

Liquefaction

روانگرایی (آبگونی - سیالیت)

قاسم زاده

1

Introduction



2

Introduction

اگر يك ماسه اشباع تحت ارتعاش قرار گيرد، تمايل به تراكم و کاهش حجم پيدا مي كند. در اين حالت اگر امكان زهكشي برقرار نباشد نتيجه كارافزايش فشار حفره اي خواهد بود. اگر به علت ارتعاش پيوسته، فشار حفره اي آب در نهشته ماسه اي افزايش يابد، گاهي مواقع مقدار آن ممكن است مساوي فشار سربار گردد.

$$\sigma' = \sigma - u$$

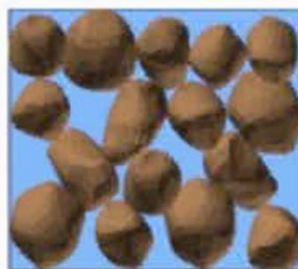
$$\sigma = u \Rightarrow \sigma' = 0 \Rightarrow \text{روانگرایی}$$

تحت اين شرايط ماسه هيچ گونه مقاومت برشي نخواهد داشت و به حالت مايع در مي آيد. به چنين وضعيتي روانگرایی مي گويند كه اغلب در ماسه هاي ريز تا متوسط به وقوع مي پيوند.

روانگرایی ماسه هاي اشباع در حين زلزله، عامل خسارات زيادي به ساختمانها، سدهاي خاكي، و سازه هاي حايل خاك بوده است. براي مثال، زلزله 16 ژوئن سال 1964 ميلادي در نيگاتاي ژاپن و زلزله 1964 ميلادي آلاسكا مي باشد. آنگونگی پديده اي است

3

Introduction



4

Introduction

Sand Boil

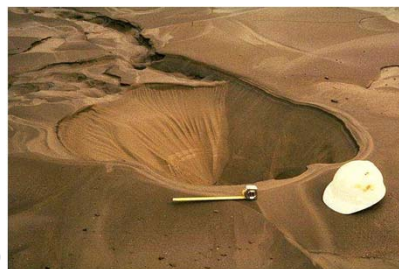


Izmit, Turkey earthquake,
Aug. 17, 1999
Magnitude: 7.4



Prieta, California
earthquake, Oct. 17,
1989 Magnitude: 7.09

Imperial Valley, California,
earthquake Oct. 15, 1979
Magnitude: 7.0



5

انواع روانگرایی

۱- **روانگرایی جریانی**: تنش برشی استاتیکی لازم
برای تعادل توده بیشتر از مقاومت برشی خاک روان شده **Flow liquefaction**
باشد.

۲- **تحرک سیکلی**: تنش برشی استاتیکی توده کمتر از **Cyclic mobility**
مقاومت برشی خاک روان شده باشد.

بررسی امکان وقوع روانگرایی

۱- بررسی تاریخی

۲- زمین شناسی

۳- ساختار خاک

۴- حالت اولیه خاک - تخلخل و تنش پیش تحکیمی

6

روانگرایی

خاکهای ریزدانه دارای هریک از معیارهای ذیل ممکن است کاهش مقاومت از خود نشان دهند

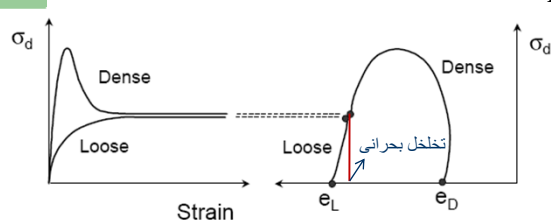
% 10 < ریزدانه (0.005 میلیمتر)

% 36 < حدروانی

% 92 > (حد روانی) > رطوبت طبیعی

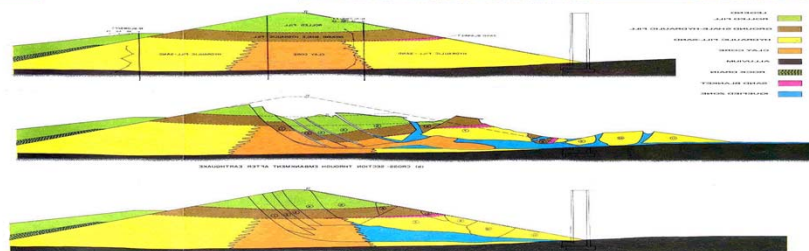
$LI = \frac{w - PL}{LL - PL}$ < 0.75 شاخص روانی

تخلخل بحرانی > تخلخل



انواع روانگرایی

Flow liquefaction
San Francisco
San fernando dam



Cyclic mobility Lateral spreading



Lateral Spreading
at Tea Garden in
Seymen, Turkey
1999

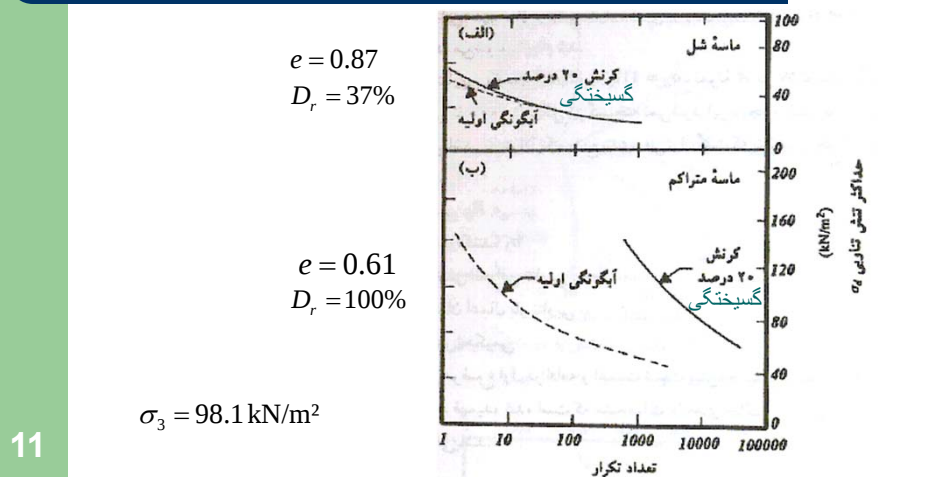
9

پارامترهاي موثر در پتانسیل روانگرایی

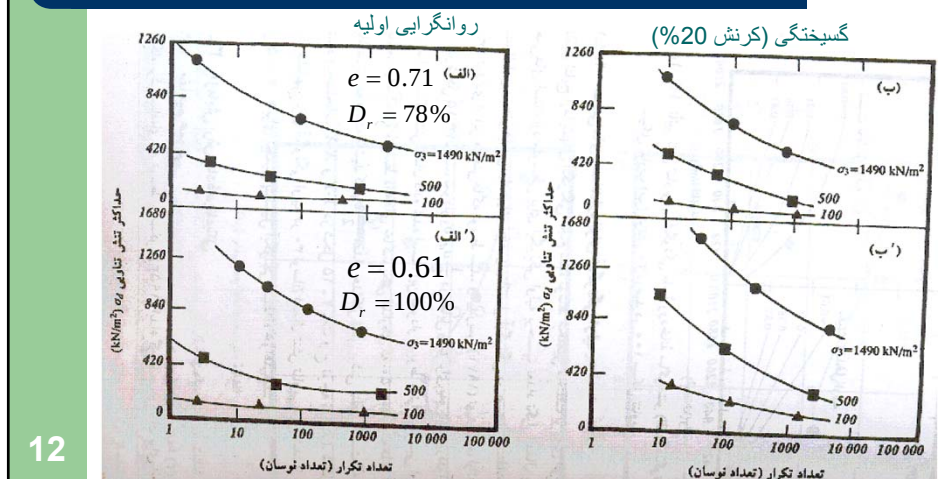
- ۱- تراکم نسبی D_r
- ۲- مشخصات دانه های خاک- اندازه و شکل ذرات
- ۳- فشار محدود کننده σ_3
- ۴- موقعیت زهکشاها و ابعاد توده خاک
- ۵- ماهیت ارتعاشات - حداکثر تنش انحرافی تناوبی σ_d
 - تعداد نوسان اعمال بار تناوبی
 - شتاب قائم و افقی
- ۶- حباب هوا

10

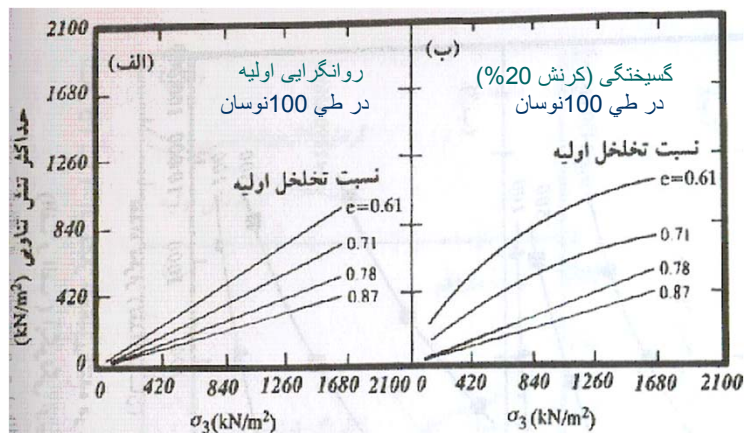
پارامترهاي موثر در پتانسیل روانگرایی تراکم نسبی اولیه – تعداد نوسان



پارامترهاي موثر در پتانسیل روانگرایی فشار محصورکننده – تعداد نوسان

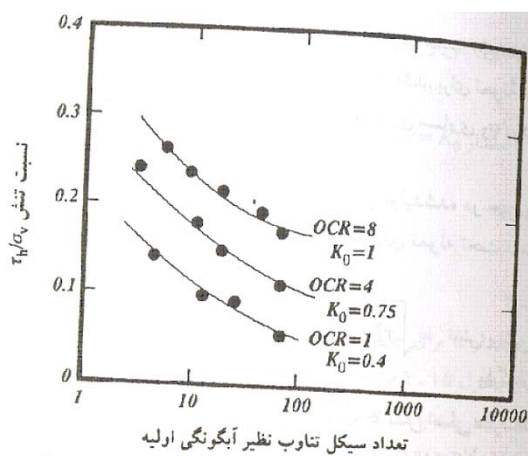


پارامترهاي موثر در پتانسیل روانگرایی حداکثر تنش انحرافی تناوبی



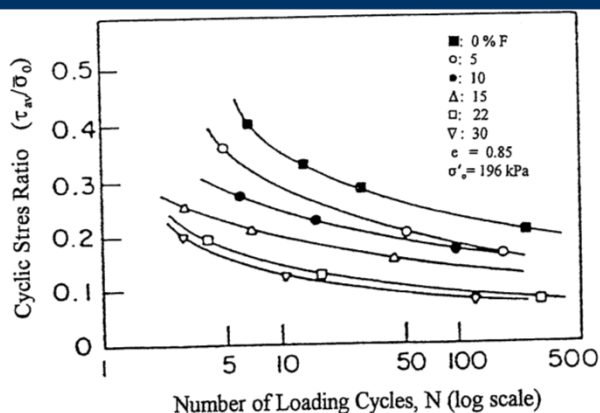
13

پارامترهاي موثر در پتانسیل روانگرایی تنش پیش تحکیمی



14

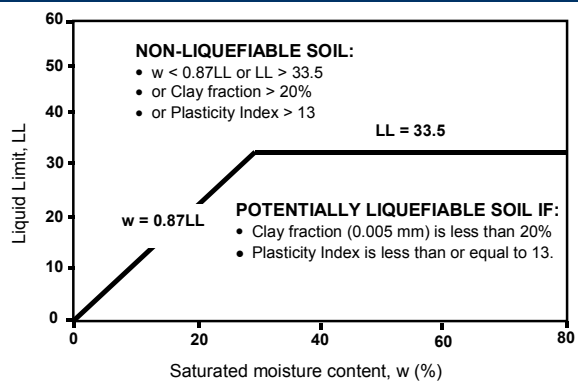
پارامترهاي موثر در پتانسيل روانگرایی درصد ریزدانه



Variation of Cyclic Strength with Fine Content at Constant Void Ratio (after Troncoso, 1990)

15

پارامترهاي موثر در پتانسيل روانگرایی درصد ریزدانه – حد خمیری – حد روانی

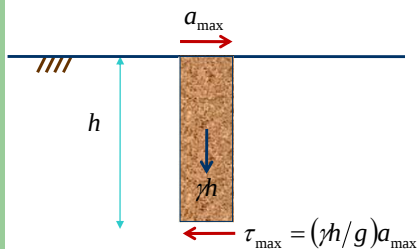


Chinese Criteria Adapted to ASTM Definitions of Soil Properties (Perlea, Koester and Prakash, 1999)

16

معمولا بیشتر خاکهاي رسي در اثر زلزله دچار آبگونگي نمي شوند. با اين حال، مطالعات اخير نشان داده اند که در انواع معيني از مصالح رسي ممکن است در اثر تکانهاي زلزله، افت مقاومت زيادي ايجاد شود.

تعیین پتانسیل روانگرایی روش سید و ادریس



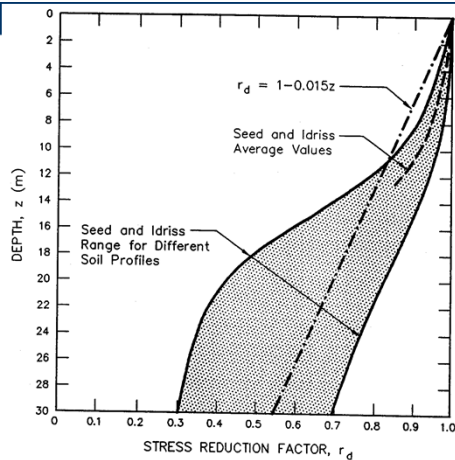
$$\tau_{\max} = (\gamma h / g) a_{\max}$$

ستون خاک صلب نیست و یک محیط شکل پذیر است، لذا رابطه باید اصلاح شود:

$$\tau_{\max(\text{mod})} = C_D \tau_{\max} = C_D [(\gamma h / g) a_{\max}]$$

17

تعیین پتانسیل روانگرایی روش سید و ادریس



18

Stress reduction factor, r_d (modified after Seed and Idriss, 1982, reprinted by permission of EERI).

تعیین پتانسیل روانگرایی روش سید و ادريس

● حداکثر تنش برشی به دست آمده از تاریخچه زمانی تنش برشی در حین زلزله می تواند به تعداد نوسان تنشهای مهم تبدیل شود.

جدول ۱۵ - ۲ تعداد نوسان تنشهای مهم N
مربوط به τ_{av}

بزرگی زلزله	N
7	10
7.5	20
8	30

سید، و ادريس تنشهای یکنواخت نوسانهای مهم را طبق رابطه زیر پیشنهاد می نمایند:

$$\tau_{av} = 0.65 \tau_{\max(\text{mod})} = 0.65 C_D [(\eta h / g) a_{\max}]$$

19

تعیین پتانسیل روانگرایی روش سید و ادريس

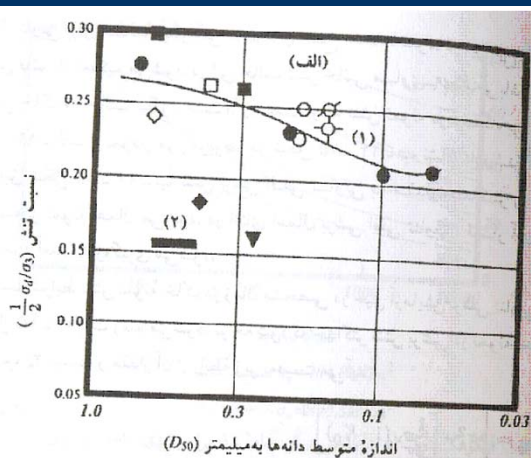
نسبت تنشی که باعث روانگرایی می شود با استفاده از نتایج آزمایشگاه بدست می آید.

$$\left(\frac{\tau}{\sigma'_0} \right)_{\text{site}, D_r} = C_r \left(\frac{\sigma_{dev}}{2\sigma'_3} \right)_{\text{triaxial}, D_r=50} \left(\frac{D_r}{50} \right)$$

D_r site	C_r
20	0.54
30	0.54
40	0.54
50	0.565
60	0.61
70	0.66
80	0.705

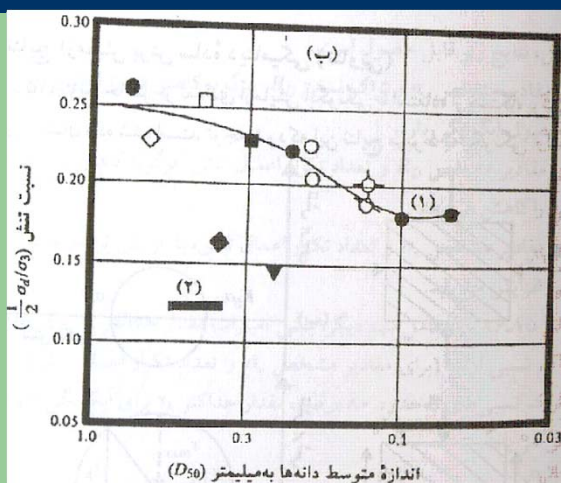
20

تعیین پتانسیل روانگرایی روش سید و ادريس



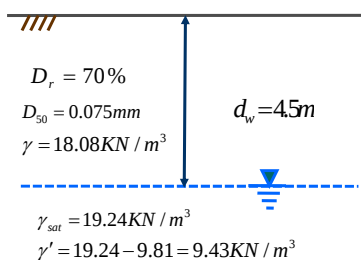
21

تعیین پتانسیل روانگرایی روش سید و ادريس



22

تعیین پتانسیل روانگرایی روش سید و ادريس



مثال: پتانسیل روانگرایی خاک مقابل در
عمق 9 متری تحت زلزله 7 ریشتر را
تعیین نمایید

$$\Rightarrow \begin{aligned} N &= 10 \\ C_D &= 0.925 \\ C_r &= 0.66 \end{aligned}$$

23

تعیین پتانسیل روانگرایی روش سید و ادريس

$$\sigma = \gamma h_1 + \gamma h_2 = 4.5 * 18.08 + 4.5 * 19.24 = 167.94$$

تنش زلزله $\tau_{av} = 0.65 * 0.925 * 167.94 [a_{max} / g] = 100.97 [a_{max} / g]$

$$\sigma'_0 = \gamma h_1 + \gamma' h_2 = 4.5 * 18.08 + 4.5 * 9.43 = 123.8$$

$$D_{50} = 0.075mm \Rightarrow \left(\frac{\sigma_{dev}}{2\sigma'_3} \right)_{triaxial, D_r=50} = 0.215$$

$$\left(\frac{\tau}{\sigma'_0} \right)_{site, D_r} = C_r \left(\frac{\sigma_{dev}}{2\sigma'_3} \right)_{triaxial, D_r=50} \left(\frac{D_r}{50} \right)$$

مقاومت خاک $\tau_{site, D_r} = 123.8 * 0.66 (0.215) \left(\frac{70}{50} \right) = 24.5 \text{ kN} / m^3$

24

مثال

$$a_{max} = 0.3g \Rightarrow \tau_{av} = 30.3 > 24.5 \Rightarrow$$

روانگرایی داریم

روش کنترل روانگرایی

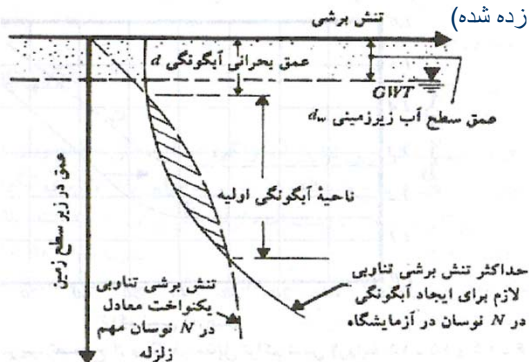
برای تعیین ناحیه ای در صحرا که آبگونگی خاک به علت زلزله از آنجا شروع می شود :

- 1 - ابتدا زلزله طرح را انتخاب نمایید.
- 2 - در اعماق مختلف لایه ماسه ای، تاریخچه زمانی تنش برشی ناشی از زلزله (یعنی تغییرات زمانی تنشهای برشی ایجاد شده در اثر زلزله) را به دست آورید.
- 3- تاریخچه زمانی تنش برشی را به تنشهای یکنواخت تبدیل نموده و مقدار تنشهای یکنواخت معادل را به صورت تابعی از عمق رسم نمایید
- 4 - با استفاده از نتایج آزمون آزمایشگاهی، مقدار تنشهای تناوبی لازم را که باعث آبگونگی اولیه در صحرا می شود به دست آورید.

25

روش کنترل روانگرایی

- 5 - ناحیه ای که در آن ترازهای تنش برشی لازم برای آبگونگی (گام 4) مساوی و یا کوچکتر از تنشهای برشی تناوبی معادل به وجود آمده برای زلزله می باشد، ناحیه ممکن برای آبگونگی می باشد (ناحیه هاشور زده شده)



26

نسبت تنش سیکلی

CSR = cyclic stress ratio causing 5% strain in 20 cycles

Simple shear test $CSR_{ss} = \tau_{cyc} / \sigma'_{v0}$

Triaxial test $CSR_{tt} = \sigma_{dc} / 2\sigma'_3$

$$CSR_{ss} = C_r CSR_{tt} \quad \begin{aligned} C_r &= (1 + K_0)/2 && \text{Finn 1971} \\ C_r &= 2(1 + 2K_0)/3\sqrt{3} && \text{Castro 1975} \end{aligned}$$

نسبت تنش سیکلی مقاوم در سایت به دلیل لرزه‌های چند جهت کاهش می‌یابد

$$CSR_{site} = 0.9 CSR_{ss} = 0.9 C_r CSR_{tt}$$

$$CSR_{EQ} = 0.65(a_{max} / g)r_d(\sigma_v / \sigma'_v)$$

27

تعیین پتانسیل روانگرایی روش سید و ادريس

مثال: تنش برشی ماکزیمم برای ایجاد روانگرایی در لایه سست خاک مقابل راحت زلزله 7.5 ریشتر را تعیین نمایید
فرض نمایید تنش انحرافی سیکلی که موجب روانگرایی می‌شود برابر 39kPa در فشار مجصورکننده 100 kPa باشد

Densan $h=4m$
 $\gamma=21Mg/m^3$
loosan
 $e=0.87$
 $\rho=0.9Mg/m^3$
 $h=2m$

$\sigma'_{v0} = \gamma h_1 + \gamma' h_2 = 4 * 2.1 + 1 * 0.91 = 91.3kPa$
 $CSR_{tt} = \sigma_{dc} / 2\sigma'_3 = \frac{39}{2 * 100} = 0.195$
 $K_0 = 1 - \sin 33 = 0.46$
 $C_r = (1 + K_0) / 2 = \frac{1 + 0.46}{2} = 0.73$
 $CSR_{site} = 0.9 CSR_{ss} = 0.9 * 0.73 * 0.195 = 0.128$
 $CSR_{site} = \tau_{cyc} / \sigma'_{v0} \Rightarrow \tau_{cyc} = CSR_{site} \sigma'_{v0} = 0.128 * 91.3 = 11.7kPa$
 $\Rightarrow \tau_{max} = \tau_{cyc} / 0.65 = 11.7 / 0.65 = 18kPa$

28

تعیین پتانسیل روانگرایی تاثیر تنش برشی اولیه و فشارهای جانبی بزرگ

$$CSR_L = CSR_{7.5} k_M k_\sigma k_\alpha$$

CSR_L نسبت تنش های سیکلی بحرانی جهت وقوع روانگرایی اولیه

$CSR_{7.5}$ نسبت تنش های سیکلی بحرانی زلزله 7.5 ریشتز

k_σ تاثیر تنش برشی اولیه با k_α و تاثیر فشارهای جانبی بزرگ

k_M تاثیر زلزله های با بزرگای متفاوت

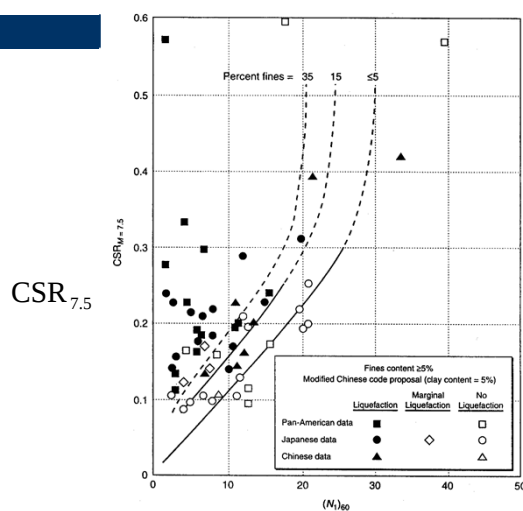
زلزله با بزرگی k_M

5.25	1.5
6	1.32
6.75	1.13
7.5	1
8.5	0.89

$$FS_L = CSR_L / CSR_{EQ}$$

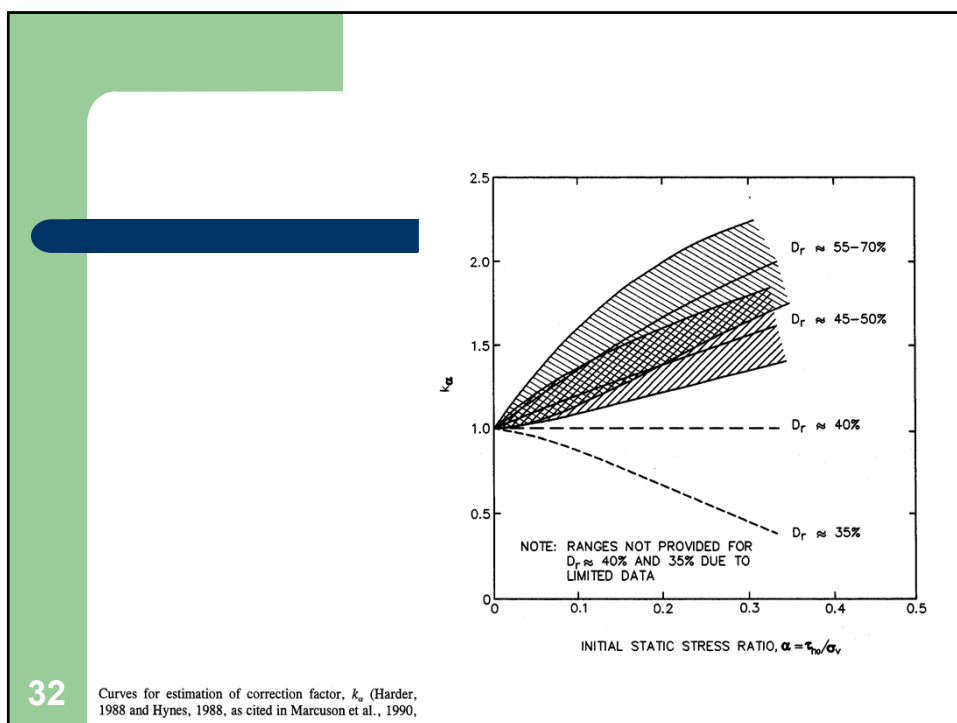
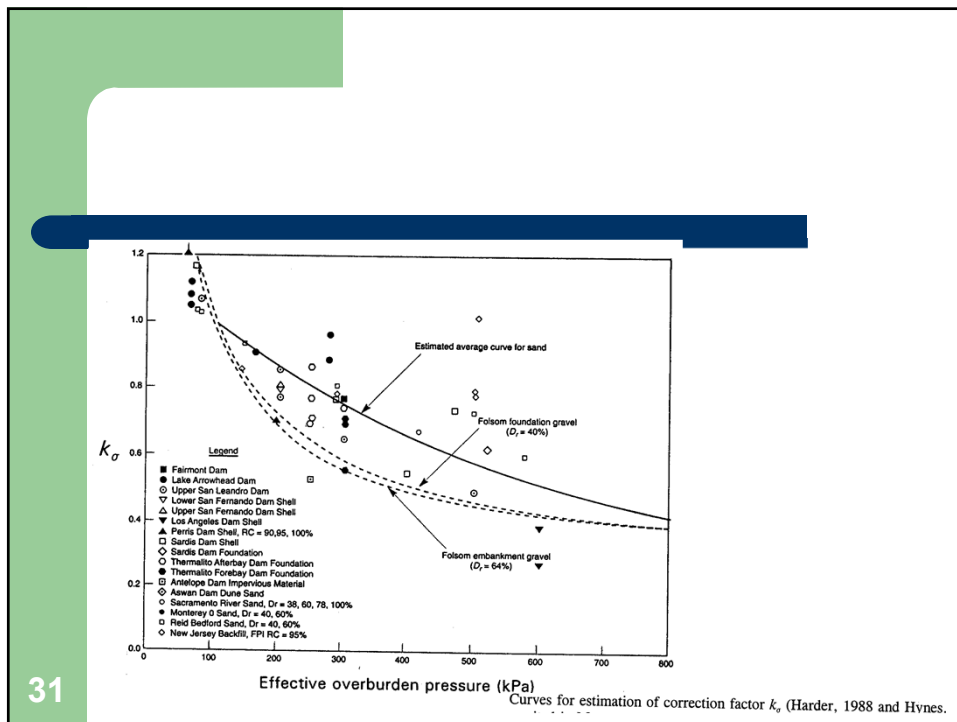
29

تعیین پتانسیل روانگرایی تاثیر تنش برشی اولیه و فشارهای جانبی بزرگ

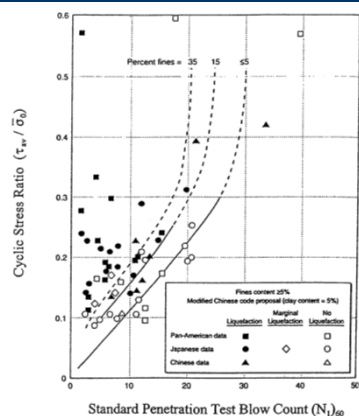


Relationship between Stress Ratio Causing Liquefaction and (N₁)₆₀ values for Silty Sand for M = 7.5 (after Seed et al. 1985)

30



پتانسیل آبگونی بر حسب آزمایشات صحرایی عدد نفوذ استاندارد



Relationship between Stress Ratio Causing Liquefaction and $(N_1)_{60}$ values for Silty Sand for $M = 7.5$ (after Seed et al. 1985)

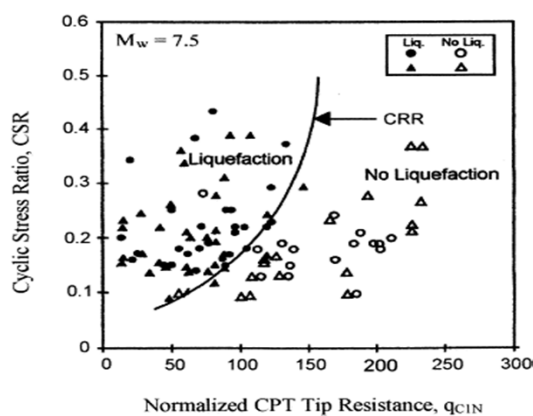
روش دیگر برای تخمین پتانسیل آبگونی خاک، تهیه نمودارهایی بر پایه مقاومت نفوذ استاندارد می باشد. بعضی از این نمودارها توسط سید، و ایدریس (1971-1985) تهیه شده اند.

TABLE 2. Corrections to SPT (Modified from Skempton 1986) as Listed by Robertson and Wride (1998)

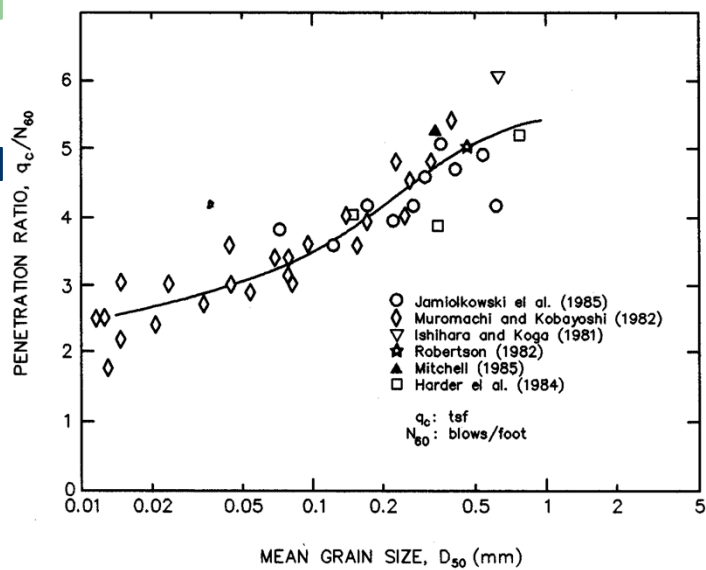
Factor (1)	Equipment variable (2)	Term (3)	Correction (4)
Overburden pressure	—	C_e	$(P_o/\sigma_v)^{0.5}$
Overburden pressure	—	C_e	$C_e \leq 1.7$
Energy ratio	Donut hammer	C_e	0.5–1.0
Energy ratio	Safety hammer	C_e	0.7–1.2
Energy ratio	Automatic-trip Donut-type hammer	C_e	0.8–1.3
Borehole diameter	65–115 mm	C_e	1.0
Borehole diameter	150 mm	C_e	1.05
Borehole diameter	200 mm	C_e	1.15
Rod length	<3 m	C_e	0.75
Rod length	3–4 m	C_e	0.8
Rod length	4–6 m	C_e	0.85
Rod length	6–10 m	C_e	0.95
Rod length	10–30 m	C_e	1.0
Sampling method	Standard sampler	C_e	1.0
Sampling method	Sampler without liners	C_e	1.1–1.3

33

پتانسیل آبگونی بر حسب آزمایشات صحرایی نفوذ مخروط



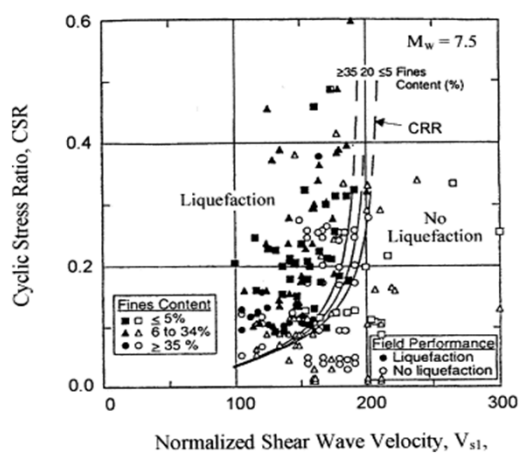
34



Variation of q_c/N_{60} ratio with mean grain size, D_{50} (Seed and De Alba, 1986, reprinted by permission of ASCE).

35

پتانسیل آبگونی بر حسب آزمایشات صحرایی سرعت موج برشی

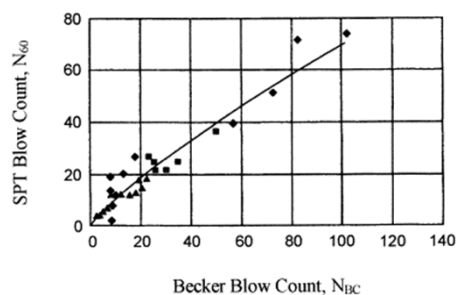


36

پتانسیل آبرنگی بر حسب آزمایشات صحرایی تست نفوذ بکر

Becker penetration test (BPT) :

- Useful in gravels
- Number of blows required to drive the casing 300 mm in the gravel
- Very little data linking BPT directly to filed liquefaction events
- Becker blow counts are to equivalent SPT blow counts
- Use SPT chart to find CRR



Correlation between SPT and BPT blow counts in sand (modified from Harder and Seed in 1986)

37

تعیین پتانسیل روانگرایی

Comparison of field tests :

Feature	Test Type			
	SPT	CPT	V_s	BPT
Number of test measurements at liquefaction sites	Abundant	Abundant	Limited	Sparse
Type of stress-strain behavior influencing test	Partially drained – large strain	Drained – large strain	Small strain	Partially drained – large strain
Quality control & repeatability	Poor to good	Very good	Good	Poor
Detection of variability of soil deposit	Good	Very good	Fair	Fair
Soil types in which test is recommended	Non-gravel	Non-gravel	All	Primarily gravel
Test provides sample of soil	Yes	No	No	No

Comparisons of advantages and disadvantages of various field tests for assessment of liquefaction resistance (from NCEER, 1997)

38

تعیین پتانسیل روانگرایی

Comparison of field tests :

- The SPT- and the CPT-based liquefaction assessment charts are the preferred means of evaluating liquefaction potential .
- They are the most reliable because they are supported by the largest databases on the occurrence of liquefaction .
- The SPT test provides soil samples for identification of soil type and many empirical design procedures are based on the SPT, N .
- The CPT provides the best picture of soil stratification and is the most reliable penetration test. Many design procedures are also based on CPT data .
- If the CPT is run with a seismic cone, the shear wave velocities can be measured at the same time. The shear moduli can be readily obtained from the velocity data and can be used as input into dynamic and static analyses.
- The BPT is the most uncertain of the tools for evaluating liquefaction potential but its use may be in gravels

39

پایدار نمودن خاکهای مستعد روانگرایی

- یکی از راههای پایدار نمودن خاکهای مستعد آبگونگی استفاده از زهکشهای شنی یا خرده سنگی می باشد. هدف از تعبیه زهکشهای شنی یا خرده سنگی زایل نمودن اضافه فشار آب حفره ای می باشد که به علت بارهای تناوبی در نهشته ای ماسه ای به وجود می آید.
- اصول طراحی زهکشهای شنی و خرده سنگی توسط سید، و بوکر بسط داده شده است.
- استفاده از پی های عمیق و نیمه عمیق (شمع)
- تقویت خاک
- تعویض خاک

40

$$CSR = \frac{\tau_{ave}}{\sigma'_{v0}} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} r_d$$

CSR = Cyclic stress ratio,

a_{max} = Peak ground surface acceleration,

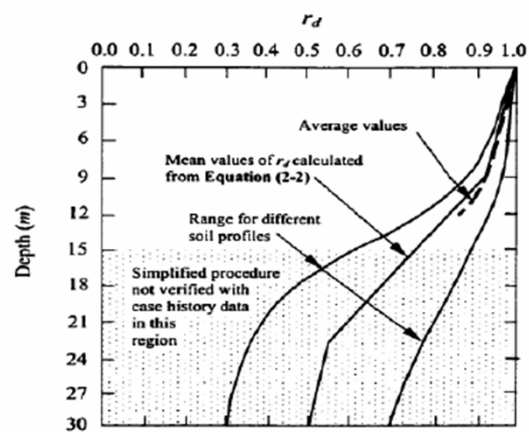
g = Acceleration of gravity,

σ'_{v0} = Effective vertical stress,

σ_{v0} = Total vertical stress, and

r_d = Stress reduction factor

41



$$r_d = 1.0 - 0.00765z \text{ for } z \leq 9.15\text{m}$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267z \text{ for } 9.15\text{m} < z \leq 23\text{m}$$

$$r_d = 0.744 - 0.008z \text{ for } 23\text{m} < z \leq 30\text{m}$$

$$r_d = 0.5 \text{ for } z > 30\text{m}$$

41

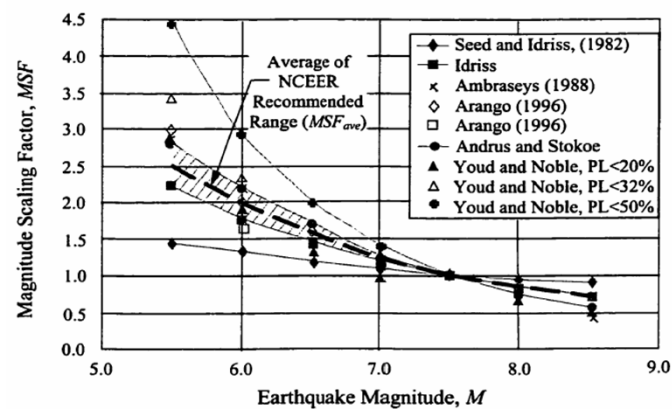
Figure 4.1 r_d versus Depth Curves (NCEER 1997)

$$MSF_{ave} = \begin{cases} \left(\frac{MSF_{Andrus-Stokoe} + MSF_{Idriss}}{2} \right) & \text{for } M \leq 7.5 \\ MSF_{Idriss} & \text{for } M \geq 7.5 \end{cases}$$

$$MSF_{Andrus-Stokoe} = \left[\frac{M}{7.5} \right]^{-3.3}$$

$$MSF_{Idriss} = \frac{10^{2.24}}{M^{2.56}}$$

43



44

45

$$\text{If } q_{c1N} < 50 \quad CRR_{7.5} = 0.833[(q_{c1N})_{cs}/1000] + 0.05$$

$$\text{If } 50 \leq q_{c1N} < 160 \quad CRR_{7.5} = 93[(q_{c1N})_{cs}/1000]^3 + 0.08$$

$$q_{c1N} = C_q (q_c / p_a)$$

$$C_q = (p_a / \sigma'_{v0})^n$$

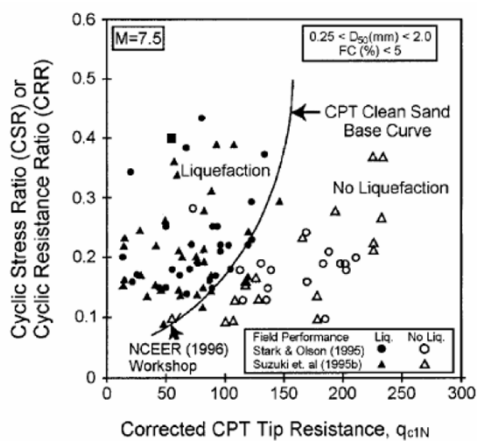
p_a = 1 atm of pressure in the same unit used for σ'_{v0} ,

n = exponent that varies with soil type, and

q_c = field cone penetration resistance measured at the tip.

The value of the exponent, n , varies from 0.5 to 1.0 depending on the grain characteristics of the soil (NCEER 1997).

46



$$(q_{clN})_{cs} = K_c q_{clN}$$

$$\text{For } I_c \leq 1.64 \quad K_c = 1.0$$

$$\text{For } I_c > 1.64 \quad K_c = -0.403I_c^4 + 5.58I_c^3 - 21.63I_c^2 + 33.75I_c - 17.88$$

$$I_c = [(3.47 - \log Q)^2 + (1.22 + \log F)^2]^{0.5}$$

$$Q = [(q_c - \sigma_{vo}) / p_a] [(p_a / \sigma'_{vo})^n]$$

$$F = [f_s / (q_c - \sigma_{vo})] \times 100\%$$

where f_s is the sleeve resistance of the CPT (The units are the same as those in which q_c and σ_{vo} are expressed).

4

The detailed calculation procedure of the I_c index for different soil types is given in Youd et al. (2001).

48