بخش هشتم

ظرفیت باربری دینامیکی پی های سطحی

(Dynamic bearing capacity of shallow foundations)

تدریس: دکتر سید محمد رضا امام

ظرفیت باربری دینامیکی پی های سطحی - کلیات

ظرفیت باربری دینامیکی پی سطحی چندان مورد مطالعه قرار نگرفته است. لیکن با توجه به مطالعات انجام شده تا کنون معلوم شده است که این ظرفیت باربری به عوامل مختلفی بستگی دارد از جمله:

- نحوه تغییرات بار دینامیکی اعمال شده، از جمله اندازه بار وارده
- مدت زمان تاثیر بار اعمال شده
- رفتار خاک بارگذاری شده و نحوه تاثیر سرعت کرنش بر رفتار آن

در اینجا اثر هریک از عوامل فوق بطور مختصر بررسی خواهند شد.

ظرفیت باربری دینامیکی پی های سطحی

- پی های سطحی بر روی زمین های ماسه ای

برای بارهای استاتیکی ظرفیت باربری از رابطه زیر بدست می آید:

$$q_u = cN_cS_cd_c + qN_qS_qd_q + \tfrac{1}{2}\gamma BN_\gamma S_\gamma d_\gamma$$

در صورتیکه بار بصورت دینامیکی اعمال شود، ظرفیت باربری تاحدی تغییر خواهد کرد. آزمایشات انجام شده توسط Vesic, Banks, and Woodward (1965), بر روی مدل آزمایشگاهی شامل پی صلب به قطر چهار اینچ بر روی ماسه متراکم خشک و اشباع این موضوع را نشان داد. برای پی که بر سطح خاک ماسه ای قرار دارد رابطه فوق بصورت روبرو در می آید:

$$q_u = \tfrac{1}{2}\gamma BN_\gamma S_\gamma$$

با استفاده از این رابطه می توان ظرفیت باربری را بصورت متغیر بدون بعد زیر نشان داد:

$$\frac{q_u}{\frac{1}{2}\gamma B} = N_\gamma S_\gamma$$

ظرفیت باربری دینامیکی پی های سطحی

- پی های سطحی بر روی زمین های ماسه ای

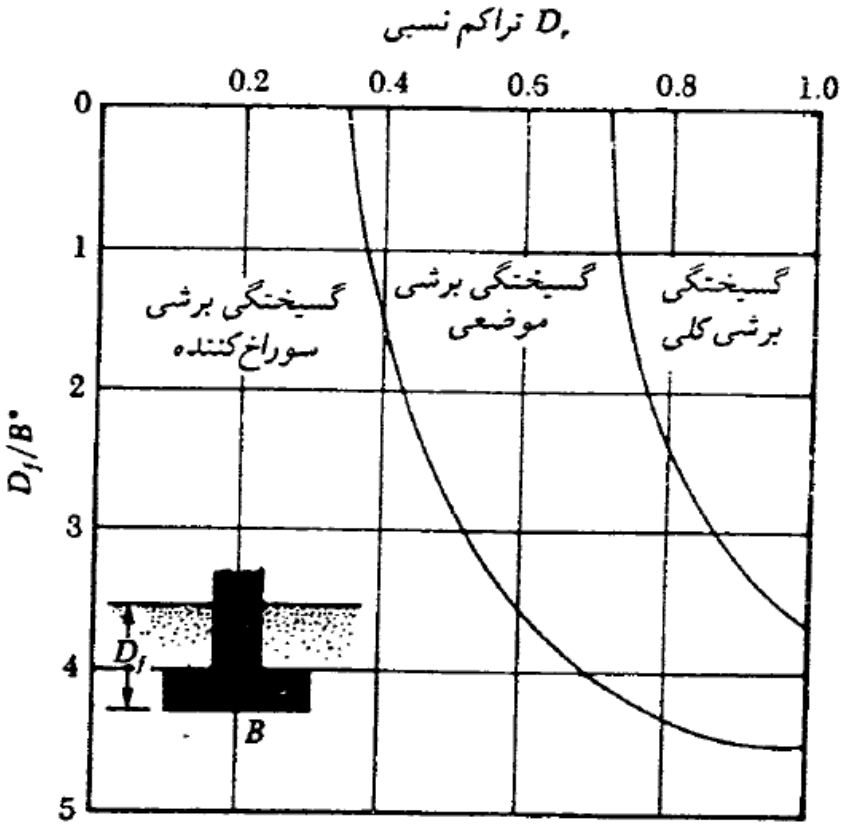
- حالتهای گسیختگی پی های سطحی

- (a) گسیختگی کلی برشی (General shear failure) : این نوع گسیختگی ممکن است همراه با چرخیدن و کج شدن ساختمان (پی) بوده و عواقب ناگواری دارد و ممکن است زمین اطراف ساختمان باد کند (bulging). در اینحال سطوح گسیختگی در زیر پی بطور کامل بوجود آمده و تا سطح خاک ادامه می یابند و بدین ترتیب مکانیزم گسیختگی تشکیل می شود.
- (b) گسیختگی برشی موضعی (Local shear failure) : ساختمان (پی) مستقیم باقی می ماند ولی در زمین فرو میرود. گاهی نشست های سریع و کوتاه دارد و بخشی از مکانیزم گسیختگی تشکیل میشود.
- (c) گسیختگی برش پانچ (Punching shear failure) : ساختمان (پی) تنها در محل خود نشست می کند و سطوح برش ممکن است تنها در کناره های پی بوجود آید ولی هیچگونه مکانیزمی تشکیل نمیشود.

ظرفیت باربری دینامیکی پی های سطحی

- پی های سطحی بر روی زمین های ماسه ای

- حالتهای گسیختگی پی های سطحی



نوع گسیختگی برشی شالوده‌های متکی بر ماسه (وسیک ۱۹۷۳)

$B^* = B$ for a square or circular footing
$B^* = BL/2(B+L)$ for a rectangular footing

حالت های گسیختگی پی ها با توجه به تراکم خاک و عمق پی

ظرفیت باربری دینامیکی پی های سطحی

- پی های سطحی بر روی زمین های ماسه ای

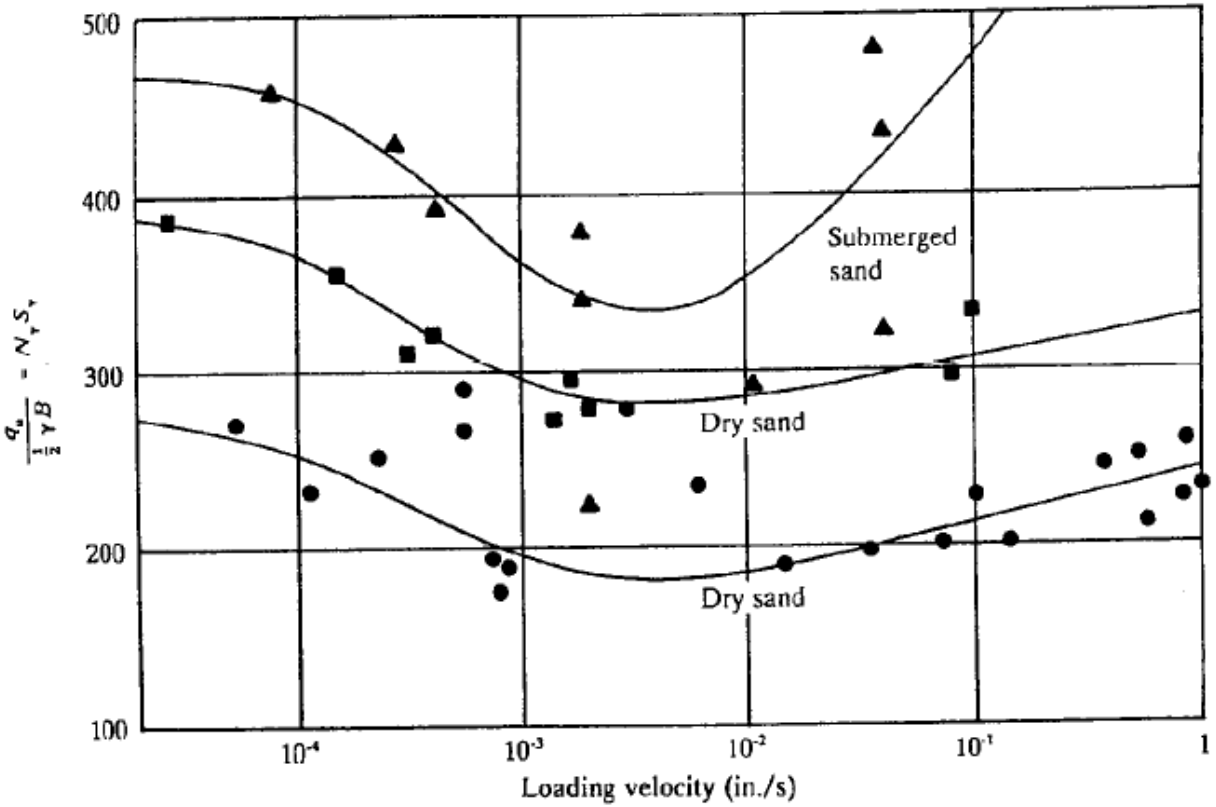


Figure 6.2 Plot of bearing capacity factor versus loading velocity (after Vesic, Banks, and Woodward, 1965)

با استفاده از آزمایشات مذکور، تغییرات شکل روبرو برای متغیر بدون بعد ظرفیت باربری در بارهای با سرعت مختلف بدست آمد:

ظرفیت باربری دینامیکی پی های سطحی

- پی های سطحی بر روی زمین های ماسه ای

- در این آزمایشات، کلیه بارگذاری ها بجز آنهائی که مربوط به ماسه اشباع تحت بارگذاری سریع بودند بار گسیختگی مربوط به گسیختگی کلی برشی را نشان دادند.
- در بارهای سریع بر روی ماسه اشباع بار گسیختگی مربوط به برش پانچ بدست آمد که در آن سطح گسیختگی تا سطح زمین ادامه نیافت.
- با استفاده از نمودار دیده میشود پارامتر بدون بعد ظرفیت باربری ابتدا با افزایش سرعت بارگذاری کاهش یافته و پس از رسیدن به مقدار حداقل در سرعتی نزدیک به حدود $2\times10^{-3} in/s$ مجددا افزایش می یابد.
- کاهش ظرفیت باربری در سرعت فوق متناظر با کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک تقریبا به انداز دو درجه است. این اثر قبلا نیز در آزمایشات انجام شده بر روی ماسه مشاهده شده بود.

ظرفیت باربری دینامیکی پی های سطحی

- پی های سطحی بر روی زمین های ماسه ای

بطور کلی با توجه به اطلاعات موجود می توان در زمینه ظرفیت باربری دینامیکی پی های سطحی بر روی خاکهای ماسه ای به موارد زیر اشاره کرد:

- برای پی های سطحی که بر روی خاکهای ماسه ای قرار داشته و تحت بارگذاری با شتاب $a_{\max} \le 13g$ قرار می گیرند، گسیختگی از نوع برشی کلی می تواند بوجود بیاید.
- برای بارگذاری با شتاب $a_{\max} > 13g$ گسیختگی از نوع برش پانچ خواهد بود
- تفاوت در نوع گسیختگی ناشی از نیروهای مقاوم مربوط به اینرسی خاک در ضمن بارگذاری دینامیکی است. تاثیر مقاومت اینرسی مشابه تاثیر سربار بوده و بدین علت نوع گسیختگی را تغییر میدهد
- حداقل ظرفیت باربری دینامیکی پی سطحی بر روی ماسه متراکم برای بار گذاری بین استاتیکی تا ضربه ای را می توان با بکار بردن زاویه اصطکاک داخلی دینامیکی، که دو درجه کمتر زاویه اصطکاک داخلی استاتیکی است بدست آورد

ظرفیت باربری دینامیکی پی های سطحی

- پی های سطحی بر روی زمین های ماسه ای

- در صورتیکه نتایج آزمایشگاهی مربوط به تغییر زاویه اصطکاک داخلی در بارگذاری دینامیکی موجود باشد، می توان از آن داده ها برای تعیین ظرفیت باربری دینامیکی استفاده کرد.
- افزایش ظرفیت باربری در بارگذاری های سریعتر بدلیل آنست که ذرات خاک در این شرایط از مسیر مربوط به کمترین مقاومت حرکت نخواهند کرد
- در پی هایی که بر روی ماسه غیرمتراکم و اشباع قرار دارند اثرات موقت روانگرائی میتواند وجود داشته باشد. در اینحال ممکن است نتوان ظرفیت باربری را بشکل قابل اعتمادی تعیین کرد
- افزایش سریع ظرفیت باربری ماسه های متراکم و اشباع با افزایش سرعت بارگذاری بدلیل ایجاد فشار آب منفی و در نتیجه افزایش تنش موثر است.

ظرفیت باربری دینامیکی پی های سطحی

- پی های سطحی بر روی زمین های رسی

- در این حالت داریم: $\phi = 0$ و $c = c_u$ چون برای $\phi = 0$ ضریب $N_\gamma = 0$ ست، رابطه ظرفیت باربری بصورت زیر در می اید:

$$q_u = c_u N_c S_c d_c + q N_q S_q d_q$$

- با توجه به اینکه در اینحالت همچنین داریم: $N_c = 5.14$ و $N_q = 1$

رابطه فوق بصورت زیر در می آید (De Beer, 1970; Brinch Hanson, 1970):

$$q_u = 5.14 c_u \left[1 + 0.1946\left(\frac{B}{L}\right)\right]\left[1 + 0.4\left(\frac{D_f}{B}\right)\right] + q \qquad \text{for } \frac{D_f}{B} \le 1$$

$$q_u = 5.14 c_u \left[1 + 0.1946\left(\frac{B}{L}\right)\right]\left[1 + 0.4 \tan^{-1}\left(\frac{D_f}{B}\right)\right] + q \qquad \text{for } \frac{D_f}{B} > 1$$

- روابط بالا را میتوان برای تعیین ظرفیت باربری پی ها بر روی خاکهای رسی اشباع بکار برد در صورتیکه اثر سرعت بارگذاری را بر مقاومت برشی زهکشی نشده منظور کنیم.

ظرفیت باربری دینامیکی پی های سطحی

- پی های سطحی بر روی زمین های رسی

- همانگونه که در گذشته دیدیم، مقاومت برشی زهکشی نشده خاکهای رسی اشباع با افزایش سرعت بارگذاری زیاد میشود و برای بارهای دینامیکی در حدود 1/5 برابر حالت استاتیکی است.
- برای آنکه اثر سرعت بارگذاری را بر مقاومت برشی زهکشی نشده منظور کنیم باید ابتدا بدانیم نرخ کرنش اعمال شده بر خاک چقدر است. این نرخ را میتوان از رابطه زیر بدست آورد:

$$\dot{\varepsilon} = \left(\frac{1}{\Delta t}\right)\left(\frac{\frac{1}{2}\Delta S}{B}\right)$$

که در آن Δt زمان بارگذاری بوده و بقیه متغیرها طبق آنچه در شکل نشان داده شده است می باشند.

ظرفیت باربری دینامیکی پی های سطحی

- پی های سطحی بر روی زمین های رسی

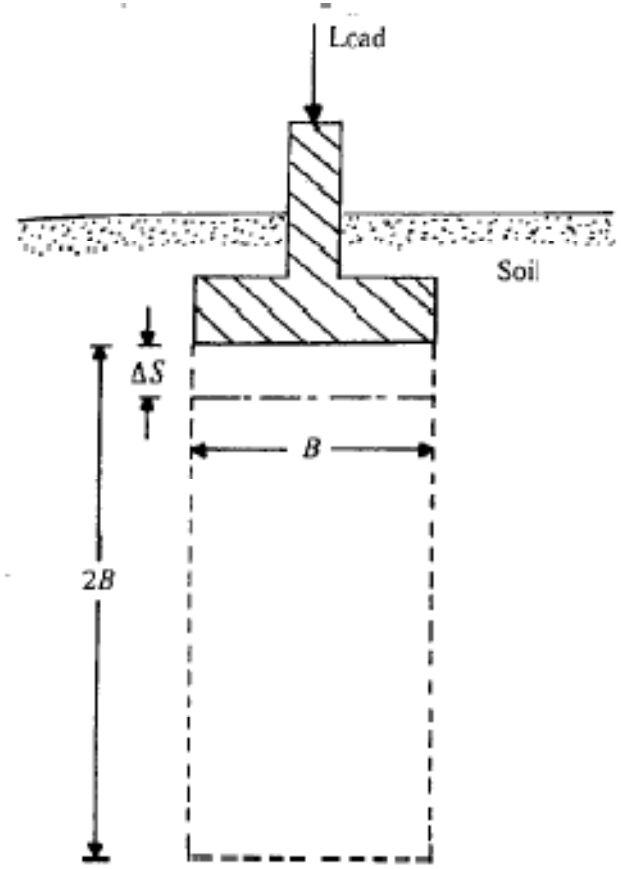


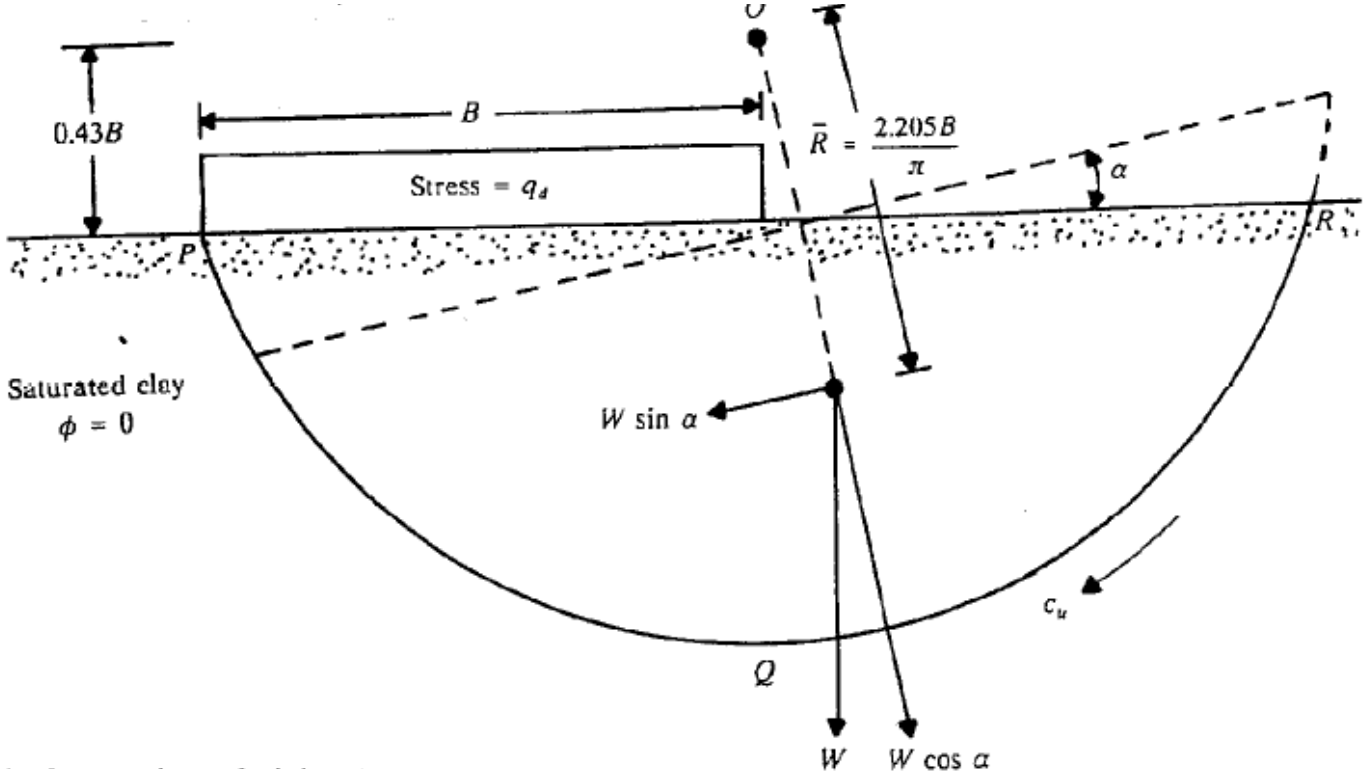
Figure 6.3 Definition of strain rate under a foundation

- همانگونه که در شکل دیده میشود، این رابطه با این فرض بدست آمده است که عمق ناحیه موثر در ایجاد کرنش در زیر پی دو برابر عرض پی است.
- بنابراین برای بدست آوردن ظرفیت باربری پی تحت باری با نرخ کرنش مشخص، می توان ابتدا نرخ کرنش اعمال شده بر پی را با استفاده از رابطه مذکور تعیین کرد، سپس مقاومت برشی زهکشی نشده خاک برای آن نرخ کرنش را بدست آورده و در رابطه ظرفیت باربری مورد استفاده قرار داد.

ظرفیت باربری دینامیکی پی های سطحی

- استفاده از رابطه تعادل دینامیکی برای پی بر روی زمین رسی

پی سطحی نواری زیر بر روی خاک رسی اشباع با زاویه اصطکاک داخلی صفر قرار داشته و بر آن بار دینامیکی برابر با: $q_d = q_0 e^{-bt} = l q_u e^{-bt}$ وارد میشود



ظرفیت باربری دینامیکی پی های سطحی

- استفاده از رابطه تعادل دینامیکی برای پی بر روی زمین رسی

- برای این پی می توان تغییرات زاویه دوران پی تحت بار دینامیکی(a) را با بررسی تعادل دینامیکی نیروی محرک و نیروهای مقاوم در برابر دوران تعیین کرد. در این بررسی فرض شده است که گوه گسیختگی بصورت یک جسم پلاستیک صلب عمل کرده و سطح گسیختگی مانند بارگذاری استاتیکی، بشکل استوانه است بگونه ایکه پی در زمان گسیختگی حول محور o دوران میکند.

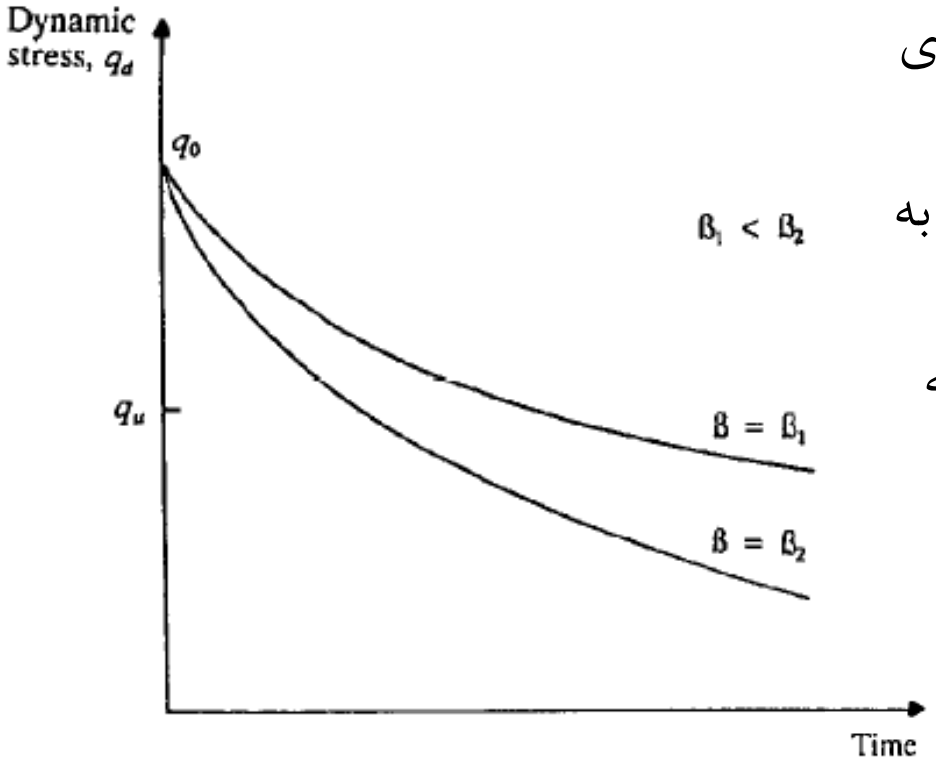
- برای رس در شرایط زهکشی نشده داریم: $q_u = 5.54c_u$

و بنابراین حداکثر بار گذرای دینامیکی وارد شده بر پی (q_0) ضریبی از ظرفیت باربری استاتیکی پی بوده و این بار با زمان بصورت لگاریتمی کاهش می یابد.

ظرفیت باربری دینامیکی پی های سطحی

- استفاده از رابطه تعادل دینامیکی برای پی بر روی زمین رسی

نحوه کاهش بار گذرا با زمان در شکل زیر نشان داده شده است.



برای بررسی تعادل دینامیکی اثر بارهای زیر در نظر گرفته میشود:

1- لنگر ناشی از نیروی محرک مربوط به بار دینامیکی وارد بر پی

2- لنگر نیروی مقاوم اینرسی مربوط به خاک گسیخته شده که بصورت یک جسم صلب در نظر گرفته میشود

3- لنگر مقاوم ناشی از جابجائی مرکز ثقل خاک گسیخته

ظرفیت باربری دینامیکی پی های سطحی

- استفاده از رابطه تعادل دینامیکی برای پی بر روی زمین رسی

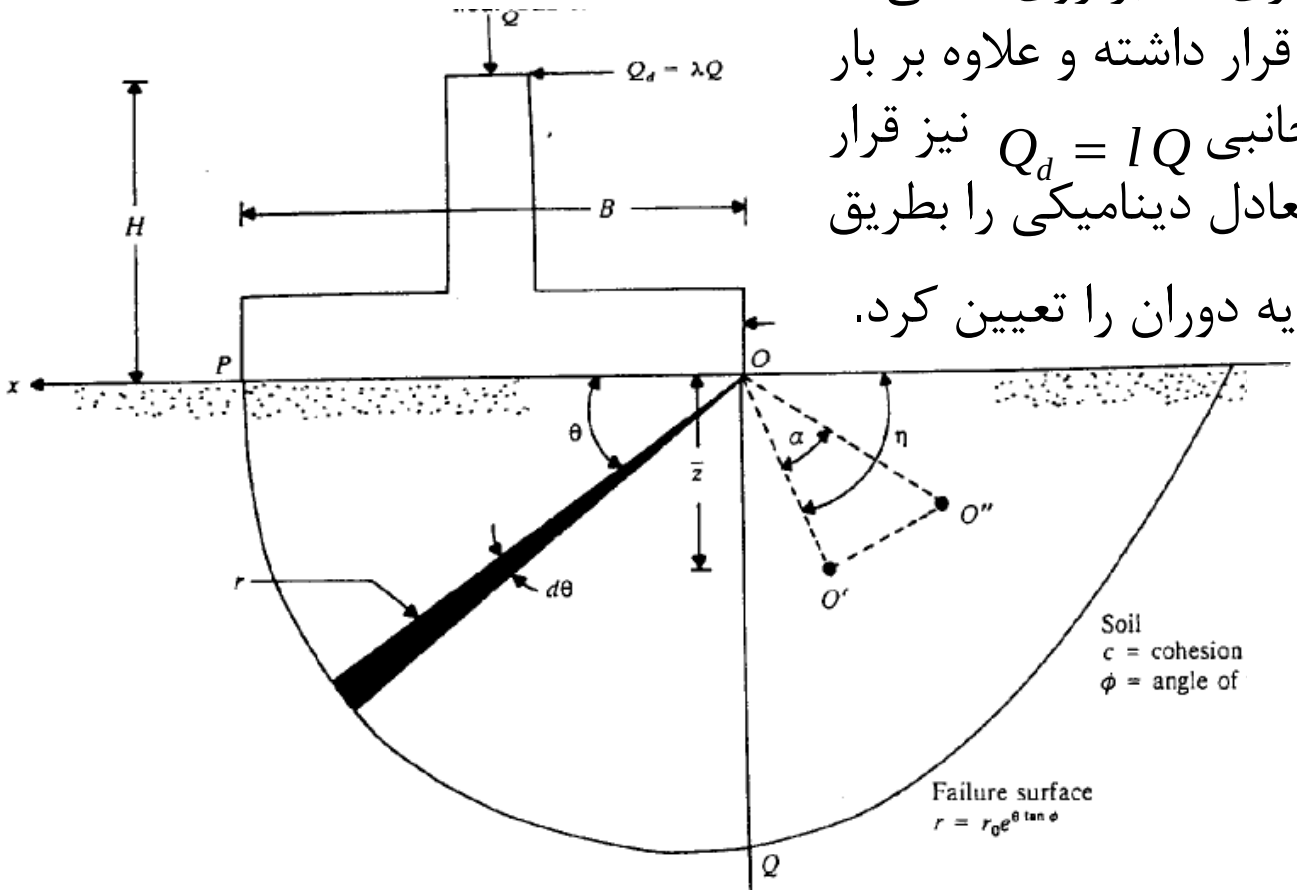
برای چنین شرایطی، با حل معادله تعادل دینامیکی مقادیر حداکثر زاویه دوران پی تحت با دینامیکی بر حسب سایر متغیرها داده شده است که در نمودارهائی در شکل 6.6 کتاب Das آمده است.

در استفاده از جوابهای مذکور باید توجه داشت که در اینجا اثر نرخ (سرعت) کرنش در افزایش مقاومت برشی خاک و همچنین وزن پی منظور نشده است. همچنین در اینجا مکانیزم گسیختگی از نوع کلی برشی فرض شده که صحت آن را برای مسئله مورد نظر باید بررسی کرد.

ظرفیت باربری دینامیکی پی های سطحی

- استفاده از رابطه تعادل دینامیکی برای پی بر روی زمین دارای C و ϕ

برای پی سطحی نواری که بر روی خاکی اصطکاکی-چسبنده قرار داشته و علاوه بر بار قائم Q ، تحت بار جانبی $Q_d = lQ$ نیز قرار دارد میتوان روابط تعادل دینامیکی را بطریق مشابهی نوشته و زاویه دوران را تعیین کرد.



در اینجا سطح گسیختگی مانند بارگذاری استاتیکی، بشکل منحنی لگاریتمی در نظر گرفته میشود.

ظرفیت باربری دینامیکی پی های سطحی

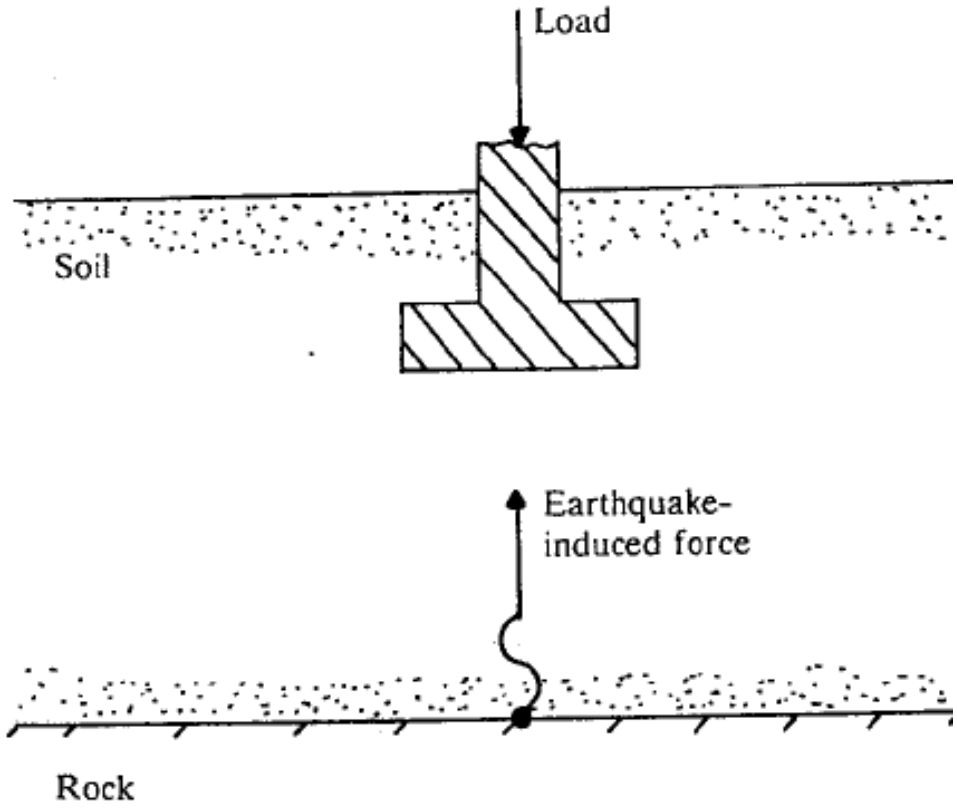
- استفاده از رابطه تعادل دینامیکی برای پی بر روی زمین دارای c و ϕ

روابط تعادل دینامیکی که در گذشته ذکر شد با این فرض بدست آمده است که گسیختگی خاک از نوع کلی برشی بوده و پی در زمان گسیختگی دوران کند. ولی در مواردی ممکن است تحت بار دینامیکی، گسیختگی پی بصورت برش پانچ (برش سوراخ کننده) اتفاق افتد و بصورت عمودی و بدون دوران در خاک فرو رود. در اینحال مکانیزم در نظر گرفته شده برای تعادل دینامیکی متفاوت بوده و پاسخ های دیگری برای تغییر مکانها بدست خواهند آمد.

نمونه ای از حل رابطه تعادل دینامیکی برای خاک دارای اصطکاک-چسبندگی نیز در کتاب Das آمده است.

ظرفیت باربری دینامیکی پی های سطحی

- رفتار پی تحت بار دینامیکی قائم منتقل شده از خاک به پی



در بسیاری موارد می خواهیم رفتار پی را تحت بار زلزله که از طریق خاک و بوسیله سنگ بستر زیرین به آن منتقل میشود بررسی کنیم.

در عمل معمولا بار زلزله را در امتداد افقی بررسی می کنند و اثر مولفه عمودی بار زلزله کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

ظرفیت باربری دینامیکی پی های سطحی

- رفتار پی تحت بار دینامیکی قائم منتقل شده از خاک به پی

مطالعاتی در این زمینه توسط Varadi and Saxena (1980) با استفاده از مدل آزمایشگاهی صورت گرفته است که در آن یک پی دایره ای شکل بر روی خاک ماسه ای قرار داده شده و از طریق خاک زیر به آن نیروی دینامیکی عمودی وارد شده است.

در این آزمایشها قبل از اعمال بار دینامیکی، به پی بار مشخص q نیز از بالا وارد شده است. در شکل بعد نتایج آزمیشگاهی برای پی به قطر 6 اینچ که برآن فشار q=0.55 lb/in^2 وارد شده است نشان داده شده است. در این شکل:

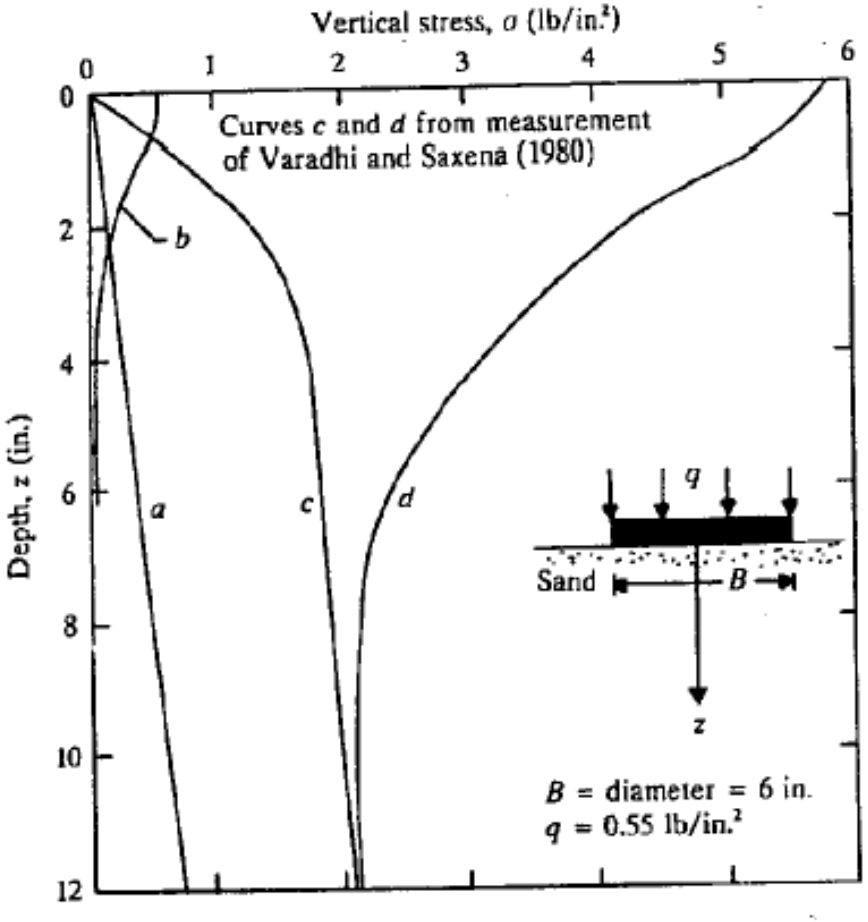
- منحنی a تغییرات تنش عمودی با عمق ( ) را نشان میدهد.
- منحنی b تغییرات تنش عمودی ناشی از فشار q در زیر پی و در مرکز سطح آن را نشان میدهد. این تغییرات با استفاده از رابطه بوسینسک بشکل زیر تعیین شده است

که در آن B قطر پی است.

$$\sigma = q\left\{1 - \frac{1}{[1 + (B/2z)^2]^{3/2}}\right\}$$

ظرفیت باربری دینامیکی پی های سطحی

- رفتار پی تحت بار دینامیکی قائم منتقل شده از خاک به پی



- منحنی c تغییرات اندازه گیری شده تنش عمودی ناشی از بار دینامیکی منتقل شده از خاک زیر، در حالتیکه پی بر روی سطح زمین قرار داده نشده است را نشان میدهد.
- منحنی d نیز تغییرات اندازه گیری شده تنش عمودی حداکثر را با عمق در زیر مرکز پی در اثر بار دینامیکی از زیر آن نشان میدهد.

ظرفیت باربری دینامیکی پی های سطحی
- رفتار پی تحت بار دینامیکی قائم منتقل شده از خاک به پی

با استفاده از این منحنی ها دیده میشود:

- تنش دینامیکی حداکثر ممکن است تا بیش از ده برابر تنش استاتیکی افزایش یابد
- در عمق حدود 2B تاثیر وجود پی بر تنش های عمودی دینامیکی تقریبا قابل صرفنظر کردن است.

با انجام مطالعات آزمایشگاهی کافی می توان روابط مناسبی برای تغییرات تنشهای عمودی ناشی از زلزله با عمق بدست آورد.