

פרק 21 - הצטמקות וזחילה*

21.1 כללי

ההתנהגות לזמן ארוך של אלמנטים מבטון מזוין הינה נושא מורכב אשר נחקר רבות וחישובים לבדיקת מצבם של הרכיבים כעבור מסי' מועט או גדול של שנים הם חישובים מיגיעים וארוכים, אשר בחלקם ניתן למחשב, אולם בשים לב לפרמטרים הרבים המשתתפים ובעיקר לתנאים המשתנים לאורך חיי המבנה כמעט ולא ניתן לארוך חישוב, מושקע ככל שיהיה, ללא הנחה מקורבת שכן החישובים המורכבים ביותר אינם בנויים ליותר מכך. בתקנים רבים, כמו התקן האירופי EC2 [40] והאמריקאי ACI 318 [43] החישובים לזמן ארוך לא נערכים כשיגרה אלא כאופציה. אופציה זו מתחייבת כאשר מדובר בתכנון מבנה בלתי שגרתי או מונומנטלי, ואז חלק לפחות מן החישוב נערך ברמה מחקרית או קרובה לה.

חלק מן התקנים מספקים מידע להתחשבות בצורה מקורבת בהשפעות לזמן ארוך. קשה כאן לעשות הכללות. יש הנחה כי במקדמי הבטחון החלקיים כלולות בצורה חלקית השפעות לזמן ארוך. אין לסמוך על זה וכאשר מתוכנן מבנה חריג לעומת המכנה המשותף הנמוך של הוראות התכן של התקנים לבטון מזוין יש לערוך חישובים לזמן ארוך כפי שניתן לראות בהמשך פרק זה.

הרכיבים היחידים בהם חובה להתייחס להשפעות לזמן ארוך הם רכיבים מבטון דרוך, בהם הפסדי הדריכה יכולים להגיע ל 15% עד 20% מכוח הדריכה הראשוני והפסדים אלה נובעים באופן כמעט בלעדי מהשפעות לזמן ארוך.

המרכיבים בעיקריים של השפעות לזמן ארוך הם הצטמקות וזחילה ובשני אלה יעסוק פרק זה בהמשך. לזחילה והצטמקות יש משקל גדול בחישובים של אלמנטים לחוצים, בעיקר כאשר מדובר באקסצנטריות גדולה. מרכיב נוסף הוא רלקסציה (הרפיה) במאמצים בפלדה. בפלדה לדריכה ידוע עליה יותר אם כי עדיין בצורה מקורבת. בפלדה לבטון מזוין רגיל ידוע עליה פחות ממעט ומאחר והיא בסיכומו של דבר מתבטאת באחוזים בודדים בלבד, ומאחר ומקדם השונות בחישובים בזחילה והצטמקות הינו בסביבות ה 20%, במילא העיסוק בה, מעניין ככל שיהיה נהפך ללא רלבנטי.

הצטמקות וזחילה נדונים כאן כפי שהם נתונים ב EC2 [40] שהינו בסיס לתקן הישראלי, אי לכך כל מה שנתון בהמשך תואם את התקן הישראלי על גליונות התיקון האחרונים בו [44][45], גם אם פורמט הכתיבה בו נתון אחרת.

21.2 הצטמקות

ההצטמקות הינה תופעת אובדן נפח הבטון כתוצאה מהתייבשות / אובדן נוזלים בו (מים) וכתוצאה מהתהליך הכימי המתרחש בו תוך כדי ההתקשות. כך לפחות מוגדרת ההצטמקות לפי [40] וכאן לא נחרוג מתפיסה זו.

*פרק זה מעודכן לאוגוסט 2010

החלק השני פחות מורכב מפני שהוא כפוף לתהליכים כימיים המתרחשים פחות או יותר בצורה אחידה על פני החתך ולאורך הרכיב. החלק הראשון מאד מורכב מפני שהוא תלוי באובדן (התאיידות או ככל שנקרא לזה) לחות, אבל, זה בודאי אינו מתרחש בצורה אחידה, לא על פני החתך ולא לאורך הרכיב. ניקח לדוגמא קיר בטון מזוין, גלוי, חשוף לשמש ולאוויר מצידו האחד וצידו השני מופנה אל מרתף סגור ולכן הטמפרטורה והלחות בו די יציבות. מובן שבין הצד החיצוני לפנימי יתפתח מתח מאמצים גבוה מאד כתוצאה מהצטמקות מואצת בצד החיצוני לעומת הפנימי. דוגמה אחרת – גג מבטון מזוין אשר מסיבה זו או אחרת לא נעשה עליו בידוד החל מיום יציקתו (אי שם באביב) ועד ראשית החורף. ברור כי גג זה יסבול מהשפעת הצטמקות קשה.

סה"כ ההצטמקות הינה סכום ההצטמקות משני המקורות הנ"ל.

$$\epsilon_{sh} = \epsilon_{cd}(t) + \epsilon_{ca}(t) \quad (21.1)$$

יש כל מיני חומרים המומלצים על ידי יועצי חומרים שונים, אשר אמורים לצמצם את תופעת ההצטמקות עד למינימום. חלק מחומרים אלה יעילים וחלקם אולי לא, ויעידו על כך סדקי התכווצות רבים מאד בכל מיני מקומות במבנים, דבר האומר כי הבעיה קיימת. אסור לשכוח כי כל החומרים האלה הם בקטגורית המוספים. בו בזמן שבארץ השימוש במוספים לא מוסדר (יש תקן המונה את סוגי המוספים אבל לא מפרט ומזהיר בפני השימוש בהם) בארצות אחרות, בארצות הברית למשל, יש תקנים אשר מפרטים מה הן "תופעות הלוואי" (בדיוק כמו בתרופות) הכרוכות בשימוש במוספים כגון אלה, והן בעיקר השפעה, לרוב לא לטובה, על התכונות המכניות של הבטון: חוזק לחיצה ומתיחה (לעתים הפחתה זמנית ולעתים הפחתה לאורך זמן) מודול האלסטיות וכו'. זה נושא אשר יש עדיין לפתח בארץ וגם להסדיר בתקינה.

21.2.1 הצטמקות עקב התקשות

לפי המינוח של [40] הצטמקות זו מכונה גם autogenous shrinkage strain ומסומנת בתור ϵ_{ca} . היא מתרחשת בעיקר בראשית התפתחותו של חוזק הבטון ודועכת מהר עם הזמן. בדוגמה המספרית המצורפת ב 21.4 זה יובלט באופן ברור. ההצטמקות עקב התקשות נתונה לפי נוסחה (21.2):

$$\epsilon_{ca}(t) = \epsilon_{ca}(\infty) \beta_{as}(t) \quad (21.2)$$

בה:

$$\epsilon_{ca}(\infty) = 2.5 (0.7f_{ck} - 10) 10^{-6} \quad (21.3)$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{(-0.2t^{0.5})} \quad (21.4)$$

כאשר: $\epsilon_{ca}(\infty)$ הינו ההצטמקות הסופית עקב התקשות לטווח ארוך

f_{ck} חוזק הבטון האופייני כמוגדר לעיל.

$\beta_{as}(t)$ גורם תיקון המביא בחשבון את הזמן t בימים מיום יציקת

הבטון ועד למועד בו נערך החישוב.

ניתן לראות כי הצטמקות זו תלויה רק בסוג הבטון והיא דועכת מהר מאד עם הזמן כפי שיוכח בדוגמה המפורטת בסיף 21.4.

21.2.2 הצטמקות עקב התייבשות

הצטמקות עקב התייבשות (drying shrinkage) מתפתחת עם הזמן ומושפעת מהרבה גורמים. היא נתונה על ידי הנוסחה (21.5). בנוסחה זו מופיעים כל הגורמים המשפיעים על הצטמקות זו.

$$\varepsilon_{cd}(t) = \varepsilon_{cd,0} k_h \beta_{ds}(t, t_s) \quad (21.5)$$

בה: $\varepsilon_{cd,0}$ הינה ההצטמקות הבסיסית עקב התייבשות והיא נתונה בנוסחה

(21.6) עבור בטונים עשויים עם צמנטים מסוג CEM בלבד (רק הצמנטים אתם יש נסיון בארץ ורשומים בת"י 118 בגרסתו מספטמבר 2008 (סעיף 5.1.2) ובחוקת הבטון):

$$\varepsilon_{cd,0} = 0.85 \left[(220 + 110 \alpha_{ds1}) e^{(-\alpha_{ds2} \frac{0.7f_{cm}}{10})} \right] 10^{-6} \beta_{RH} \quad (21.6)$$

כאשר: α_{ds1} הינו מקדם התלוי בסוג הצמנט: = 3 עבור צמנט מסוג S (איטי)

4 עבור צמנט מסוג N (רגיל)

6 עבור צמנט מסוג R (מהיר)

α_{ds2} הינו מקדם התלוי בסוג הצמנט = 0.13 עבור צמנט מסוג S (איטי)

0.12 עבור צמנט מסוג N (רגיל)

0.11 עבור צמנט מסוג R (מהיר)

f_{cm} הינו חוזק הבטון הממוצע בלחיצה בגיל 28 ימים (f_{ck} כמוגדר בת"י 118 ובחוקת הבטון 1).

לצורך החישובים כאן $f_{cm} = f_{ck} + 11 \text{ MPa}$.

הלחות היחסית נתונה באמצעות נוסחה (21.7).

$$\beta_{RH} = 1.55 \left[1 - (RH/RH_0)^3 \right] \quad (21.7)$$

כאשר: RH - הינה הלחות היחסית בעליל באחוזים

RH_0 - לחות יחסית בשיעור 100%

$\beta_{ds}(t, t_s)$ מביע את התלות בהפרש הזמן בין היום בו נערך החישוב t לבין

המועד בו החלה ההצטמקות עקב התייבשות t_s (בדרך כלל מועד

תום האשפחה).

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0.04 h_0^{3/2}} \quad (21.8)$$

כאשר: $h_0 = 2 \frac{A_c}{u}$: A_c - הינו שטח חתך הרכיב

u - הינו היקף החתך החשוף להתייבשות

k_h - הינו מקדם התלוי h_0 וערכו נתון לפי הטבלה 21.1 (ניתן לעשות

אינטרפולציה עבור ערכי ביניים).

טבלה 21.1 - ערכי k_h בתלות ב h_0

h_0	k_h
100	1.0
200	0.85
300	0.75
≥ 500	0.70

h_0 הינו באופן עקיף מדד של דרגת החשיפה שכן ערכו $h_0 = 2A_c / u$ ובו A_c הינו שטח החתך אבל u הינו ההיקף החשוף להתייבשות (הבא במגע עם האויר החופשי).

ניתן לראות מתוך הנוסחאות לעיל כי: לבד מהתלות בסוג הבטון ובסוג הצמנט, שהם כמובן לא משתנים לאורך חיי המבנה, יש תלות בזמן ובדרגת החשיפה h_0 וכן בלחות היחסית. החישוב כפי שהוא מוצג אינו מאפשר לפצל את אורך התקופה $(t - t_s)$ לשתי תקופות או יותר. במלים אחרות בחישוב הצטמקות זו לא נוכל להביא בחשבון כי מידת החשיפה h_0 היתה בתקופה הראשונה ערך מסוים ובתקופה אחרת השתנתה לערך אחר. אותו הדבר ביחס ללחות היחסית. יש לגבי הטמפרטורה כלי להתחשב במידת השתנותה אבל לא בהצטמקות אלא בזחילה – ראה להלן (ראה דוגמה ב 21.4).

21.3 זחילה

הזחילה היא עיבור נוסף לעיבור האלסטי בבטון המצוי תחת מאמצי לחיצה והיא נוצרת כתוצאה מאובדן נפח כאשר הבטון כאמור תחת מאמצי לחיצה. יש לתופעה יותר מהסבר פיסיקלי אחד. המטרה כאן היא לא להעמיק בצד המדעי של הסבר הזחילה כתופעה אלא להראות איך מתמודדים עם חישוב הזחילה.

כאשר המאמץ בבטון לא עולה על $[0.45f_{ck}(t_0)]$ לפי הגליל האירופי $0.315f_{ck}(t_0)$ בקוביה ישראלית בזמן t_0 הזמן בו הועמס הבטון במאמצי הלחיצה) עיבור הזחילה ϵ_{cc} גדל ליניארית לעומת העיבור האלסטי ולכן הוא כפולה שלו. עיבור הזחילה הכולל, בין מועד ההעמסה t_0 לבין מועד הבדיקה t נתון על ידי הנוסחה (21.9):

$$\epsilon_{cc}(t, t_0) = \varphi(t, t_0) \frac{\sigma_c}{E_c} \quad (21.9)$$

בה: σ_c הינו מאמץ הלחיצה בבטון אשר גורם לעיבור האלסטי
 E_c הינו מודול האלסטיות של הבטון הנתון בפרק 3 בחוקת הבטון.

כאשר המאמץ בבטון σ_c עולה על $0.315f_{ck}(t_0)$ יש להציב בנוסחה (21.9) במקום $\varphi(t, t_0)$ את השפעת אי הליניאריות כנתון בנוסחה (21.10) להלן:

$$\varphi_{nl} = \varphi(t, t_0) e^{(1.5(k_\sigma - 0.45))} \quad (21.10)$$

k_σ - הינו היחס $\sigma_c / 0.7f_{ck}$ בזמן t_0 .

מקדם הזחילה $\varphi(t, t_0)$ בין מועד הפעלת ההעמסה t_0 לבין זמן t (שניהם בימים) נתון על ידי:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \beta_c(t, t_0) \quad (21.11)$$

מקדם הזחילה הבסיסי φ_0 ניתן לאומדן באמצעות נוסחה (21.12) בה מרכיבים של הלחות היחסית, סוג הבטון, הפרש הזמן ומידת החשיפה:

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0) \quad (21.12)$$

בה:

$$0.7 f_{cm} \leq 35 \text{ MPa} \quad \text{עבור} \quad \varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH/100}{0.1 h_0^{1/3}} \quad (21.13)$$

$$0.7 f_{cm} > 35 \text{ MPa} \quad \text{עבור} \quad \varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - RH/100}{0.1 h_0^{1/3}} \alpha_1 \right] \alpha_2 \quad (21.13)$$

α_1 ו α_2 מוגדרים בהמשך

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16.8}{(0.7 f_{cm})^{1/2}} \quad (21.14)$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{(0.1 + t_0^{0.2})} \quad (21.15)$$

h_0 , A_c ו u - כמוגדרים בהצטמקות

$\beta_c(t, t_0)$ מתאם את התפתחות הזחילה עם הזמן (21.16):

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{(t - t_0)}{(\beta_H + t - t_0)} \right]^{0.3} \quad (21.16)$$

$(t - t_0)$ הינו משך הזמן הבלתי מתואם לאורכו מופעל המאמץ σ_c ולכן

לאורכו גם מתרחשת הזחילה בעליל כאשר שני המועדים נקבעים בימים.

β_H הינו מקדם התלוי בלחות היחסית ועל כן תלוי גם במידת החשיפה h_0

(כמוגדרת בהצטמקות).

$$\beta_H = 1.5 \left[1 + (0.012 RH)^{18} \right] h_0 + 250 \leq 1500 \quad (21.17)$$

עבור $0.7 f_{cm} \leq 35 \text{ MPa}$

$$\beta_H = 1.5 \left[1 + (0.012 RH)^{18} \right] h_0 + 250 \alpha_3 \leq 1500 \alpha_3 \quad (21.18)$$

עבור $0.7 f_{cm} > 35 \text{ MPa}$

מקדמי α תלויים בחוזק / סוג הבטון ומוגדרים כך:

$$\alpha_2 = \left(\frac{35}{0.7f_{cm}} \right)^{0.2} \quad (21.19) \quad \alpha_1 = \left(\frac{35}{0.7f_{cm}} \right)^{0.7} \quad (21.19)$$

$$\alpha_3 = \left(\frac{35}{0.7f_{cm}} \right)^{0.5} \quad (21.19)$$

התאמות להשפעת הזמן על הזחילה:

שני גורמים משפיעים על המועד t_0 בנוסחה (21.15) הוא המועד ממנו מתחילה

ההתחשבות בהשפעת הזחילה:

א. הטמפרטורה בה הבטון מתקשה וצובר חוזק. הניסוח של המשואות (21.9) עד

(21.19) מתאים לתנאים של טמפרטורה 20°C אולם כאשר הטמפרטורה שונה

תהליך צמיחת החוזק ישתנה בתלות בטמפרטורה השונה מהנ"ל.

הבטוי (21.20) נותן את סכום קטעי הזמן ΔT_i בהם הטמפרטורה שונה מ 20°C .

טמפרטורה גבוהה תגרום לתוספת זמן t_T (הבטון יהיה "בוגר" יותר) ואילו

טמפרטורה נמוכה ממנה תגרום לגריעת זמן. בדרך כלל מדובר בטמפרטורה גבוהה

יותר בזמן האשפחה, אולם לא תמיד.

$$t_T = \sum_{i=1}^n \Delta T_i e^{-\left(\frac{4000}{273+T(\Delta T_i)} - 13.65\right)} \quad (21.20)$$

$T(\Delta T_i)$ הינה הטמפרטורה במעלות C בפרק הזמן ΔT_i בימים.

t_T המחושב לפי נוסחה (21.20) מחליף את $t_{0,T}$ המקורי בנוסחה (21.21).

ב. סוג הצמנט - הניסוח של המשואות (21.9) עד (21.19) מתאים לצמנט רגיל מסוג N.

התאמת הזמן בגין סוג הצמנט נעשית באמצעות (21.21):

$$t_0 = t_{0,T} \left(\frac{9}{2 + t_{0,T}^{1.2}} + 1 \right)^\alpha \geq 0.5 \quad (21.21)$$

$t_{0,T}$ הינו מועד המתוקן של היציקה או מועד תום האשפחה עקב

טמפרטורה לפי משואה (21.20).

$-1 = \alpha$ עבור צמנט מסוג S (איטי)

$0 = \alpha$ " " " " N רגיל

$1 = \alpha$ " " " " R (מהיר)

t_0 המחושב לפי נוסחה (21.21) יוצב בנוסחה (21.15) אולם לא ב (21.16) בה הזמן

ההתחלתי אינו מתואם.

21.4 דוגמה

הדוגמה הבאה נועדה להפעיל את כל ההליכים המתוארים בפרק זה בנוגע להצטמקות וזחילה. יש בה שלבים רבים ואם הבעיה של הקורא מצומצמת – הוא ימצא את מבוקשו אי שם בחלקים מן הדוגמה.

עמוד במידות חתך 400/400 מ"מ עשוי מבטון ב-400 ובו 8Φ25 אשר שטחם 3920 מ"מ². גובה העמוד 4 מ' מעל פני היסוד. העמוד נוצק מבטון עם צמנט CEM1 אולם איטי, כלומר S. $E_s = 200000 \text{ MPa}$ $E_c = 28200 \text{ MPa}$.
העמוד קבל אשפרה מלאה (RH = 100%) במשך 20 הימים הראשונים ובימים אלה הטמפרטורה היתה 25°C.

לאחר תום האשפרה, מסיבות כל שהן, העמוד עמד גלוי בטמפרטורה 30°C ולחות יחסית RH=30% במשך 3 חודשים (90 ימים). בתום התקופה הנ"ל (היום ה-110) התחדשה הבניה ועל העמוד הועמס עומס של 1000 kN. הלחות היחסית היתה RH = 25% והטמפרטורה 25°C. כעבור שנה, ביום ה-475, הועמסו על העמוד 2000 kN נוספים. הטמפרטורה והלחות היחסית נותרו כמו בתקופה הקודמת. תקופה זו נמשכה עד היום ה-2300 (כ-6.3 שנים).

הבדיקה האחרונה נעשתה ביום ה-11425 ובמשך כל התקופה הזאת (2300 עד 11425) תנאי הטמפרטורה והלחות היחסית לא השתנו.

יש לחשב את העיבורים בחתך כולל לזמן ארוך, בתום כל אחד מחמשת המועדים אשר נמנו לעיל, כולל את המאמצים בבטון ובפלדה בשים לב להידבקות בין הבטון והפלדה.

פתרון:

לפי נתוני הבעיה נחלק לחמש תקופות:

1. מ 0 ימים עד 20 יום - $RH = 100\%$ $t = 25^{\circ}\text{C}$ אשפרה
2. מ 20 יום ועד 110 ימים - $RH = 30\%$ $t = 30^{\circ}\text{C}$ אין עומס
3. מ 110 ימים ועד 475 ימים - $RH = 25\%$ $t = 25^{\circ}\text{C}$ נוסף עומס 1000 ק"ג
4. מ 475 ימים ועד 2300 ימים - $RH = 25\%$ $t = 25^{\circ}\text{C}$ נוסף עוד עומס 2000 ק"ג
5. מ 2300 ימים ועד 11425 ימים - $RH = 25\%$ $t = 25^{\circ}\text{C}$

אבל, במציאות, מאחר ולא ניתן לעבוד עם תקופות מצטברות אלא כל חישוב חייב להיערך מהתחלה (מראשית חיי האלמנט) חמשת התקופות תיראנה אחרת:

1. מ 0 ימים ועד 20 יום.
2. מ 0 ימים ועד 110 ימים.
3. מ 0 ימים ועד 475 יום.

4. מ 0 ימים ועד 2300 יום.

5. מ 0 ימים ועד 11425 יום.

1. התקופה הראשונה מ 0 ימים ועד 20 יום

זחילה אין מאחר ואין עומס.

הצטמקות עקב התייבשות אין מאחר ו $RH = 100\%$

הצטמקות עקב התקשות יש ואת זו נחשב:

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2.5(0.740 - 10) 10^{-6} = 45 10^{-6} \quad (21.3) \text{ לפי}$$

$$\beta_{as}(20) = 1 - e^{-(0.2 \cdot 20^{0.5})} = 0.591 \quad (21.4) \text{ לפי}$$

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{ca}(20) = -0.591 \cdot 45 10^{-6} = -2.66 10^{-5} \quad \text{ולכן}$$

2. התקופה השנייה מ 0 ימים ועד 110 יום

זחילה אין מאחר ואין עומס.

א. הצטמקות עקב התקשות יש ואת זו נחשב:

$$\beta_{as}(110) = 1 - e^{-(0.2 \cdot 110^{0.5})} = 0.877 \quad (21.4) \text{ לפי}$$

מי שלא לא משתנה לכל האורך זה $\varepsilon_{ca}(\infty)$ מאחר והוא תלוי בסוג הבטון בלבד.

$$\varepsilon_{ca}(110) = -0.877 \cdot 45 10^{-6} = -39.5 10^{-6} \quad \text{ולכן}$$

ב. ההצטמקות עקב התייבשות –

הצטמקות עקב התייבשות יש מאחר ו $RH = 30\%$ החל ב 20 יום.

זו התרחשה רק בתקופה בין 20 ל 110 ימים:

$$\beta_{RH} = 1.55 [1 - (30/100)^3] = 1.508 \quad (21.7) \text{ לפי}$$

ובהמשך, לפי (21.6) מאחר והצמנט הוא מסוג S:

$$\varepsilon_{cd,0} = -0.85 [(220 + 110 \alpha_{ds1}) e^{-(\alpha_{ds2} \frac{0.748}{10})}] 10^{-6} \cdot 1.508 = 45.5 10^{-5}$$

$$k_h = 0.85 \quad \text{מתוך טבלה 21.1} \quad h_0 = 2400.400/4.400 = 200\text{mm}$$

$$\beta_{ds}(110,20) = \frac{(110 - 20)}{(110 - 20) + 0.04 \cdot 200^{3/2}} = 0.443 \quad (21.8) \text{ לפי נוסחה}$$

ולבסוף ההצטמקות עקב התייבשות תהיה:

$$\varepsilon_{cd}(110) = -45.5 10^{-5} \cdot 0.85 \cdot 0.443 = -17.13 10^{-5} \quad (21.5) \text{ לפי}$$

סה"כ ההצטמקות בתום 110 ימים תהיה לפי (21.1):

$$\varepsilon_{sh}(110) = -(17.13 + 3.95) 10^{-5} = -21.08 10^{-5}$$

3. התקופה השלישית מ 0 ימים ועד 475 ימים

עבור תקופה זו יש לחשב:

א. הצטמקות עקב התקשות בין 0 ל 475 ימים.

ב. הצטמקות עקב התייבשות בין 20 ל 475 ימים.

ג. עיבור אלסטי וזחילה בין 110 ל 475 ימים בהשפעת 1000 ק"נ.

א. הצטמקות עקב התקשות

לפי החישוב באחת משתי התקופות הקודמות, עם שנוי הזמן בלבד:

$$\varepsilon_{ca}(475) = -45 \cdot 10^{-6} (1 - e^{-(0.2 \cdot 475^{0.5})}) = -45 \cdot 10^{-6} \cdot 0.987 = -4.44 \cdot 10^{-5}$$

ניתן לראות שהצטמקות זו כעבור כשנה ורבע הגיעה לסיומה כמעט.

ב. הצטמקות עקב התייבשות

כאן מתעוררת בעיה בגלל הלחות היחסית השונה בשני פרקי זמן שונים: בין 20 ל 110 ימים הלחות היחסית 30% ואילו בין 110 ל 475 ימים הלחות היחסית 25%. לא קיימת האפשרות לבצע חישוב מצטבר – לכל תקופה בנפרד ולחבר את התוצאות. יש לבחור באחד משני הנתונים.

עבור 90 הימים הראשונים הלחות היחסית 30% ובחישוב מקבלים $\beta_{RH} = 1.508$

אולם ב 365 הימים הבאים הלחות היחסית 25% והחישוב נותן $\beta_{RH} = 1.525$

ההבדל ביניהם רק 1.1%

והתקופה השנייה מהווה 80% מכלל התקופה, אי לכך נבחר את $\beta_{RH} = 1.525$ עבור ההמשך, מה גם שכל החישוב אינו ברמה כה גבוהה של דיוק.

$$\varepsilon_{cd,0} = -0.85 [(220 + 110 \alpha_{ds1}) e^{-\frac{0.13 \cdot 0.748}{10}}] 10^{-6} \cdot 1.525 = -46.06 \cdot 10^{-5}$$

$$\beta_{ds}(475,20) = \frac{(475 - 20)}{(475 - 20) + 0.04 \cdot 200^{3/2}} = 0.801$$

עבור הצטמקות זו:

והצטמקות עקב התייבשות תהיה:

$$\varepsilon_{cd}(475) = -46.06 \cdot 10^{-5} \cdot 0.85 \cdot 0.801 = -31.35 \cdot 10^{-5}$$

סה"כ ההצטמקות בתום 475 ימים תהיה לפי (21.1):

$$\varepsilon_{sh}(475) = -(31.35 + 4.44) \cdot 10^{-5} = -35.79 \cdot 10^{-5}$$

ג. זחילה

העומס הופעל בגיל 110 ימים וגרם לעיבור אלסטי. השטח שווה הערך של החתך הינו

$$A_{eq} = 400^2 + 3920 \left(\frac{200000}{28200} - 1 \right) = 183880 \text{mm}^2$$

לכן המאמץ בבטון הינו: $\sigma_c = \frac{1000000}{183880} = -5.44 \text{MPa}$ (בהנחת הידבקות מלאה):

$$\sigma_s = -5.44 \frac{200000}{28200} = -38.58 \text{MPa} \quad \text{המאמץ בפלדה הינו} :$$

העיבור האלסטי המשותף לפלדה ולבטון (כתנאי פתיחה) :

$$\varepsilon_c = \varepsilon_s = -\frac{5.44}{28200} = -19.310^{-5}$$

מקדם הזחילה הבסיסי הינו לפי נוסחה (21.12) :

$$\beta(f_{cm}) = 16.8 / (0.7 \cdot 48)^{0.5} = 2.90 \quad \text{ועבורו נודקק ל:} \quad \varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0)$$

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - 25/100}{0.1 h_0^{1/3}} \right] = 2.285 \quad \text{יהיה:} \quad \varphi_{RH} \quad \text{המקדם}$$

אמנם β_{t_0} מוגדר לפי נוסחה (21.15) אבל נצטרך לעשות התאמות לזמן t_0 באופן

הבא :

הטמפרטורה לאורך הזמן לא היתה 20°C ומידת הטמפרטורה השפיעה על זמן ההתחלה אשר לא יהיה 0 ימים. העומס הופעל ב גיל 110 ימים אולם גיל הבטון במועד זה לא יהיה 110 ימים אלא בוגר יותר מאחר ו"צמח" בטמפרטורה גבוהה מ 20°C . לפי נוסחה (21.20) נעריך את התקדמות הזמן והוא יתפרס כך :

$$t_T = 20 e^{-\left(\frac{4000}{273+25} - 13.65\right)} + 90 e^{-\left(\frac{4000}{273+30} - 13.65\right)} = 20 \cdot 1.255 + 90 \cdot 1.566 = 166$$

משמעות הדבר היא כי עקב הטמפרטורה הגבוהה מ 20° ניתן להניח זמן התחלה מבחינת גיל הבטון כ 166 ימים.

אבל הצמנט מסוג S גורם לעיכוב בהתפתחות הגיל של הבטון ואת זה נקבל מתוך (21.21) :

$$\beta(475) = \frac{1}{(0.1 + 163^{0.2})} = 0.348 \quad \text{ואז} \quad t_0 = 166 \left[\frac{9}{2 + 166^{1.2}} + 1 \right]^{-1} = 163$$

הצמנט האיטי גורם להאטה הבאה לבטוי ב 3 ימים. עד פה תיאום הזמן t_0 .

$$\varphi_0 = 2.285 \cdot 2.90 \cdot 0.348 = 2.31 \quad \text{כעת אפשר לחשב את } \varphi_0 :$$

להשלמת החישוב דרוש β_c ולפני זה β_H :

$$\beta_H = 1.5 [1 + (0.012 \cdot 25)^{18}] \cdot 200 + 250 = 550 \quad \text{בחישוב } \beta_c \quad \text{אין תיאום זמנים.}$$

$$\beta_c(475,110) = \left[\frac{(475 - 110)}{(475 - 110) + 550} \right]^{0.3} = 0.759$$

$$\varphi(475,110) = 2.31 \cdot 0.759 = 1.753$$

ועכשו עיבור הזחילה יהיה :

$$\varepsilon_{cc}(475,110) = -1.753 \cdot 19.31 \cdot 10^{-5} = -33.83 \cdot 10^{-5}$$

סכום העיבורים – אלסטי וזחילה יהיה :

$$\varepsilon_c + \varepsilon_{cc} = -(1 + 1.753) 19.31 10^{-5} = -53.16 10^{-5}$$

הערה : בזה לא ניגמר החישוב בשלב זה ובשלבים הקודמים לו. נצטרך להביא בחשבון כי הבטון אינו מופרד מהפלדה ויש אינטראקציה ביניהם באמצעות ההידבקות.

4. התקופה בין 0 ימים לבין 2300 ימים

עבור תקופה זו יש לחשב :

א. הצטמקות עקב התקשות בין 0 ל 2300 ימים.

ב. הצטמקות עקב התייבשות בין 20 ל 2300 ימים.

ג. עיבור אלסטי וזחילה בין 110 ל 2300 ימים בהשפעת 1000 ק"נ.

ד. עיבור אלסטי וזחילה בין 475 ל 2300 ימים שכן ב475 יום התוסף עומס 2000 ק"נ.

כאן אי אפשר לאחד את חישוב הזחילה עבור שני הכוחות 1000 ו 2000 קנ', לעומת זאת אפשר להפריד אותו מאחר וכל עיבור זחילה, ידוע מה מקורו והוא כופל את המרכיב האלסטי הנוצר רק בגין העומס שגרם להיווצרותו.

א. הצטמקות עקב התקשות

החישוב הקודם יחזור במלואו עם שנוי במועד האחרון במקום 475 :

$$\varepsilon_{ca}(2300) = -45 10^{-6} (1 - e^{-(0.2 2300)^{0.5}}) = -45 10^{-6} 0.99999 = -4.5 10^{-5}$$

בשים לב לאי דיוק המובנה בחישובים מסוג זה ניתן לראות כי מרכיב זה של ההצטמקות סיים את התפתחותו מזמן.

ב. ההצטמקות עקב התייבשות

בנושא של הלחות היחסית השונה בשני פרקי זמן שונים : בין 20 ל 110 ימים הלחות היחסית 30% ואילו בין 110 ל 2300 ימים הלחות היחסית 25%, דנו בשלב הקודם ולכן נמשיך לערוך את החישוב עם לחות יחסית של 25% לפי המנומק שם.

$$\varepsilon_{cd,0} = -46.06 10^{-5}$$

$$\beta_{ds}(2300,20) = \frac{(2300 - 20)}{(2300 - 20) + 0.04 200^{3/2}} = 0.953$$

אולם כאן :

וההצטמקות עקב התייבשות תהיה :

$$\varepsilon_{cd}(2300) = -46.06 10^{-5} 0.85 0.953 = -37.31 10^{-5}$$

סה"כ ההצטמקות בתום 2300 ימים תהיה לפי (21.1) :

$$\varepsilon_{sh}(110) = -(37.31 + 4.5) 10^{-5} = -41.81 10^{-5}$$

ג. עיבור אלסטי וזחילה בין 110 ל 2300 ימים בהשפעת 1000 ק"נ.

חישוב זה יהיה זהה לחישוב אשר בתקופה השלישית ורק במקום 475 ימים יירשם 2300 ימים.

העומס כזכור הופעל בגיל 110 ימים וגרם מאמץ בבטון $\sigma_c = -5.44\text{MPa}$ ולעיבור

אלסטי בבטון ובפלדה $\varepsilon_c = \varepsilon_s = -19.310^{-5}$ נמשיך להניח התפתחות זחילה

ליניארית. אי לכך:

$$\beta_H = 550 \quad \varphi_0 = 2.31 \quad \beta(110) = 0.348 \quad t_0 = 163 \text{ ימים} \quad t_T = 166 \text{ ימים}$$

$$\beta_c(2300,110) = \left[\frac{(2300 - 110)}{(2300 - 110) + 550} \right]^{0.3} = 0.935 \quad \text{אבל}$$

$$\varphi(2300,110) = 2.31 \cdot 0.935 = 2.16 \quad \text{ואז}$$

$$\varepsilon_{cc}(2300,110) = -2.16 \cdot 19.31 \cdot 10^{-5} = -41.71 \cdot 10^{-5} \quad \text{העיבור עקב זחילה יהיה:}$$

סכום העיבורים – אלסטי וזחילה (בגין 1000 קני) יהיה:

$$\varepsilon_c + \varepsilon_{cc} = -(1 + 2.16) \cdot 19.31 \cdot 10^{-5} = -61.02 \cdot 10^{-5}$$

ד. עיבור אלסטי וזחילה בין 475 ל 2300 ימים

475 יום התוסף עומס 2000 ק"נ.

עומס זה, בניגוד לעומס של 1000 ק"נ מופעל מגיל 475 ימים ויש לערוך עבורו חישוב ניפרד, המבטא בחשבון את היום בו הוא מופעל ושיערוך מחודש של יום ההפעלה בשים לב לשנויי הטמפרטורה עד לאותה התקופה וכן לסוג הצמנט.

העומס גרם למאמץ בבטון $\sigma_c = -10.88\text{MPa}$ ולעיבור אלסטי בבטון ובפלדה

$$\varepsilon_c = \varepsilon_s = -38.6210^{-5} \quad \text{(בהנחת הידבקות מלאה).}$$

שוב שני מרכיבים במקדם הזחילה הבסיסי $\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0)$ נשארים אבל

עבור β_{t_0} יש לעשות הערכה מחודשת.

$$t_T = 20 e^{-\left(\frac{4000}{273+25}\right)^{-13.65}} + 90 e^{-\left(\frac{4000}{273+30}\right)^{-13.65}} + 365 e^{-\left(\frac{4000}{273+25}\right)^{-13.65}} = 20 \cdot 1.255 + 90 \cdot 1.566 + 365 \cdot 1.255 = 624$$

כלומר: הטמפרטורה העודפת "קידמה" את גיל הבטון (ובאופן כזה תשפיע על הקטנת משך זמן הזחילה).

העיכוב עקב סוג הצמנט (מסוג S) יהיה:

$$\beta(2300) = \frac{1}{(0.1 + 622^{0.2})} = 0.269 \quad \text{ואז} \quad t_0 = 624 \left[\frac{9}{2 + 624^{1.2}} + 1 \right]^{-1} = 621.5$$

קטן הפעם כעת נחשב שוב את $\varphi_0 = 2.285 \cdot 2.90 \cdot 0.269 = 1.783$. ניתן לראות כי

לעומת ערכו המקביל כאשר הועמס העומס של 1000 ק"נ וזה מפני שהבטון בוגר יותר, מאחר וזמן ההעמסה לעומת העמסת ה 1000 ק"נ התרחק מיום יציקת הבטון הזה ועל כן יש הקלה בזחילה.

$$\beta_c(2300,475) = \left[\frac{(2300 - 475)}{(2300 - 110) + 550} \right]^{0.3} = 0.924$$

$$\varphi(2300,475) = 1.783 \cdot 0.924 = 1.648 \quad \text{ועכשו עיבור הזחילה יהיה:}$$

$$\varepsilon_{cc}(2300,475) = -1.648 \cdot 38.62 \cdot 10^{-5} = -63.65 \cdot 10^{-5}$$

העיבור הכולל – אלסטי + זחילה הינו (רק עקב ה 2000 ק"נ) :

$$\varepsilon_c + \varepsilon_{cc} = -(1 + 1.648) \cdot 38.62 \cdot 10^{-5} = -102.27 \cdot 10^{-5}$$

הערה : שוב, בזה לא ניגמר החישוב בשלב זה ובשלבים הקודמים לו. נצטרך להביא בחשבון כי הבטון אינו מופרד מהפלדה ויש אינטראקציה ביניהם באמצעות ההידבקות.

5. התקופה בין 0 ימים לבין 11425 ימים

עבור תקופה זו יש לחשב :

א. הצטמקות עקב התקשות בין 0 ל 11425 ימים.

ב. הצטמקות עקב התייבשות בין 20 ל 11425 ימים.

ג. עיבור אלסטי וזחילה בין 110 ל 11425 ימים בהשפעת 1000 ק"נ שנוסף בגיל 110 ימים

ד. עיבור אלסטי וזחילה בין 475 ל 11425 ימים בגין העומס 2000 ק"נ שנוסף בגיל 475 ימים

כמו קודם בתקופה 4 נפריד את חישוב הזחילה עבור שני הכוחות 1000 ו 2000 קנ'.

א. הצטמקות עקב התקשות בין 0 ל 11425 ימים.

$$\varepsilon_{ca}(11425) = -4.5 \cdot 10^{-5}$$

ראינו כי זו התייצבה כבר בתקופה 4 לכן לא נחשב מחדש :

ב. הצטמקות עקב התייבשות בין 20 ל 11425 ימים.

כמו בתקופה הרביעית נמשיך לערוך את החישוב עם לחות יחסית של 25% לפי המנומק שם.

$$\varepsilon_{cd,0} = -46.06 \cdot 10^{-5}$$

כמו בתקופה השלישית והרביעית :

נחשב אם כי ברור שההבדל בין תקופה זו לתקופה 4 יהיה קטן :

$$\beta_{ds}(11425,20) = \frac{(11425 - 20)}{(11425 - 20) + 0.04 \cdot 200^{3/2}} = 0.990$$

והצטמקות עקב התייבשות תהיה :

$$\varepsilon_{cd}(11425) = -46.06 \cdot 10^{-5} \cdot 0.85 \cdot 0.990 = -38.77 \cdot 10^{-5}$$

סה"כ ההצטמקות בתום 11425 ימים תהיה לפי (21.1) :

$$\varepsilon_{sh}(11425) = -(38.77 + 4.5) \cdot 10^{-5} = -43.27 \cdot 10^{-5}$$

ג. עיבור אלסטי וזחילה בין 110 ל 11425 ימים בהשפעת 1000 ק"נ

גם כאן החישוב זה יהיה זהה לחישוב אשר בתקופה השלישית ורק במקום 475 ימים יירשם 11425 ימים.

העומס כזכור הופעל בגיל 110 ימים וגרם מאמץ בבטון $\sigma_c = -5.44\text{MPa}$ ולעיבור אלסטי בבטון ובפלדה $\varepsilon_c = \varepsilon_s = -19.310^{-5}$ נמשיך להניח התפתחות זחילה ליניארית.

שוב לפי החישוב המקביל מהתקופה השלישית בהבדל – התקופה כעת מתמשכת עד 11425 ימים אי לכך:

$$\beta_H = 550 \quad \varphi_0 = 2.31 \quad \beta(110) = 0.348 \quad t_0 = 163 \text{ ימים} \quad t_T = 166 \text{ ימים}$$

$$\beta_c(11425,110) = \left[\frac{(11425 - 110)}{(11425 - 110) + 550} \right]^{0.3} = 0.986 \quad \text{אולם}$$

$$\varphi(11425,110) = 2.31 \cdot 0.986 = 2.28 \quad \text{ואז}$$

העיבור עקב זחילה יהיה: $\varepsilon_{cc}(11425,110) = -2.28 \cdot 19.31 \cdot 10^{-5} = -43.98 \cdot 10^{-5}$ סכום העיבורים – אלסטי וזחילה יהיה:

$$\varepsilon_c + \varepsilon_{cc} = -(1 + 2.28) \cdot 19.31 \cdot 10^{-5} = -63.34 \cdot 10^{-5}$$

ד. עיבור אלסטי וזחילה בין 475 ל 11425 ימים בגין העומס 2000 ק"נ
עומס זה נוסף בגיל 475 ימים.

בהמשך ולפי התקופה הרביעית:

כל הערכים הבסיסיים כבר חושבו ויש רק להביא בחשבון את המועד האחרון – 11425 ימים.

העומס גרם מאמץ (נוסף) בבטון $\sigma_c = -10.88\text{MPa}$ ולעיבור אלסטי בבטון ובפלדה $\varepsilon_c = \varepsilon_s = -38.6210^{-5}$ (בהנחת הידבקות מלאה).

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0) = 1.783 \quad \text{מועד ההתחלה כבר מתואם ולכן:}$$

$$\beta_c(11425,475) = \left[\frac{(11425 - 475)}{(11425 - 475) + 550} \right]^{0.3} = 0.985$$

$$\varphi(11425,475) = 1.783 \cdot 0.985 = 1.756 \quad \text{ועכשו עיבור הזחילה יהיה:}$$

$$\varepsilon_{cc}(11425,475) = -1.756 \cdot 38.62 \cdot 10^{-5} = -67.82 \cdot 10^{-5}$$

העיבור הכולל – אלסטי + זחילה הינו:

$$\varepsilon_c + \varepsilon_{cc} = -(1 + 1.756) \cdot 38.62 \cdot 10^{-5} = -106.44 \cdot 10^{-5}$$

חישוב המאמצים במוטות הזיון ובבטון בשלבים השונים

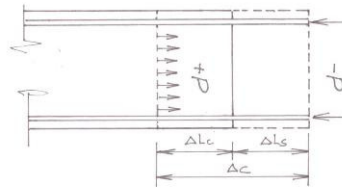
לאורך החישוב הנחנו שכל המאמצים והעיבורים המתפתחים בבטון הם בלתי תלויים בפלדה והנחה זו יש לתקן כעת. מצד שני, לצורך קביעת המאמצים/עיבורים אלסטיים בבטון ובפלדה, הנחנו הידבקות מושלמת. שתי הנחות אלו לא יכולות לדור ביחד שכן אין קומפטיביליות בחתך. בתיקונים אלה יעסוק סעיף זה מתוך פתרון הבעיה.

1. התקופה 0 – 20 ימים

העיבורים בתקופה זה זניחים מאחר והיתה לחות יחסית 100% ולא היה עומס. עבור תקופה זו לא נחשב מאמצים אם כי מה שקורה בה לא יוזנח אלא יבוא לבטוי בתקופות הבאות.

2. התקופה 0 – 110 ימים

לא יה עומס חיצוני. לא היתה זחילה. סה"כ העיבורים בבטון היו כתוצאה מהצטמקות והם היו $\epsilon_{sh} = -21.08 \cdot 10^{-5}$. כמודל חישובי אפשר להניח הפרדה בין הבטון לפלדה. בפלדה לא היו שום כוחות ולכן שום מאמצים ולא עיבורים. הבטון התקצר לעומת הפלדה ב $\Delta c = -21.08 \cdot 10^{-5} L$ כאשר L אורך המוט. מיד נראה כי מאחר ומדובר בכוחות פנימיים לאורך המוט L אין השפעה על החישוב. נניח כעת קיום כוח פנימי P אשר גורם למתיחה בבטון ויוצר בו התארכות Δc ואותו הכוח מפעיל לחיצה על מוטות הפלדה וגורם להתקצרותם - Δs . מטרת הפעלת הכוח הפנימי לגרום לכך שתיווצר קומפטיביליות בחתך וביטול ההפרדה המלאכותית אשר הנחנו לצורך קיום המודל (ראה ציור 21.1).



ציור 21.1

$$\Delta c + \Delta s = \Delta c \quad \Delta s = \frac{P L}{A_s E_s} \quad \Delta c = \frac{P L}{A_c E_c}$$

פתרון המשואה הזאת נותן: $P = 153639 \text{ N}$ $\sigma_c = +0.98 \text{ MPa}$ $\sigma_s = -39.19 \text{ MPa}$

3. התקופה 0 – 475 ימים

בתקופה זו יש הצטמקות ויש זחילה.

עבור חישוב הזחילה חישבנו את המאמצים ואת העיבורים האלסטטיים. לצורך אלה הנחנו חתך שווה ערך, אי לכך אלה לא יובאן בחישוב הבא אלא יצורפו לתוצאות החישוב.

נניח שוב מודל של הפרדה מוחלטת בין הבטון והפלדה, כאשר העיבורים עקב הזחילה והעיבורים עקב הצטמקות גורמים להתקצרות הבטון לעומת הפלדה.

תוצאות החישוב בסוף תקופה זו היו: $\epsilon_{sh} = -35.79 \cdot 10^{-5}$ $\epsilon_{cc} = -33.83 \cdot 10^{-5}$

וביחד: $\epsilon_{cc} + \epsilon_{sh} = -33.83 \cdot 10^{-5} - 35.79 \cdot 10^{-5} = -69.62 \cdot 10^{-5}$
 התקצרות הבטון לעומת הפלדה היתה $\Delta c = -69.62 \cdot 10^{-5} L$.

נניח שקיים כוח פנימי P אשר גורם למתיחה בבטון ולחיצה בפלדה עד להשגת קומפטיביליות בחתך אשר משמעה כי התארכות Δl_c של הבטון והתקצרות מוטות הפלדה - Δl_s תהיה שווה ל Δc – התקצרות הבטון עקב זחילה והצטמקות (ציור 21.1).

$$\Delta l_c + \Delta l_s = \Delta c = 69.62 \cdot 10^{-5} \quad \Delta l_s = \frac{P L}{A_s E_s} \quad \Delta l_c = \frac{P L}{A_c E_c}$$

הפעם: $P=463.3 \text{ kN}$

$$\sigma_s = -118.19 \text{ MPa} \quad \sigma_c = +2.97 \text{ MPa} \quad \text{המאמצים עקב הכוח הפנימי:}$$

$$\sigma_s = -38.58 \text{ MPa} \quad \sigma_c = -5.44 \text{ MPa} \quad \text{המאמצים עקב 1000 ק"ג:}$$

$$\sigma_s = -156.77 \text{ MPa} \quad \sigma_c = -2.47 \text{ MPa} \quad \text{סה"כ המאמצים:}$$

4. התקופה מ 0 – 2300 ימים

בתקופה זו יש הצטמקות ויש זחילה.

עבור חישוב הזחילה חישבנו את המאמצים ואת העיבורים האלסטיים. לצורך אלה כמו קודם, הנחנו חתך שווה ערך, אי לכך אלה לא יובאו בחישוב הבא אלא יצורפו לתוצאות החישוב.

כמו בתקופה השלישית נניח שוב מודל של הפרדה מוחלטת בין הבטון והפלדה, כאשר העיבורים עקב הזחילה והעיבורים עקב ההצטמקות גורמים להתקצרות הבטון לעומת הפלדה.

$$\epsilon_{sh} = -41.81 \cdot 10^{-5} \quad \text{תוצאות החישוב בסוף תקופה זו היו:}$$

$$\epsilon_{cc} = -41.71 \cdot 10^{-5} \quad \text{זחילה עקב 1000 ק"ג}$$

$$\epsilon_{cc} = -63.65 \cdot 10^{-5} \quad \text{זחילה עקב 2000 ק"ג}$$

$$\Sigma \epsilon = -147.17 \cdot 10^{-5} \quad \text{סה"כ עיבורים לאיזון}$$

העיבורים הנ"ל, כמו בחישוב בתקופה השלישית, הם העיבורים הלא מאוזנים.

$$\Delta c = -147.17 \cdot 10^{-5} L \quad \text{נניח כי הבטון מתקצר לעומת הפלדה ב}$$

נניח כוח פנימי P (ראה תקופה 3) הגורם למתיחה בבטון והתארכות Δl_c של הבטון

ובמקביל גורם להתקצרות בפלדה - Δl_s . מאחר ו $\Delta l_c + \Delta l_s = \Delta c$ נקבל:

$$P = 979.38 \text{ kN} \quad \text{ובעקבות כך} \quad \frac{P L}{A_c E_c} + \frac{P L}{A_s E_s} = 147.17 \cdot 10^{-5} L$$

המאמצים הפנימיים המתעוררים

$$\sigma_s = -247.84 \text{ MPa} \quad \sigma_c = +6.27 \text{ MPa} \quad \text{עקב הכוחות הפנימיים הם:}$$

$$\sigma_s = -38.58 \text{ MPa} \quad \sigma_c = -5.44 \text{ MPa} \quad \text{המאמצים בחתך עקב העומס 1000 ק"ג}$$

$$\sigma_s = -77.16 \text{ MPa} \quad \sigma_c = -10.88 \text{ MPa} \quad \text{המאמצים בחתך עקב העומס 2000 ק"ג}$$

$$\sigma_s = -363.58 \text{ MPa} \quad \sigma_c = -10.05 \text{ MPa} \quad \text{סה"כ המאמצים בתום התקופה 4}$$

5. התקופה מ 0 – 11425 ימים

בתקופה זו יש הצטמקות ויש זחילה.
 עבור חישוב הזחילה חישבנו את המאמצים ואת העיבורים האלסטיים. לצורך אלה כמו קודם, הנחנו חתך שווה ערך, אי לכך אלה לא יובאו בחישוב הבא אלא יצורפו לתוצאות החישוב.

תוצאות החישוב בסוף תקופה זו היו: $\epsilon_{sh} = -43.27 \cdot 10^{-5}$

זחילה עקב 1000 קני $\epsilon_{cc} = -43.98 \cdot 10^{-5}$

זחילה עקב 2000 קני $\epsilon_{cc} = -67.82 \cdot 10^{-5}$

סה"כ עיבורים לאיזון $\Sigma \epsilon = -155.07 \cdot 10^{-5}$

העיבורים הנ"ל, כמו בחישוב בתקופה השלישית, הם העיבורים הלא מאוזנים.

נניח כי הבטון מתקצר לעומת הפלדה ב $\Delta c = -155.07 \cdot 10^{-5} L$.

נניח כוח פנימי P (ראה תקופה 3) הגורם למתיחה בבטון והתארכות Δc של הבטון

ובמקביל גורם להתקצרות בפלדה - Δs . מאחר ו $\Delta c + \Delta s = \Delta c$ נקבל:

$$P = 1031.95 \text{ kN} \quad \text{ובעקבות כך} \quad \frac{P L}{A_c E_c} + \frac{P L}{A_s E_s} = 155.07 \cdot 10^{-5} L$$

המאמצים הפנימיים המתעוררים

עקב הכוחות הפנימיים הם: $\sigma_s = -263.25 \text{ MPa}$ $\sigma_c = +6.61 \text{ MPa}$

המאמצים בחתך עקב העומס 1000 קני $\sigma_s = -38.58 \text{ MPa}$ $\sigma_c = -5.44 \text{ MPa}$

המאמצים בחתך עקב העומס 2000 קני $\sigma_s = -77.16 \text{ MPa}$ $\sigma_c = -10.88 \text{ MPa}$

סה"כ המאמצים בתום התקופה 5: $\sigma_s = -378.99 \text{ MPa}$ $\sigma_c = -9.71 \text{ MPa}$

סיכום

ניתן לראות בתרגיל ארוך זה את כל שלבי החישוב לזמן ארוך – זחילה והצטמקות. אפשר להיווכח כי ההצטמקות והזחילה גורמים למאמצים פנימיים גבוהים ביותר בחתך. ניתן לראות כי התהליך המנוסח ב EC2 עובד מצוין ובכל שלב מוכח ההגיון והרציו מאחורי כוונותיו.

בחישוב זה לא הובאה בחשבון רלקסציה במאמצים בפלדה. היא לא הובאה בחשבון מתוך חוסר מידע מספיק אולם גם מתוך הכרה ברורה שאם בפלדה לבטון דרוך היא קטנה הרי שבפלדה לבטון מזוין רגיל היא תהיה עוד יותר קטנה (אחוזים בודדים אם בכלל).

יש מרכיב אחד שנותר עלום והוא האם יש רלקסציה או הפסדי מאמצים בהידבקות, דבר אשר יגרום לשנויים במערך המאמצים שהוצגו כאן.