

بررسی پاسخ بالارانش خط لوله‌های مدفون در ماسه با استفاده از روش اجزاء محدود (مصالح با قانون جریان متحد)

جمال صیدی

عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد ایلام
jamal_mm@yahoo.com

علیرضا قیطاسی

کارشناس ارشد شرکت ملی نفت ایران

چکیده:

توانایی انتقال فرآورده‌های هیدروکربنی، همیشه عامل مهمی در توسعه و پیشرفت در زمینه نفت و گاز طبیعی در هر دو حالت ساحلی و فراساحلی بوده است. خط لوله‌ها از گذشته تاکنون، متداولترین وسیله استفاده شده برای انتقال نفت خام و گاز طبیعی تولید شده هستند. اما علیرغم سادگی استفاده از خط لوله‌ها برای انتقال فرآورده‌های نفتی مشکلاتی نیز گریبان‌گیر این شیوه می‌باشد، که از آن جمله می‌توان کم‌انرژی بودن عبور نفت خام داغ، بالارانش در اثر قرارگیری در محیط‌های اشباع یا در اثر حرکات قائم زمین و ... را نام برد.

در این مقاله مطالعه عددی تعیین پاسخ بار- تغییر شکل لوله‌های مدفون در ماسه تا زمان ایجاد گسیختگی برشی کامل در خاک ماسه‌ای با قانون جریان متحد بر اساس روش اجزاء محدود (برنامه PLAXIS) و با استفاده از مدل رفتاری ارتجاعی- خمیری (الاستو - پلاستیک) مور- کولمب انجام شده است. همچنین گسترش مناطق خمیری (پلاستیک) در توده خاک مورد بررسی قرار گرفته است. تاثیر نسبت کارگذاری لوله، λ ، زاویه اصطکاک خاک، ϕ ، و نسبت پواسن خاک، ν ، بر روی نتایج به‌طور مفصل مطالعه شده است. نتایج به‌دست آمده با بارهای گسیختگی محاسبه شده به‌وسیله تئوریهای موجود متفاوتی که اغلب برای تعیین مقاومت در برابر بالارانش مهاریهای نواری استفاده شده‌اند، مقایسه شده است.

کلمات کلیدی:

بالارانش لوله‌ها - روش اجزاء محدود - نقطه پلاستیک - ماسه اشباع



۱- مقدمه:
 کرنشهای جزئی $\{d\varepsilon\}$ با استفاده از ماتریس سختی ارتجاعی-خمیری $[D^p]$ مرتبط شده است [۱].

$$[D^{ep}]_{r,r} = [D^e]_{r,r} - \frac{[D^e]_{r,r} \left[\frac{\partial F}{\partial \sigma} \right]_{r,r} \left[\left(\frac{\partial F}{\partial \sigma} \right)^T \right]_{r,r} [D^e]_{r,r}}{\left[\left(\frac{\partial F}{\partial \sigma} \right)^T \right]_{r,r} [D^e]_{r,r} \left[\frac{\partial F}{\partial \sigma} \right]_{r,r}}$$

که F تابع تسلیم است.

[۲]

$$F = \frac{I_1}{r} \sin \phi + \sqrt{J_1} \left(\cos \alpha - \frac{\sin \alpha \sin \phi}{\sqrt{r}} \right) - c \cos \phi$$

[۳]

$$\left[\left(\frac{\partial F}{\partial \sigma} \right)^T \right]_{r,r} = \left[\frac{\partial F}{\partial \sigma_x} \quad \frac{\partial F}{\partial \sigma_y} \quad \frac{\partial F}{\partial \sigma_z} \quad \frac{\partial F}{\partial \tau_{xy}} \right]$$

[۴]

$$J_r = \left[\frac{S_x^r + S_y^r + S_z^r}{r} + \tau_{xy}^r + \tau_{yz}^r + \tau_{zx}^r \right]$$

[۵]

$$J_r = S_x S_y S_z + r \tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} - S_x \tau_{yz}^r - S_y \tau_{zx}^r - S_z \tau_{xy}^r$$

[۶]

$$\alpha = \frac{1}{r} \sin^{-1} \left(- \frac{r J_r \sqrt{r}}{r J_r \frac{r}{r}} \right)$$

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

$$S_x = \sigma_x - \frac{I_1}{r}$$

$$S_y = \sigma_y - \frac{I_1}{r}$$

$$S_z = \sigma_z - \frac{I_1}{r}$$

ماتریس سختی ارتجاعی برای حالت کرنش

سطح

همچنین تابع تسلیم F می‌تواند با بزرگترین و کوچکترین

تنشهای اصلی σ_1 و σ_3 مرتبط باشد [۱].

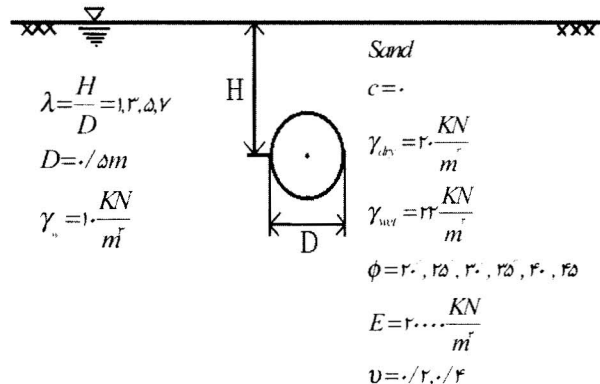
[۷]

$$F = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{r} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{r} \sin \phi - c \cos \phi$$

در حالتی که سطح آب در تراز بالتر از سطح زمین قرار دارد لوله‌های کار گذاشته شده در زیر زمین تحت تاثیر نیروی بالارانش قابل توجهی قرار می‌گیرند. این وضعیت اغلب در حالت لوله‌های به کار گرفته شده برای انتقال نفت و گاز در زیر آب اتفاق می‌افتد. بنابراین برای نگهداری کامل چنین لوله‌هایی لازم است که سیستم شالوده لوله مقاومت در برابر بالارانش کافی داشته باشد. در این حالت اگر وزن لوله برای خنثی کردن نیروهای بالارانش متداول کافی نباشد، آنگاه مهاریهایی برای افزایش مقاومت در برابر بالارانش این لوله‌ها تعبیه می‌شوند.

۲- تعریف مسئله:

لوله‌ای طویل به قطر D در عمق H از سطح زمین همانطوری که در شکل ۱ نشان داده شده، کار گذاشته شده است. فرض شده که لوله کاملاً صلب، زیر و در محیط خاکی بدون چسبندگی مدفون شده است. بررسی پاسخ نیروی بالارانش- تغییر مکان قائم لوله تا زمان گسیختگی نهایی و سپس تعیین بزرگی نیروهای گسیختگی مد نظر می‌باشد. در تحلیل موجود مقدار D برابر با ۰/۵ متر در نظر گرفته شده است. نسبت کارگذاری لوله $(\lambda = H/D)$ بین ۱ تا ۷ متغیر می‌باشد. مقدار مدول ارتجاعی (E) برابر 2000 KN/m^2 در نظر گرفته شده است. مقدار نسبت پواسن خاک (ν) ۰/۲ و ۰/۴ در نظر گرفته شده است. زاویه اصطکاک داخلی خاک (ϕ) بین 20° تا 45° متغیر می‌باشد. وزن مخصوص خشک خاک (γ_{dry}) مساوی 20 KN/m^3 و وزن مخصوص اشباع خاک (γ_{wet}) مساوی 22 KN/m^3 در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- خط لوله کار گذاشته شده در زیر ماسه اشباع

۴- مدل بنیادی:

فرض شده که محیط خاک مصالح ارتجاعی خطی- کاملاً خمیری با توجه به معیار گسیختگی مور- کولمب و قانون جریان متحد می‌باشد. در حالت قانون جریان متحد تنشهای جزئی $\{d\sigma\}$ به مجموع

۵- شبکه بندی اجزاء محدود و شرایط مرزی:

بر طبق تحلیل اجزاء محدود رو و دیویس [۱۵،۱۴] که در آن پاسخ بالارانش قائم مهاریهای صلب نواری افقی بررسی شده، فرض شده است که تاثیر بارگذاری لوله در فواصل افقی و قائم با بزرگی $8D$ از مرکز لوله قابل صرفنظر است. با توجه به تقارن لوله حول محور قائم مرکزی، فقط یک نصف از محدوده خاک اطراف لوله در نظر گرفته شده است. برای مدلسازی خط لوله از المان تیر استفاده شده است. برای محدوده خاک انتخاب شده، در طول مرزهای قائم قید تغییر مکانی فقط در جهت افقی در نظر گرفته شده است. در طول مرز افقی خط زیر لوله، قیدهای تغییر مکانی در هر دو جهت افقی و قائم در نظر گرفته شده است. جرم خاک بعنوان محیط محصور در مرزهای معلوم به شبکه‌ای با المانهای مثلثی ۱۵ گرهی تبدیل شده است. شبکه اجزاء محدود به طریقی که المانهای نزدیک محیط لوله به تدریج کوچکتر می‌شوند، تولید شده است.

تحلیل:

برنامه اجزاء محدود:

PLAXIS VERSION ۷.۲

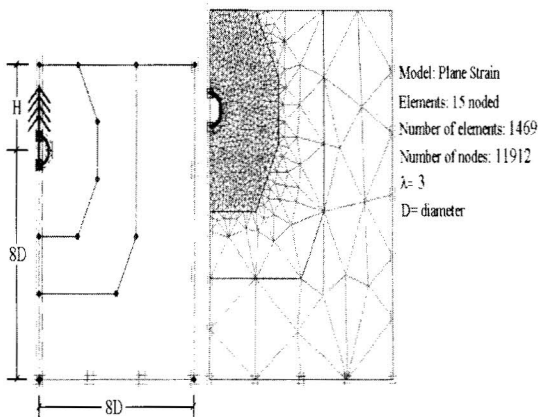
برای انجام دادن تحلیل استفاده شده است. قبل از آغاز تحلیل ارتجاعی- خمیری اجزاء محدود، تنشهای در محل در همه جا به وسیله فرض شرایط K_0 در جرم خاک تعیین شده است. بزرگی ضریب فشار جانبی زمین $K = 1 - \sin\phi$ گرفته شده است. همانطوری که توسط رو و دیویس (۱۹۸۲) [۱۵،۱۴] تشریح شده، تغییرات K_0 اثر قابل توجهی بر مقاومت در برابر بالارانش مهاریها ندارد. بنابراین تاثیر آن بر مقاومت در برابر بالارانش لوله‌ها تحقیق نشده است. همچنین یک تئوری در پلاستیسیته نشان می‌دهد که تغییرات در تنشهای اولیه هیچ تاثیری بر مقدار مقاومت مصالح در حالت قانون جریان متحد ندارد. بعد از تعیین تنشهای در محل از شرایط K_0 ، تغییر مکانهای ناشی از این تنشها را مساوی صفر قرار داده و سپس تحلیل اجزاء محدود با اعمال جزء تغییر مکان قائم رو به بالا در طول محیط لوله شروع می‌شود. قید تغییر مکانی در جهت افقی در طول محیط لوله برای شبیه سازی زبری سطح لوله در نظر گرفته شده است. برای مدل کردن واکنش بین لوله و خاک از فصل مشترک استفاده شده است. اندازه هر جزء تغییر مکان به صورت خودکار توسط نرم افزار انتخاب می‌شود. در ضمن هر جزء تغییر مکان تکنیک سعی و خطا مورد استفاده قرار می‌گیرد. دیده شده است که ۸ تا ۵۰ سعی و خطا برای رسیدن به همگرایی در هر جزء تغییر مکان لازم می‌باشد. نیروی بالارانش در واحد طول لوله p ، به ازای هر جزء تغییر مکان، به وسیله نرم افزار محاسبه می‌شود. محاسبات تا زمانی که به ازای هر جزء تغییر مکانهای متوالی به نیروی بالارانش یکسانی برسیم، ادامه پیدا می‌کند.

همانطوری که قبلاً به وسیله رو و دیویس [۱۵،۱۴] تعریف شده، مقدار P در حالت گسیختگی، P_{ult} ، به صورت فاکتور بالا رانش، F_γ ، معرفی شده است.

$$P_{ult} = \gamma H D F_\gamma \quad [۸]$$

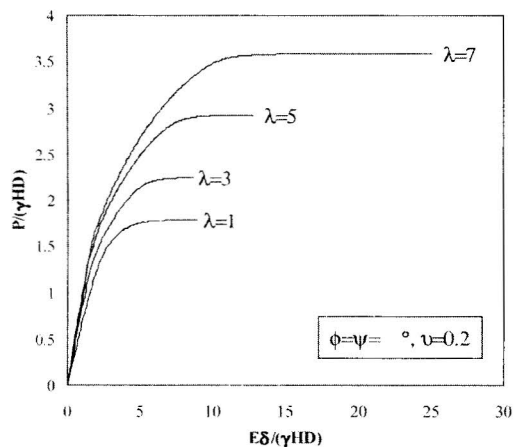
۷- نتایج:

پاسخ نیروی بالارانش- تغییر مکان قائم به دست آمده به همان طریقی که قبلاً توسط رو و دیویس [۱۴، ۱۵] تهیه شده است، به صورت بدون بعد ارائه شده است. نیروی بالارانش به صورت بدون بعد $\frac{F \delta}{\gamma H D}$ ، و تغییر مکان قائم لوله به صورت بدون بعد $\frac{F \delta}{\gamma H D}$ نشان داده شده است. ارتباط نیروی بالارانش - تغییر مکان قائم بدون بعد در همه حالات در شکل‌های ۶ تا ۹ نشان داده شده‌اند. دیده شده است که در ابتدا برای همه حالات، پاسخ نیروی بالارانش- تغییر مکان قائم خطی باقی می‌ماند و سپس شیب (سختی) منحنی‌های ترسیم شده به صورت پیوسته تا زمانی که گسیختگی کامل اتفاق می‌افتد، کاهش می‌یابد. مقادیر بارهای گسیختگی، تغییر مکان قائم گسیختگی و سختی اولیه منحنی‌ها برای مقادیر λ و ϕ بالاتر، بزرگتر می‌شود. همچنین مقدار سختی اولیه منحنی‌ها برای افزایش ν از ۰/۲ به ۰/۴، افزایش یافته ولی مقادیر بارهای گسیختگی و تغییر مکان قائم گسیختگی بدون تغییر باقی می‌مانند. از نیروی بالارانش به دست آمده در مقابل تغییر مکان قائم مربوطه، بارهای گسیختگی در همه حالات تعیین شده است. سپس از مقدار بارهای گسیختگی معلوم، فاکتور بالارانش F_γ از معادله [۸] تعیین شده است. تغییرات F_γ با λ و ϕ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. دیده شده است که فاکتور بالارانش با افزایش λ و ϕ افزایش می‌یابد. علاوه بر این، به منظور بررسی ارتباط نیروی بالارانش- تغییر مکان قائم لوله، نقاط خمیری (پلاستیک) خاک بالای لوله مورد توجه قرار گرفته است. نقاط خمیری (پلاستیک) مربوط به حالات مختلف در شکل‌های ۲ تا ۵ نمایش داده شده‌اند.

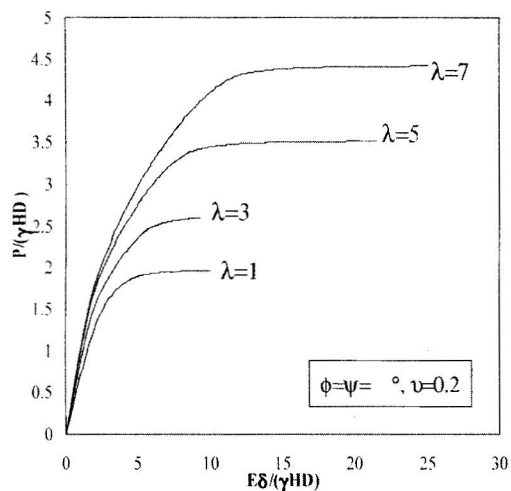


شکل ۲- محدوده هندسی پروژه و شبکه بندی اجزاء محدود برای حالت

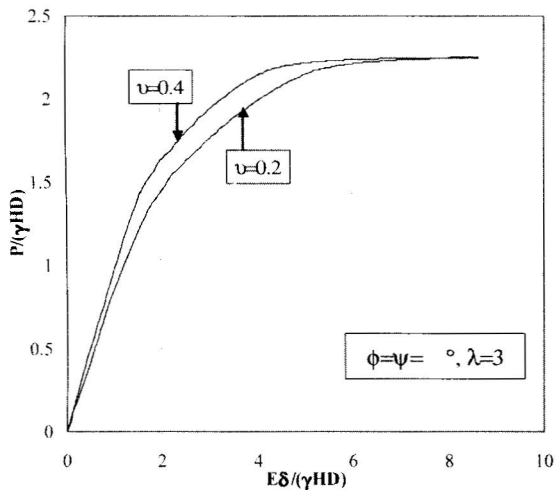
$$\lambda = 3$$



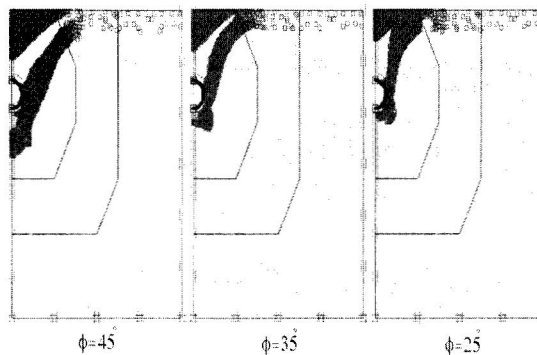
شکل ۶- پاسخ نیروی بالارانش- تغییر مکان قائم لوله به صورت بدون بعد
($\phi = \psi = 0^\circ$)



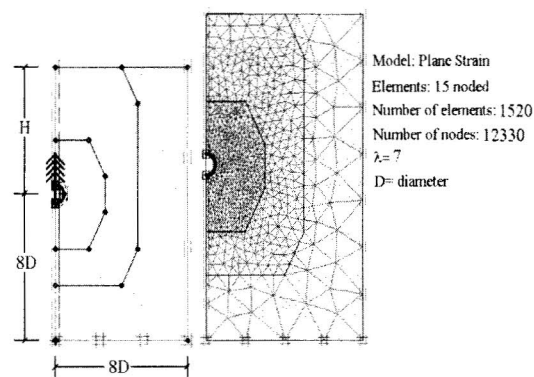
شکل ۷- پاسخ نیروی بالارانش- تغییر مکان قائم لوله به صورت بدون بعد
($\phi = \psi = 30^\circ$)



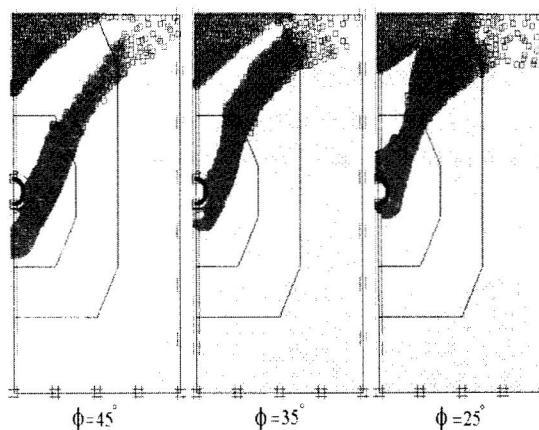
شکل ۸- پاسخ نیروی بالارانش- تغییر مکان قائم لوله به صورت بدون بعد
($\lambda = 3$)



شکل ۳- نقاط خمیری (پلاستیک) برای حالت $\lambda = 3$



شکل ۴- محدوده هندسی پروژه و شبکه بندی اجزاء محدود برای حالت
 $\lambda = 7$



شکل ۵- نقاط خمیری (پلاستیک) برای حالت $\lambda = 7$

۸- مقایسه:

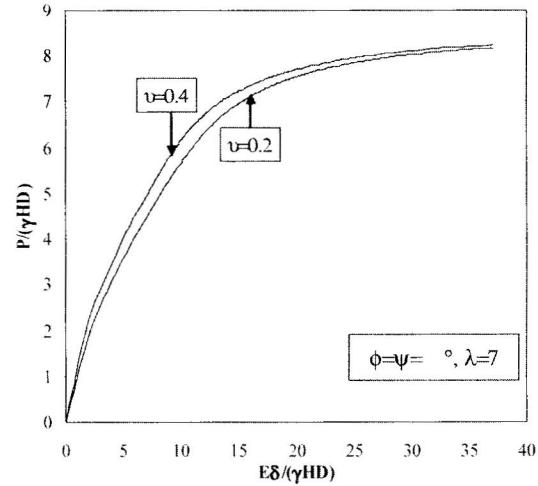
اغلب، نتایج مهاریهای نواری که تحت تاثیر نیروی بالارانش قرار می‌گیرند در پیش بینی پاسخ بالارانش لوله‌های مدفون تشخیص داده شده‌اند [۱].

فاکتور بالارانش به دست آمده: F_{γ} ، از تحلیل اجزاء محدود حاضر با مطالعه حالت حدی مارستون (۱۹۳۰)، میجر (۱۹۵۵)، میرهوف و آدامز (۱۹۶۸)، مدل انبساط کره سطحی وسیک (۱۹۷۱)، تحلیل اجزاء محدود رو و دیویس (۱۹۸۲) برای مصالح با قانون جریان متحد، مطالعه آزمایشگاهی ترانمن و همکارانش (۱۹۸۵)، تحلیل حالت حد بالایی مورای و گدس (۱۹۸۷)، راه حل سوبا راثو و کومار (۱۹۹۴)، تحلیل سخت شوندگی سینماتیک وایت و همکارانش (۲۰۰۱) و تحلیل اجزاء محدود کومار (۲۰۰۲) برای مصالح با قانون جریان متحد مقایسه شده است. مقایسه‌های انجام شده در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده‌اند. دیده شده است که نتایج اجزاء محدود حاضر به صورت خیلی خوبی با تحلیل اجزاء محدود کومار (۲۰۰۲) و تحلیل سخت شوندگی سینماتیک وایت و همکارانش (۲۰۰۱) مطابقت می‌کند. مطالعه حالت حدی میجر (۱۹۵۵) با سطح گسیختگی قائم در همه موارد کمترین فاکتور بالارانش را ایجاد می‌کند. باید خاطر نشان شود که مطالعه حالت حدی مورای و گدس (۱۹۸۷) با سطح گسیختگی منحنی در اکثر موارد بالاترین فاکتور بالارانش را ایجاد می‌کند.

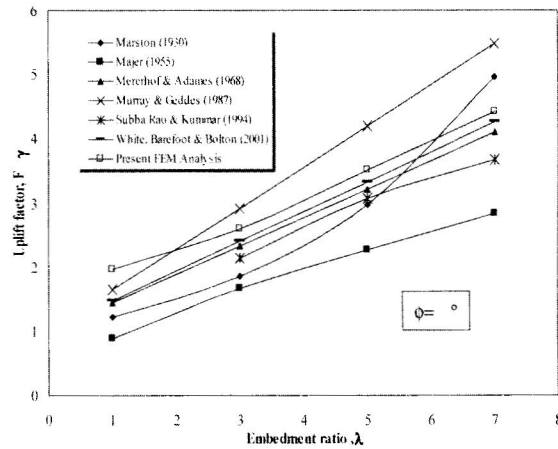
۹- بحث و نتیجه‌گیری:

با توجه به مطالب آورده شده در این مقاله موارد زیر را می‌توان نتیجه‌گیری کرد:

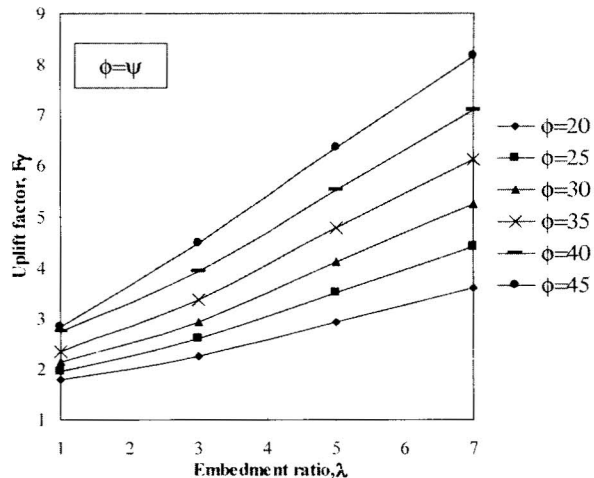
- ۱- در ابتدا برای همه حالات، منحنی‌های نیروی بالارانش- تغییر مکان قائم خطی باقی می‌ماند و سپس شیب (سختی) منحنی‌های ترسیم شده به صورت پیوسته تا زمانی که گسیختگی کامل اتفاق می‌افتد، کاهش می‌یابد.
- ۲- مقادیر بارهای گسیختگی، تغییر مکان قائم گسیختگی و سختی اولیه منحنی‌های نیروی بالارانش- تغییر مکان قائم برای مقادیر λ و ϕ بالاتر، بزرگتر می‌شود.
- ۳- مقدار سختی اولیه منحنی‌های بالارانش- تغییر مکان قائم برای افزایش ν از ۰/۲ به ۰/۴، افزایش یافته ولی مقادیر بارهای گسیختگی و تغییر مکان قائم گسیختگی بدون تغییر باقی می‌ماند.
- ۴- فاکتور بالارانش، F_{γ} ، با افزایش λ و ϕ افزایش می‌یابد.
- ۵- فاکتور بالارانش، F_{γ} ، با افزایش ν از ۰/۲ به ۰/۴ بدون تغییر باقی می‌ماند.
- ۶- تغییرات فاکتور بالارانش، F_{γ} ، با نسبت کارگذاری، λ ، به صورت خطی می‌باشد.



شکل ۹- پاسخ نیروی بالارانش- تغییر مکان قائم لوله به صورت بدون بعد ($\lambda = \nu$)



شکل ۱۰- تغییرات فاکتور بالارانش با λ و ϕ



شکل ۱۱- مقایسه فاکتور بالارانش F_{γ} برای $\phi = 25^\circ$

14. Rowe, R.K., and Davis, E.H., 1982, "The behaviour of anchor plates in clay", *Geotechnique*, England, Vol. 32, No. 1, pp. 9-23.
15. Rowe, R.K., and Davis, E.H., 1982, "The behaviour of anchor plates in sand", *Geotechnique*, England, Vol. 32, No. 1, pp. 25-41.

۷- نتایج اجزاء محدود حاضر به صورت خیلی خوبی با تحلیل اجزاء محدود کومار (۲۰۰۲) و تحلیل سخت شوندگی سینماتیک وایت و همکارانش (۲۰۰۱) مطابقت می کند.

۸- مطالعه حالت حدی میجر (۱۹۵۵) با سطح گسیختگی قائم در همه موارد کمترین فاکتور بالارانش را ایجاد می کند.

۹- مطالعه حالت حدی مورای و گدس (۱۹۸۷) با سطح گسیختگی منحنی در اکثر موارد بالاترین فاکتور بالارانش را ایجاد می کند.

مراجع:

1. Kumar, J., 2002, "Uplift response of buried pipes in sands using FEM", *Indian Geotechnical Journal*, Vol. 32, No. 2, pp. 146-160.
2. Das, B. M., 1999, "Shallow foundation: bearing capacity and settlement", p. 366.
3. Trautmann, C. H., O'Rourke, T. D., and Kulhawy, F. H., 1985, "Uplift force- displacement response of buried pipe", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 9, pp. 1061-1075.
4. White, D. J., Barefoot, A. J., and Bolton, M. D., 2001, "Centrifuge modeling of upheaval buckling in sand", *International Journal of physical modeling in Geotechnics*, Vol. 2, pp. 1-18.
5. Bransby, M. F., Brunning, P., Newson, T. A., and Davies, M. C. R., 2001, "Numerical and centrifuge modeling of upheaval resistance of buried pipelines", 20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE01/PIPE-4118, pp. 1-8.
6. Bouazza, A., and Finlay, T. W., 1990, "Uplift capacity of plate anchors buried in two layered sand", *Geotechnique*, Vol. 40, No. 2, pp. 293-297.
7. Murray, E. J., and Geddes, J. D., 1987, "Uplift of anchor plates in sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 3, pp. 202-215.
8. Matyas, E. L., and Davis, J. B., 1983, "Prediction of vertical earth loads on rigid pipes", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 109, No. 2, pp. 190-201.
9. Subba Rao, K. S., and Kummar, J., 1994, "Vertical uplift capacity of horizontal anchors", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 7, pp. 1134-1147.
11. Brinkgreve, R. B. J., 1999, "Beyond 2000 in computational geotechnics", *Plaxis B.V. & Delft University of technology*, Netherlands, p. 313.
12. Poulos, H. G., 1988, "Marine geotechnics", *Unwin Hyman Ltd*, p. 473.
13. Fang, H. Y., 2001, "Foundation engineering handbook", *Chapman and Hall, Inc.*, p. 923.

Uplift Response of Buried pipes in Saturated Sand Using Finite Element Method

Jamal Seidi

Islamic Azad University, Ilam Branch

Alireza Ghaitasi

Islamic Azad University, Ilam Branch

Abstract:

In this research a numerical analysis using PLAXIS program has been carried out to investigate the behavior of buried concrete box culverts different parameters including load types, loading locations, culvert dimensions, underlying soil specifications, and the coefficient of earth pressure-at-rest. For modeling purpose, patch loading of truck or military tank has been substituted to an equivalent strip load, and the problem has been analyzed under plane strain with application of linear elastic constitutive model.

The result of numerical analysis showed that load location has a considerable effect on the produced moment and shear amounts in the culvert and the most critical case is under the tank loading. The location of maximum shear and negative moment (positive in PLAXIS results) is at the corner of box culvert, and the location of maximum shear and positive moment (negative in PLAXIS results) is at the center of upper and lower slab of the box culvert. By increasing the box culverts dimensions, the moment and shear amount will be increased significantly. By increasing the elasticity modulus of underlying soil, moments will be increased and shears will be decreased. The variation of Poisson's ratio has a little effect on box culvert behavior in terms of shear and moment. By increasing the side soil's coefficient of earth pressure-at-rest of side, the maximum shear and negative moment (positive in PLAXIS results) decreased, and positive moment (negative in PLAXIS results) increased. Finally, the results of linear elastic model are compared with Mohr-Coulomb model, and a good agreement has been obtained; therefore, considering the assumption of linear elastic behavior for soil is almost a good assumption and the results have a good precision.

Keywords:

Concrete box culvert, linear elastic model, Iranian bridge loading code, Equivalent strip load, Finite element method.