



بررسی رفتار شمع‌های مایل منفرد به روش عددی

حسن امیدعلی^۱، سهیل محمدی^۲، علی فاخر^۳

۱- کارشناس ارشد عمران، گرایش خاک و پی دانشکده فنی، دانشگاه تهران

۲ و ۳- دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه تهران

Email : homidali@yahoo.com

خلاصه

در این مقاله به مقایسه رفتار شمع‌های قائم و شمع‌های مایل پرداخته شده است. این تحقیق به روش عددی و با استفاده از نرم‌افزار FLAC^{3D} انجام گرفته است که بر اساس روش عددی تفاضل‌های محدود FD استوار است. خاک به صورت محیط پیوسته و با مدل رفتاری موهر-کولمب در نظر گرفته شده و شمع‌ها از جنس بتن و با مدل رفتاری الاستیک فرض شده‌اند. در ابتدا به منظور صحت سنجی نتایج، یک شمع قائم مدل گردیده و نتایج به دست آمده از تحلیل آن با نتایج ارائه شده توسط سایر محققین و روابط موجود مقایسه شده است. سپس شمع‌های مایل و قائم مدل‌سازی شده و پس از بارگذاری این شمع‌ها، مقدار تغییرمکان محوری و جانبی شمع برای مقادیر مختلف بارهای محوری و جانبی محاسبه و نتایج انواع شمع‌ها با هم مقایسه شده‌اند. از مقایسه این نتایج می‌توان رفتار شمع‌های قائم و مایل و تفاوت‌های رفتاری آنها تحت اثر بارهای محوری و جانبی را بهتر درک کرد و از این موضوع برای بهینه‌سازی طراحی‌ها استفاده نمود.

کلمات کلیدی: شمع مایل، بارگذاری محوری، بارگذاری جانبی، FLAC^{3D}.

مقدمه

شمع‌ها معمولاً به صورت گروهی استفاده می‌شوند ولی در بعضی موارد با توجه به نوع خاک، فاصله شمع‌ها از یکدیگر، صلبیت و ضخامت سرشمع، عملکرد آنها به صورت شمع منفرد می‌باشد. شمع‌ها بر اساس زاویه نصبشان به دو دسته شمع‌های قائم و مایل تقسیم می‌شوند. شمع مایل یکی از موضوعات مورد بحث در حیطه مهندسی پی‌سازی است که نظرات متفاوتی در مورد آن وجود دارد. دانشمندان تحقیقات اندکی بر روی رفتار شمع‌های مایل انجام داده‌اند و نتایج ارائه شده در پاره‌ای موارد با هم در متناقض می‌باشند. استفاده از شمع‌های مایل یکی از روش‌های کاهش تغییرمکان جانبی گروه‌های شمع تحت اثر بارهای جانبی است. تحت اثر بارهای قائم و جانبی، رفتار شمع‌های مایل و شمع‌های قائم متفاوت می‌باشد. لذا تعمیم رفتار شمع‌های قائم به شمع‌های مایل و نیز تئوری یکسان بودن مکانیزم گسیختگی خاک اطراف این دو نوع شمع مبنای علمی ندارد و فقط به دلیل ناشناخته بودن رفتار شمع‌های مایل این تعمیم صورت می‌پذیرد. در نتیجه مقایسه شمع‌های مایل و قائم تحت اثر بارهای محوری و جانبی از موضوعات مهمی است که می‌تواند به شناخت بیشتر رفتار شمع‌های مایل و طراحی بهینه در محیط‌های حرفه‌ای توسط مهندسان کمک کند.

شمع‌های مایل بسته به نوع گسیختگی خاک اطرافشان به دو دسته شمع‌های مایل مثبت (لغزش گوه گسیختگی به سمت بالای شمع) و شمع‌های مایل منفی (لغزش گوه گسیختگی به سمت پایین شمع) تقسیم می‌شوند. [۱] از شمع‌های مایل منفی به دلیل مقاومت بالا در مقابل بارهای جانبی استاتیکی و سیکلیک به طور گسترده استفاده می‌شود. بررسی رفتار شمع‌های مایل تحت اثر بارهای جانبی استاتیکی و سیکلیک یک مسأله اندرکنش خاک-سازه است که از پیچیدگی خاصی برخوردار می‌باشد.

با توجه به تحقیقاتی که تاکنون صورت گرفته است، رفتار شمع‌های مایل در آزمایشگاه و در مطالعات مختلف بررسی شده است. چبوتاریف [۱] در سال ۱۹۵۳ با انجام چند آزمایش مدل، سطح لغزش را در پائین شمع‌های مایل منفی گزارش کرد. در سال ۱۹۶۵ پراکاش و سابرامانیام [۲] نیز بر روی شمع‌های مایل، چند آزمایش مدل انجام دادند و نشان دادند که مقاومت شمع‌های مایل منفی تحت اثر بارهای جانبی بیشتر از مقاومت شمع‌های مایل

^۱ تهران، بزرگراه کردستان، خیابان بیستم، شرکت سازه‌پردازی ایران، تلفن: ۰۲۱-۸۸۶۳۵۸۵۰-۵

^۲ دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه تهران، تلفن: ۰۲۱-۶۱۱۱۲۲۵۸، Email: smoham@ut.ac.ir

^۳ دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه تهران، تلفن: ۰۲۱-۶۱۱۱۲۲۶۴، Email: afakher@ut.ac.ir

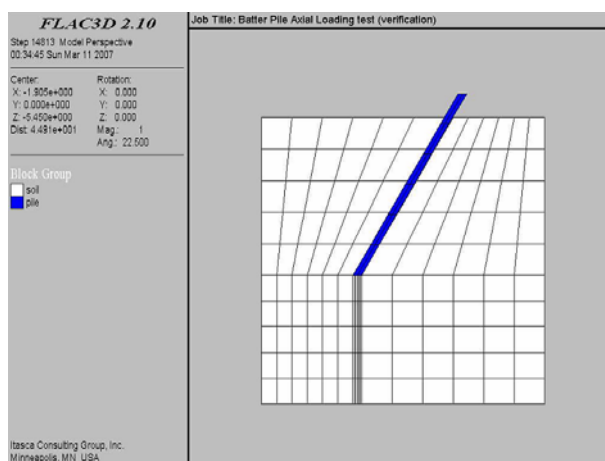


مثبت می باشد. در سال ۱۹۷۰ عزیزاده و دیویسون [۳] به بررسی نظری شمع‌های مایل تحت اثر بارهای جانبی پرداختند و پولوس و مدهاو [۴] در سال ۱۹۷۱ رفتار شمع‌های مایل تحت اثر بارهای استاتیکی جانبی را بررسی کردند و نشان دادند که تغییر مکان جانبی شمع‌های مایل به زاویه شمع تمایل آنها بستگی دارد. در سال ۱۹۷۳ مایرهورف و رنجان [۵] ظرفیت باربری جانبی شمع‌های مایل مثبت و منفی را در خاک‌های دانه‌ای بررسی کردند و نشان دادند که مقاومت شمع‌های مایل منفی بیشتر از شمع‌های مایل مثبت می‌باشد. آنها همچنین مطالعات آزمایشگاهی بر روی گروه شمع‌های قائم و مایل انجام دادند و دریافتند که تغییر مکان جانبی گروه شمع شامل یک شمع قائم و مایل (چه مثبت و چه منفی) از تغییر مکان گروه شمع شامل دو شمع قائم کمتر است. در سال ۱۹۹۲ مایرهورف و یالسن [۶] برای مطالعه رفتار شمع‌های مایل انعطاف‌پذیر تحت اثر بارهای زاویه‌دار یک سری آزمایش مدل انجام دادند. در سال ۲۰۰۱ راجاشیری و سیتهارام [۷] مدلی بر اساس روش اجزاء محدود برای مطالعه رفتار غیرخطی شمع‌های مایل ارائه کردند. در این مدل برای مطالعه مقاومت شمع‌های مایل و تغییر مکان جانبی به وجود آمده تحت اثر بارهای جانبی استاتیکی و سیکلیک یک سری توابع P-Y ارائه شده است. آنها در این تحقیق، خاک را به صورت محیط پیوسته مدل نکردند بلکه برای مدل کردن خاک از فن‌رهایی با سختی معادل استفاده نمودند. در این مقاله رفتار شمع‌های قائم و مایل منفرد تحت اثر بارهای محوری و جانبی بررسی شده و نتایج حاصل از آنها با هم مقایسه می‌گردد.

مدل‌سازی عددی

به منظور مقایسه رفتار شمع‌های مایل و قائم، یک شمع با مشخصات معین در نظر گرفته شده است. این شمع یک بار به صورت قائم و بار دیگر به صورت مایل با زاویه میل ۳۰ درجه نسبت به راستای قائم مدل گردیده است. شمع مدل شده، از جنس بتن و به طول ۸ متر و قطر ۰/۳۶ متر است. مشخصات رفتاری و مقاومتی مصالح خاک و شمع به شرح جدول ۱ می‌باشد.

در شکل ۱ المان‌بندی محیط در نظر گرفته شده برای تحلیل یک شمع مایل نشان داده شده است. این محیط ۸ متر طول، ۵ متر عرض و ۱۲ متر عمق دارد. تکیه‌گاه‌های غلتکی در راستای Z برای قسمت پایین مدل و در راستای X و Y برای طرفین مدل به کار گرفته شده است.



شکل ۱- شبکه المان‌های مورد استفاده برای تحلیل شمع

جدول ۱- مشخصات مکانیکی خاک و شمع در مدل‌های عددی مورد استفاده

شمع	خاک	خصوصیات مکانیکی
الاستیک	موهر کولمب	مدل رفتاری
E=22GPa	E=90MPa	مدول الاستیسیته
v=0.3	v=0.48	ضریب پواسون
-	C=400kPa	چسبندگی خاک
-	φ=0	زاویه اصطکاک داخلی

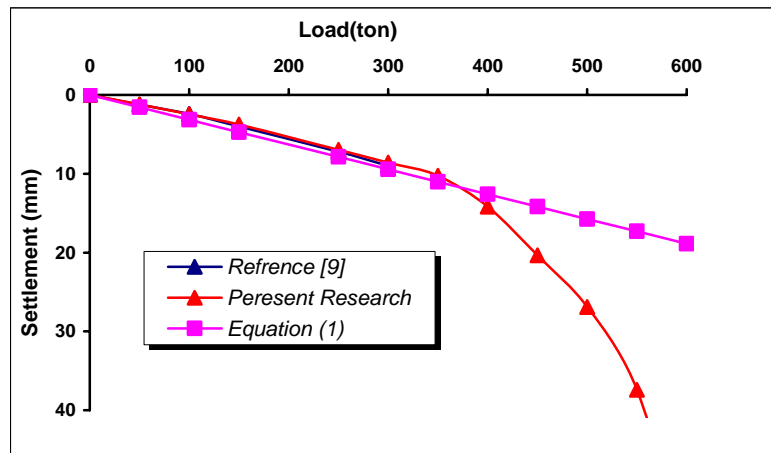
صحت سنجی مدل

برای اطمینان از صحت روند مدل‌سازی، ابتدا یک شمع قائم مدل گردیده و نتایج به دست آمده از آن با نتایج رابطه ۱ و نتایج عددی موجود، مقایسه شده است. رابطه ۱ برای پیش‌بینی نشست شمع قائم تحت اثر بار قائم ارائه شده است.

$$\rho = \frac{PI}{E_s d} \quad (1)$$

در این رابطه، ρ نشست شمع، P بار محوری وارده، d قطر شمع و E_s مدول الاستیسیته خاک است. ضریب I به مشخصات خاک و شمع بستگی دارد که نحوه محاسبه آن در مرجع [۸] ارائه شده است.

شمع مورد مطالعه به طول ۸ متر و قطر ۳۶/۰ متر در یک محیط خاکی با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ مدل گردیده است. نمودار بار-نشست به دست آمده از تحلیل عددی این شمع تحت اثر بارگذاری قائم در شکل ۲ ارائه شده است. در این شکل نتایج تحلیل حاضر، نتایج تحلیل‌های عددی گزارش شده توسط مؤمن [۹] و نتایج به دست آمده از رابطه ۱ مشاهده می‌شود. با توجه به شکل می‌توان دریافت که نتایج به دست آمده تطابق خوبی با روابط و نتایج تحلیل‌های عددی دیگر دارد.

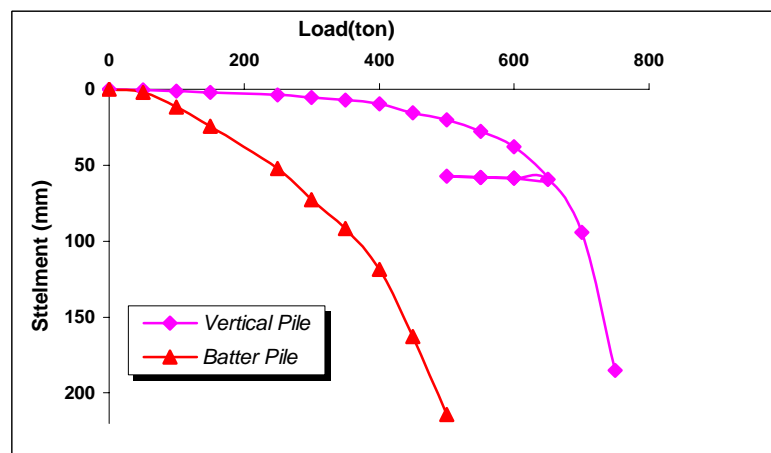


شکل ۲- نمودار بار- تغییر مکان برای شمع جهت صحت سنجی نتایج

مقایسه رفتار شمع قائم و مایل تحت اثر بارهای محوری

برای مقایسه رفتار شمع قائم و مایل تحت اثر بارهای محوری، دو شمع، یکی مایل و دیگری قائم مدل گردید و برای اعمال بارهای محوری یک تنش یکنواخت در راستای محور شمع وارد شد. برای اینکه تحت اثر مقادیر مختلف بار وارد شده مقدار تغییر مکان محوری قابل اندازه‌گیری باشد، تنش محوری وارد شده به صورت مرحله‌ای زیاد گردید و در هر مرحله بارگذاری تغییر مکان محوری ثبت شد. این نتایج در غالب نمودار بار- تغییر مکان در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

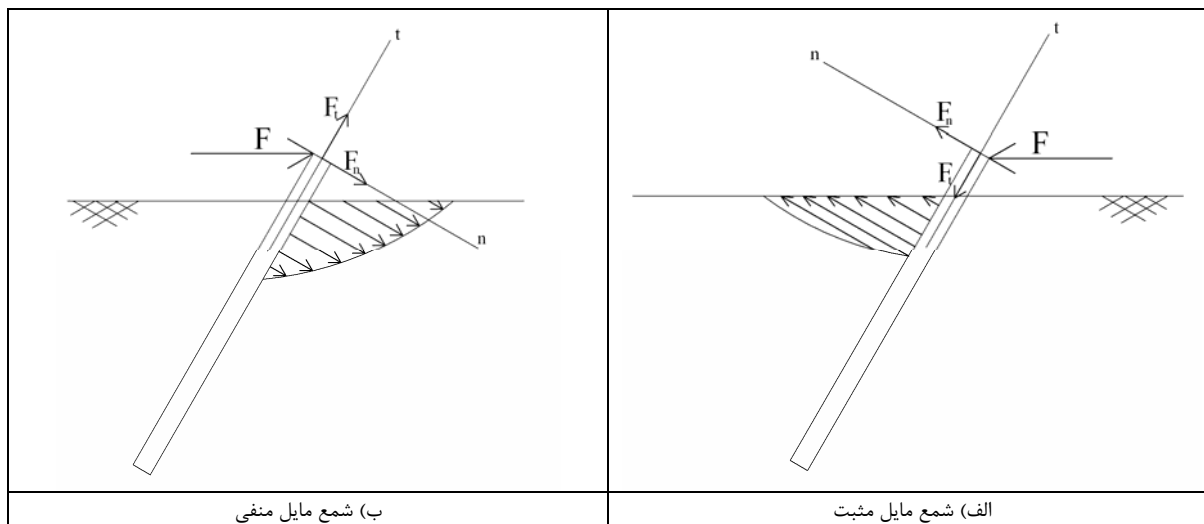
همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، نشست شمع مایل تحت اثر بار محوری بیشتر از شمع قائم است. به عبارت دیگر ظرفیت باربری محوری شمع مایل کمتر از شمع قائم می‌باشد. نتایج ارائه شده توسط دیگر محققین درباره این مطلب متفاوت می‌باشد. پولوس و دیویس [۸] این نتیجه را رد کرده‌اند و توزیع تنش اطراف شمع مایل و قائم را یکسان در نظر گرفته‌اند، در نتیجه تفاوتی در مقدار نشست شمع مایل و قائم تحت اثر بار محوری قائل نشده‌اند. ولی صبری [۱۰] و نگوین و هنا [۱۱] توزیع تنش به وجود آمده در خاک اطراف شمع مایل و قائم تحت اثر بارهای محوری را متفاوت می‌دانند. آنها نموداری برای مقایسه بار ظرفیت شمع قائم و مایل ارائه داده‌اند که با مراجعه به این نمودار و با توجه به توزیع تنش در نظر گرفته شده برای نواحی مختلف اطراف شمع مایل می‌توان این نتیجه را استنباط کرد که در اثر مایل کردن شمع، مقدار نشست محوری شمع تحت اثر بارهای محوری افزایش می‌یابد. مقدار این افزایش نشست تابعی از پارامترهای مقاومتی خاک می‌باشد.



شکل ۳- مقایسه نمودار بار- نشست شمع‌های قائم و مایل تحت اثر بار محوری

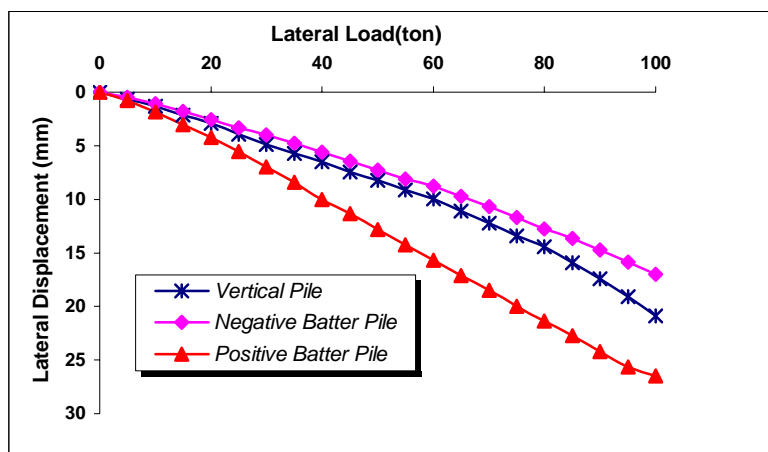
رفتار شمع قائم و مایل تحت اثر بارهای جانبی

مزیت اصلی استفاده از شمع‌های مایل تحمل بارهای جانبی توسط آنها می‌باشد. همان‌گونه که در مقدمه اشاره شد، شمع‌های مایل تحت اثر بارهای جانبی بسته به جهت وارد شدن بار به دو دسته شمع مایل مثبت و شمع مایل منفی تقسیم می‌شوند. تفاوت این دو نوع شمع مایل در شکل ۴ نشان داده شده است. برای مقایسه رفتار شمع مایل و قائم تحت اثر بارهای جانبی، بر شمع‌های مدل شده در قسمت قبل، بار جانبی به صورت یک تنش یکنواخت وارد گردید. در این قسمت نیز بارهای جانبی وارد شده به صورت مرحله‌ای زیاد شده و در هر مرحله بارگذاری، تغییر مکان جانبی ثبت شد. این نتایج در غالب نمودار بار- تغییر مکان در شکل ۵ مشاهده می‌شود.



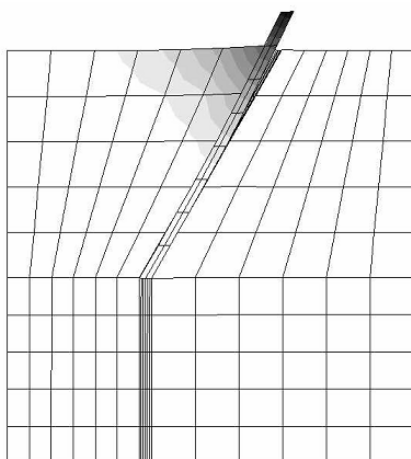
شکل ۴- تفاوت شمع‌های مایل مثبت و منفی

در شکل ۵ مشاهده می‌شود که تحت اثر بارهای جانبی شمع مایل منفی کمترین تغییر مکان جانبی و شمع مایل مثبت بیشترین تغییر مکان جانبی را دارد و منحنی بار جانبی- تغییر مکان جانبی مربوط به شمع قائم بین منحنی‌های مربوط به دو نوع شمع مایل مثبت و منفی قرار می‌گیرد. این نتیجه که مقدار تغییر مکان جانبی شمع مایل منفی کمتر از شمع مایل مثبت است توسط دیگر محققین نیز ارائه شده است [۱] و [۲]. دلیل تغییر مکان کمتر شمع مایل منفی تحت اثر بارهای جانبی به‌طور شماتیک در شکل ۴ مشاهده می‌شود. همان‌گونه که از شکل ۴ دریافت می‌شود، اگر نیروی جانبی وارد شده به شمع در دو راستای محوری و عمود بر محور شمع تجزیه شود، در شمع مایل منفی مؤلفه عمودی بارهای جانبی در جهتی وارد می‌شود که خاک پشت شمع را تحت فشار قرار دهد. به عبارت دیگر این مؤلفه تمایل دارد که فشار مقاوم خاک پشت شمع را بسیج کند و به دلیل این‌که گوه گسیختگی به سمت پایین حرکت می‌کند، توده خاک قرار گرفته در زیر این گوه باعث کاهش حرکت آن می‌شود که نتیجه این عمل کاهش تغییر مکان جانبی شمع مایل منفی است. در مقابل در شمع مایل مثبت گوه گسیختگی ایجاد شده در خاک به کشش می‌افتد و به دلیل این‌که این گوه در این نوع شمع به طرف بالا حرکت می‌کند و با توجه به سطحی بودن گوه گسیختگی توده خاک قرار گرفته در اطراف این گوه نمی‌تواند باعث کاهش حرکت آن شود. در نتیجه در این نوع شمع تغییر مکان جانبی بیشتری به وجود می‌آید. در شمع قائم نیز حالت بینابین به وجود می‌آید، به عبارت دیگر گوه گسیختگی به وجود آمده در خاک پشت این شمع به طرف بالا و یا پایین حرکت نمی‌کند، بلکه حرکت آن به طرفین می‌باشد. توده خاک قرار گرفته در اطراف گوه گسیختگی، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش حرکت این گوه ندارد. در نتیجه در شمع قائم تغییر مکان جانبی بیشتر از شمع مایل منفی و کمتر از شمع مایل مثبت می‌باشد.

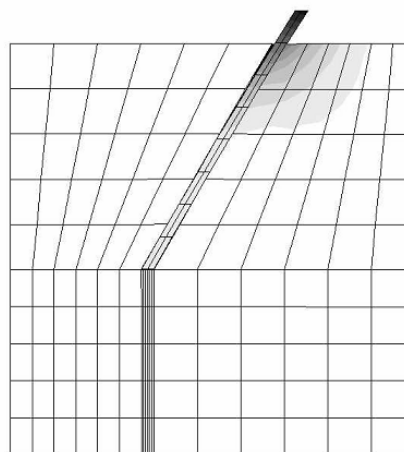


شکل ۵- مقایسه نمودار بار- تغییر مکان جانبی برای شمع‌های قائم و مایل تحت اثر بار جانبی

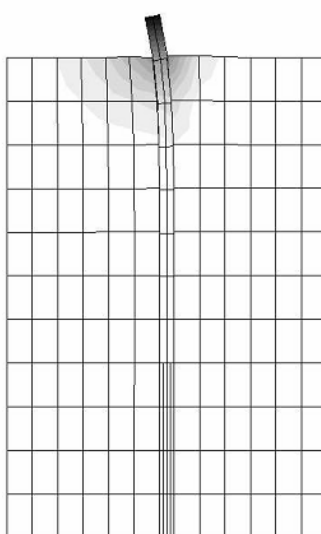
در شکل ۶ تغییر مکان جانبی شمع‌های مایل مثبت و منفی و همچنین شمع قائم تحت اثر بارهای جانبی مشاهده می‌شود.



(ب) شمع مایل مثبت



(الف) شمع مایل منفی



(ج) شمع قائم

شکل ۶- تغییر مکان جانبی انواع شمع تحت اثر بارهای جانبی



نتیجه گیری

با توجه به تحلیل‌های انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت که:
الف) نشست شمع‌های مایل تحت اثر بارهای محوری بیشتر از شمع‌های قائم است. به عبارت دیگر تحت اثر بارهای محوری، توزیع تنش به وجود آمده در خاک اطراف شمع‌های قائم و مایل متفاوت می‌باشد.
ب) شمع‌های مایل منفی تحت اثر بار جانبی کمترین تغییرمکان جانبی را دارند. شمع‌های مایل مثبت بیشترین تغییرمکان جانبی را دارند. تغییرمکان جانبی شمع قائم، مداری مابین دو مقدار قبل می‌باشد.
ج) گوه گسیختگی در شمع‌های مایل منفی به سمت پایین حرکت می‌کند در صورتی که گوه گسیختگی خاک در شمع‌های مایل مثبت به سمت بالا حرکت می‌کند و حرکت گوه گسیختگی در شمع‌های قائم به سمت طرفین محیط می‌باشد.

مراجع

1. Tschebotarioff, G.P. (1953) The resistance to lateral loading of single piles and pile group. *Spec. Publ. No 154, ASTM, West Conshohocken*, 38-48.
2. Prakash, S., and Subramanyam, G. (1965) Behavior of battered piles under lateral loads. *J. Indian Nat. Soc of Soil Mech. And Found. Eng., New Delhi*, 4, 177-196.
3. Alizadeh, M., and Davison, M.T. (1970) Lateral Load test on piles-Arkansas River Project. *J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE*, 96, 1583-1603.
4. Poulos, H.G., and Madhav, M.R. (1971) Analysis of movement of battered piles. *Rep. No. R173, University of Sydney*, 1-18.
5. Meyerhof, G.G., and Ranjan, G. (1973) The bearing capacity of rigid piles under inclined loads in sand II: batter piles. *Can. Geotech. J.*, 10, 71-85.
6. Meyerhof, G.G., and Yalcin, A.S. (1992) Behavior of flexible batter piles under inclined loads in layered soil. *Can. Geotech. J.*, 30, 247-256.
7. Rajashree, S. S., and Sitharam, T. G. (2001) Nonlinear finite element method of batter piles under lateral load. *J. Geotech. Eng.*, 127(7), 604-612.
8. Poulos, H.G., and Davis, E.H. (1980) Pile foundation analysis and design. *Wiley, New York*.
9. مؤمن، م. (۱۳۸۴) آنالیز دینامیکی پی‌های شمع‌ی با استفاده از روش‌های عددی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، ایران.
10. Sabry, M. (2001) Shaft Resistance of a Single Vertical or Batter Pile in Sand Subjected to Axial Compression or Uplift Loading. *M.Sc. Thesis, The Department of Building, Civil and Environmental Engineering, Concordia University, CAN*.
11. Hanna, A., and Nguyen, T.G. (2003) Shaft Resistance of Single Vertical and Batter Piles Driven in Sand. *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 129, 601-607.