

הגדלת תסבולת הכפיפה של לוח"ד על ידי הדבקת למינטים של CFRP

רני סלע

■ הסבת מבנה משרדים, הבנוי מתקרת לוח"דים, למבנה
בית חולים

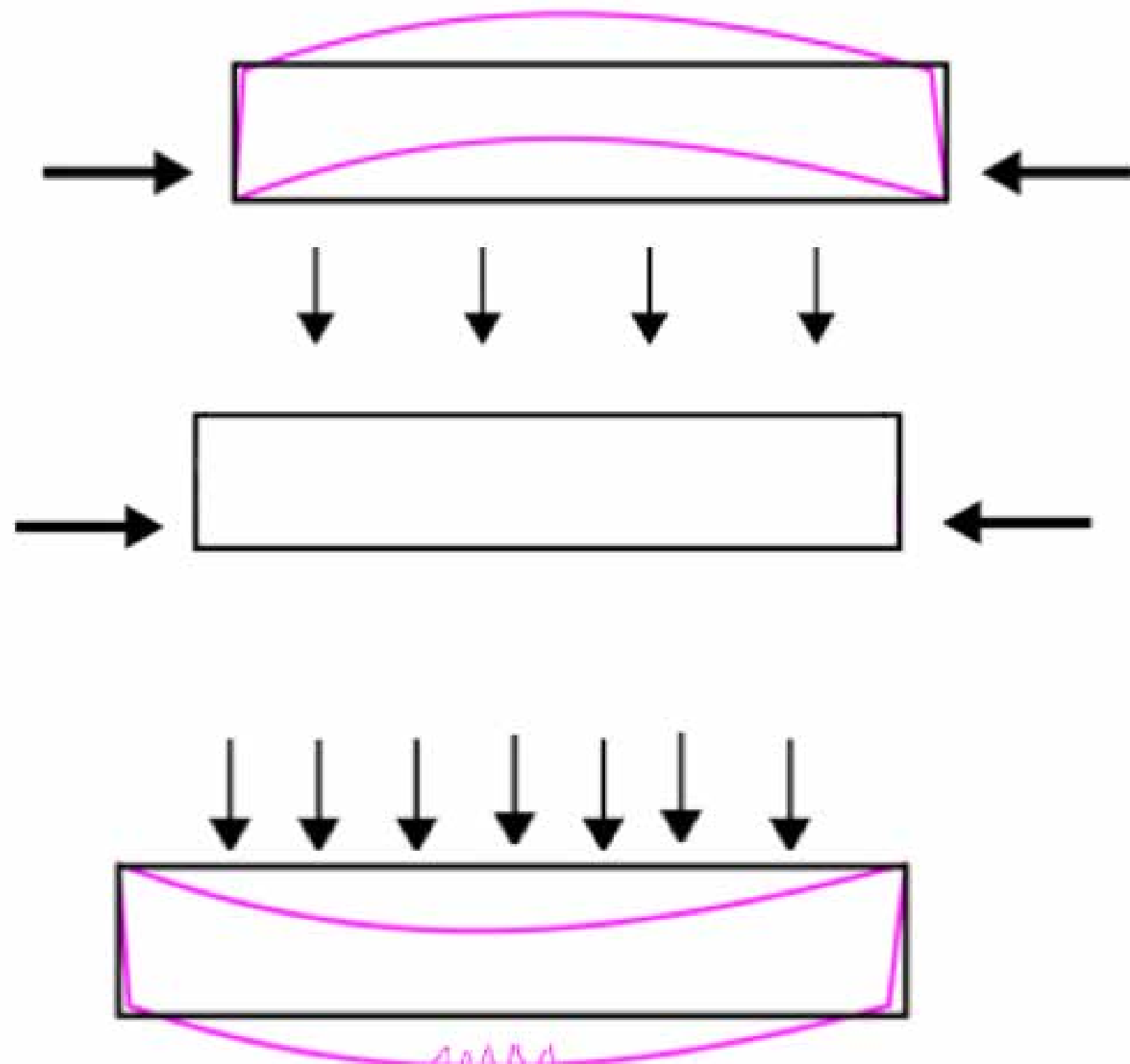
■ עלה צורך להתאים את התקרות לעומסים מוגדלים
הנובעים משינוי התפקוד

■ בשל תקנות רגולטוריות לא ניתן היה לפנות לשיטות
מסורתיות של הוספת קורות פלדה או עיבוי בבטון - שהיו
גורמים להנמכת התקרה בצורה שלא פוגשת את
הדרישות מחדרי ניתוח

■ בשל הנסיבות ההלו נדרש פתרון של חיזוק ע"י
רצועות סיבי פחמן

מוטיבציה ראשונית -
בי"ח נארא-מדיקה

חישוב לוח"ד

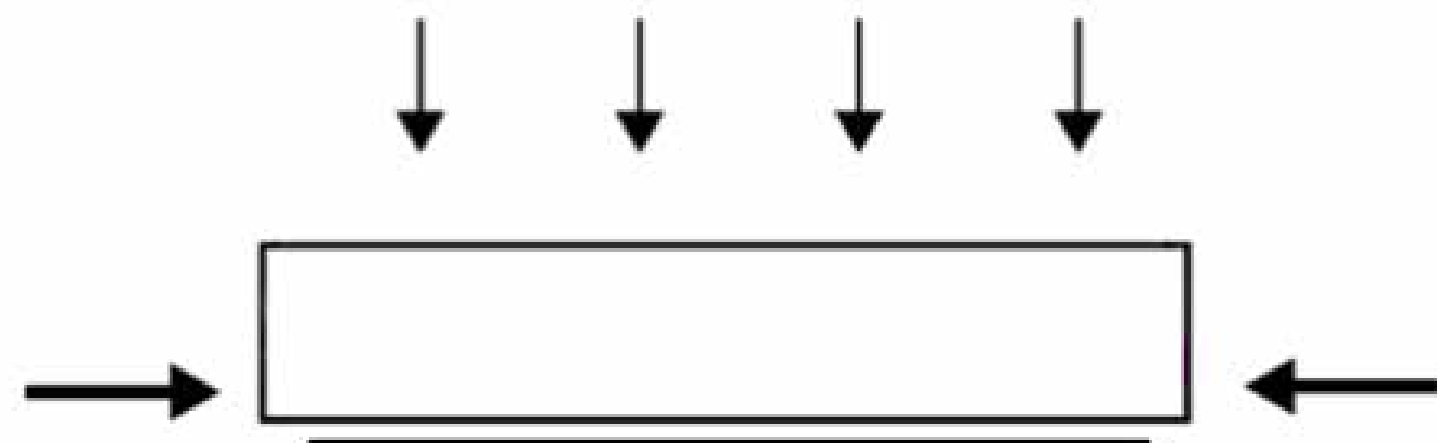


● חישוב תקין של לוח"ד הוא ייצור עם כפף כלפי מעלה (קמבר)

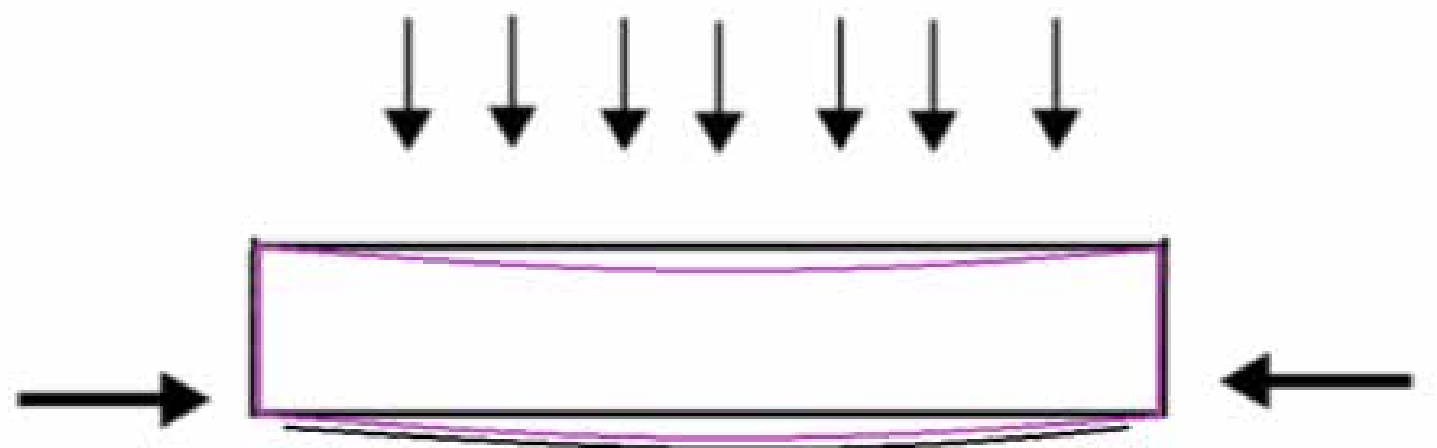
● ואז העומס מיישר את הלוח"ד למצב ישר

● אולם מה קורה שרוצים להגדיל את העומס? הכפף בלוח"ד גדל ועשויים להיווצר סדקים בבטון המתוח

חישוב לוח"ד



● כאן נכנס לפעולה ה-FRP - במצב העומס הנוכחי מדביקים את ה-FRP לתחתית הלוח"ד.



● ה FRP משמש למעשה זיון תחתון נוסף ומגדיל את כוח המתיחה האפשרי לנשיאה בכפיפה. בנוסף, הוא מגביל את הכפף האפשרי בלוח"ד.

ניסור פתחים

המשמעות של ניסור פתחים בלוח"ד היא כפולה:

הפחתת כוחות הדריכה בחתך (ע"י
הקטנת שטח הכבלים הדרוכים)



הקטנת שטח הבטון בחתך



**מבחינה זו - פתיחת פתחים בחתך והרצון לשמור על תסבולת קיימת -
מקבילה להגדלת תסבולת של חתך בעל המידות של החתך החדש.**

איך בכלל מחשבים תסבולת של לוח"ד?



34.2.2. חישוב מומנט תסבולת החתך

חישוב מומנט התסבולת של החתך מבוסס על רציפות ועל התאמת העיבורים (strain compatibility) ושיווי המשקל בין הכוחות והמומנטים הפנימיים לבין ערכי הכוחות והמומנטים של הטרחות העומסים החיצוניים, כמפורט בציורים 34.1 (א) עד (ד) ובנוסחות המפורטות שם. החישוב נעשה בהנחה כי קיימת רציפות לאורך כל היסטוריית ההעמסה של החתך, החל בהפעלת כוח הדריכה ועד למצב גבולי של הרס, כפי שהוא מוגדר בספרות, בתקן הישראלי ת"י 466 חלק 1 ובתקן זה.

« איך בכלל מחשבים תסבולת של לוח"ד? »

1. מניחים כי עיבורי הבטון ופלדת הדריכה הם בערכם המקסימלי.
2. קובעים את גובה האזור הלחוץ לפי דיאגרמת העיבורים והמאמצים בחתך שבציור 34.1 ולפי נוסחות 34.1 (א), (ב).
3. קובעים את שקול המאמצים בבטון, C_{ult} , ואת סכום שקולי הכוחות בפלדות הדריכה והפלדה הרכה, $T_{sall} = T_{asm} + T_{ult} + T_{ultc}$ (ראו ציור 34.1). בודקים אם נוסחה 34.1 (ג) מתקיימת.
4. אם נוסחה 34.1 (ג) אינה מתקיימת, בודקים לפי אחת מהאפשרויות שלהלן, לפי העניין:
 - א. אם $T_{sall} < C_{ult}$, מניחים כי העיבור בפלדת הדריכה שווה לערכו המקסימלי. קובעים את גובה האזור הלחוץ בעיבורים לפי נוסחה 34.1 (א), ומציבים בנוסחה 34.1 (ב) לקביעת גובה האזור הלחוץ במאמצים כאשר הנעלם הוא העיבור המקסימלי של הבטון, ϵ_{cu} . מתוך נוסחה 34.1 (ג) קובעים את ערכו של העיבור הנעלם. מצב זה מתאר שבר משיך, שבו הפלדה הדרוכה באזור המתוח הגיעה לכניעה לפני כשל בבטון.
 - ב. אם $T_{sall} > C_{ult}$, מניחים כי העיבור בסיב הקיצוני הלחוץ של הבטון שווה לערכו המקסימלי. קובעים את גובה האזור הלחוץ בעיבורים לפי נוסחה 34.1 (א), ומציבים בנוסחה 34.1 (ב) לקביעת גובה האזור הלחוץ במאמצים כאשר הנעלם הוא תוספת העיבור בפלדת הדריכה, $\Delta\epsilon_p$. מתוך נוסחה 34.1 (ג) קובעים את ערכה של תוספת העיבור הנעלמת. מצב זה מתאר שבר פריד, שבו הגיע הבטון לכשל לפני שפלדת הדריכה הגיעה לכניעה, וייתכן שהיא בתחום האלסטי.

איך בכלל מחשבים תסבולת של לוח"ד?

$$y = \frac{\epsilon_{cu} d_p}{(\epsilon_{cu} + \Delta \epsilon_p)} \quad (א) \quad (34.1)$$

$$x = \begin{cases} y & \sigma_c = \sigma_c(\epsilon_c) \\ 0.8y & \sigma_c = f_{cd} \end{cases} \quad (ב)$$

$$\sum F_x = 0 = C_{ult} + C_{usmc} + T_{ultc} + T_{ult} + T_{usm} - N_d \quad (ג)$$

$$M_{ult} = T_{ultc} z_{spe} + T_{ult} z_{sp} + T_{usm} z_{sm} + C_{usmc} z_{smc} \quad (ד)$$



כמה CFRP לשים?

קבלת הדרישה למומנט תכן חדש

קביעת כמות ברזל הנוספת הדרושה לצורך
התסבולת הנדרשת

הנחת העיבור בFRP (בדרך כלל 3-6 פרומיל)

חישוב המאמץ המתקבל בFRP (חוק הוק).

$$A_f = \frac{A_{s,cal} \cdot f_{sd}}{f_f}$$

חישוב כמות הFRP הדרושה על פי:



חישוב התסבולת עם ה FRP זה (כמעט) בדיוק אותו דבר...

◀ אם במקרה של לוח "ד בחנו למעשה שני
מגנוני כשל כאן אנחנו בוחנים 3
(בתיאוריה 4) מגנוני כשל:

10.3.1.2 Strain in FRP reinforcement—The maximum strain that can be achieved in the FRP reinforcement will be governed by strain limitations due to either concrete crushing, FRP rupture, FRP debonding, or prestressing steel rupture. The effective design strain for FRP reinforcement

- מעיכה בבטון
- כשל בפלדה הדרוכה
- קריעה בFRP (תיאורטי)
- התנתקות הFRP מהבטון



חישוב התסבולת עם ה FRP זה (כמעט) בדיוק אותו דבר...

◀ לאחר שקבענו את העיבור המירבי שה FRP יוכל לקבל (כתוצאה מקריעה או היפרדות), נשאר רק פרמטר אחד שמשפיע על העיבורים (ומכאן על המאמצים והכוחות) - גובה האיזור הלחוץ.

◀ כעת התקן האמריקאי מנחה להניח גובה איזור לחוץ וממנו לחשב את העיבורים, המאמצים והכוחות השונים ולבדוק את שיווי המשקל. במידה ואין שיווי משקל - יש לשנות את הנחת הגובה האיזור הלחוץ. כך, בתהליך איטרטיבי נגיע לשיווי משקל ונוכל לחשב את התסבולת.



חישוב התסבולת עם ה FRP זה (כמעט) בדיוק אותו דבר...

◀ ניתן גם ליישם את השיטה המקובלת בתקן הישראלי- לאחר שוידאנו מה עיבור הכשל בלחיצה בבטון (שימו לב שהתקן האמריקאי לוקח 0.003) ומה העיבור המירבי שיכול להתקבל בסיב בתחתון (FRP או פלדת דריכה)- ניתן להניח כשל סימולטני ולתקן על פי 34.2.2.4

THE BOTTOM LINE

- מציאת עיבור בתחתית הלוח"ד
על מנת לייצר "מצב 0" - ebi
- מציאת העיבור המותר לFRP - efd

- הנחת פירוס העיבורים למצב גבולי של
הרס כאשר הבטון בכשל (ecu) והFRP
בכשל (ebi+efd)

- מציאת "בלוק המאמצים" בבטון,
המאמצעים והכוחות בכבלים וביריעות

בדיקת תסבולת לוח"ד
למצב גבולי של הרס

THE BOTTOM LINE

- מציאת שיווי משקל
-אם הכשל הוא בFRP ($T < C$) מתקנים את פירוס
העיבורים כך שהעיבור בתחתית נשאר אך הבטון
אינו מגיע לכשל (השוואת כוח הלחיצה לכוח
המתיחה ומציאת גובה האיזור הלחוץ) מוצאים
מחדש את הכוחות עד לשיווי משקל.

- אם הכשל הוא בבטון ($T > C$) מתקנים את
פירוס העיבורים איטרטיבית (ע"י הקטנת
העיבור של הFRP וכתוצאה מזה גם של
הפלדה) עד למציאת שיווי משקל.
- אם הכשל הוא בבטון ייתכן וניתן לשים
פחות FRP- יש לבדוק זאת.
- מומנט התסבולת מחושב ע"פ כוח
מתיחה כפול הזרוע המתאימה לו.

בדיקת תסבולת לוח"ד
למצב גבולי של הרס

שלב ראשון - עיבורים

מציאת עיבור בתחתית הלוח"ד על מנת לייצר "מצב 0" - ϵ_{bi} .

• חישוב פשוט על פי השיטה האלסטית:

$$\sigma_{bc} = -\frac{T_\infty}{A_p} - \frac{T_\infty \cdot e_p}{W_{bp}} + \frac{M_{g+\Delta g_1}}{W_{bp}} + \frac{M_q}{W_{bc}}$$

$$\epsilon_{bi} = \frac{\sigma_{bc}}{E_p}$$

• מציאת העיבור המותר ל-FRP - ϵ_{fd} .

$$\epsilon_{fd} = 0.083 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0.9\epsilon_{fu} \quad (\text{in.-lb})$$

$$\epsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0.9\epsilon_{fu} \quad (\text{SI})$$

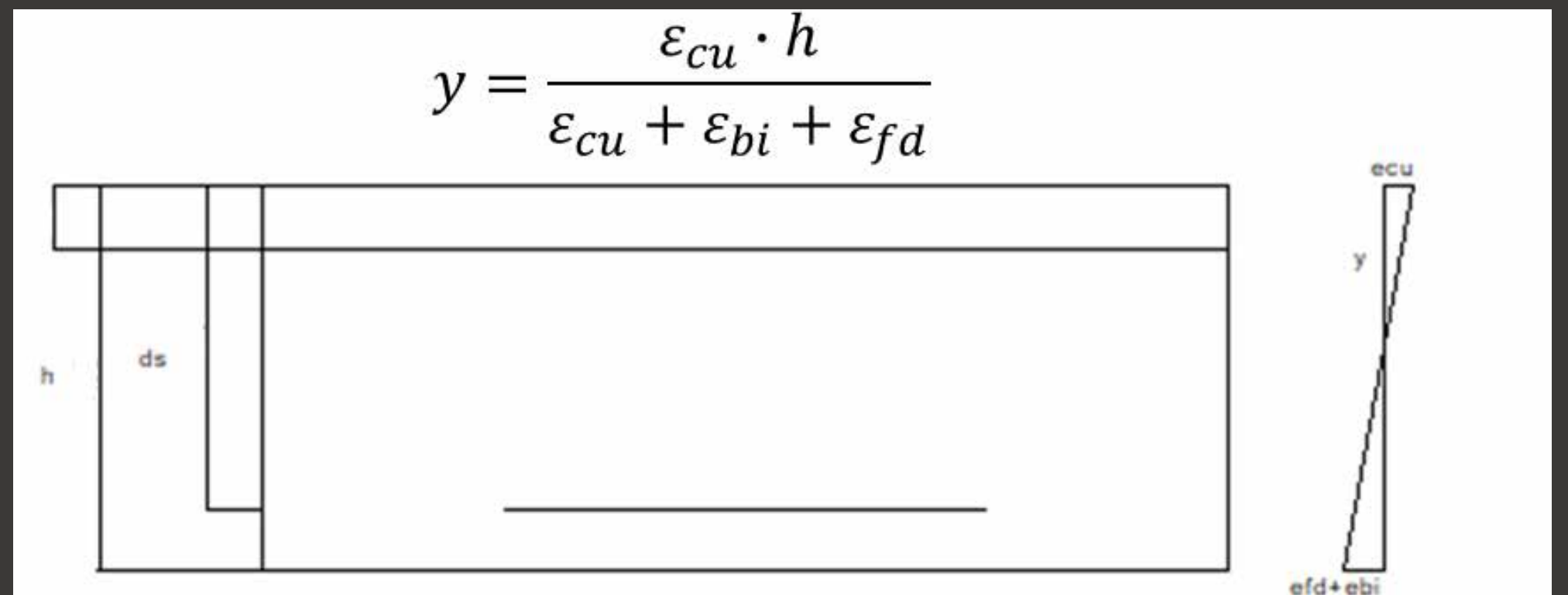
(10.1.1)

$$\epsilon_{fd} = 0.41 \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{n \cdot E_f \cdot t_f}} \leq 0.9 \cdot \epsilon_{fu}$$

2 שלב שני (א) כשל סימולטני

הנחת פירוס עיבורים למצב גבולי של הרס-כאשר בטון בכשל (ecu) וה FRP בכשל (ebi+efd).

בתקן האמריקאי המרחק בין ציר ניטרלי לציר לחוץ ביותר ביותר נקרא C



עיבור בפלדה

תוספות עיבור בפלדה:

$$\frac{h - y}{\varepsilon_{bi} + \varepsilon_{fd}} = \frac{(h - y) - y_b}{\Delta \varepsilon_s}$$

$$\Delta \varepsilon_s = \varepsilon_{fd} \cdot \frac{h - y - y_b}{h - y}$$

לחיצה בבלוק מאמצים
ומתיחה בFRP ובפלדת הדריכה



מכאן: יש לנו את כל
העיבורים הנחוצים ניתן
לחשב את הכוחות:

האם מתקיים שיווי משקל?

לא

כן

$$M_n = A_p f_{ps} \left(d_p - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (10.3.1.6g)$$

$$M_{ult} = T_s \cdot Z_s + \psi \cdot T_f \cdot Z_f$$

אם הכשל הוא בFRP ($T < C$) מתקנים את פירוס העיבורים כך שהעיבור בתחתית נשאר אך הבטון אינו מגיע לכשל (השוואת כוח הלחיצה לכוח המתיחה ומציאת גובה האיזור הלחוץ מזה) מוצאים מחדש את הכוחות עד לשיווי משקל.

אם הכשל הוא בבטון ($T > C$) מתקנים את פירוס העיבורים איטרטיבית (ע"י הקטנת העיבור של הFRP וכתוצאה מזה גם של הפלדה) עד למציאת שיווי משקל.

2 שלב שני (ב) עיבורים

- הנחת גובה איזור לחוץ C

$$\epsilon_{fe} = \epsilon_{cu} \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \epsilon_{bi} \leq \epsilon_{fd} \quad (10.2.5)$$

- העיבור בFRP במצב של הרס בבטון:

For failure controlled by prestressing steel rupture, Eq. (10.3.1.2a) can be used. For Grade 270 and 250 ksi (1860 and 1725 MPa) strand, the value of ϵ_{pu} to be used in Eq. (10.3.1.2a) is 0.035

$$\epsilon_{fe} = (\epsilon_{pu} - \epsilon_{pi}) \left(\frac{d_f - c}{d_p - c} \right) - \epsilon_{bi} \leq \epsilon_{fd} \quad (10.3.1.2a)$$

in which

$$\epsilon_{pi} = \frac{P_e}{A_p E_p} + \frac{P_e}{A_c E_c} \left(1 + \frac{e^2}{r^2} \right) \quad (10.3.1.2b)$$

- העיבור בFRP במצב של הרס בפלדה הדרוכה:

עיבור בפלדה (ב)

• העיבור בפלדה:

$$\epsilon_{ps} = \epsilon_{pe} + \frac{P_e}{A_e E_e} \left(1 + \frac{e^2}{r^2} \right) + \epsilon_{pnet} \leq 0.035 \quad (10.3.1.6a)$$

$$\epsilon_{pnet} = 0.003 \left(\frac{d_p - c}{c} \right) \text{ for concrete crushing failure} \quad (10.3.1.6b)$$

$$\epsilon_{pnet} = (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi}) \left(\frac{d_p - c}{d_f - c} \right) \text{ for FRP rupture or debonding failure modes} \quad (10.3.1.6c)$$

• במצב של
מעיכת בטון:

• במצב של
כשל בFRP:

שיווי משקל (ב)

ומכאן יש לנו את כל העיבורים הנחוצים, ניתן לחשב את הכוחות:



● לחיצה בבלוק מאמצים ומתיחה
ב FRP ובפלדת הדריכה

● נבדוק שיווי משקל ונראה אם
האזור הלחוץ מתאים להנחה שלנו

$$\alpha_1 f_c' \beta_1 b c = A_p f_p + A_f f_{fe} \quad (10.3.1.6f)$$

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f_c' \beta_1 b}$$

(התקן מתיר להשתמש במקדמים $\alpha_1 = 0.85$ ו β_1 מוערך ע"פ ACI-318. אולם שיטה זו מאפשרת (ולא מכריחה) גם חישוב מתקדם יותר של המקדמים האלו כתלות בגובה האזור הלחוץ, כך שההשפעה של גובה האזור הלחוץ נהיית לא-לינארית).

האם מתקיים שיווי משקל?

לא

כן

נניח גובה איזור לחוץ
חדש ונבדוק מחדש

נחשב את התסבולת:

$$M_n = A_p f_{ps} \left(d_p - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (10.3.1.6g)$$

$$M_{ult} = T_s \cdot Z_s + \psi \cdot T_f \cdot Z_f$$

הגבלות בתקן האמריקאי:

התקן האמריקאי מזהיר מפני
עומסים מסוכנים במצב שירות -
ומגביל את הכוחות שיש להתייחס
אליהם בפלדה, בבטון ובFRP

Eq. (10.3.1.4a) and (10.3.1.4b). In addition, the compressive stress in the concrete under service load should be limited to 45 percent of the compressive strength

$$f_{ps,s} \leq 0.82f_{py} \quad (10.3.1.4a)$$

$$f_{ps,s} \leq 0.74f_{pu} \quad (10.3.1.4b)$$

- יש הבדלים בין התקנים השונים:
במקדמים, בכוחות המותרים, ובפילוסופיה הכללית.

- יש לשים לב ביכן ניתן ללכת עם תקן אחד
והיכן אנו נידרשים לעמוד בשני תקנים

הבדלים לדוגמא:

- חוזק הבטון (צילינדר מול קובייה), מקדם הפחתה
לחוזק הבטון (f_{cd} לעומת $0.85f'_c$) גובה בלוק
המאמצים (0.8 לעומת 0.85)

- הבדל משמעותי- חישוב התסבולת הנומינלית לפי
התקן האמריקאי ייתן תוצאה גבוהה משמעותית
מהחישוב לפי התקן הישראלי.

התקן האמריקאי, מנגד, מפחית את התיסבולת
הנומינלית במקדם שנע בין 0.65-0.9

שים לב!

הגבלות נוספות בתקן האמריקאי



מכאן שאם נחשב את התיסבולת הנומינלית עם ערכים "ישראליים" ואז נכיל עליהם
את ההפחתה ה"אמריקאית" נקבל תסבולת נמוכה שתהיה בזבזנית ולא אפקטיבית





שים לב!

- המצגת הזו מדברת על חישוב התסבולת לכפיפה.
יש לבחון גם את התסבולת לגזירה וגם את המאמצ
בשירות (בעיקר בסיב התחתון).
- במצב שירות- כדי לכסות את נפח המאמצים
בבטון במתיחה (אם קיימים) יש לחשב את
העיבור בFRP ולראות האם הכוח המתפתח
בFRP עונה על הדרישות בתקן.

תודות:

א. רביץ מהנדסים, מהנדס אהרן רביץ.
אנונו רפי הנדסת מבנים, מהנדס רפי אנונו.
אלקטרה דנקו:
מנהל פרויקט: יואב אריאלי,
מנהל פרויקט: משה אלעד.
ב.א. אייכנבאום ניהול ופיקוח, יאיר עין גדי.
חברה קבלנית: בניין הארץ