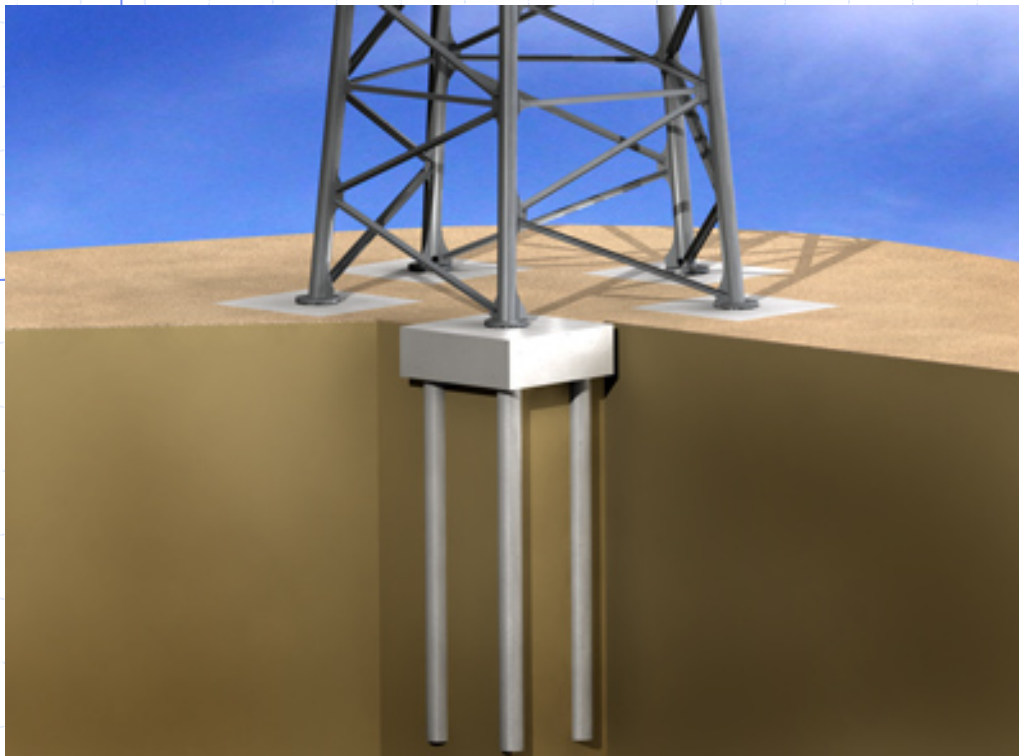


תסבולת כלונסאות בחיכוך במסות סלע סדוקות



מגיש ויינשטיין איליה
בהנחיית פרופ' יוסף חצור

תוכן הרצאה:

1. רקע

- שיטות לסיווג איכות מסת הסלע
מונחים כלליים בתחום של כלונסאות בסלע
שיטות תכנון כלונסאות בסלע

2. מטרות המחקר

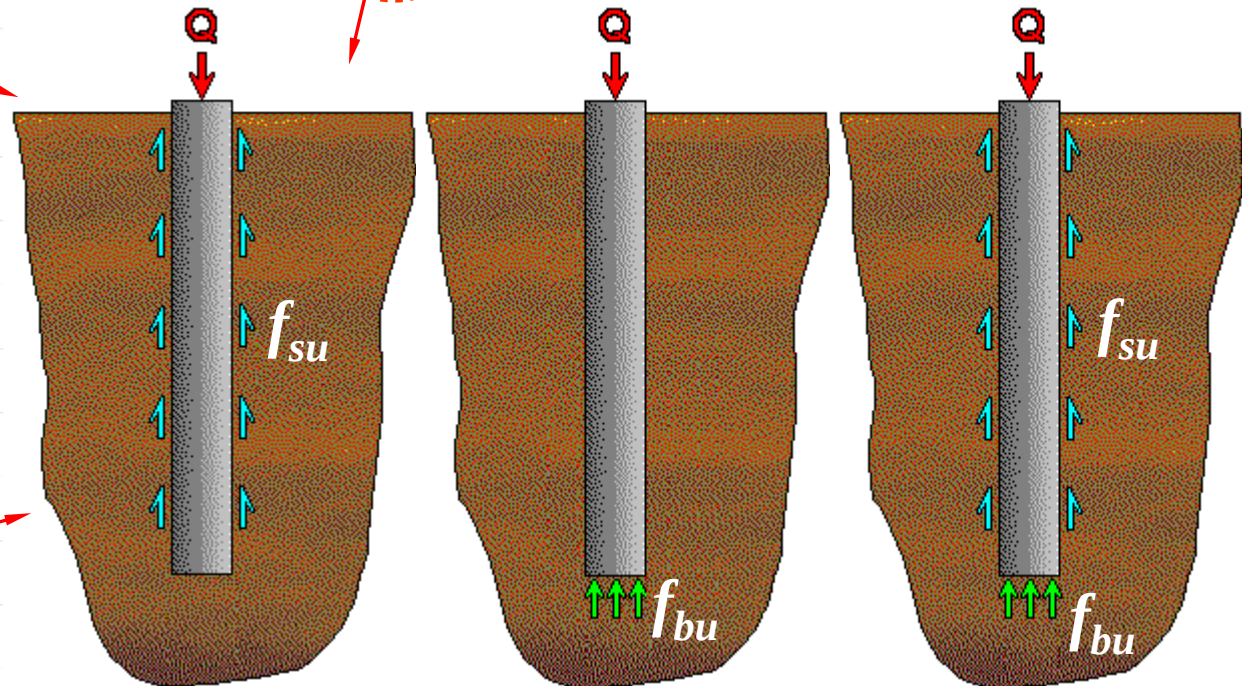
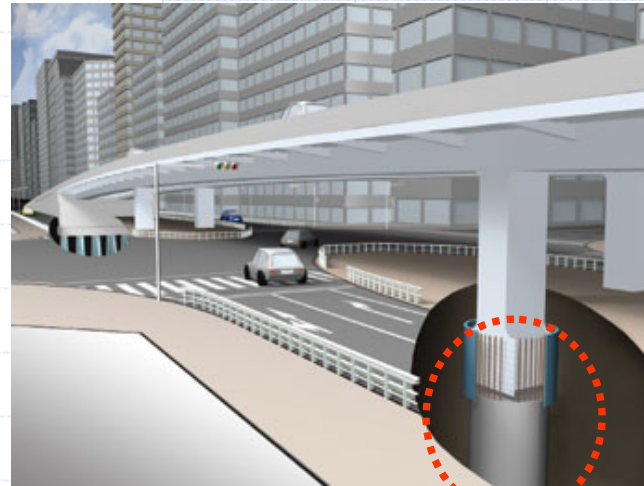
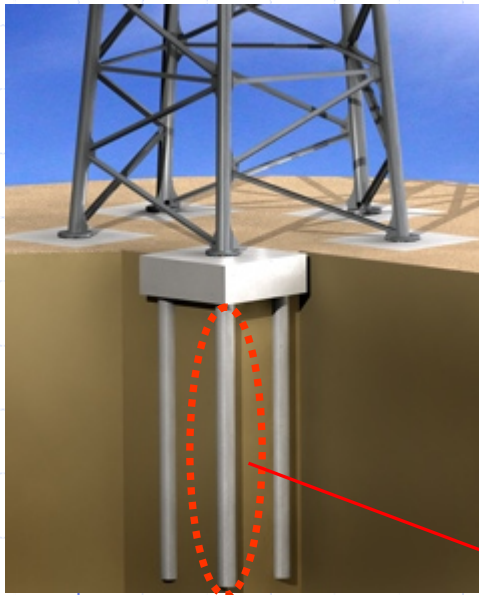
3. שיטות מחקר

- קטלוג ניסיונות העמסה בשטח וניתוח תוצאות ראשוני
בדיקות מעבדה, כולל ניסיונות העמסה מעבדתיים
שימוש בשיטות חישוביות DDA, ROCKET

4. סיכום ומסקנות

מושגי יסוד

כלונס הוא סוג של יסוד בנית,
שתפקידו לקבע את המבנה
לקרקע או לסלע.



כלונס חיכוך

כלונס קצה

כלונס חכוך + קצה

תסבולת הכלונס בחיכוך

$$Q_{ult.} = f_{su} \cdot A_s$$

מאמץ חיכוך ממוצע בכשל
שטח מעטפת

הערכת מאמץ חיכוך ממוצע בכשל

לחישוב מאמץ החיכוך בהרס יש לבצע בדיקות חוזק בלא כלוא⁽¹⁾ כמפורט בת"י 940
בחנאי רוויה על מדגמי סלע המאפיינים קטעי סלע רך שהתגלו בקידוח.
בטבלה 1 מפורטים ערכי מאמץ החיכוך בהרס, בתלות בחוזק בלא כלוא של סלעים שונים.

טבלה 1 - חוזק בלא כלוא ומאמץ החיכוך בהרס

חוזק בלא כלוא (מגפ"ס) σ_{ci}	מאמץ החיכוך בהרס (מגפ"ס) f_{su}
1.25	0.2
5.00	0.5
20.00	0.9
50.00	1.5
100.00	2.0
הערה: את ערכי הביניים מחשבים בביון לינארי	

?

304. מקדם הפחתה

מאמץ החיכוך בהרס (טבלה 1), יוקטן על ידי חכפלה במקדם הפחתה לקבלת מאמץ החיכוך המותר.

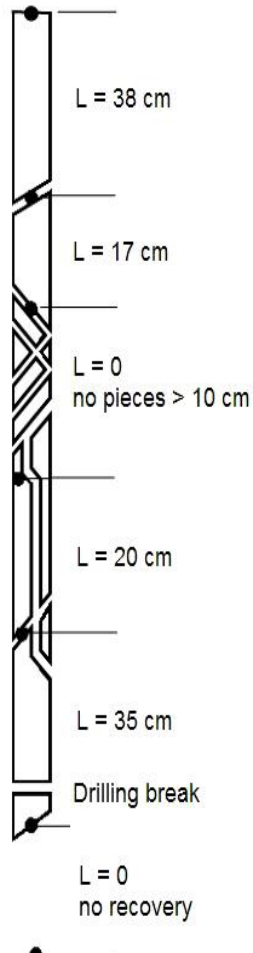
מקדם ההפחתה ייקבע על-ידי מהנדס הקרקע בהתחשב בגורמים שלהלן:

- 304.1 - אחידות הסלע.
- 304.2 - שיעור הסדקים והחללים, גודלם וסוג החומר הממלא אותם.
- 304.3 - רגישות המבנה לתנועות כלליות ותבדולות⁽¹⁾.
- 304.4 - מספר בדיקות חוזק הגזירה⁽¹⁾ שנערכו על המדגמים האומייניים.
- 304.5 - רום מפלט פני הקרקע הטבעית או רום המילוי מעל מפלט פני הסלע.
- 304.6 - האורך המצטבר של גושי סלע⁽¹⁾ היוצרים שטח מעטפת אפקטיבית. קטעי סלע קצרים מחצי מטר לא יובאו בחשבון כחלק משטח המעטפת האפקטיבית.
- 304.7 - דרגת החיספוס של שטחי הסלע בבור הקידוח.
- 304.8 - שינויי רטיבות צפויים והשפעתם על תכונות הסלע וחומר המילוי בסדקים וכן בקרקע טבעית ובמילוי שמעל למפלט הסלע.

שיטות לסיווג איכות מסת הסלע

RQD (Rock Quality Designation)

Deere, 1989



Total length of core run = 200 cms

$$RQD = \frac{\sum \text{Length of core pieces} > 10 \text{ cm length}}{\text{Total length of core run}} \times 100$$

$$RQD = \frac{38 + 17 + 20 + 35}{200} \times 100 = 55 \%$$

RMR (Rock Mass Rating)

Bieniawski, 1976

➤ חוזק לחיצה חד צירי של סלע רציף

➤ מרווח ממוצע בין הסדקים

➤ מצב הסדקים (כולל אורך, מפתח, חספוס, מילוי ובליה)

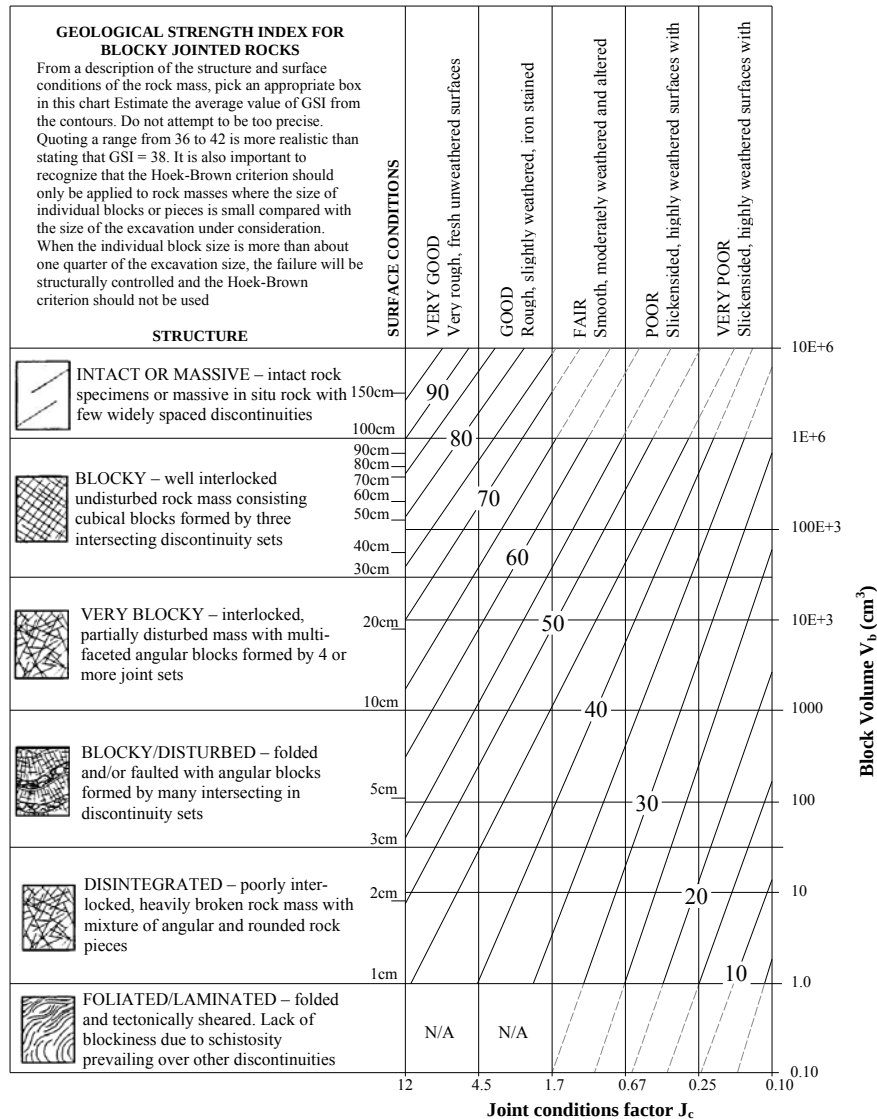
➤ מצב מי תהום

➤ נטיית הסדקים בהקשר לביסוס בסלע

שיטות לסיווג איכות מסת הסלע

GSI (Geological Strength Index)

Hoek et al., 1995

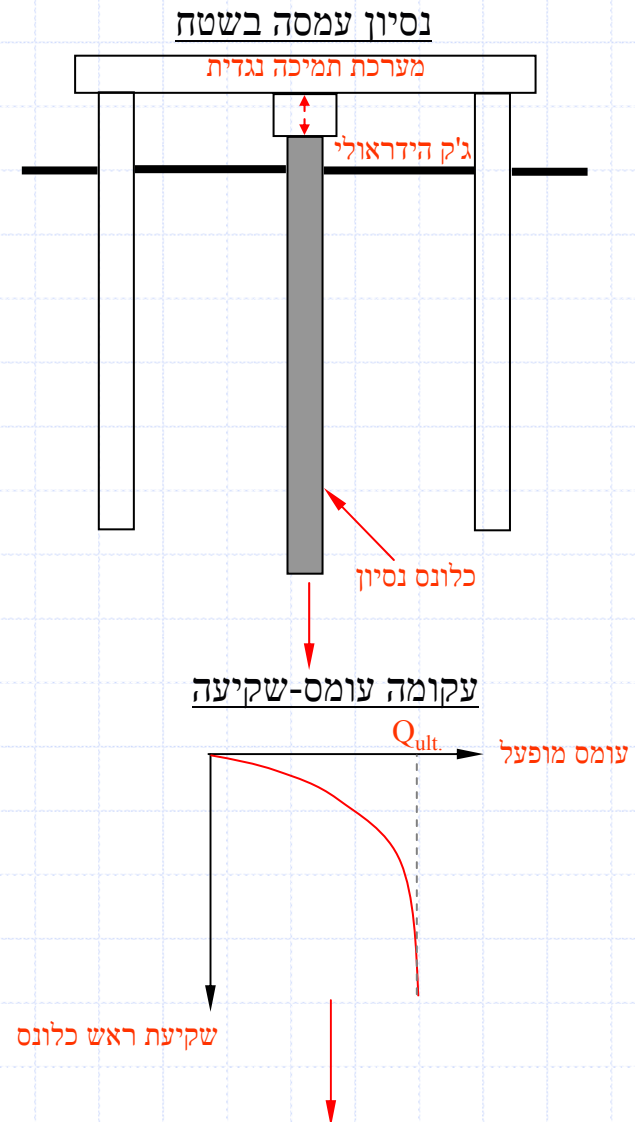


or

$$GSI = RMR_{76} \quad (\text{for } RMR_{76} > 18)$$

$$GSI = RMR_{89} - 5 \quad (\text{for } RMR_{89} > 23)$$

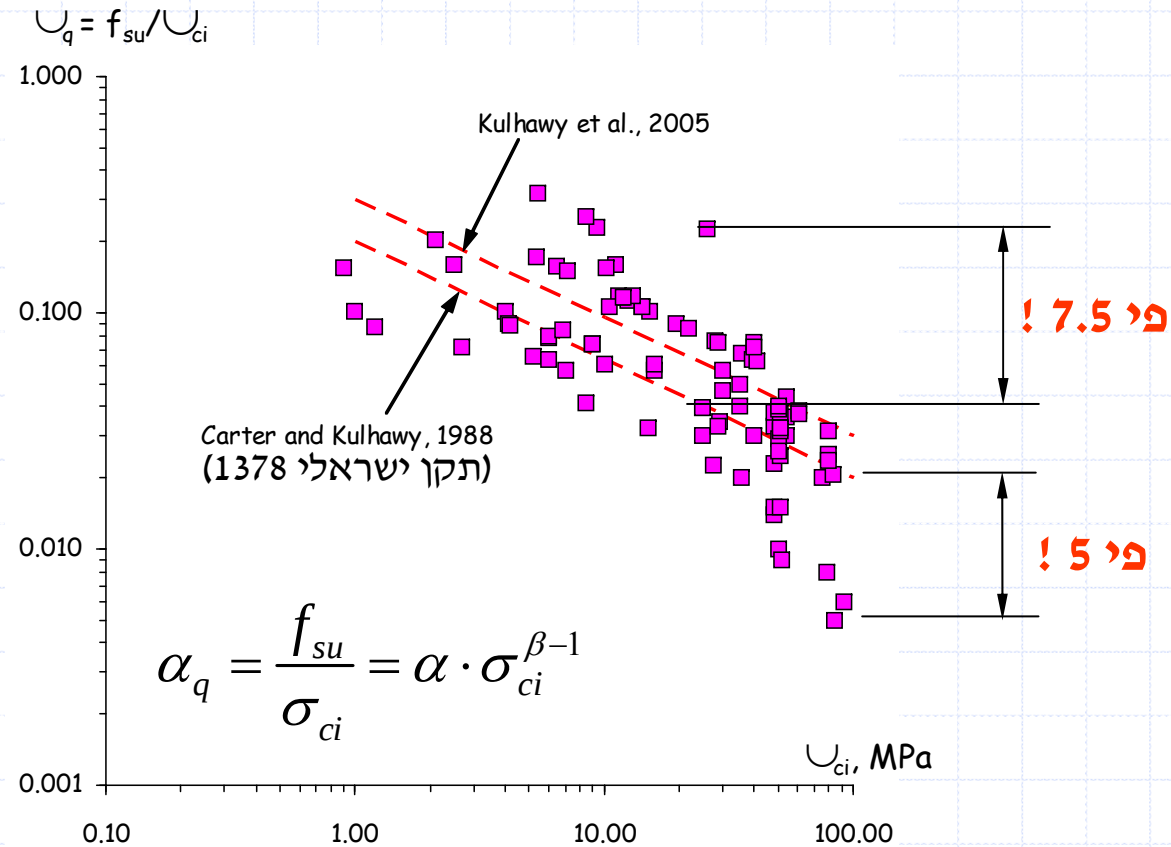
הערכת תסבולת כלונסאות בחיכוך באמצעות ניסיונות העמסה



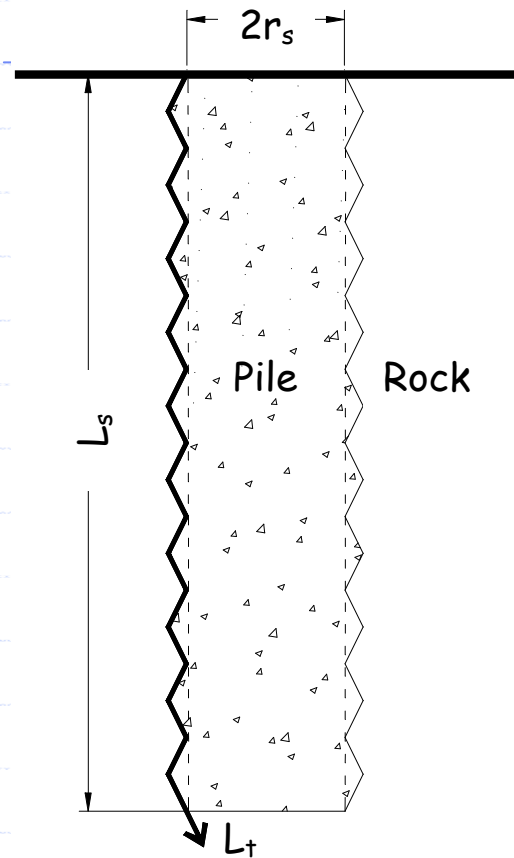
$$Q_{ult.} = f_{su} \cdot A_s \Rightarrow f_{su} = Q_{ult.} / A_s$$

בעיתיות בהערכת מאמץ חיכוך ממוצע בכשל

הקשר האמפירי



גורמים עיקריים שמשפיעים על תסבולת הכלונס בחיכוך



לפי מחקרים שפורסמו לאחרונה (Haberfield and)

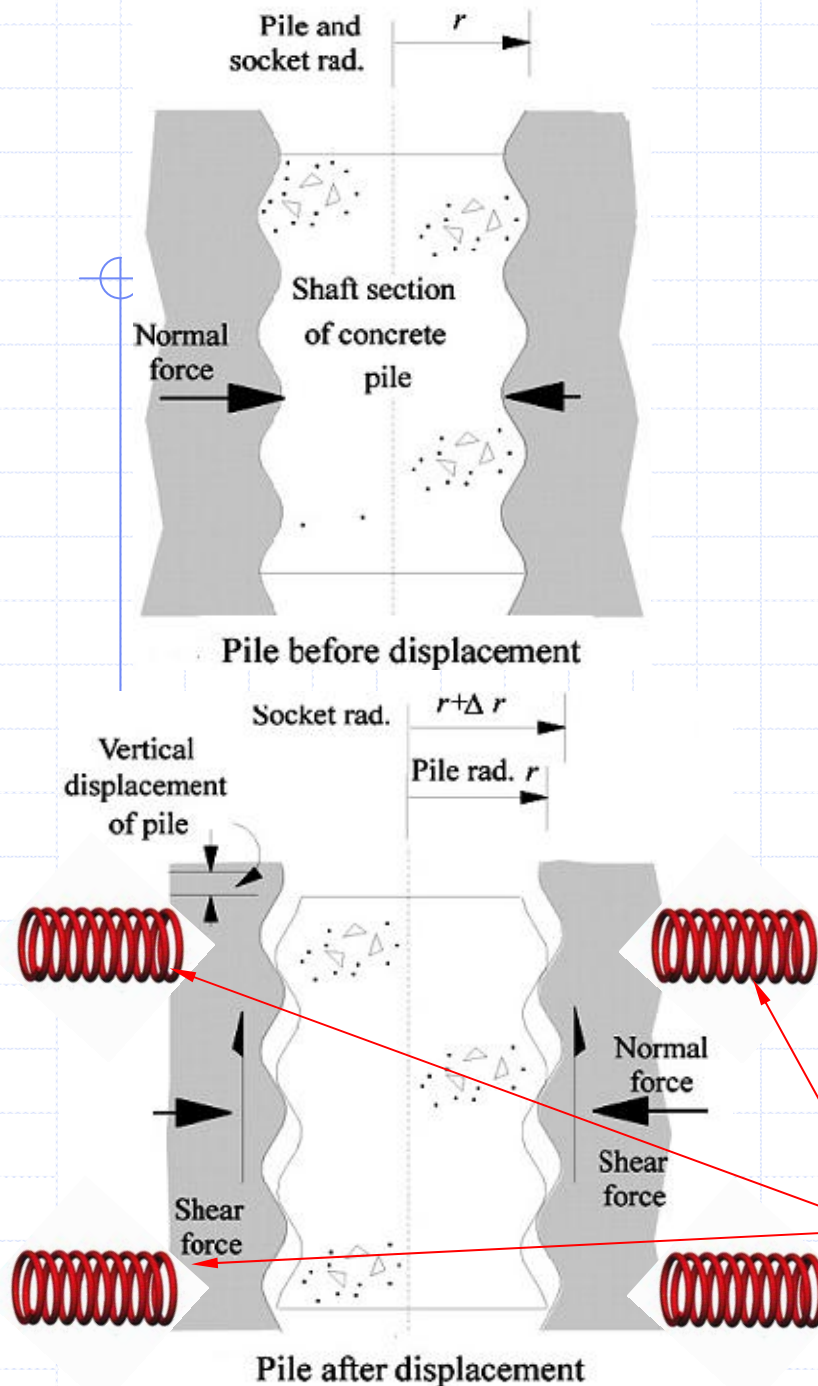
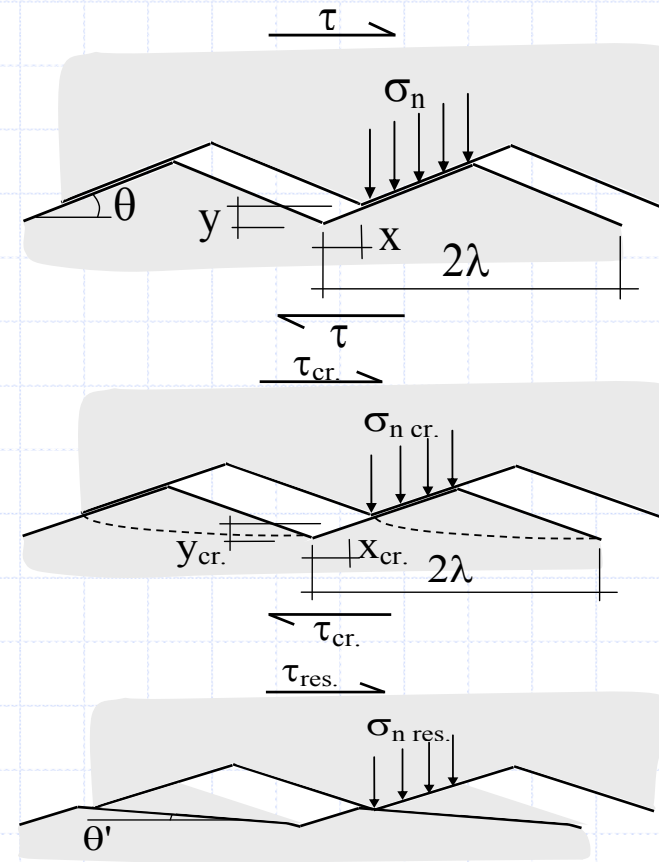
(Collingwood, 2006) הגורמים העיקריים המשפיעים על תיסבולת הכלונס בחיכוך הם :

1. חוזק מרבי ושיורי של החומר החלש בממשק כלונס-סלע
2. חספוס דפנות הקידוח
3. מאפיינים מכאניים וסטרוקטוראליים של מסת הסלע
4. קוטר הכלונס
5. שיטות ביצוע
6. מאמץ נורמאלי התחלתי על הממשק טרם תחילת ההעמסה

מודלים אנאליטיים

מודל מיקרו מכאני של מונש (Seidel, 1993):

שלבי גזירת הממשק



$$k_n = \sigma_n / \Delta r_s = E_m / [r_s (1 + \nu_m)]$$

מודל מיקרו מכני של מונש

תוכנת ROCKET

יתרונות:

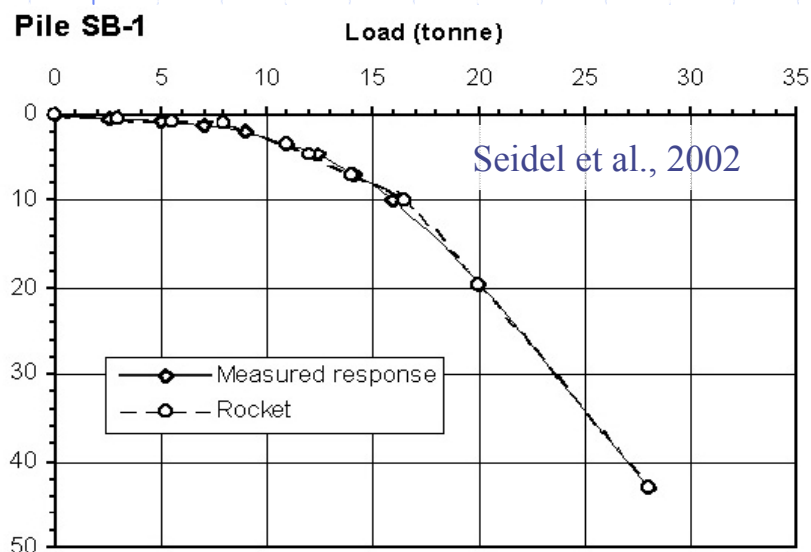
1. מתאר בצורה טובה את כל שלבי הגזירה של הממשק.
2. לוקח בחשבון את מרבית הגורמים שמשפיעים על תסבולת הממשק.
3. נבחן פעמים רבות מול ניסיונות מעבדה וניסיונות העמסה בשטח ונמצאה התאמה טובה בין חיזוי המודל להתנהגות המתקבלת.

חסרונות:

דיוק החיזוי רגיש מאוד ל:

1. הגדרת פרופיל החספוס.
2. הגדרת מודול אלסטיות של מסת הסלע.

מרבית התיקופים המוצגים בספרות התבצעו בתהליך איטרטיבי תוך חיפוש ערך אופטימלי של מודול אלסטיות של מסת הסלע !



תוכן הרצאה:

1. רקע

- שיטות לסיווג איכות מסת הסלע מונחים כלליים בתחום של כלונסאות בסלע שיטות תכנון כלונסאות בסלע

2. מטרות המחקר

3. שיטות מחקר

- קטלוג ניסיונות העמסה בשטח וניתוח תוצאות ראשוני בדיקות מעבדה, כולל ניסיונות העמסה מעבדתיים שימוש בשיטות חישוביות DDA, ROCKET

4. סיכום ומסקנות

מטרות המחקר

1. חקירה מקיפה של השפעת איכות מסת הסלע על תסבולת הכלונסאות בחיכוך.
2. בחינת שימוש בשיטה נומרית DDA לניתוח הבעיה.

תוכן הרצאה:

1. רקע

- שיטות לסיווג איכות מסת הסלע מונחים כלליים בתחום של כלונסאות בסלע שיטות תכנון כלונסאות בסלע

2. מטרות המחקר

3. שיטות מחקר

- קטלוג ניסיונות העמסה בשטח וניתוח תוצאות ראשוני בדיקות מעבדה, כולל ניסיונות העמסה מעבדתיים שימוש בשיטות חישוביות DDA, ROCKET

4. סיכום ומסקנות

שיטות המחקר

חקירת הנושא התבצעה בשלושה כיוונים נפרדים:

1. בניית קטלוג של ניסיונות העמסה בשטח, בהם ישנו

תיאור כלשהו של איכות מסת הסלע, וניתוחו.

2. ביצוע ניסיונות העמסה מעבדתיים.

3. ניתוח הבעיה באמצעות שיטות חישוביות שונות

(DDA, ROCKET).

תוכן הרצאה:

1. רקע

- שיטות לסיווג איכות מסת הסלע מונחים כלליים בתחום של כלונסאות בסלע שיטות תכנון כלונסאות בסלע

2. מטרות המחקר

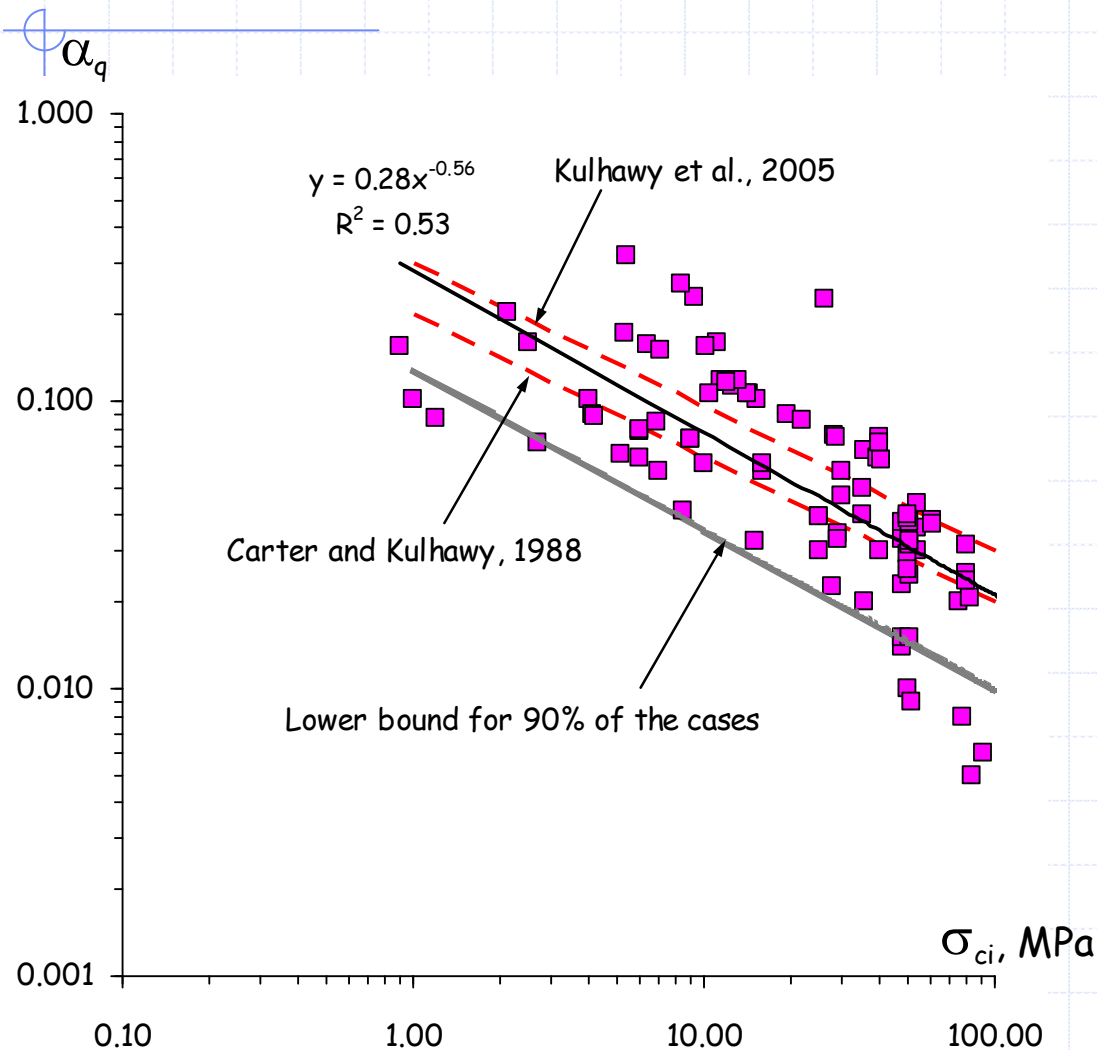
3. שיטות מחקר

- קטלוג ניסיונות העמסה בשטח וניתוח תוצאות ראשוני בדיקות מעבדה, כולל ניסיונות העמסה מעבדתיים שימוש בשיטות חישוביות DDA, ROCKET

4. סיכום ומסקנות

קטלוג ניסיונות העמסה בשטח

במסגרת המחקר נבנה קטלוג בינלאומי של ניסיונות העמסה, אשר כולל 92 תוצאות.



סטטיסטיקה:

• 92 תוצאות

• איכות מסת הסלע מוצגת בניסיונות העמסה

דרך: GSI, RMR, ROD ומודול אלסטיות של

מסת הסלע

• קוטר הכלונסאות נע בין 17 ס"מ ל-3 מטר.

• קוטר של מרבית הכלונסאות הינו סביב 1 מטר.

• אורך בסלע של מרבית הכלונסאות הוא בין 2

ל-4 מטר.

• כ-70% מערכי החיכוך בכשל הוערכו

באמצעות שיטות לא ישירות.

• תיסבולת הכלונס בחיכוך נעה בין 0.1 עד ל-3

מגפ"ס

• כמחצית מניסיונות העמסה בוצעו בסלעי

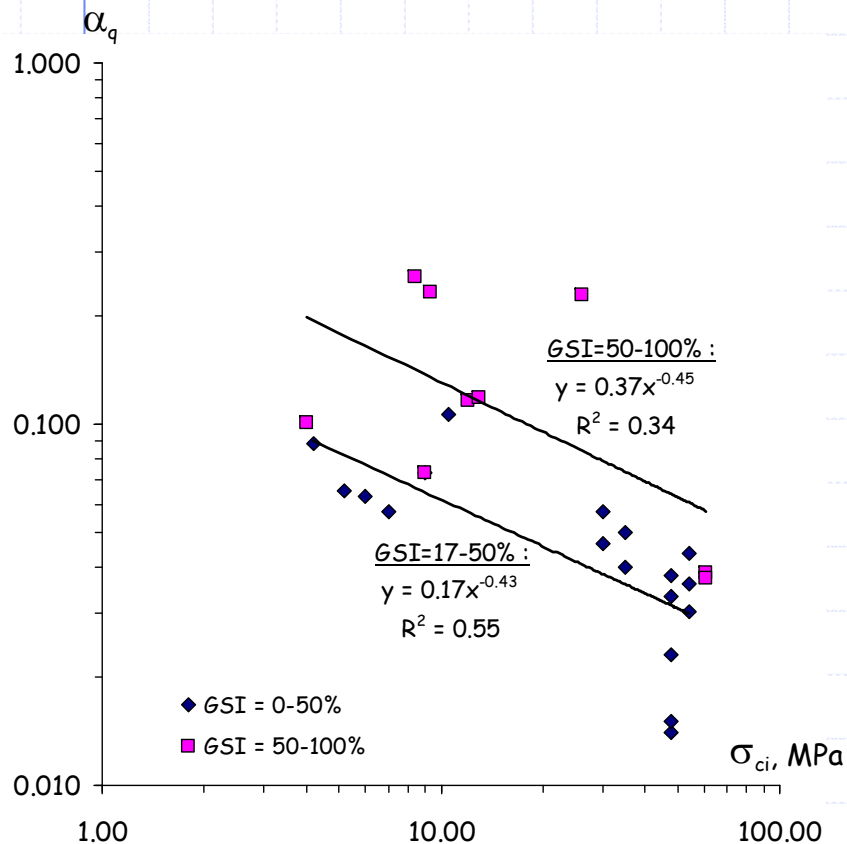
יסוד, כ-40% בסלעי משקע והשאר בסלעים

מטמורפיים.

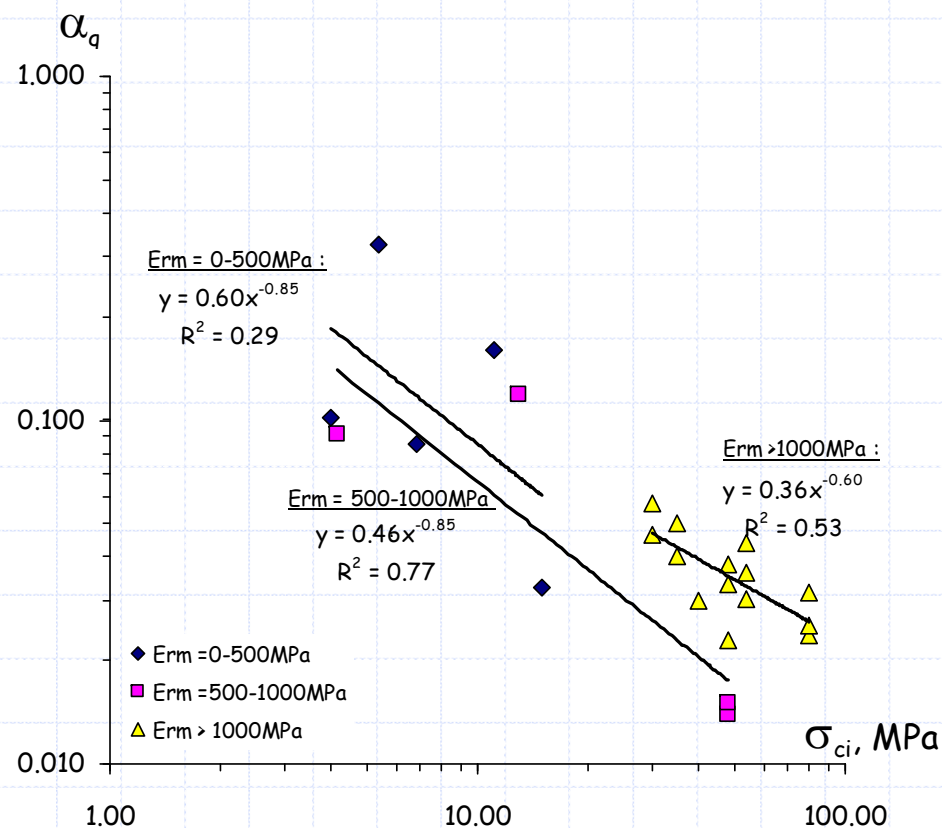
השפעת איכות מסת הסלע על תסבולת הכלונס בחיכוך



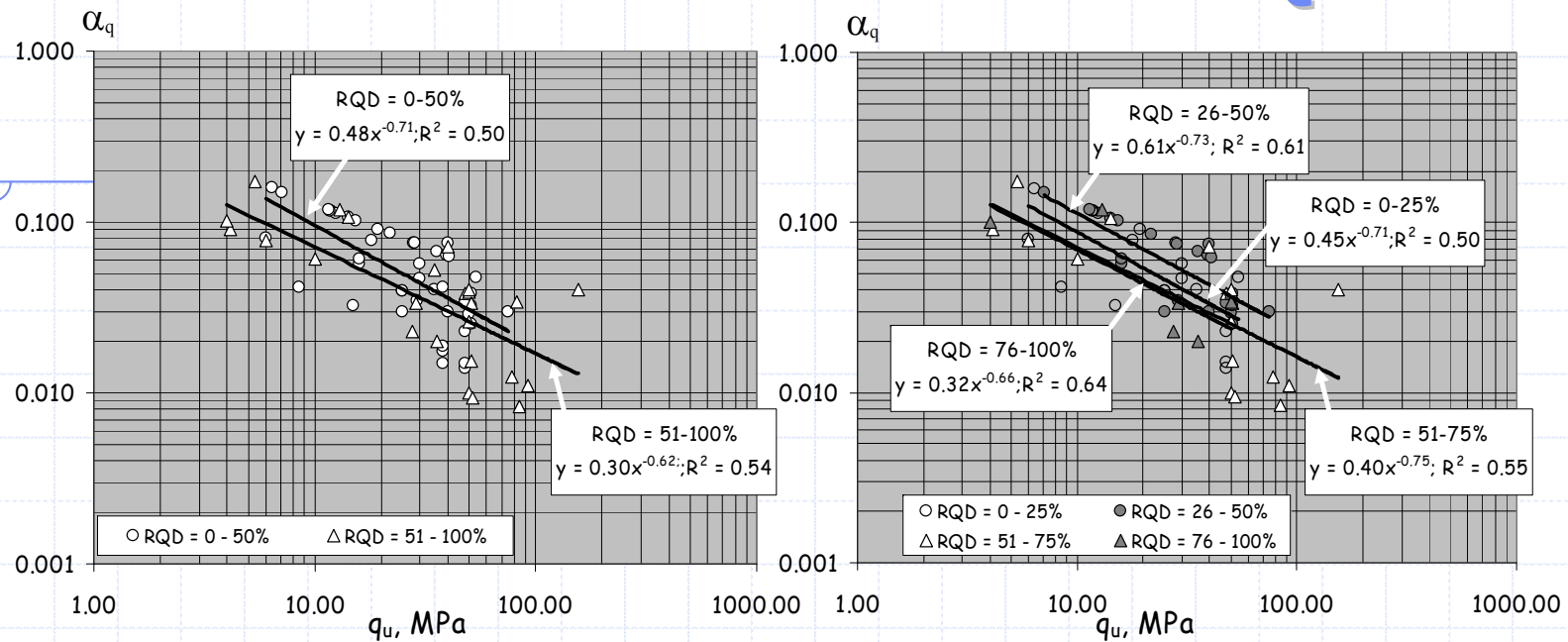
השפעת GSI



השפעת מודול אלסטיות של מסת הסלע



השפעת RQD



צפיפות הסדקים בין 10-100 סדקים\מטר (המתקבלת בערכי RQD נמוכים מ-50%) עלולה ליצור צורות שבירה מיוחדות, אשר יגדילו באופן משמעותי את חספוס דפנות הקידוח.



photo courtesy of Professor R. Finno

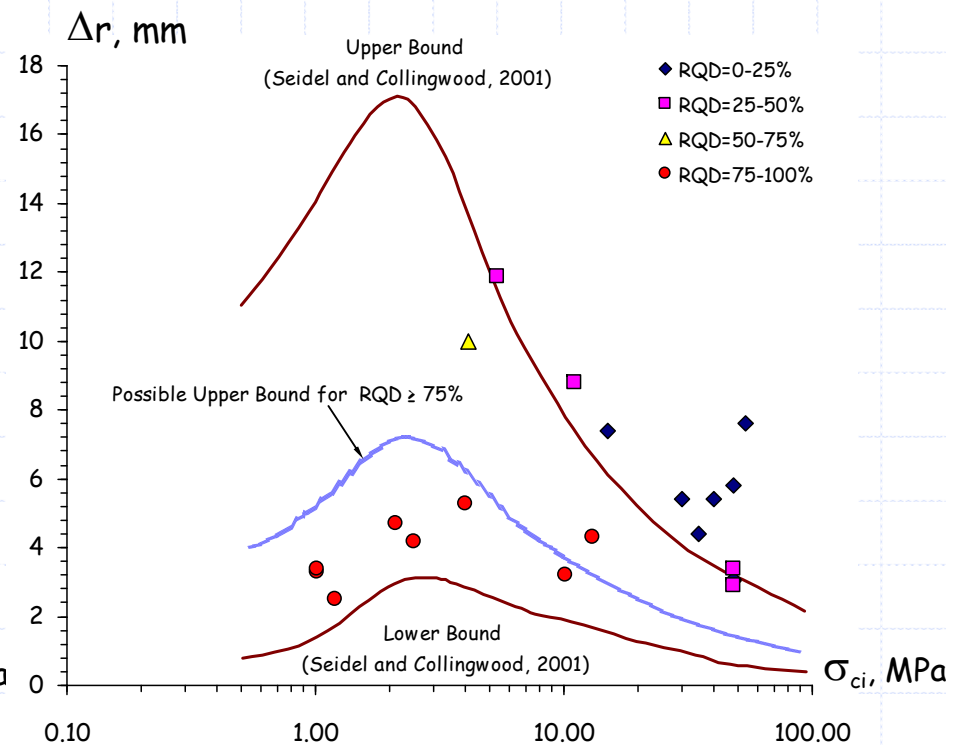
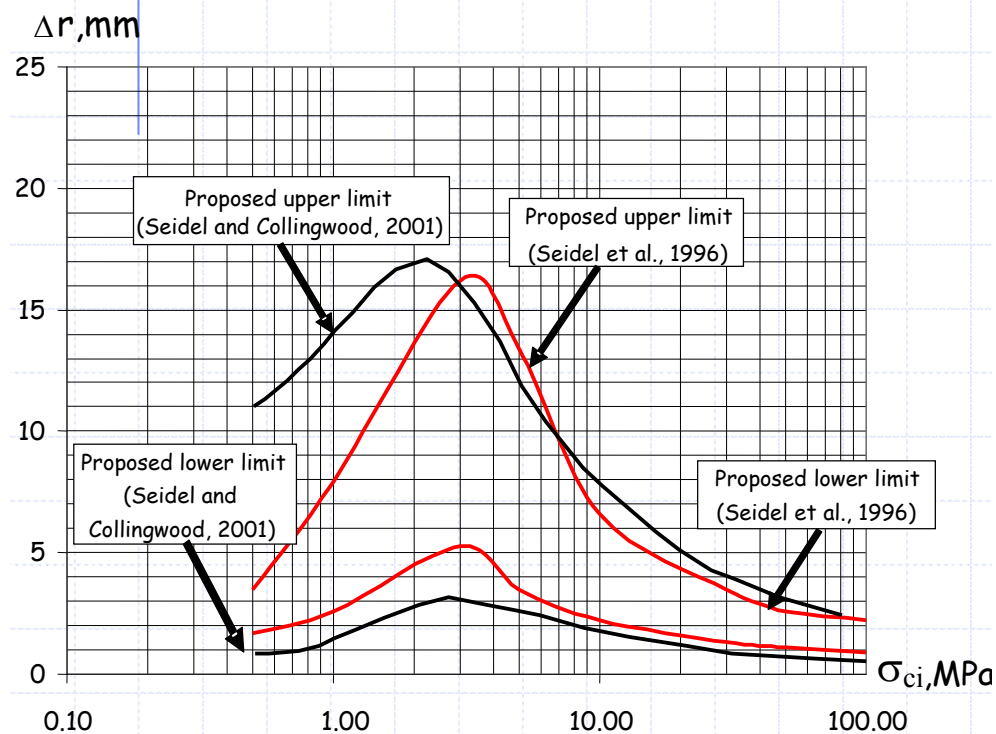
השפעת RQD

גורמים המשפיעים על חספוס הדפנות המתקבל הם :

1. ציפוף מישורי אי רציפות

2. שיטת הקידוח

3. קצב התקדמות הקידוח



תוכן הרצאה:

1. רקע

- שיטות לסיווג איכות מסת הסלע
מונחים כלליים בתחום של כלונסאות בסלע
שיטות תכנון כלונסאות בסלע

2. מטרות המחקר

3. שיטות מחקר

- קטלוג ניסיונות העמסה בשטח וניתוח תוצאות ראשוני
בדיקות מעבדה, כולל ניסיונות העמסה מעבדתיים
שימוש בשיטות חישוביות DDA, ROCKET

4. סיכום ומסקנות

ניסיונות מעבדה

החלק הניסיוני של מחקר זה התרכז ב:

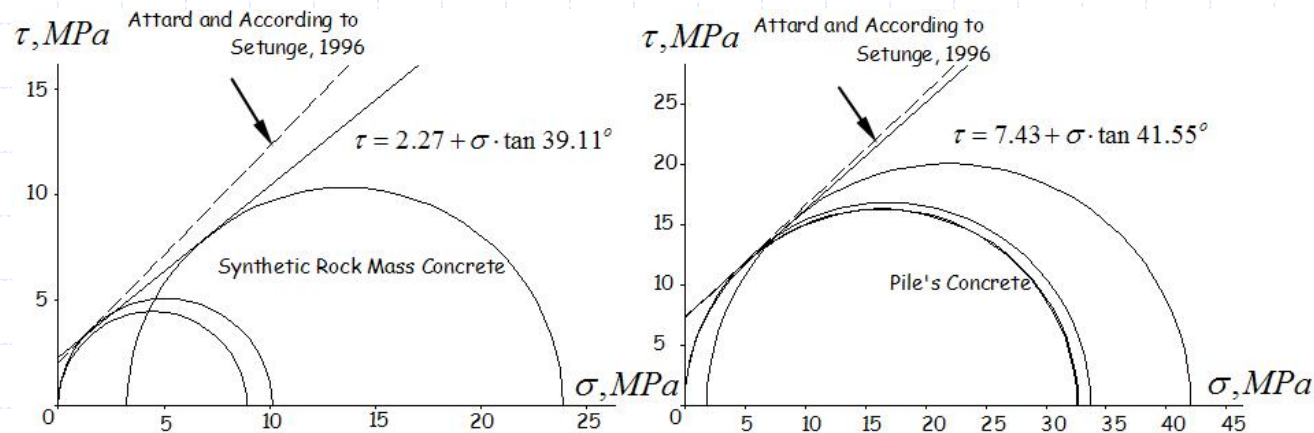
1. תכנון וביצוע ניסיונות העמסה מעבדתיים
2. אפיון של חומר רציף
3. אפיון של ממשקי מגע בטון-סלע תוך הכתבת תנאי גבול שונים

אפיון מכני של חומר רציף

אפיון מכני של חומר רציף בוצע במעבדה למכניקת הסלע על שם דייכמן ומעבדה לחומרי בניין (מחלקה להנדסת בניין) באוניברסיטת בן גוריון בנגב

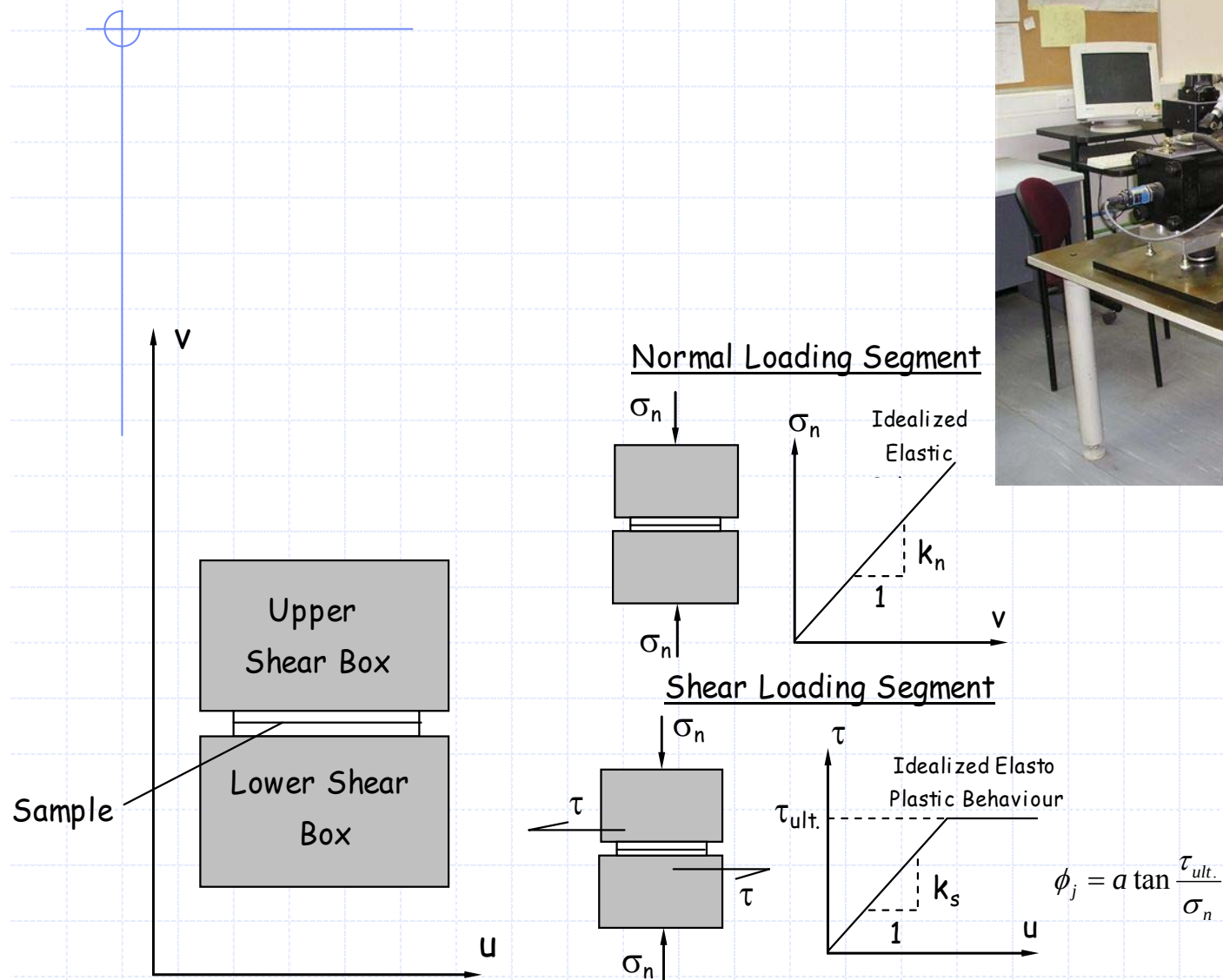
ν	E GPa	I_p MPa	σ_t MPa	σ_{ci} MPa	n %	ρ_{dry} gr/cm ³	
0.23	4.27 ± 0.23	0.79 ± 0.12	1.15 ± 0.13	9.6 ± 0.9 7.9 ± 1.4	---	1.98	בטון עבור סלע מלאכותי
0.22	15.62 ± 2.65	2.40 ± 0.28	3.46 ± 0.53	33.0 ± 0.6 35.7 ± 5.3	---	2.05	בטון עבור כלונסאות
0.17 ⁽²⁾	$7.5 \pm 0.9^{(2)}$	---	---	$27.6 \pm 5.3^{(2)}$	27-31% ⁽²⁾	1.90 ⁽²⁾	קרטון ע'רב
0.26 ⁽¹⁾	$48.0 \pm 16.8^{(1)}$	$3.1 \pm 1.6^{(1)}$	$8.1 \pm 3.3^{(1)}$	$132 \pm 80.6^{(1)}$	2-22% ⁽¹⁾	2.54 ⁽¹⁾	דולומיט עמינדב

(1) - Hatzor and Palchik, 1997; (2) - Tsesarsky, 2004 (תכונות החוזק והאלסטיות של קרטון ע'רב נמדדו במקביל למישורי השיכוב)

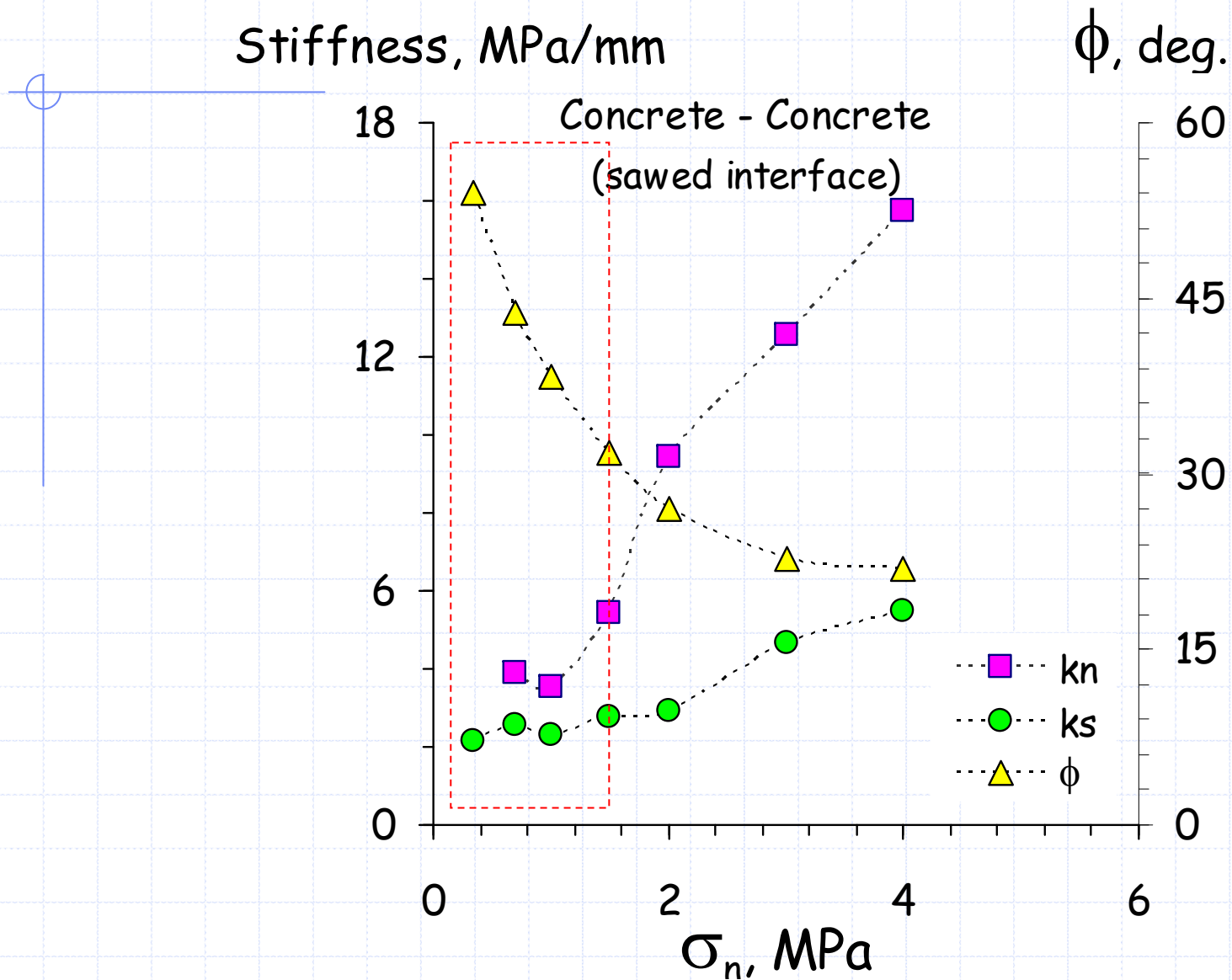


אפיון מכני של ממשקים

אפיון מכני של ממשקים בוצע במעבדה למכניקת הסלע על שם דייכמן באוניברסיטת בן גוריון בנגב

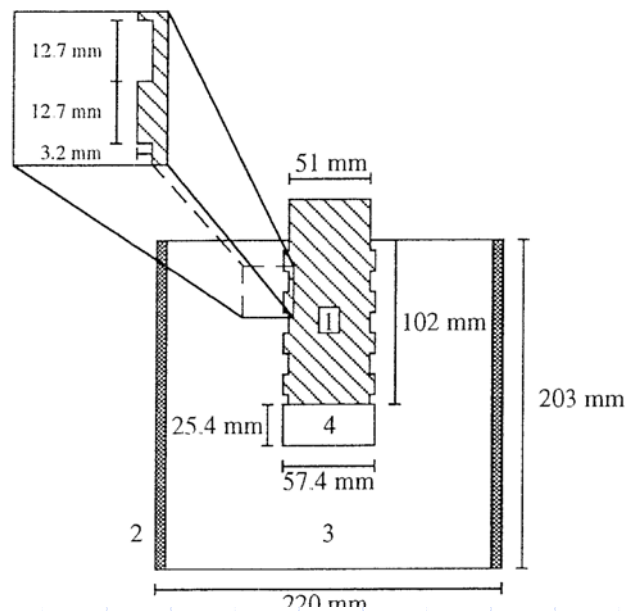
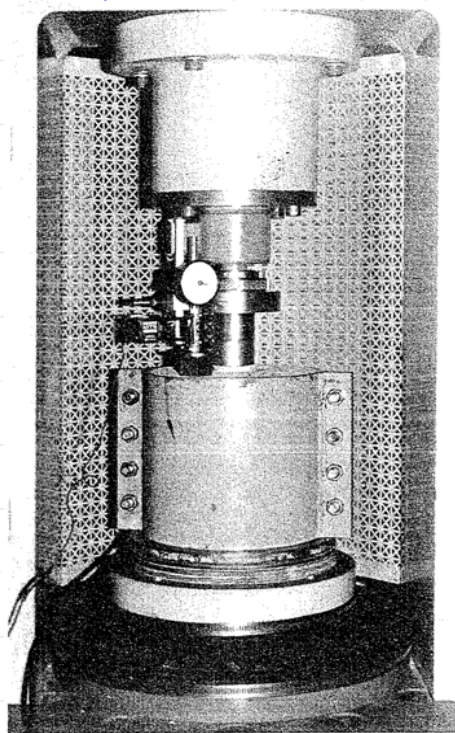


אפיון מכני של ממשקים – תוצאות



ניסיונות העמסה מעבדתיים – עבודות קודמות

Benmokrane et al., 1994



Wang et al., 2005



ניסיונות העמסה מעבדתיים

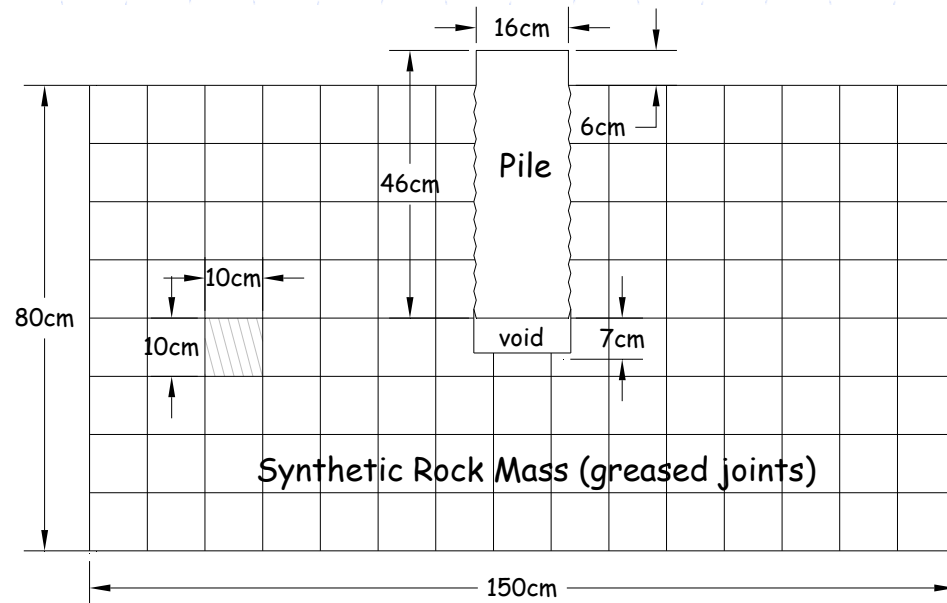
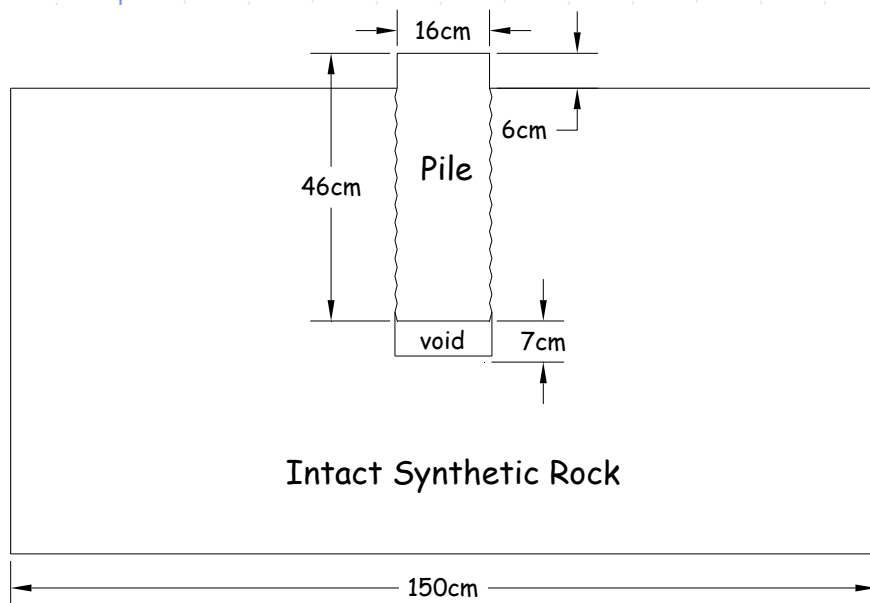
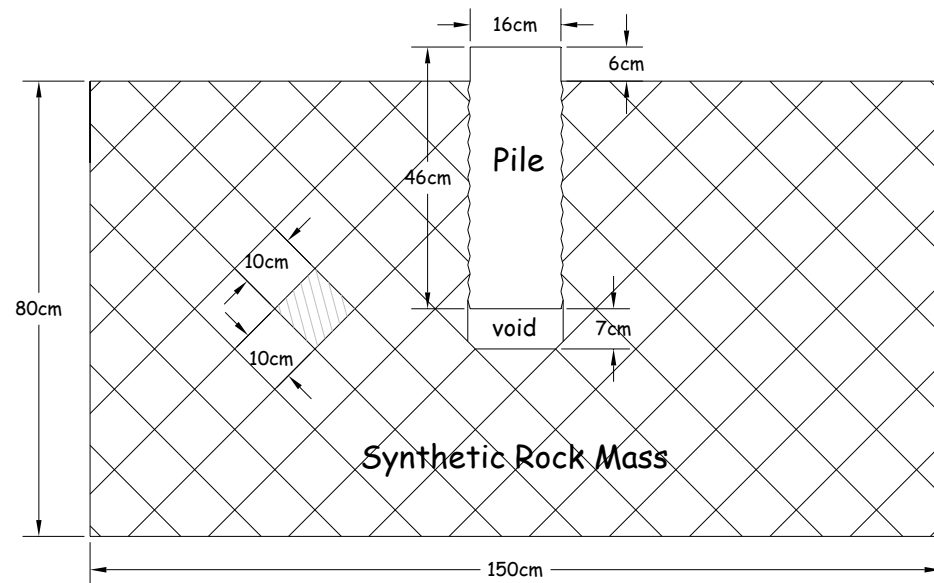
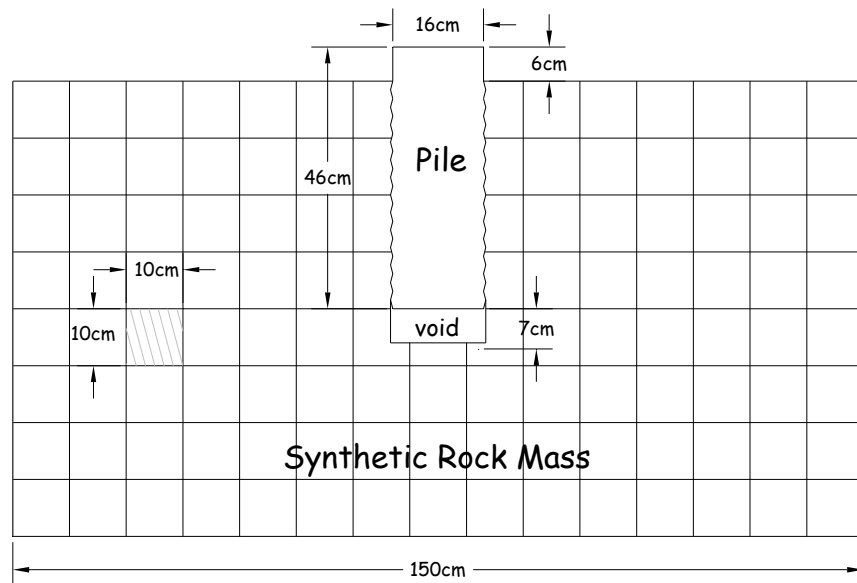
ניסיונות העמסה בוצעו במעבדה לחומרי בניין במחלקה להנדסת בניין באוניברסיטת בן

גוריון בנגב



מכשיר ללחיצה צירית

ניסיונות העמסה מעבדתיים



ניסיונות העמסה מעבדתיים

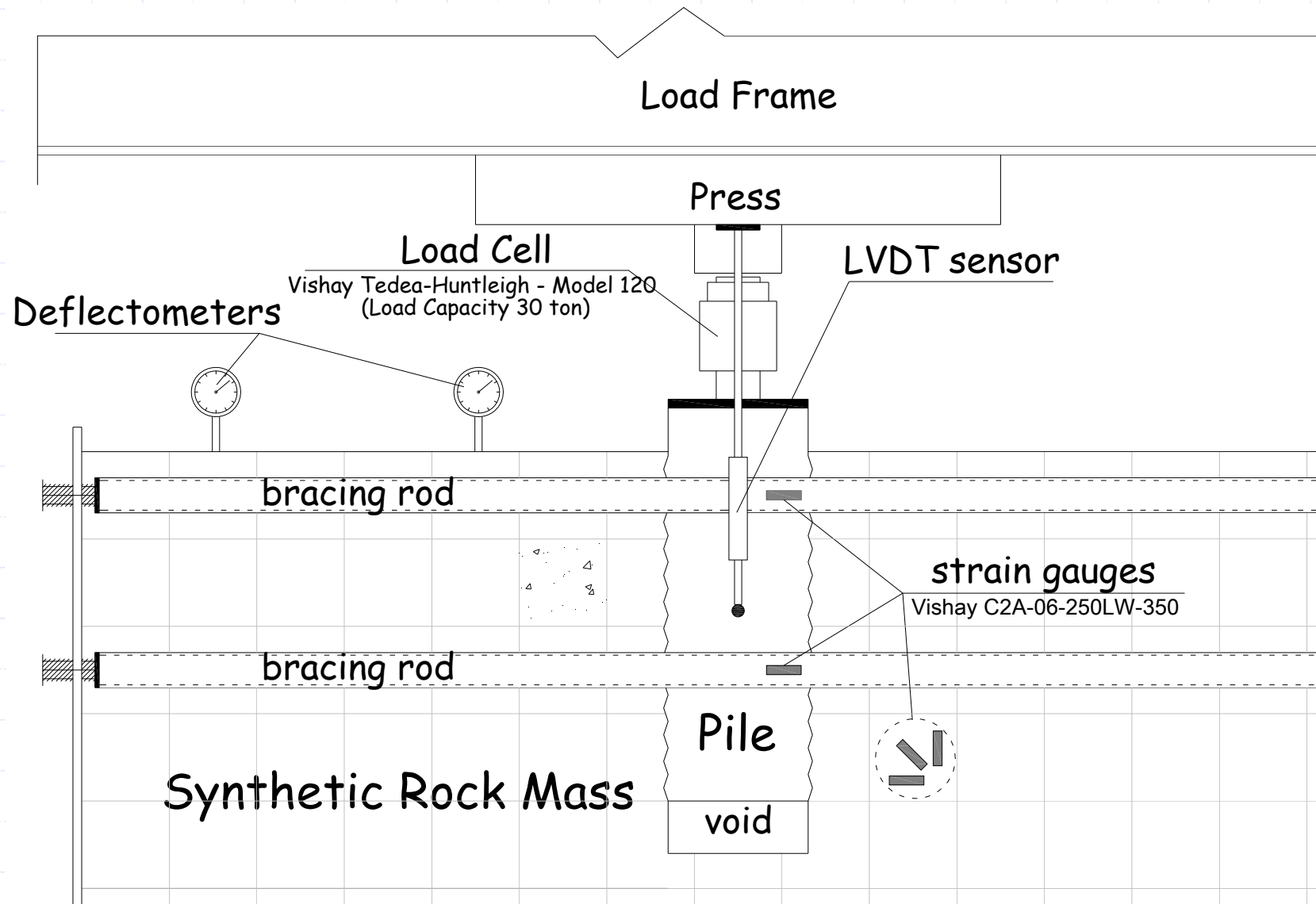
נסיון העמסה מעבדתי במסת סלע מלאכותית
בעלת נטיית $\pm 45^\circ$ ביחס לאופק



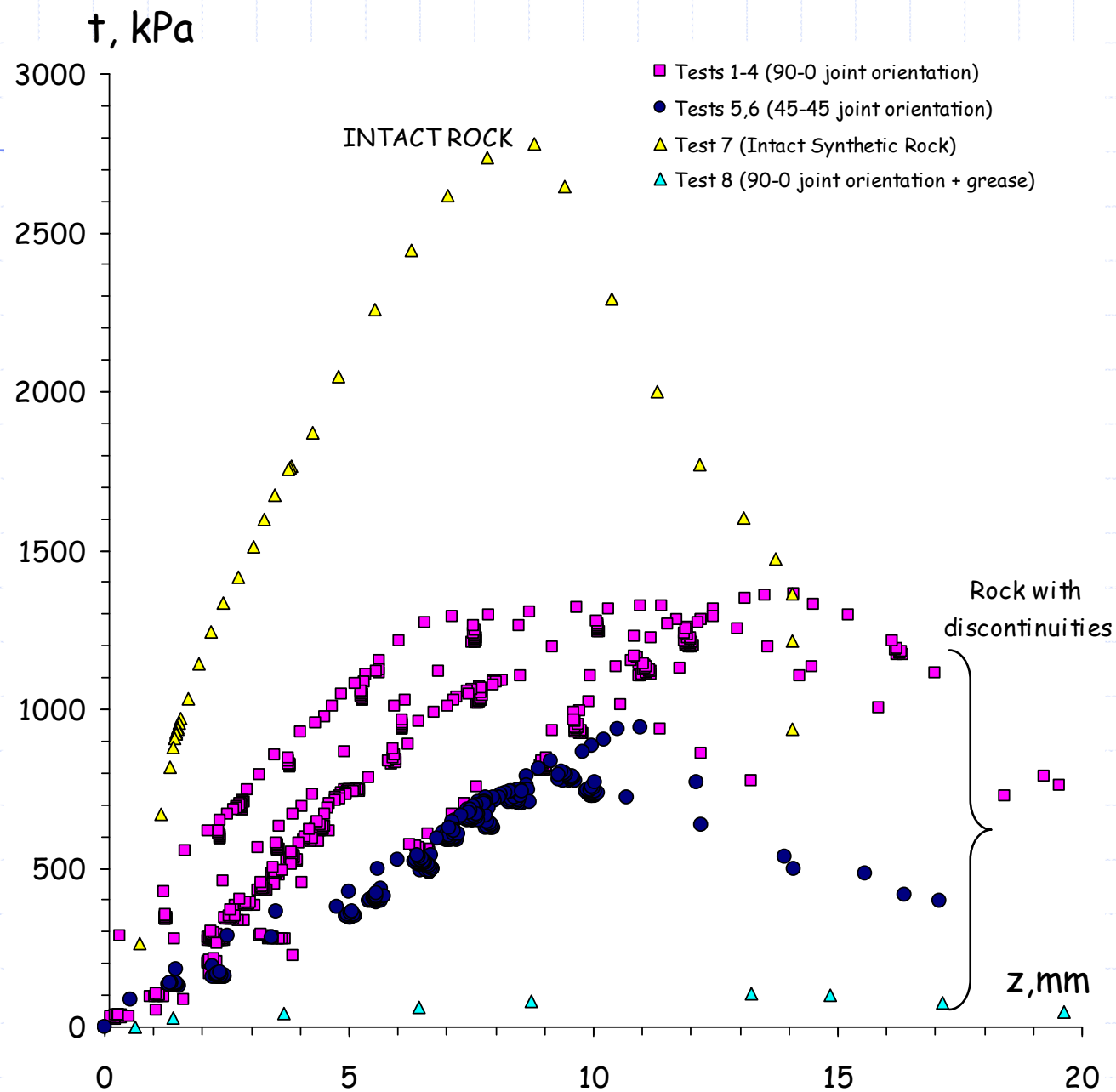
נסיון העמסה מעבדתי במסת סלע מלאכותית
בעלת נטיית מישורי סידוק אופקית אנכית



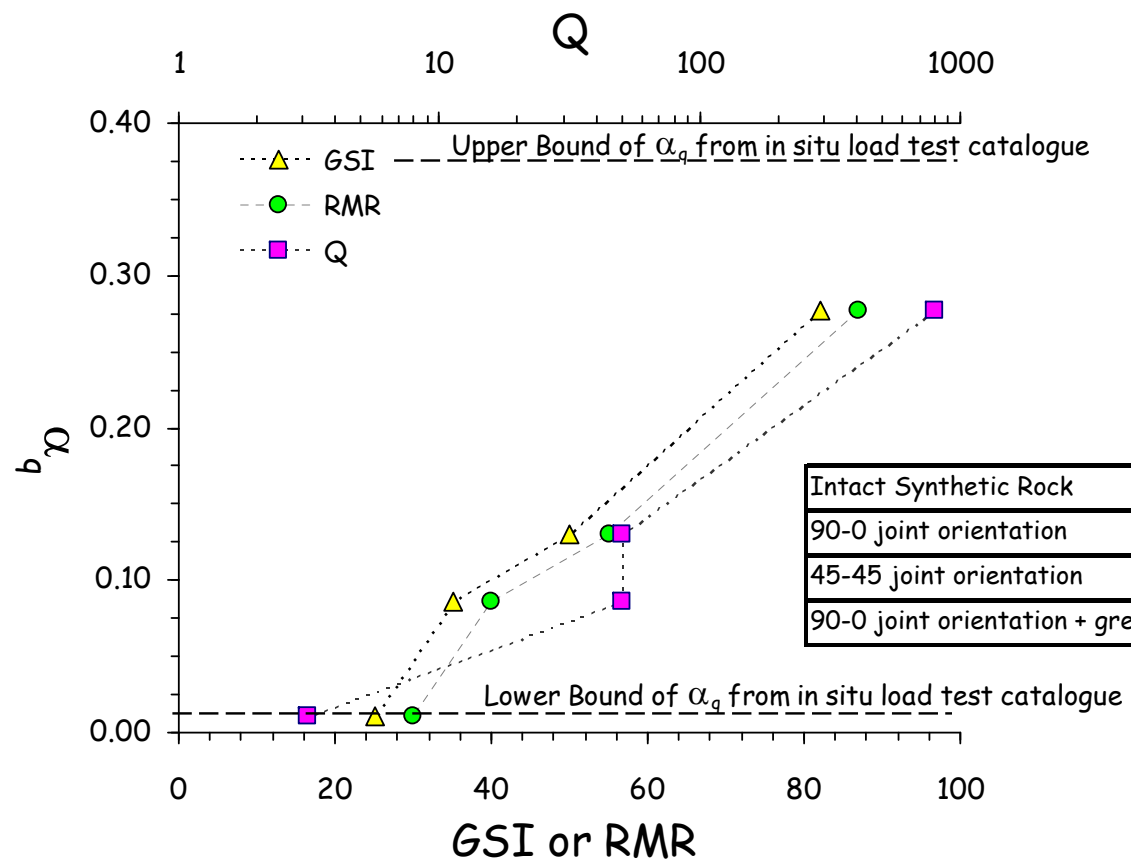
ניסיונות העמסה מעבדתיים – מערכת מדידה



ניסיונות העמסה מעבדתיים – תוצאות



ניסיונות העמסה מעבדתיים – תוצאות



תוכן הרצאה:

1. רקע

- שיטות לסיווג איכות מסת הסלע
מונחים כלליים בתחום של כלונסאות בסלע
שיטות תכנון כלונסאות בסלע

2. מטרות המחקר

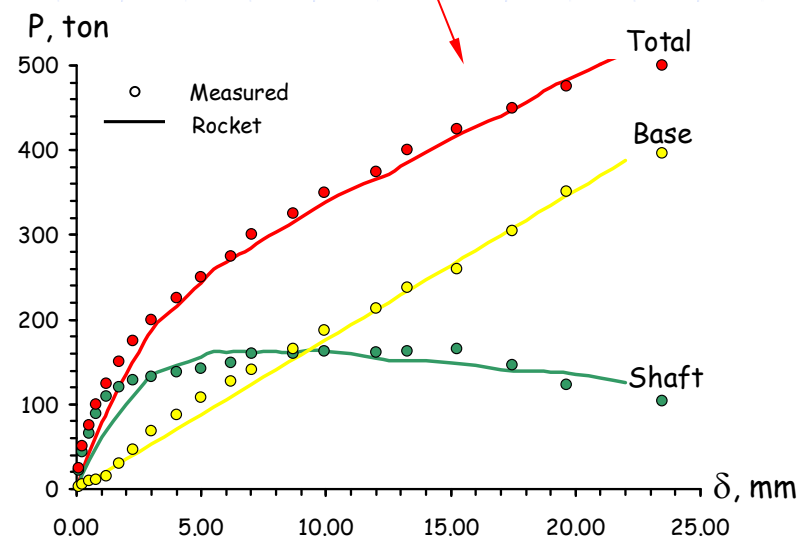
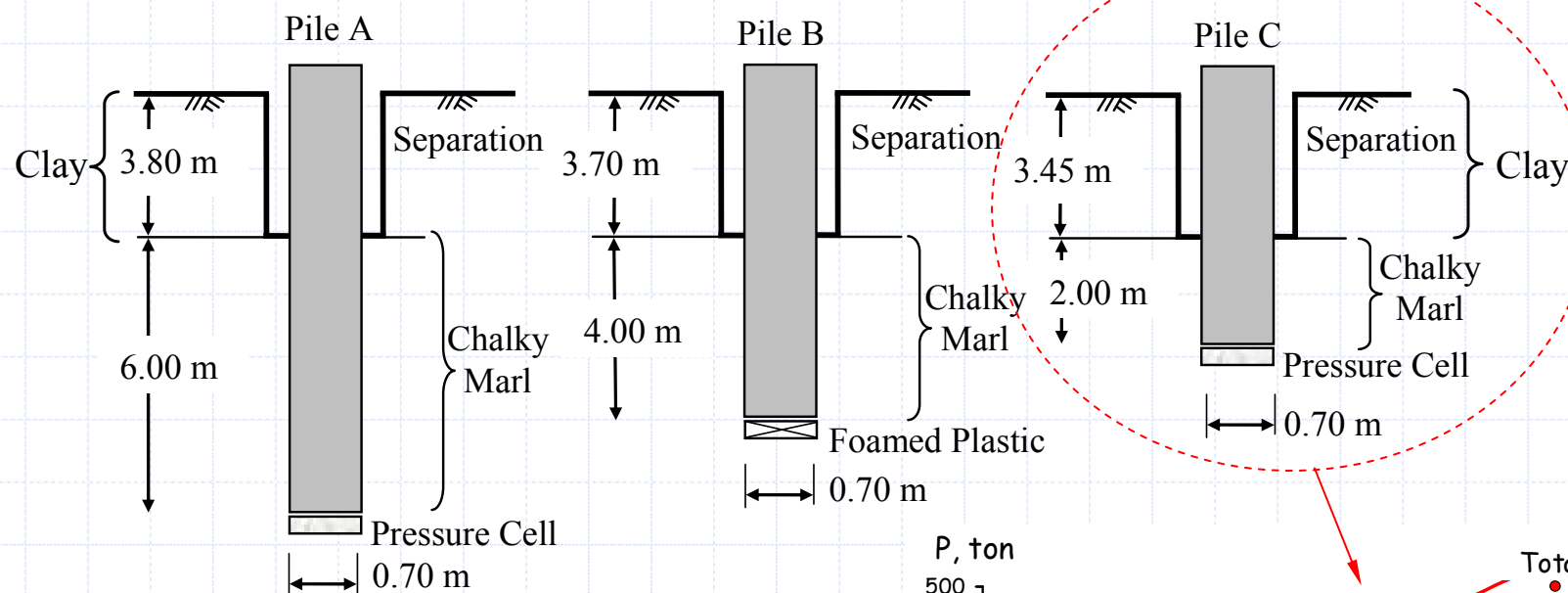
3. שיטות מחקר

- קטלוג ניסיונות העמסה בשטח וניתוח תוצאות ראשוני
בדיקות מעבדה, כולל ניסיונות העמסה מעבדתיים
שימוש בשיטות חישוביות **ROCKET**, **DDA**

4. סיכום ומסקנות

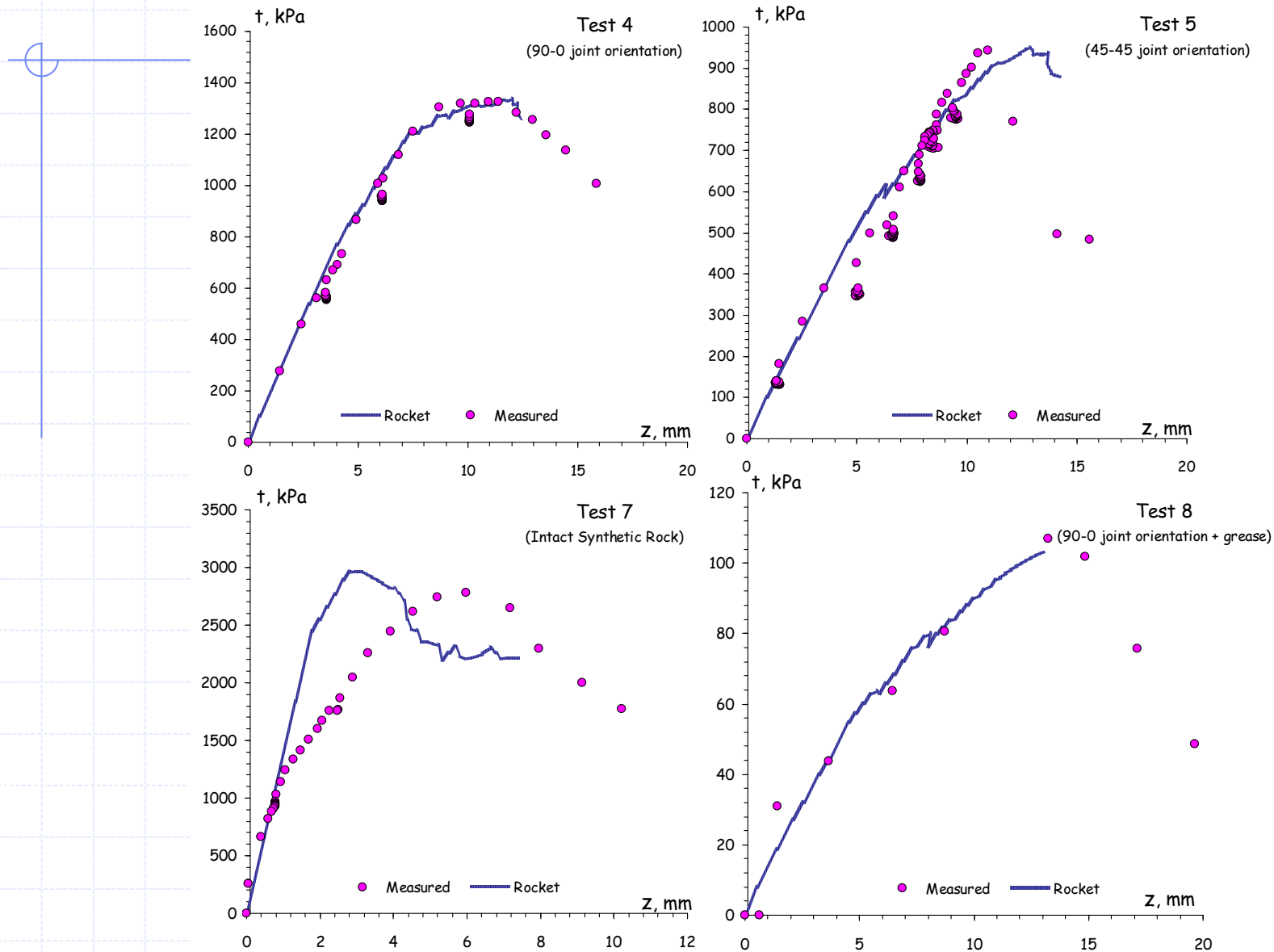
תיקוף של תוכנת ROCKET

תיקוף ניסיון העמסה בחוואר קרטוני (אתר גשר מעל נחל שורק בבית שמש)

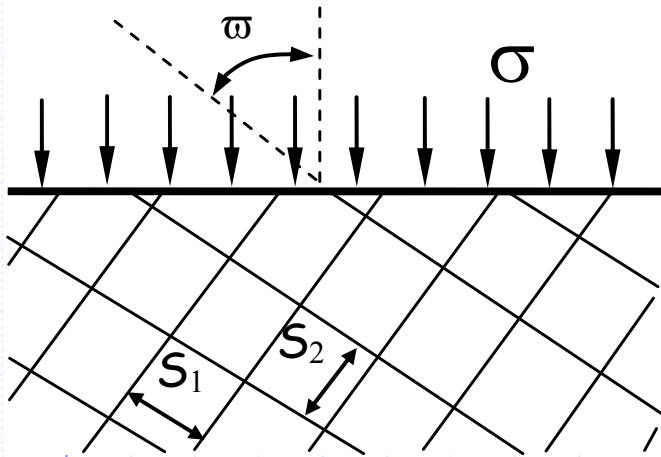


תיקוף של תוכנת ROCKET

תיקוף של ניסיונות העמסה מעבדתיים

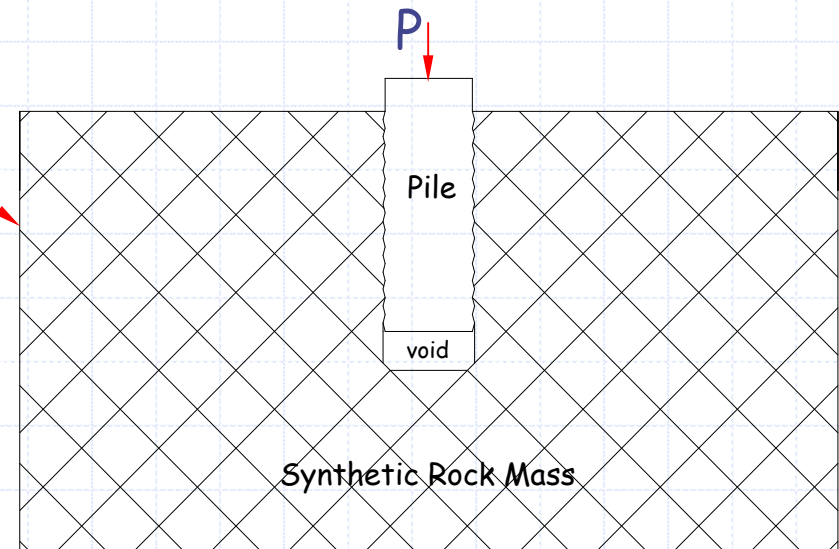
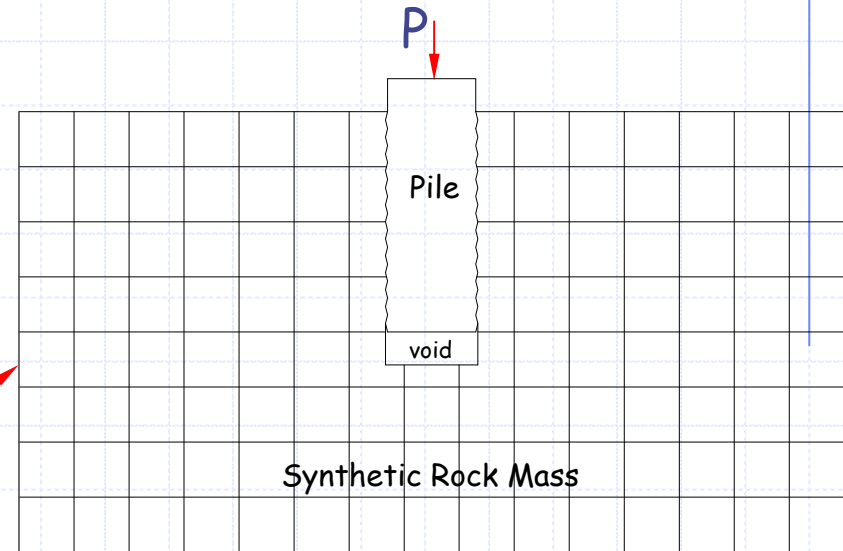


הערכת מודול אלסטיות של מסת הסלע



Wei and Hudson, 1986

$$\frac{1}{E_m} = \frac{1}{E_r} + \frac{\cos^4 \varpi}{k_{n1} \cdot s_1} + \frac{\cos^2 \varpi \cdot \sin^2 \varpi}{k_{s1} \cdot s_1} + \frac{\sin^4 \varpi}{k_{n2} \cdot s_2} + \frac{\cos^2 \varpi \cdot \sin^2 \varpi}{k_{s2} \cdot s_2}$$



תוכן הרצאה:

1. רקע

- שיטות לסיווג איכות מסת הסלע
מונחים כלליים בתחום של כלונסאות בסלע
שיטות תכנון כלונסאות בסלע

2. מטרות המחקר

3. שיטות מחקר

- קטלוג ניסיונות העמסה בשטח וניתוח תוצאות ראשוני
בדיקות מעבדה, כולל ניסיונות העמסה מעבדתיים
שימוש בשיטות חישוביות DDA, ROCKET

4. סיכום ומסקנות

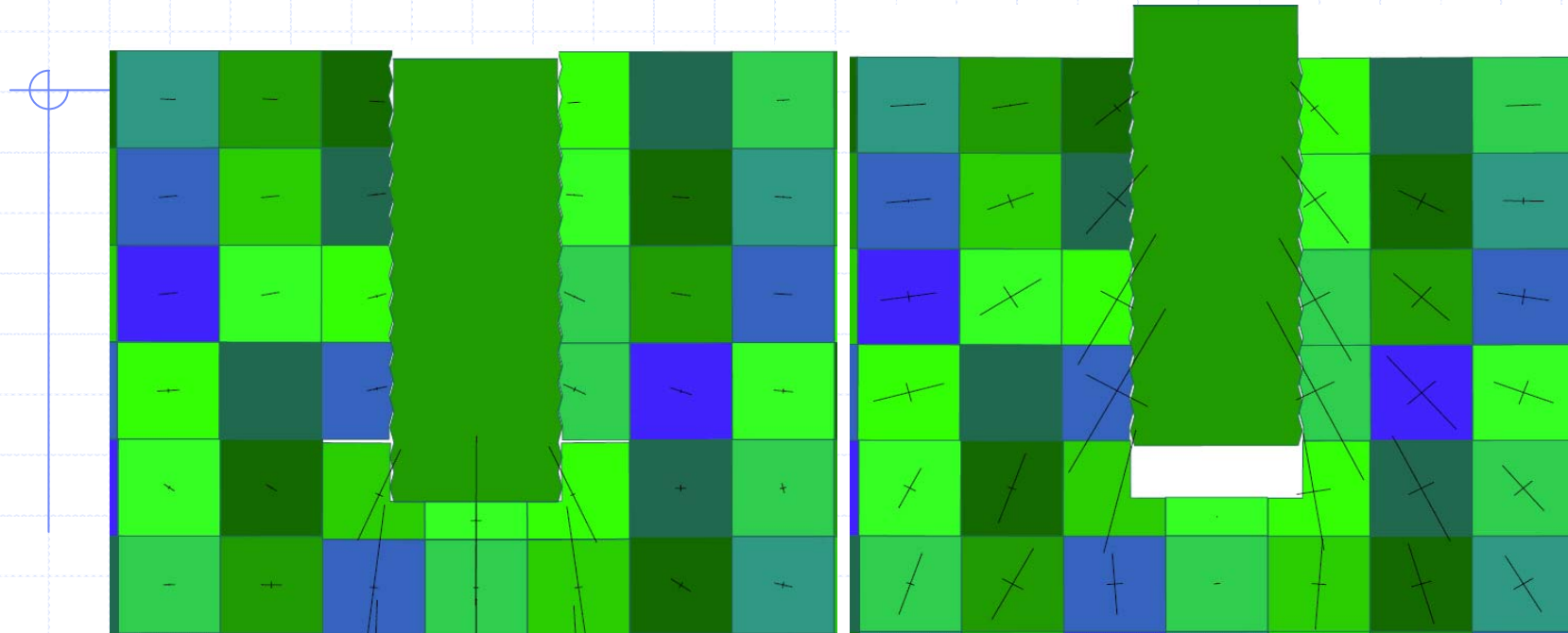
שיטת DDA

עקרונות:

1. שיטה נומרית ממשפחת שיטות האלמנט הבדיד - distinct element method
2. מבוססת על החוק השני של תרמודינמיקה – מינימיזציה של אנרגיה פוטנציאלית בכל פסיעת הזמן
3. אלמנטים נומריים הינם בלוקים בדידים, בעלות 6 דרגות חופש כל אחד
4. אין חדירה ואין מתיחה בגבולות בין הבלוקים
5. התנהגות הממשקים בהתאם לקריטריון כשל Coulomb-Mohr

תיקוף שיטת DDA

תיקוף של ניסיונות העמסה מעבדתיים

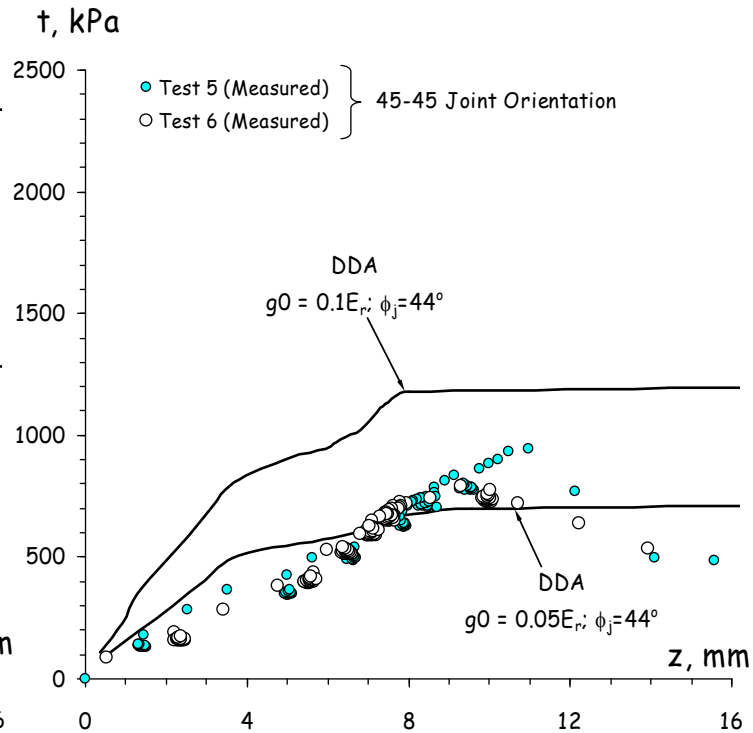
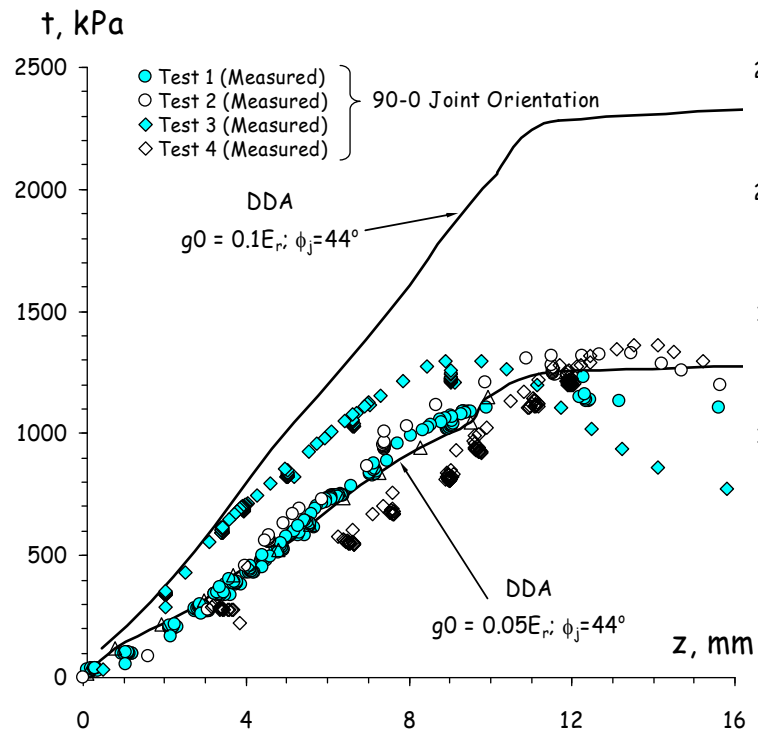
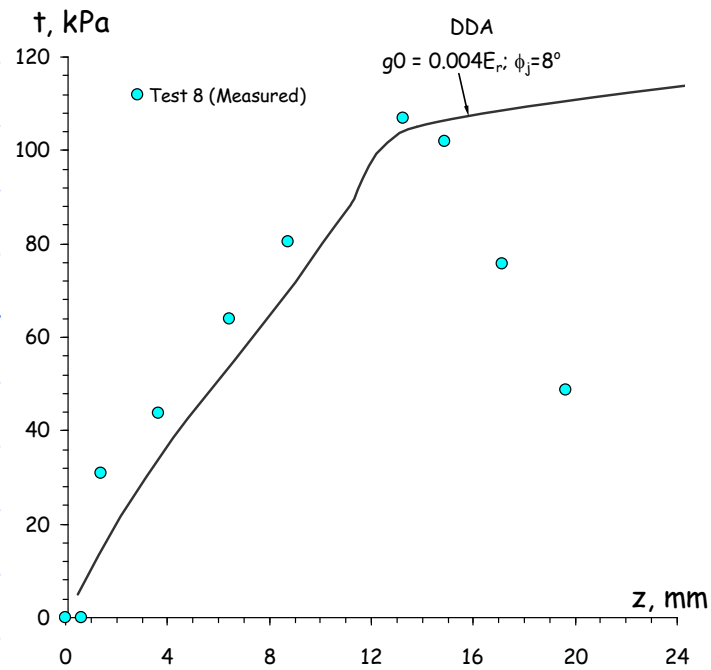


מגבלות:

1. ניסוח דו ממדי של השיטה במצב מאמצים מישוריים (Plane Stress), כאשר בפועל נכון יותר לשייך את הבעיה לניסוח תלת מימדי או לפחות לניסוח אקסיסימטרי
2. קירוב מסדר ראשון של הזזות (אלמנטי עיבור קבוע)
3. כשל הסלע הרציף (גבשושיות חספוס) אינו נלקח בחשבון
4. דיוק הפתרון רגיש מאוד לפרמטרי שליטה נומריים

תיקוף שיטת DDA

תיקוף של ניסיונות העמסה מעבדתיים



תוכן הרצאה:

1. רקע

- שיטות לסיווג איכות מסת הסלע מונחים כלליים בתחום של כלונסאות בסלע שיטות תכנון כלונסאות בסלע

2. מטרות המחקר

3. שיטות מחקר

- קטלוג ניסיונות העמסה בשטח וניתוח תוצאות ראשוני בדיקות מעבדה, כולל ניסיונות העמסה מעבדתיים שימוש בשיטות חישוביות DDA, ROCKET

4. סיכום ומסקנות

סיכום ומסקנות

1. לאיכות מסת הסלע ישנה השפעה מכרעת על תיסבולת הכלונסאות בחיכוך, אשר לא נכון לבטאה באמצעות חוזק לחיצה של הסלע הרציף בלבד.
2. השפעה זו הינה מורכבת ויכולה להתבטא במקביל גם לטובה וגם לרעה במספר גורמים המשפיעים על תסבולת הכלונס בחיכוך בפועל.
3. נמצאה דרך מעשית לשלב את איכות מסת הסלע (שיטת RQD) בהערכת חספוס דפנות הקידוח.
4. תסבולת כלונסאות בחיכוך במסות סלע סדוקות נמוכה מזו שבסלע רציף ומושפעת מאוד מנטיית מישורי הסידוק ומחומר המילוי שבהם.
5. החקירה היעילה ביותר של השפעת איכות מסת הסלע על תסבולת כלונסאות בחיכוך הינה על בסיס שיטות דירוג איכות הסלע RMR ו-GSI.
6. המודל המיקרו מכאני של מונש נמצא כמתאים לניתוח התנהגות כלונסאות במסות סלע סדוקות והינו יעיל במיוחד בנטיות סידוק אופקית-אנכית.
7. שיטת DDA נמצאה כמתאימה לניתוח התנהגות כלונסאות במסות סלע סדוקות במידה ועיקר הדפומרציה מתרחשת לאורך מישורי הסידוק.
8. השימוש בשיטת DDA חוסך את הצורך בהערכת מודול אלסטיות של מסת הסלע.
9. שילוב יעיל של שיטת DDA בתחום זה מצריך המשך תיקופים מול מקרי חקר נוספים.

**תודה על שהקדשתם
מזמנכם !**