تحمل بارهای وارد از پل که درحدود ۷۵۰ تن میشد سطح توزیعی بمساحت ۱۰×۴ مترمربع دربالای دیوار پیش بینی شده بود . نشستی که برای این پایه درنظرگرفته شده ۲۰ سانتیمتر بوده که بعد از سه ماه از خاتمهٔ ساختمان دیوار میبایستی ظاهر شود .

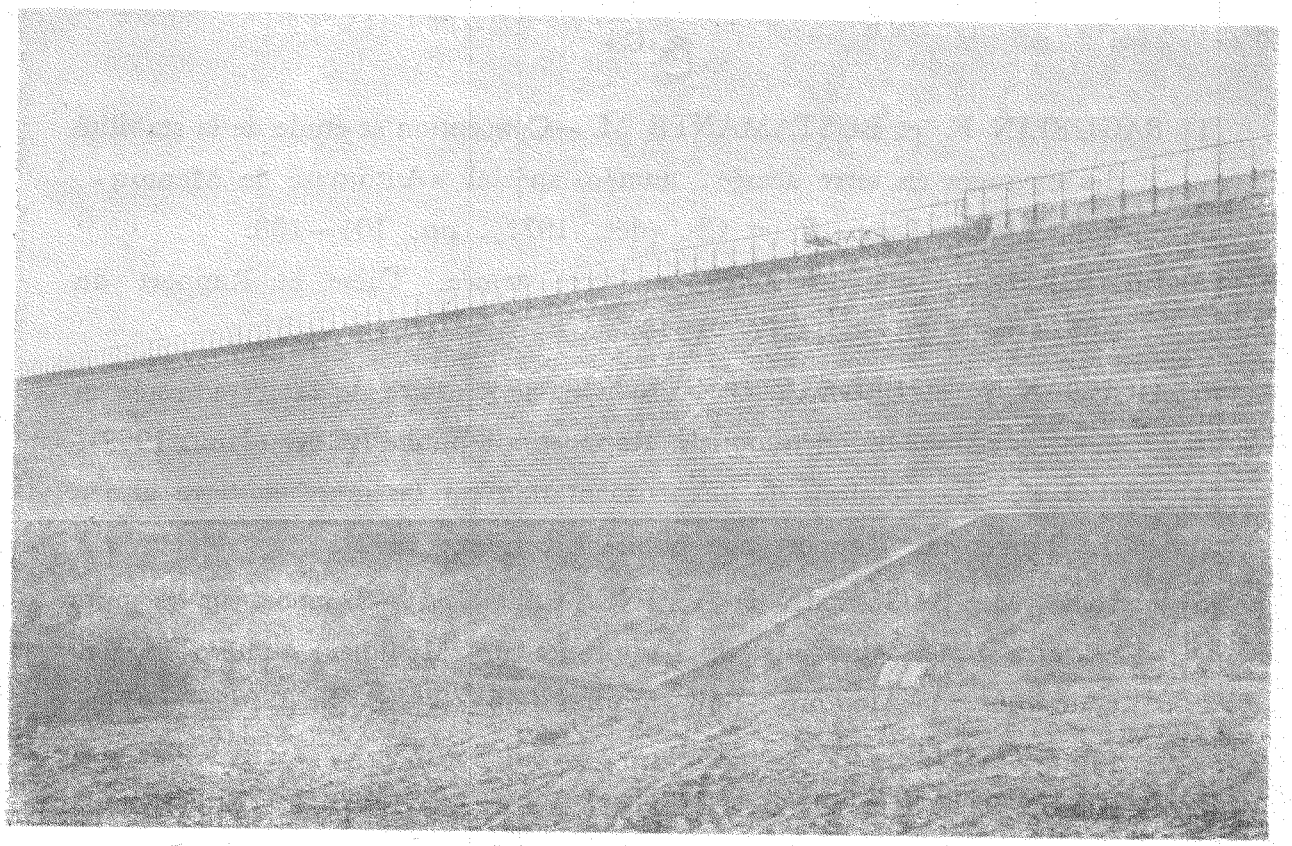
درمقایسه بین دو راه حل طریقه دوم مورد قبول قرارگرفت زیرا خیلی با صرفه تر بود و نسبت بین هزینه ها در دو راه حل به ۲٫۵ بالغ میگردید .

مثال چهارم ـ دیوارهای بارانداز در بندر دنکرك Dunkerque دیوارهای نگهبانی که بارهای متمرکزی را دربالای خود تحمل میکنند در دومورد دربندر دنکرك ساخته شده‌اند که یکی از آنها بطور عمیق مورد بررسی قرارگرفته است . این دو دیوار قسمتهای اصلی دوبارانداز وسیع میباشد که یکی برای بندر دنکرك (بطول ۷۹۰ متر با ظرفیت مفید ۱۵۰۰۰۰ مترمکعب) و دومی برای کارخانه ذوب‌آهن اوزینور (بطول ۶۴۰ متر و باظرفیت ۱۰۰۰۰۰ مترمکعب) احداث شده‌اند . درهردومورد دیوارعظیمی

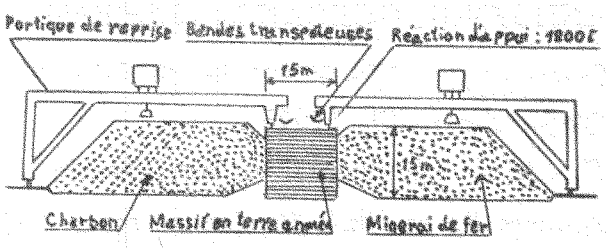
با خاك مسلح بارتفاع ۱۰ متر در وسط بارانداز ساخته شده که سنگ آهن وذغال سنگ را ازهم جدا میکند و مستقیماً ریل‌های حرکت جرثقیل‌ها و نوارهای نقاله روی آن قرار دارند . با توجه باینکه زمین پی (ماسه شل با طبقات لای قابل تراکم) بسیار سست بود راه حلهای معمولی از لحاظ پی‌سازی و مکانیک خاك مشکلات زیادی را بوجود میآورد (لزوم پی‌سازی روی شمع برای جلوگیری از نشست قابل ملاحظه پی‌ها رانش‌های جانبی روی سرشمع‌ها را دراثر فشار تودهٔ سنگهای معدنی و غیره) .

لذا تصمیم به احداث دیوار خاك مسلح گرفته شد که مورد اجراء قرارگرفت .

نشست نهائی این‌دیوارها درحدود نیم متر بوده که قسمت‌اعظم آن درطول مدت ساختمان ایجاد شده است .



شکل ۱۹ — دیوار بارانداز و محل انبار معدن آهن و ذغال سنگ دربندر دنکرك Dunkerque



نتیجه

بدون اینکه وارد تمام مسایل مربوط به تعیین اندازه‌ها و ساختمان بناهای خاك مسلح شده باشیم دراینجا سعی کرده‌ایم مهمترین نتایجی را که تاکنون ازشناخت این تکنیك جدید بدست‌آمده عرضه نمائیم. بعلت انعطاف پذیری خاك مسلح میتواند راه حلهای نوین و اقتصادی برای مسایل مشکل ارائه دهد و بدین‌جهت جای خود را دربین روشهای اصلی ساختمانی باز کرده است.

منابع

[1] BAGUELIN F. et BUSTAMANTE M. —Conception et étude de la stabilité des ouvrages en terre armée. numéro spécial «Autoroute de Menton», Bull. Liaison Labo. P. et Ch. (déc. 1971). pp. 101 – 108.

[2] BEHNIA C. —Etude des voutes en terre armée. Thèse et Rapport de recherche N. 26 du LCPC, 1973.

[3] GUEGAN Y. et LEGEAY G. – Etude en laboratoire de la terre armée en modèles réduits bidimensionnels. Rapport non publié LCPC (janv. 1969).

[4] HULO Y. – Les résultats de l'expérimentation sur les murs en terre armée de Dunkerque. Rapport non publié LR Lille, (1972).

[5] MAREC M., BAGUELIN F. et VINCENTELLI A. – Données sur les murs en terre armée construits sur l'autoroute de Menton. numéro spécial «Autoroute de Menton», Bull. Liaison Labo. P. et Ch., (déc. 1971), pp. 109 – 114.

[6] NGUYEN THANH LONG, GUEGAN Y. et LEGEAY G. – Etude de la terre armée a l'appareil triaxial, Rapport de recherche LCPC 17 (juil. 1972).

[7] NGUYEN THANH LONG, GUEGAN Y., LEGEAY G. et SCHLOSSER. F. —Etude des murs en terre armée sur modèles réduits bidimensionnels, Rapport de recherche LCPC (1973).

[8] SCHLOSSER F. – Mur expérimental en terre armée d'Incarville, Bull. Liaison Labo. routiers P. et Ch., 33, (aout—sept. 1970), pp. 7 – 10.

[9] SCHLOSSER F. et NGUYEN THANH LONG. – Expérimentation sur le mur en terre armée d'Incarville, Rapport non publié LCPC (1970).

[10] SCHLOSSER F. et NGUYEN THANH LONG. – Comportement de la terre armée dans les ouvrages de soutènement, 5° Congr. européen de mécanique des sols et des travaux de fondations (Madrid, avril 1972).

[11] SCHLOSSER F., NGUYEN THANH LONG et SEVESTRE F. – Ouvrages en terre armée sur sols de faible portance, Congr. int. de mécanique des sols et des travaux de fondations (Moscou, 1973).

[12] SCHLOSSER F. – La terre armée dans l'échangeur de Sète, Rev. Générale des Routes 480 (oct. 1972) et Bull. Liaison Labo. P. et Ch. 63 (janv. – fév. 1973, a paraitre).

[13] SCHLOSSER F. et VIDAL H. – La terre armée, Bull. Liaison Labo. P. et Ch., 41 (nov. 1969), pp. 101–144.

[14] VIDAL H. – La terre armée, Ann. ITBTP (juil. – aout 1966).

[15] VIDAL H. – La terre armée (réalisations récentes), Ann. ITBTP (juil. – aout 1969).