

بهسازی پی با استفاده از شمعهای

ماسه ای متراکم شده

Eizaburo Ichimoto , Naomiki Suematsu

ترجمه : مسعود عبدلی

چکیده :

عموماً سه روش اصلی در بهسازی خاکها شناخته شده است ، که این سه روش بر اساس اصول بهسازی خاک عبارتند از: روش جایگزینی Replacement method ، روش متراکم سازی Densification method و روش جامد سازی Solidification method که این سه روش نیز خود به ۵۰ نوع دسته بندی می گردند . از سال ۱۹۵۰ در کشور ژاپن موارد زیادی با استفاده از روشهای فوق جهت بهسازی خاک بکار گرفته شده ، که در ابتدا روش جایگزینی و سپس روش متراکم سازی و اخیراً نیز روش جامد سازی (بالا بردن استحکام) مورد استفاده قرار گرفته است . بنابراین در زمان حاضر می توان استفاده از روشهای جایگزینی و متراکم سازی را بعنوان روشهای اصلی در بهسازی خاک بحساب آورد .

در عملیات صحرائی بجز در موارد موقتی ، روش متراکم سازی به شکل زهکشی عمودی و اجرای شمع های ماسه ای متراکم شده در بیشتر از ۹۰٪ کارهای بهسازی خاک ، مورد استفاده قرار گرفته است . همچنین در ۷۰٪ پروژه های انجام گرفته برای فرودگاهها و بنادر ، از روش جایگزینی جهت بهسازی خاک که در ادامه با زهکشی عمودی و اجرای شمع ماسه ای متراکم شده همراه بوده ، استفاده شده است . سه روش فوق از سال ۱۹۶۵ بمدت ۱۰ سال در بیشتر از ۹۵٪ از عملیات بهسازی خاک ها بکار گرفته شده اند .

۱ - خلاصه ای از روش Compozer :

روش Compozer همراه با ایجاد شمع های ماسه ای متراکم شده بوده ، که در این روش شمع های ماسه ای با قطر زیاد که تحت تأثیر ضربه های حاصل از بارگذاری ویریه ای کاملاً متراکم می گردند، در زمینهای سست و یا رسی نرم ایجاد می شوند . شمعهای ماسه ای متراکم شده ویریه ای بکمک تجهیزاتی شامل ؛ کلاهک ،

لوله های کیسینگ حاوی پیشرو مخصوص و یکک ویریه کننده جهت ایجاد ویریه عمودی ، ایجاد می گردند . این روش با استفاده از تجهیزات یکسان نه تنها در زمینهای ماسه ای سست بلکه در زمینهای رسی نرم نیز قابل اجرا می باشد که در زمینهای ماسه ای ، عمل تثبیت خاک در نتیجه تراکم زمین و ایجاد شمع های ماسه ای خوب متراکم شده بوسیله دستگاه ویریه انجام می گیرد .

اگرچه بخشی از عمل تثبیت در زمین های رسی ، بعلت نشست زمین در نتیجه متراکم نمودن شمع های ماسه ای توسط عملکرد دستگاه ویریه صورت می پذیرد ، ولی عمدتاً تقویت زمینهای رسی با توجه به وجود دو ماده با سختیهای متفاوت ، تابعی از تمرکز تنش بیشتر وارد بر شمعهای ماسه ای متراکم شده با مقاومت بالاتر می باشد . از آنجا که این روش همچنانکه در بالا توضیح داده شده ، دارای عملکرد تثبیتی متفاوتی می باشد ، تحت عنوان روش Vibro – Compozer شناخته شده است . این روش بطور گسترده ای در ژاپن تقریباً برای انواع خاک ها واقع در زیر سازه های مختلف از قبیل ساختمانها ، مخزنها ، بندرگاهها ، پلها ، سازه های زیرزمینی و غیره بکار می رود .

۲- اجرای روش Compozer :

برای اجرای روش Compozer همانگونه که در شکل شماره ۱ مشاهده می گردد ، مراحل زیر باید انجام گیرد :

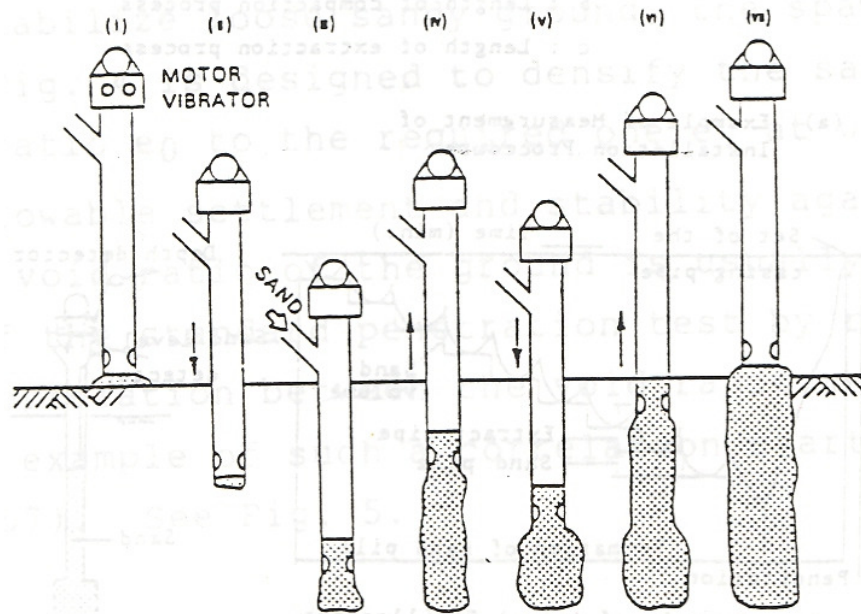
۱- ۲- لوله کیسینگ که بوسیله قطعه ای به ویراتور متصل گردیده را در زمین فرو می کنیم .

۲- ۲- با رسیدن لوله کیسینگ به عمق مورد نظر ، از طریق قیفی واقع در بالای کیسینگ ، مقداری ماسه را بدرون کیسینگ ریخته تا بخشی از کیسینگ را فرا گیرد .

۳- ۲- لوله کیسینگ را کمی بالا آورده و با دمیدن هوا توسط کمپروسور بدرون آن ، بخشی از یک شمع ماسه ای را درون زمین بوجود می آوریم .

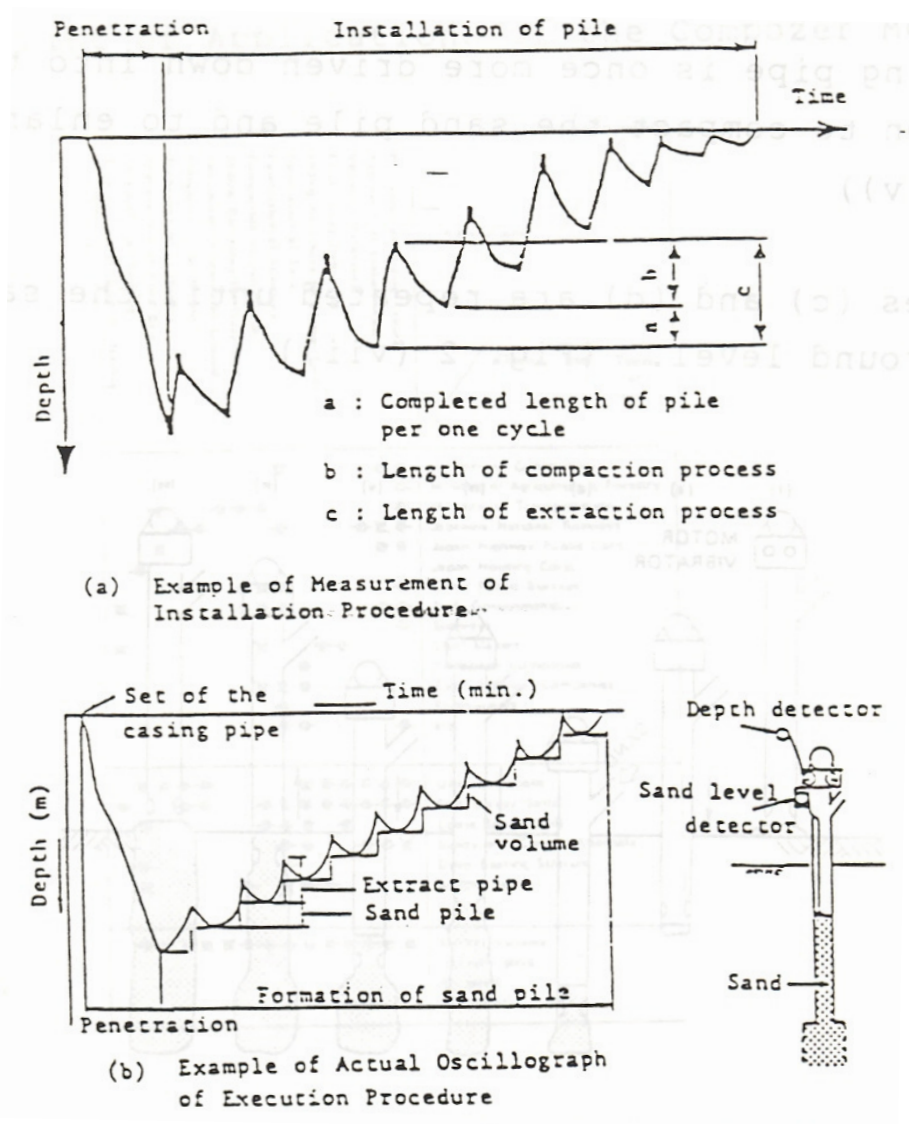
۴- ۲- لوله کیسینگ را مجدداً بسمت پائین فرستاده و تحت عملکرد دستگاه ویریه قرار می دهیم تا شمع ماسه ای متراکم گردد ، که در اینصورت قطر آن نیز بزرگتر می شود .

۵-۲- مراحل ۳ و ۴ را مجدداً برای بخش های بالایی ماسه ریخته شده در داخل کیسینگ ، تکرار کرده تا شمع ماسه ای تا سطح زمین ساخته شود .



شکل شماره ۱- روش ایجاد شمع های ماسه ای (Compozer pile)

شمع های ماسه ای متراکم شده هم در خشکی و هم در بستر دریا معمولاً با قطری معادل ۷۰ تا ۲۰۰ سانتیمتر ایجاد می گردند، که این قطر بستگی به قطر لوله های کیسینگ (بین ۴۰ تا ۱۵۰ سانتیمتر) دارد . همزمان با متراکم نمودن ماسه در کیسینگ و ایجاد شمع ماسه ای ، سطح ماسه و عمق کیسینگ بطور منظم اندازه گیری می شود ، که شکل شماره ۲ مثالی از این اندازه گیری ها را بر حسب زمان نشان می دهد . همچنین در هر سیکل تکراری فرو بردن لوله کیسینگ قطر شمع ماسه ای ایجاد شده ، می تواند از طول a در شکل شماره ۲ و حجم ماسه ای که از لوله کیسینگ به درون زمین منتقل می گردد ، بدست آید .



شکل شماره ۲ - مثالی از فرایند اجرایی برای روش Compozer

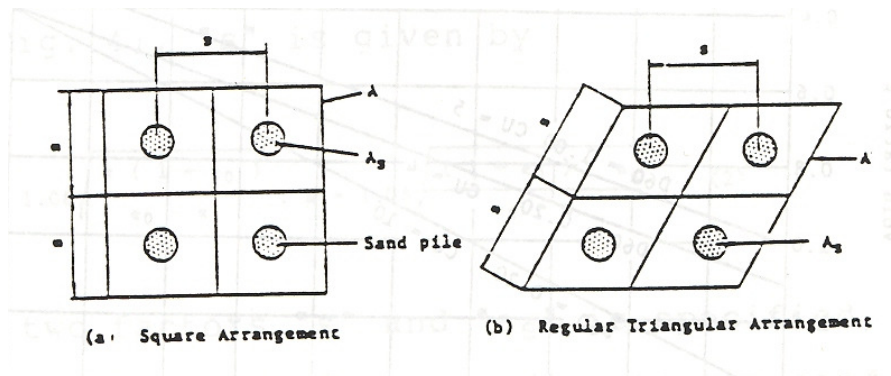
۳- طراحی اجرای عملیات :

طراحی عملیات زیر بوسیله موری یاما ، در سال ۱۹۵۸ برای زمینهای ماسه ای و در سال ۱۹۸۲ برای زمینهای رسی ارائه شده است .

۱-۳- زمینهای ماسه ای :

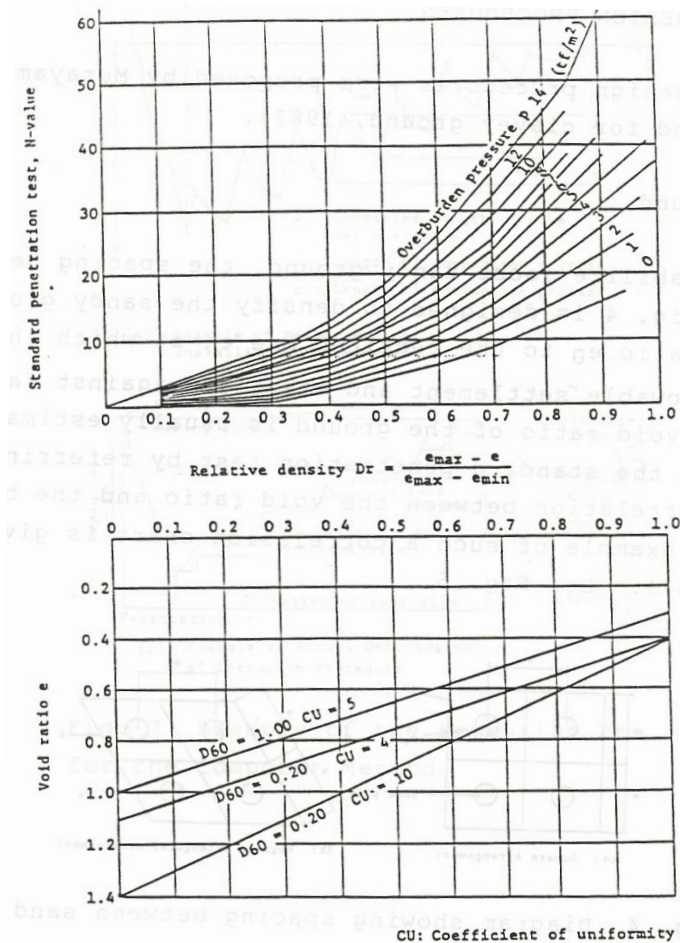
در اجرای تثبیت زمینهای ماسه ای سست ، فاصله بین شمعهای ماسه ای (S) که در شکل شماره ۳ دیده می شود ، بگونه ای طراحی شده است که در اثر عملکرد تراکم پوکی در خاک ماسه ای مجاور که از نظر

نشست و مقاومت مجاز تا حدی در مقابل شکست مطمئن می‌باشد، از پوکی اولیه e_0 به پوکی مورد نظر e تبدیل گردد.



شکل شماره ۳- شکل، فضای بین شمعهای ماسه ای را نشان می دهد

در عمل، پوکی زمین معمولاً از اعداد بدست آمده از آزمایش ضربه ای (آزمایش SPT) و با استفاده از نموداری که رابطه بین پوکی و تعداد ضربه SPT (N) را نشان می دهد، تخمین زده می شود. شکل شماره ۴ مثالی از رابطه بین پوکی و تعداد ضربه (N) را که بوسیله گیبس و هولتز (۱۹۵۷) ارائه شده را نشان می دهد.



شکل شماره ۴- نسبت بین مقدار N و دانسیته نسبی (Gibbs and Holtz, 1957)

اگر فرض شود که ایجاد شمعه‌های ماسه ای متراکم شده باعث تراکم خاک احاطه کننده ، تنها در جهت های جانبی فواصل شمع ها (S) گردد ، بنابراین می تواند راه حلی برای روابط بعدی ارائه نمود .

اگر شمعه‌های ماسه ای همانگونه که در شکل شماره ۳ نشان داده شده است ، به شعاع a و در یک آرایش مربعی قرار داشته باشند ، فواصل جانبی S از رابطه زیر تعیین می گردد:

$$\frac{S^2 - \pi a^2}{S^2} = \frac{1 + e}{1 + e_0}$$

بنابراین داریم :

$$a = \sqrt{\frac{(1 + e_0) \cdot a_s^2}{e_0 - 1}} \quad (1)$$

که در آن داریم :

a_s : نسبت جایگزینی در بهسازی که از رابطه زیر بدست می آید :

$$a_s = \frac{A_s}{A}$$

A_s : حجم ماسه در عمق یک متری از شمع ماسه ای

A : حجم خاک در عمق یک متری زمین (در مقایسه با شمع ماسه ای)

بطور مشابه ، اگر شمعه‌های ماسه ای بصورت آرایش مثلثی منظم (شکل شماره ۳) قرار گرفته باشند ، S از رابطه زیر تعیین می گردد :

$$a = \sqrt{\frac{(1 + e_0) \cdot a_s^2}{e_0 - 1}} \quad (2) \quad s = 1.08 \sqrt{\frac{\pi(1 + e_0)}{e_0 - 1}}$$

اگر یکی از دو فاکتور S و a_s تعیین شده باشد ، دیگری را می توان از طریق معادله انطباق با آرایش شمع ماسه ای بدست آورد ، و اغلب S در ابتدا و a_s بعداً محاسبه می گردد .

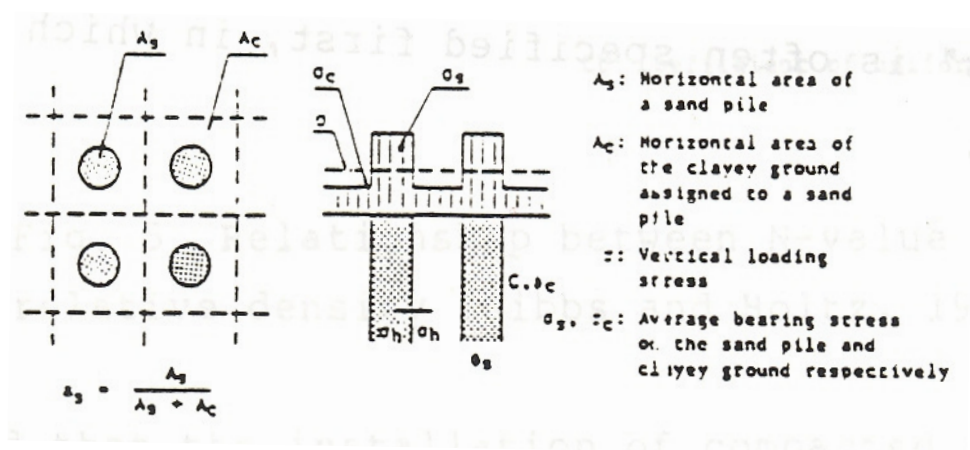
۲-۳- زمینهای رسی :

در صورتیکه عمل بارگذاری بر روی زمینهای رسی و شمعهای ماسه ای متراکم شده (زمینهای مرکب) صورت گیرد بعلت اختلاف در مقاومت آنها، تنشهای باربری ایجاد شده بطور غیر یکسان عمل کرده و تنش متمرکز شده بر روی شمعهای ماسه ای با افزایش در نشست زمینهای رسی، افزایش می یابد. تنش حاصل از بارگذاری عمودی (σ_c) و متوسط تنش های باربری بر روی شمعهای ماسه ای و زمینهای رسی (σ_s, σ_c) از فرمولهای زیر بدست می آیند.

از موازنه تنش ها داریم:

$$(A_s + A_c) \cdot \sigma = A_s \cdot \sigma_s + A_c \cdot \sigma_c \quad (3)$$

در نواحی مسطح، A_s و A_c بترتیب مربوط به یک شمع ماسه ای و خاک رسی دربرگیرنده بوده که در شکل شماره ۵ مشاهده می گردند.



شکل شماره ۵- نمودار مربوط به زمین مرکب (Composite Ground)

در معادله شماره ۳، σ_s و σ_c از طریق معادلات زیر بدست می آیند:

$$\sigma_c = \frac{\sigma}{[1 + (m - 1)a_s]} \quad (4)$$

$$\sigma_s = \frac{m\sigma}{[1 + (m - 1)a_s]} \quad (5)$$

که داریم:

m : نسبت تنش های متمرکز که از رابطه زیر بدست می آید:

$$m = \frac{\sigma_s}{\sigma_c}$$

از آنجا که :

$$a_s = \frac{A_s}{(A_s + A_c)}$$

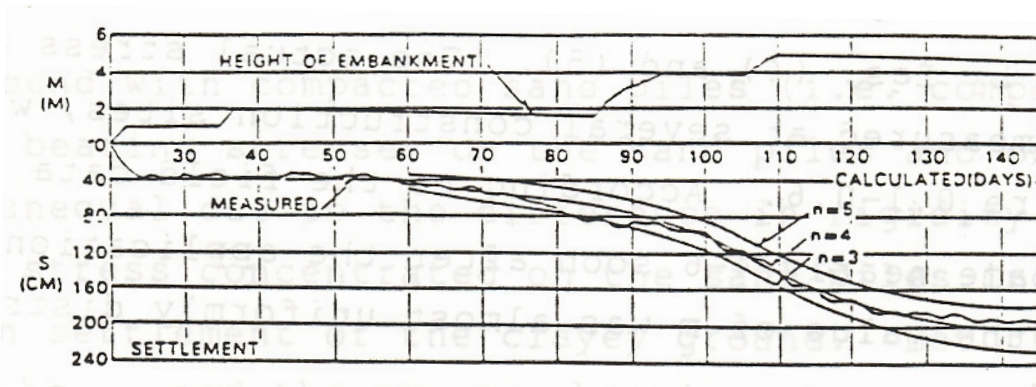
$$a_c = \frac{A_c}{(A_s + A_c)}$$

در صورتیکه مقدار m مشخص باشد ، شدت تنش های σ_s ، σ_c برای a_s می تواند از رابطه های ۴ و ۵ بدست آید . نسبت تنش های متمرکز واقعی اندازه گیری شده (m) در چندین سایت ساختمانی با مقدار a_s بین ۰/۱ تا ۰/۶ و برطبق اطلاعات صحرائی بدست آمده ، تقریباً ۴ تا ۶ بوده که در طی زمان کوتاهی با افزایش بارگذاری با عمق زمین بطور یکسان توزیع می گردد .

از نظر تئوری ، نسبت تنش های متمرکز با استفاده از معادلات ترکیبی برای ماسه و رس مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است (Murayama , Matsuoka and Suematsu , 1972) . مقادیر این نسبت در آنالیزها با ارائه نمودن پارامترهای فیزیکی ماسه و رس ، با اطلاعات واقعی بدست آمده در سایتهای ساختمانی نزدیک بوده ، که در این نسبت مقدار a_s تاثیر کمی نیز دارد .

در روش Compozer ، شمعهای ماسه ای باعث تسریع تحکیم در لایه های رسی ، مشابه با روش زهکشی در ماسه شده ولی بعلاوه وجود این شمعها تمرکز تنش بر روی زمینهای رسی کاهش یافته و بنابراین میزان نشست تحکیمی زمین در این روش کمتر از روش زهکشی معمولی ماسه می باشد . بهمین دلیل نسبت تنش متمرکز واقعی m می تواند از میزان کاهش در نشست واقعی در نتیجه تحکیم تخمین زده شود .

شکل شماره ۶ ، مثالی از منحنی نشست واقعی با منحنی هایی که بصورت تئوری و با استفاده از تئوری تحکیم معمولی محاسبه شده اند در زمینی واقع در زیر پی یک خاکریز را نشان می دهد . در این نمودار کاهش تنش بارگذاری بکمک معادله شماره ۴ و با استفاده از نسبتهای متمرکز ۳ ، ۴ ، ۵ $m =$ فرض گردیده ، که در مقایسه منحنی های واقعی با منحنی های تئوری ، منحنی تئوری با $m = ۴$ مناسبترین نوع در مقایسه با نوع واقعی آن بحساب می آید (Yamamoto and Hoshi , 1967) .



شکل شماره ۶ - مقایسه منحنی نشست واقعی با منحنی های نشست تخمین زده شده در

زمین مرکب (Composite Ground) (Yamamoto and Hoshi, 1967)

در این روش فضای بین شمعه های ماسه ای باید بگونه ای طراحی گردد که باعث نگهداری شمعه های ماسه ای و زمین رسی مجاور گردد، و عمل تثبیت باید بگونه ای باشد که تحت تأثیر تنش بارگذاری شکستگی رخ ندهد. در نگهداری پایدار یک شمعه ماسه ای، تنش محصور کننده جانبی در یک سطح استوانه ای شمعه ماسه ای $[(\sigma)_h]$ بطور رضایت بخشی از رابطه زیر بدست می آید:

(۶)

$$\sigma_h \geq \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \cdot \sigma_v$$

که داریم:

ϕ : زاویه اصطکاک داخلی ماسه متراکم شده در شمعه ماسه ای

از آنجائیکه تنش محصور کننده جانبی $[(\sigma)_h]$ ، در شمعه ماسه ای واقع در زمین رسی مورد استفاده قرار می گیرد، بنابراین حداقل شدت σ_v باید شدت مورد نیاز در نگهداری زمین رسی مستحکم باشد. این شرایط بصورت زیر در نظر گرفته می شود.

$$\sigma_h \leq \sigma_c + \sigma_u \quad (7)$$

σ_u : مقدار شدت بالا در زمین رسی تحکیم یافته

با توجه به رابطه های ۳، ۶ و ۷ مقدار A_c از رابطه زیر بدست می آید:

$$A_c = \frac{\left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) \cdot \left(1 + \frac{\sigma_u}{\sigma_c} \right) \sigma_c - \sigma}{\sigma - \sigma_c} \cdot A_s \quad (8)$$

با فرض داشتن مقدار m و بدست آمده بوسیله معادله ۴، می توان مقدار A_c یا فضای بین شمع های ماسه ای را از معادله ۸ بدست آورد. با دارا بودن این خصوصیات زمینهای مرکب می توانند در مقابل رفتار بارگذاری با دوره کوتاهتر از طرف سازه نسبت به زمین اصلی، یا رفتار زمین در مقابل روش زهکشی ماسه، حمایت شوند.

۱-۲-۳- ظرفیت باربری و مقاومت پایداری لغزشی در زمینهای مرکب:

مقاومت برشی زمینهای مرکب، برای ظرفیت باربری و مقاومت پایداری لغزشی با توجه به رابطه ۳ و ۷، از رابطه ۹ بدست می آید:

$$\tau_{sc} = (1 - a_s) \cdot c + a_s \left((\mu_s \cdot \sigma) + (\gamma_s \cdot z) \right) \tan \varphi_s \cdot \cos^2 \alpha \quad (9)$$

که داریم:

τ_{sc} : مقاومت برشی زمین مرکب

$$a_s = \frac{A_s}{(A_s + A_c)}$$

a_s : که در اینجا نسبت جایگزینی بهسازی نامیده می شود

c : چسبندگی خاک رس

γ_s : وزن شمع ماسه ای در واحد حجم

φ_s : زاویه اصطکاک داخلی شمع ماسه ای

α : تنش عمودی حاصل از بارگذاری

μ_s : ضریب تمرکز تنش در شمع ماسه ای

$$\mu_s = \frac{m}{1 + (m - 1) \cdot a_s}$$

در حالت تحکیم خاک رس ، افزایش چسبندگی از رابطه ۱۰ بدست می آید :

$$c = c_0 + [(\mu)]_c \cdot \sigma \cdot \mu \cdot c/p \quad (1)$$

که داریم :

c_0 : مقاومت اولیه خاک رس

μ_c : کاهش در ضریب تنش خاک

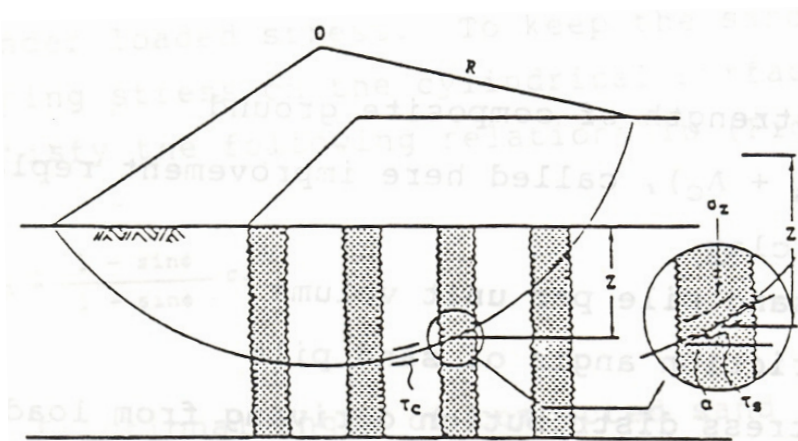
$$\mu_c = \frac{1}{1 + (m - 1) \cdot a_s}$$

m : نسبت تمرکز تنش در شمع ماسه ای

μ : درجه تحکیم

c/p : افزایش در نسبت میزان چسبندگی

در محاسبه شکستگیهای دایره ای ، همچنان که در شکل شماره ۷ نشان داده شده ، فرض می گردد که یک مرحله از برش در عمق Z اتفاق افتاده و در اینصورت مقاومت مجموعه دو شمع ماسه ای مجاور و خاک رس بین آنها بطور یکجا در مقابل بارگذاری عمودی در نظر گرفته می شود .



شکل شماره ۷- نمودار مربوط به روش سطح لغزش دایره ای در شمعهای ماسه ای

جدول شماره ۱ خلاصه ای از اطلاعات مهم با اندازه گیری های دقیق مربوط به خاکریزهای طراحی شده با این روش را در کشور ژاپن نشان می دهد.

جدول شماره ۱ - ضرایب اطمینان مربوط به زمین پی های بهسازی شده

No.	LOAD P (T/N ²)	NAVIGABLE DEPTH Z (M)	THICKNESS H (M)	ORIGINAL STRENGTH C (T/M ²)	R.RATIO a_s	C.RATIO μ	SAFETY FACTOR	
							F ₁	F ₂
1	10.9	-	15.0	2.5	0.184	3	1.59	1.23
2	7.5	-	14.0	0.93	0.133	3	1.48	0.95
3	8.7	-	10.0	0.6~1.0	0.180	3	1.20	0.56
4	10.7	-	16.0	1.9	0.171	4	1.07	0.74
5	11.8	-	10.0	1.2~2.0	0.205	4	1.54	0.95
6	32.0	-	11.4	2.0~4.0	0.178	4	1.01	0.46
7	16.7	8.8	13.2	0.3~1.7	0.27	3	1.33	<1.0
8	15.0	9.0	19.0	0.2~2.5	0.27	3	1.25	<1.0
9	15.7	8.0	22.0	0.1~3.5	0.46	2	1.30	<1.0
10	19.9	11.0	10.0	1.0~1.5	0.50	1	1.16	<1.0
11	17.5	7.5	23.5	0.0~4.5	0.50	2	1.25	<1.0
12	13.3	6.0	10.0	0.0~1.5	0.50	1	1.12	0.72
13	14.0	7.0	19.0	0.5~4.8	0.50, 0.70	2	1.25	<1.0
14	39.2	19.0	26.0	1.5~4.8	0.70	*	1.35	<1.0
15	18.6	19.5	20.0	1.0~5.0	0.70	*	1.31	<1.0
16	20.0	13.5	17.5	0.3~4.5	0.70	1	1.17	<1.0
17	13.8	7.0	16.0	0.5~2.0	0.70	1	1.23	<1.0
18	15.7	7.5	16.5	2.0~3.6	0.70	*	1.43	<1.0

No. 7~No. 18: Port structures

*: Designed as replacement

در جدول فوق F_1 و F_2 ، ضریب اطمینان بدست آمده بترتیب برای زمینهای مرکب و اولیه می باشد، که در این جدول، حتی در حالتی که ضریب اطمینان تقریباً برابر با واحد فرض شده، برای وضعیت شکست هیچ موردی در نظر گرفته نشده است. بنابراین این روش را بطور محافظه کارانه، می توان یک روش مطمئن بحساب آورد.

۲-۲-۳- نشست در زمین مرکب:

شمعهای ماسه ای در یک پی مرکب مشابه با روش زهکشی در ماسه، وظیفه سرعت بخشیدن تحکیم در زمینهای رسی را دارند (Aboshi & Yoshikuni, 1971, 73, 79). اگرچه پی مرکب با در نظر گرفتن

تأثیرات آن در کاهش نشست تحکیمی توصیف گردیده است. نشست در یک خاک رسی زیرین S_0 تحت بار نگهدارنده σ از رابطه زیر تعیین می گردد:

$$S_0 = m_v \cdot \sigma \cdot H \quad (11)$$

که داریم:

m_v : مدول قابلیت تراکم پذیری حجمی

H: ضخامت لایه

نشست S در یک پی مرکب با قرار دادن تأثیر کاهش تنش بیان شده از رابطه ۴ از رابطه زیر بدست می آید:

$$S = m_v \cdot (\mu_c \cdot \sigma) \cdot H \quad (12)$$

با مقایسه روابط ۱۱ و ۱۲ برای نسبت کاهش نشست β داریم:

$$\beta = S/S_0 = \mu_c = 1/[1 + (m - 1) \cdot a_s] \quad (13)$$

۴- نتیجه گیری:

این گزارش نشان می دهد که می توان با استفاده از روش Compozer انواع مختلفی از سازه ها را در زمینهای سست سرعت و بصورت اقتصادی بنا نمود. از سال ۱۹۵۸ که روش Compozer عملاً مورد استفاده قرار گرفته، تلاشهایی در جهت توسعه تکنولوژی تثبیت خاک صورت پذیرفته است. بعلاوه در این روش سیستم جدید دیگری مورد استفاده قرار گرفته که این تکنیک جدید که به نام سیستم تحکیم Mechatronic نامیده می شود یک سیستم اتوماتیک کنترلی تثبیت خاک بوده که دارای تجهیزاتی با عملکرد خاص به نام Acom Consolider می باشد.

پایان