

6. פרק פלסטי, תכן לפי שיטת הפרקים הפלסטיים

6.1 שיטת הפרקים הפלסטיים

שיטת הפרקים הפלסטיים היא שיטת תכן כללית המבוססת על התורה הפלסטית. היא אינה אופיינית או מיוחדת לאלמנטים מבטון מזוין. מאחר ואין מטרת פרק זה להוות פרק יסוד בלימוד שיטת חישוב פלסטית אלא לפתוח צוהר אל ההתנהגות הפלסטית של אלמנט מבטון מזוין, נסתפק בעיקרי השיטה כדלקמן. צוין מראש: השיטה הזאת ושיטות פלסטיות (שיטות הרס מבחינה סטטית) אחרות מנוסחות על מומנט התסבולת אשר הינו המומנט בו הזיון בחתך מגיע לכניעה (נזילה), כלומר לחוזק האופייני שלו. אין שיטות פלסטיות בהן החתך מגיע להרס פריד, אי לכך במילא מדובר בחתך בו החוליה החלשה היא האיזור המתוח בחתך. אולם, באנליזה של אלמנטים מבטון מזוין אנחנו לעולם לא מנסחים את הבעיה על מומנט ההרס אלא על מומנט ה"תכן". ההבדל בין שניהם הוסבר בפרק 3. אי לכך: כדי לא לאבד את הכלליות מצד אחד, ומצד שני על מנת להישאר עיקביים עם "שפת התכן" שלנו, נניח בדיון שלהלן כי כל הניסוח, אשר נכון ברמת מומנטי הרס נכון ותקף גם ברמת מומנטי תכן וכל מה שייאמר להלן על "מומנטי הרס" כאילו נאמר על מומנט תכן גם כן.

א. במספר חתכים של האלמנט (כאן – קווי בלבד) המומנט יגיע לערך גבולי – M_u אשר יסמל את תסבולת החתך לכפיפה. חתכים אלה יהיו בדרך כלל במקומות המומנטים המקסימליים בסכימה הסטטית הקווית שבדיון. בהגיע המומנט בחתך לערך M_u לא יעלה יותר גודלו שם.

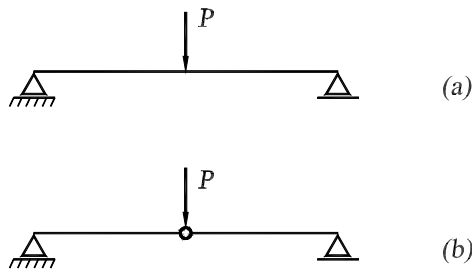
ב. בהגיע המומנט בחתך ל M_u כל תוספת עומס בחתך זה או אחר לאורך האלמנט תביא לתוספת סיבוב (לא אלסטי) בחתך בו פועל M_u .

ג. לצורך פשטות הניסוח נאמר כי יכולים להיווצר לאורך האלמנט מספר חתכים בהם המומנט יגיע לערך M_u אך כל הדפורמציות לאורך האלמנט יתרכזו בחתכים אלה (בסיבובים בהם) וקטעי האלמנטים בין חתכים אלה ישארו קשיחים אין סופית. כוחות סטטיים יהיו בהם אולם בהיותם קשיחים אין סופית – לא תהיה בהם דפורמציה, כלומר – העבודה האלסטית אשר היתה אמורה להתבצע על קטעי האלמנט בין החתכים המגיעים ל M_u תהיה שווה אפס. מכאן שכל העבודה הפנימית מתרכזת

באותם החתכים בהן יכול להגיע המומנט ל M_u והנחנו כי רק שם יכול להתרחש סיבוב.

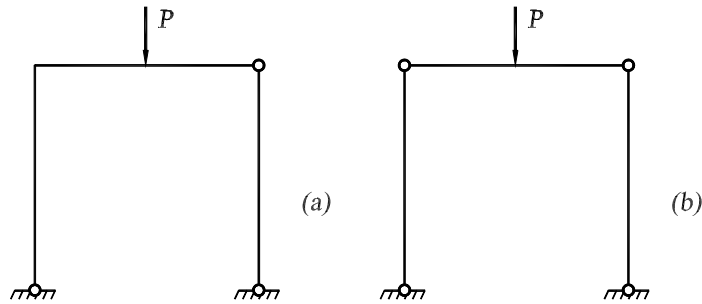
ד. מכאן שכל העבודה הפנימית תתבטא בעבודת המומנטים M_u על הסיבובים בחתכים המסוימים בלבד ואילו העבודה החיצונית תהיה עבודת הכוחות החיצוניים. גישה זו היא שיטת אנליזה של מבנים בשיטה הפלסטית המכונה גם - lumped plasticity method , או ריכוז כל העבודה הפנימית כעבודת פרקים פלסטיים במקומות מרוכזים בלבד.

ה. לחתכים בהם המומנט הגיע ל M_u ושם יכול להתבצע סיבוב ניקרא פרקים פלסטיים. מספר הפרקים הפלסטיים אשר יכול להיווצר תלוי במידת אי הסיום הסטטי. הפרק הפלסטי הראשון אשר גורם למערכת להפוך למכניזם (אבדן היכולת לקיים שווי משקל והפיכתה לגופים היכולים לבצע תנועה חופשית של גוף קשיח ללא תוספת עומס) הוא גם האחרון אשר יכול להיווצר בה. בחינת השויון בין אנרגיה פנימית לחיצונית היא משוואת שווי המשקל לפתרון הבעיה לפי שיטת הפרקים הפלסטיים.



ציור 6.1

בשתי הדוגמאות הבאות ניתן להדגים את הנ"ל: בציור a 6.1 נתונה קורה מסוימת סטטית אשר תיהפך למכניזם עם היווצר פרק פלסטי אחד בה, למשל – במקום פעולת העומס המרוכז P (ציור b 6.1). בציור a 6.2 נתונה מסגרת פשוטה בת שלושה פרקים, אך עדיין מסוימת סטטית. עם התווסף פרק פלסטי רביעי (בפינה למעלה משמאל) – ציור b 6.2 הופכת המסגרת למכניזם. שיטת הפרקים הפלסטיים הינה חלק, לפי התורה הפלסטית, ממשפחת הפתרונות הכפופים ל upper bound theorem (או חסומים מלמעלה) אשר משמעותם



ציור 6.2

– זהו העומס המירבי אשר אלמנט בעל החוזקים הנתונים מסוגל לשאת. מטרת התכן לפי שיטת הפרקים הפלסטיים הינה להביא לניצול רציונלי יותר (בהשוואה לשיטה האלסטית) של האלמנטים תוך מתן אפשרות של יותר מחתך אחד להגיע למיצוי מלא של החוזק. הדוגמאות הבאות מנסות לתאר מימוש רעיון זה.

דוגמה מס' 1

קורה בת מיפתח אחד אשר סמכיה הם ריתום פרק עמוסה עומס בודד P באמצע המיפתח (ציור 6.3 a). בחישוב אלסטי המומנט בסמך A יהיה:

$$M_A = \frac{3}{16} P l \quad (6.1)$$

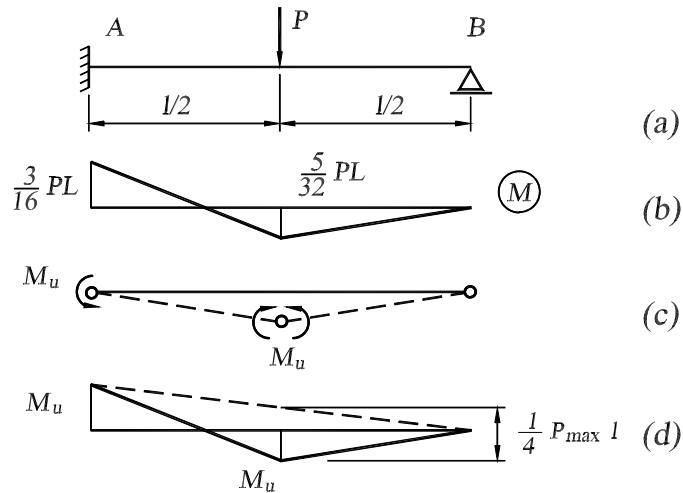
והמומנט בשדה, מתחת לכוח יהיה קטן יותר. אם המומנט המקסימלי אשר חתך הקורה יוכל לקבל הינו M_u הרי ש:

$$M_u = M_A \quad (6.2)$$

ובהנחה של חתך אחיד המומנט בסמך A ($M_u = M_A$) יהיה הקובע את גודל הכוח P_{max} (ציור 6.3 b):

$$M_u = \frac{3}{16} P_{max} l \quad (6.3)$$

$$P_{max} = 5.33 \frac{M_u}{l} \quad \text{או:}$$



ציור 6.3

ברם, לפי שיטת הפרקים הפלסטיים, נהיה מוכנים להניח כי בהגיע המומנט בסמך A למומנט המקסימלי M_u העומס יוכל להמשיך לעלות (כפוף לכך כי מתאפשר סיבוב מתאים בסמך A) עד אשר במקום נוסף, מתחת לכוח P , ייווצר פרק פלסטי, כלומר המומנט גם שם יגיע לערך M_u (ציור 6.3 c). מאחר ובוה נוצר מכניזם – זהו סיום התהליך. כעת, עם הגיע הקורה בשני חתכים למומנט ההרס M_u נוכל לאמוד מחדש את ערכו של הכוח המקסימלי P_{max} (ראה ציור 6.3 d) וערכו נתון על ידי:

$$M_u + \frac{1}{2} M_u = \frac{1}{4} P_{max} l \quad (6.4)$$

או P_{max} יהיה:

$$P_{max} = 6 \frac{M_u}{l} \quad (6.5)$$

השוואה בין (6.3) ל (6.5) מצביעה על כך שבגישה זו P_{max} גדל ב 12%.

דוגמה מס' 2

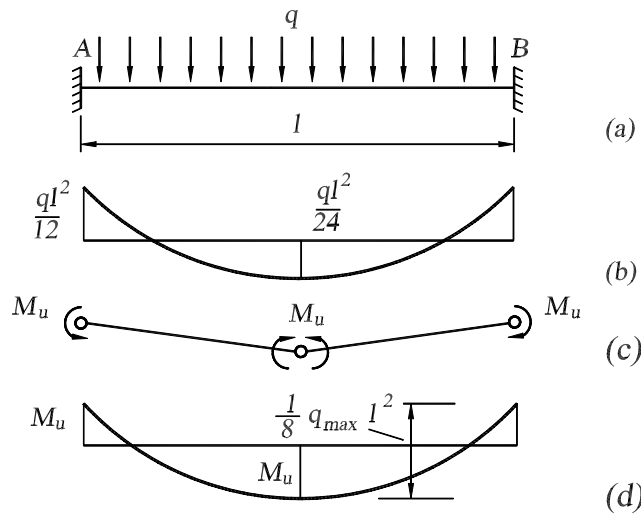
קורה בת מיפתח אחד, דו רתומה, עמוסה עומס מפורס אחיד q (ציור 6.4 a). בחישוב אלסטי המומנטים המקסימליים מתקבלים בסמכים A ו B ואם נניח כי ערכו

של מומנט הריתום שם מגיע למומנט התסבולת M_u :

$$M_u = M_A = \frac{1}{12} q_{max} l^2 \quad (6.6)$$

הרי שהעומס המירבי אשר קורה זו תוכל לשאת יהיה q_{max} :

$$q_{max} = 12 \frac{M_u}{l^2} \quad (6.7)$$



ציור 6.4

לפי שיטת הפרקים הפלסטיים, בהגיע המומנט בסמכים ל M_u ובמחיר תוספת סיבוב בריתומים (כלומר – חריגה מתנאי הריתום, שכן בריתום מלא אין סיבוב כלל), ימשך העומס לעלות עד אשר חתך נוסף, באמצע הקורה, יגיע גם כן ל M_u . ברגע זה נוצר מכניזם וכאן נוכל לערוך את שווי המשקל (ציור 6.4 d) ולקבוע כי:

$$2 M_u = \frac{1}{8} q_{max} l^2 \quad (6.8)$$

ולפי זה העומס המקסימלי יהיה:

$$q_{max} = 16 \frac{M_u}{l^2} \quad (6.9)$$

השוואה בין (6.7) ל (6.9) מצביעה על עליה ב q_{max} ב 33%.

לסיכום:

א. שיטת הפרקים הפלסטיים פותחת אפשרות לניצול חוזק האלמנטים בצורה יעילה יותר תוך מתן אפשרות למספר גדול יותר של חתכים להגיע למיצוי החוזק וזאת בהשוואה לשיטה האלסטית, על פיה העומס נקבע עם הגיע החתך הראשון לחוזק החתך המירבי.

ב. כמובן שמה שנאמר ב א' לעיל נכון לגבי אלמנט בעל חוזק קבוע לאורכו. באלמנטים מבטון מזוין אנחנו שולטים בחוזק באמצעות שליטה על כמויות הזיון, אבל זה לא מחליש את הטיעון כאן אלא מחזק אותו.

ג. העובדה שנוצר פרק פלסטי ראשון ואחריו נוסף, ואחריו אולי עוד אחד וכו', מלווה בתוספת סיבוב בכל חתך בו נוצר קודם לכן פרק פלסטי, עד רגע היווצרות הפרק הפלסטי האחרון. תהא מידת הסיבוב אשר תהא – היא צריכה להיות מובטחת. אבטחת כושר הסיבוב בפרקים הפלסטיים נעשית באמצעות אבטחת משיכות לחתכים (ductility) כפי שניראה בהמשך. בלי הקניית משיכות לחתכים בהם עשוי להיווצר הפרק הפלסטי אין כל אפשרות לממש את השיטה.

ד. בכל הדיון לעיל לא הוזכרו כלל שני מרכיבים חשובים בתכן אלמנטים מבטון מזוין – הגבלת הסדיקה והכפף. אלה שיקולים מכריעים בתכן אלמנטים מבטון מזוין אך הם שייכים לתכן במצב גבולי של שרות. שיטת הפרקים הפלסטיים, כמו כל שיטת הרס אחרת (חישוב הגדלים הסטטיים באמצעות שיטת הרס) לא נותנת תשובה למצב גבולי של שרות. לבדיקת מצב זה יש להיעזר בשיטת חישוב אחרת (למשל השיטה האלסטית). אין סתירה בין בדיקת מצב גבולי של הרס בשיטת הפרקים הפלסטיים לבין שיטה אלסטית לצורך בדיקת מצב גבולי של שרות. כל אחת מהן נעשית תחת עומס אחר.

6.2 פרק פלסטי באלמנט מבטון מזוין

פרק פלסטי באלמנט מבטון מזוין הנתון בכפיפה והגורמים המשפיעים על היווצרותו נדון באופן עקרוני בסעיף זה.

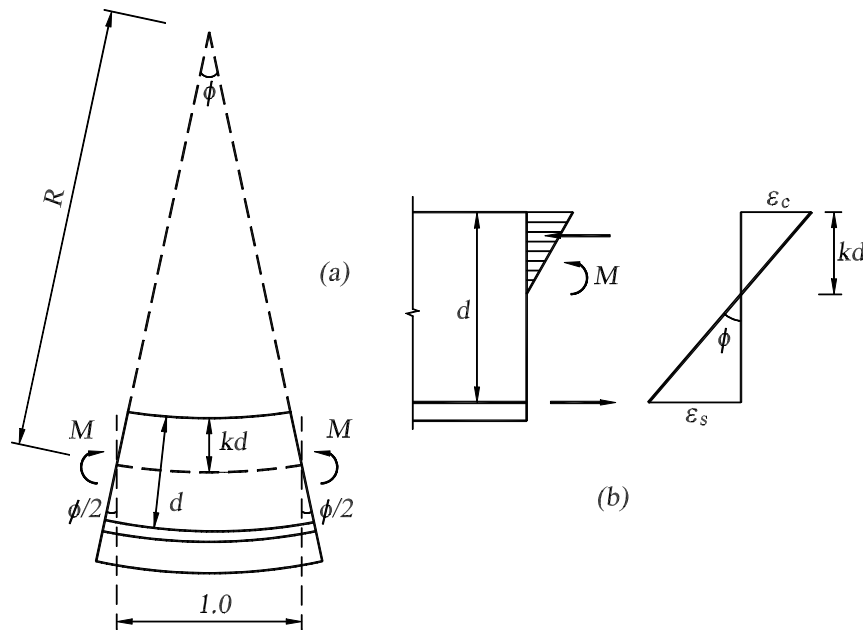
6.2.1 מומנט ועקמומיות

בקטע אלמנטרי מתוך אלמנט מבטון מזוין, באורך יחידה, הנתון לפעולת מומנט כפיפה M נוצרת עקמומיות ρ (או $1/R$ כאשר R - רדיוס העקמומיות). שני

הזווית בין קצוות הקטע האלמנטרי בעל אורך יחידה יהיה $\phi = (1.0 \rho)$ כמסומן בציור 6.5 a .

את העקמומיות ניתן לבטא על ידי :

$$\rho = \frac{1}{R} = \frac{\phi}{1.0} = \frac{M}{EI} \quad (6.10)$$



ציור 6.5

EI ב (6.10) מסמן את הקשיחות לכפיפה בצורה מוכללת (צריכה להיכלל שם השפעת הסדיקה, ההחלקה ההדדית בין מוטות הפלדה לבטון הסובב אותם, אי הליניאריות של החומרים – בטון בעיקר) . אם נביא בחשבון את הנחת קירקהוף, אשר לגבי אלמנט הנתון בכפיפה טהורה אין ערעור עליה, ניתן לבטא את העקמומיות גם באמצעות העיבורים הממוצעים של הבטון והפלדה, בתחום הנדון, לפי ציור 6.5 b בו ϵ_c הינו העיבור בבטון בסיב הלחוץ ביותר בחתך בעל גובה פעיל d ו ϵ_s הינו העיבור בציר מרכז הכובד של מוטות הזיון.

$$\frac{I}{R} = \frac{\phi}{1.0} = \frac{\epsilon_c}{kd} = \frac{\epsilon_s}{(1-k)d} = \frac{\epsilon_c + \epsilon_s}{d} \quad (6.11)$$

הביטוי (6.11) הינו העקמומיות בחתך מבוטאת בכמה אופנים וחשיבותו גדולה להמשך הדיון במשיכות ובפרק פלסטי.

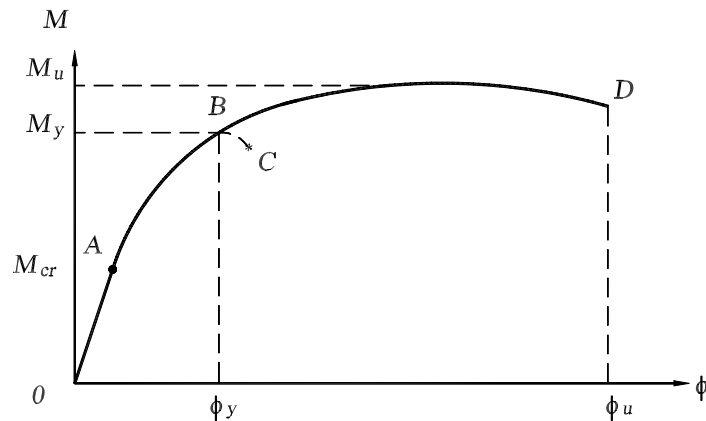
בפרק 1 נסקרו תכונות הבטון והפלדה כחומרים ושם התברר כי הדפורמביליות הגבולית של מוטות הזיון (מצולעים) מגיעה עד כ 5% (עיבור מקסימלי במאמץ מקסימלי) ואף יותר. לעומת זאת ראינו כי בתאור מקורב ניתן להגיע לעיבור לחיצה מירבי עבור הבטון בגבולות של 3.5% - . ברור איפוא כי מבחינת מרכיבי העקמומיות בביטוי (6.11) יש לפלדה השפעה דומיננטית.

6.2.2 משיכות (Ductility)

בסעיף הקודם ראינו כיצד ניתן לבטא את העקמומיות בחתך סדוק (בהתאם להגדרה – בסדק או העקמומיות הממוצעת). תכונות המשיכות של החומרים נדונו בפרק 1 וגם הוזכרו בסעיף הקודם. בצעד נוסף נראה את התנהגות החתך.

נניח גידול מונוטוני איטי במומנט הכפיפה M הפועל על חתך מבטון מזוין.

לאורך העקום M / ϕ (מומנט – עקמומיות) ניתן להבחין מספר תחומים – ציור 6.6 .



ציור 6.6

הקטע הראשון OA הינו ליניארי והוא מתאר את התחום בו החתך לא סדוק

$$(M \leq M_{cr})$$

בעבור המומנט את הנקודה A המציינת את מומנט הסדיקה, הפלדה עדיין בתחום האלסטי ליניארי אולם החתך במצב סדיקה מתפתחת, אי לכך הקו לא ליניארי ושיפועו יורד עם העליה בסדיקה עד לנקודה B המציינת את הגעת הפלדה לגבול הנזילה.

אם העקום מאמץ-עיבור בפלדה היה פלסטי מושלם, עם הגיע הפלדה לגבול הנזילה, ברור כי החל בנקודה B גם העקום מומנט-עקמומיות הנתון בציר 6.6 לא היה עולה, ברם, כפי שראינו (פרק 1) מיד לאחר גבול הנזילה יש עליה איטית בחוזק הפלדה (תחום ה strain hardening) ותודות לו גם הקו מומנט-עקמומיות של החתך עולה מעבר לנקודה B. עקמומיות הקטע אחרי B ועד D תלויה בגורמים רבים. אפשר לראות את הקטע הזה כדמוי "תחום נזילה". גם אם קיימת ירידה קלה לכיוון D אין זה משנה את העובדה כי קיים תחום בו העקמומיות בחתך עולה עם מומנט עולה או שומרת על ערך יציב. מעבר לנקודה D העקמומיות יורדת בצורה חדה.

התנהגות החתך המתוארת בקו מלא בציר 6.6 הינה משיכה. התחום המתואר בין B ל D מציין גידול משמעותי בעקמומיות מ ϕ_y ועד ל ϕ_u תוך גידול מומנט לא גדול עד זעום מ M_y ועד ל M_u . היחס ϕ_u / ϕ_y הינו אחד המדדים למשיכות וככל שערכו גדול יותר – המשיכות גדולה יותר. למידת הגידול במומנט מ M_y ל M_u יש משמעות אך החשיבות היא בעצם יכולת הקיום של הסיבוב תחת מומנט בשיעור יציב. תכן מבנים מבטון מזוין אשר לחתכיהם תכונות משיכות רצוי מכמה טעמים. בין החשובים:

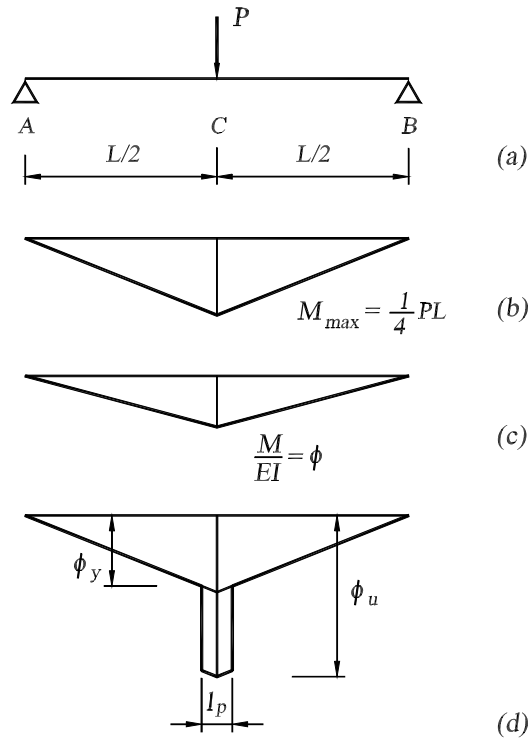
1. עם עליה הדרגתית בהטרחה חתכים אחדים עשויים להגיע לסביבות מומנט הכניעה M_y . החל במעמד זה יתאפשר גידול משמעותי בהזזות או בשקיעות. האלמנט ייצא ממצב שרות ובפועל מתקדם אל מצב גבולי של הרס אך טרם נהרס. הגידול בהזזות פועל כסימן התראה ובכך מאפשר לנסות לייצב את המבנה ו/או למנוע פגיעה בחיי אדם. סימן התראה זה לא ניתן לנו אם התנהגות החתך לא משיכה (המסומנת בציר 6.6 בקטע הקצר המרוסק בין B ל C המתאר שבר כמעט פריך – ירידה במומנט עם גידול אפסי בעקמומיות).

2. בתכן אלמנטים לעמידה בכוחות אופקיים עקב רעידת אדמה, או אחרים, (אשר תוצאתם עומס מחזורי בצורה כל שהיא) חשוב ביותר כי תהיה לאלמנטים יכולת ספיגת אנרגיה, אשר באה לביטוי כאן בעבודה פנימית המתבצעת על ידי מומנט כמעט קבוע על פני אורך תחום דפורמביליות רחב בין ϕ_y ל ϕ_u .

6.2.3 פרק פלסטי באלמנט מבטון מזוין

ההידבקות בין הבטון למוטות הזיון גורמת לכך ששום דבר באלמנט מבטון מזוין לא מתרחש בחדך אלא לכל הפחות בקבוצת חתכים סמוכים. פרק פלסטי באלמנט מבטון מזוין הינו קטע מהאלמנט בו תחת השפעת מומנט קבוע (או כמעט קבוע) מתפתחת תוספת גדולה בעקמומיות הקו האלסטי שלו. היסוד לקיום האפשרות להתפתחות הפרק הפלסטי הינה תכונת המשיכות (ductility).

פרק פלסטי אינו יכול להיווצר בחדך מאחר ולא ניתן להגדיר התארכות סופית כה גדולה על פני אורך אין סופי קטן של מוט הזיון (שהוא עובי החדך). הגידול בעיבורים בזיון מתחולל על פני קבוצת חתכים אשר לאורכם חלה תזוזה מהותית בין מוטות הזיון לבטון המקיף אותם (כלומר החלשת עד אובדן ההידבקות). רוחב קבוצת חתכים זו מכונה I_p – רוחב הפרק הפלסטי (או אורך הקטע בו מתהווה הפרק הפלסטי).



ציור 6.7

בציור 6.7a נתונה קורה AB על שני סמכים, עמוסה עומס בודד P באמצע המיפתח. מהלך המומנטים בקורה זו נתון בציור 6.7b. העקמומיות לאורך הקורה נתונה בציור 6.7c. בהגיע המומנט המקסימלי לערך גבולי M_y תתפתח שם עקמומיות נוספת אשר תגרום ליצירת פרק פלסטי. הפרק הפלסטי יהיה באורך l_p בקטע בו העקמומיות תעלה על ϕ_y (ציור 6.7d). שנוי הזווית במרכז הקורה בסביבות הנקודה C בה פועל הכוח P יהיה מורכב משנוי אלסטי ושנוי פלסטי (בהנחה כי אורך הפרק הפלסטי l_p קטן משמעותית ממיפתח הקורה l):

$$\theta_c = \theta_e + \theta_p = 2 \left[\frac{1}{4} \phi_y l + (\phi_u - \phi_y) \frac{1}{2} l_p \right] \quad (6.12)$$

המרכיב האלסטי בשנוי הזווית θ_e הינו:

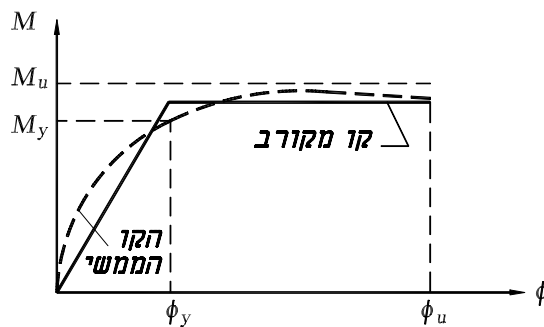
$$\theta_e = \frac{1}{2} \phi_y l \quad (6.13)$$

המרכיב הפלסטי בשנוי הזווית θ_p הינו:

$$\theta_p = (\phi_u - \phi_y) l_p \quad (6.14)$$

באיזו מידה ייווצר בסביבת הנקודה C פרק פלסטי תלוי, איפוא, לפי (6.14) בעיקר בהפרש העקמומיות $(\theta_u - \theta_y)$.

שוב לתכונת המשיכות. הובהר כי המשיכות יוצרת אפשרות להתפתחות עקמומיות גדולה ביחס לעקמומיות ϕ_y המתפתחת בהגיע החתך למומנט הכניעה M_y



ציור 6.8

(ציור 6.8). מקובל גם לתאר את העקום הממשי M/ϕ בצורה מקורבת כמתואר בציור 6.8. הקו המרוסק שם מתאר את העקום האמיתי. בצורה מקורבת ניתן להמירו בקו המלא המורכב משני קטעים – אלסטי ליניארי ופלסטי מושלם (זה האחרון עובר דרך M_y או בערך ביניים בין M_y ל M_u (כאשר בגלל הקירבה ביניהם אין לזה משמעות רבה). יחד עם זאת נראה ב 6.2.5 כי M_u יהיה לפחות במקצת גדול מ M_y .

6.2.4 אורך הפרק הפלסטי l_p

אורך הפרק הפלסטי l_p תלוי במספר גורמים. אין עבורו ביטוי מתמטי מוגדר והוא נקבע בניסויים.

אורך הפרק הפלסטי תלוי בסכימה הסטטית, בגובה הפעיל של האלמנט d , בסוג הבטון ובצורת העקום σ/ε שלו, בגודל העיבור המקסימלי (ε_c) בו הבטון מגיע לנזילה ולהרס (ε_u), במנת זיון החישוקים באלמנט במקום היווצרות הפרק הפלסטי, וכו'. שני ביטויים אמפיריים מקובלים להנחת אורך הפרק הפלסטי:

$$l_p = 0.5d + 0.2d^{1/2}(z/d) \quad (6.15)$$

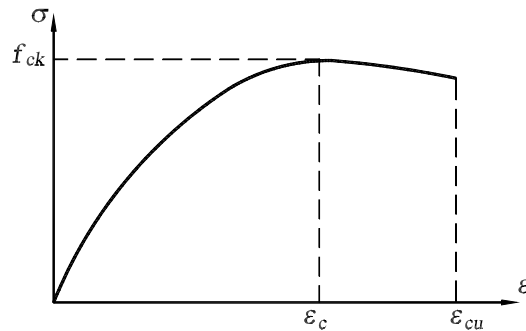
$$l_p = 0.5d + 0.05z \quad (6.16)$$

בשניהם d הינו הגובה הפעיל של החתך ו z הינו המרחק עד נקודת האפס הקרובה במהלך המומנטים.

6.2.5 הגורמים המשפיעים על יצירת הפרק הפלסטי ומהותו

בסעיפים 6.2.2 ו 6.2.3 הובהר כי תכונת המשיכות הינה היכולת של קבוצת חתכים (אף כי תמיד מתייחסים לחתך בלבד!) לעבור גידול נוסף בעקמומיות תחת פעולת מומנט קבוע (או משתנה במעט) לאחר הגיע החתך למומנט הכניעה, או במלים אחרות ($\phi_u - \phi_y$) גבוה ככל האפשר.

עקום עקרוני של מאמץ-עיבור בתחום הלחיצה של הבטון נתון בציור 6.9. בסעיף 1.2 נאמר כי לגבי מרבית הבטונים ε_c נע סביב 2.2% ו ε_{cu} נע בין 2.8% ל 4% ואף יותר. נאמר שם גם כי לצורך חישובים ניתן לייצג את עקום σ_c/ε_c של הבטון ייצוג מקורב באמצעות עקום הנתון בציור 1.6 - פרבולה עד $\varepsilon_c = 2\%$ ופלסטי מושלם בין ε_c ועד $\varepsilon_{cu} = 3.5\%$ (תוך התעלמות מכך שהענף מ ε_c ועד ε_{cu} יורד).



ציור 6.9

בציורים 1.14 ו 1.15 בפרק 1 ניתנו שתי אלטרנטיבות לעקום עקרוני של החוק הקונסטיטוטיבי (σ_s/ϵ_s) עבור פלדת הזיון. לצורך חישוב חתכים הנתונים בכפיפה ובכוח אקסצנטרי התאור לפי 1.15 מספיק לחלוטין. לצורך הבנת ההתנהגות הפרק הפלסטי (ויותר מאוחר – תופעת הרדיסטריבוציה) דרוש להיזקק לתאור אשר בציור 1.14 .

אם העקום σ_s/ϵ_s של פלדת הזיון היה תואם את התאור אשר בציור 1.15 , בהגיע החתך למומנט הפלסטי, כלומר – בהגיע פלדת הזיון לחוזק הכניעה (f_{sk} או f_y) כמקובל בכמה מקורות וכמה תקנים), היה נוצר מצב על פיו תחת אותו המומנט החתך יכול להימצא בעקמומיות משתנה (הפרוסה על פני כל התחום בין ϕ_u ל ϕ_y) אי לכך המעבר מ ϕ_y ל ϕ_u היה מהיר מאד, למעשה פתאומי, ללא אפשרות עצירה וללא התראה מוקדמת (ראה התאור המקורב בציור 6.8).

תופעה זו אינה רצויה. רצוי כי עם כניסת החתך (האזור בו מתפתח הפרק הפלסטי) לפלסטיפיקציה תתפתח אמנם דפורמביליות גבוהה (אשר אנו מעוניינים בה לצורך יצירת אפשרות לספיגת אנרגיה) אולם ללא "גלישה", כלומר – עם התחזקות, קטנה אבל קיימת, בגודל המומנט. ההתחזקות הזאת מושגת כדלקמן : בעת הכניסה למצב של פרק פלסטי העיבור בבטון מצוי עדיין בחלק העולה של עקום σ_s/ϵ_s של הבטון, אולם טווח ההשתנות בעיבור הבטון מוגבל ולכן פוטנציאל הגידול בעיבור זה מאד מצומצם. בנוסף – גורם אי הודאות בחוק הקונסטיטוטיבי של הבטון הרבה יותר גדול מאשר בזה של הפלדה.

כאשר מתהווה הפרק הפלסטי המאמץ בפלדה הוא f_{sk} (או f_y) ובהמשך התפתחותו הוא מתקדם אל f_t . אם יש ביניהם הבדל, כומר f_t גדול מ f_y , יחול גידול מסוים במומנט מ M_y אל M_u . גידול זה הוא תוצאה מעליה במאמץ בפלדה וזרועה פנימית כמעט לא משתנה או אפילו עולה במעט. התאור יהיה תואם את ציור 6.6 או לפי הקו הממשי בציור 6.8. יש התקדמות בפרק הפלסטי אבל אין "גלישה" מהירה אלא התהליך איטי. בתהליך זה העקמומיות עולה ההזזות עולות ומתקבל האפקט של התראה מוקדמת.

היחס $f_t / f_y \geq 1.15$ נחשב לרצוי מאד לגבי פלדת זיון כאשר מדובר בהטרחות סאיסמיות. לגבי אלמנטים המתוכננים לעמוד ברדיסטריבוציה המירבית המותרת בתקנים (בגבולות 30%) היחס הרצוי הוא $f_t / f_y \geq 1.08$. יחס נמוך מזה מאפשר רק רדיסטריבוציה מוגבלת (ראה גם פרק 7).

במונחים של ערכים אופייניים ניתן לומר כי עבור הפלדה למוטות מצולעים (Φ) בעלת חוזק אופייני של כ 400 MPa היא תגיע לכניעה בעיבור ממוצע של כ 2% (בתאור מקורב) ומשם תמשיך אל חוזק המשיכה f_t עד לעיבור משוער של כ 6%. באומדן דומה עבור הפלדה בעלת חוזק גבוה לייצור רשתות אשר חוזקה 500 Mpa, היא תגיע לכניעה בסביבות עיבור של 2.5% עד לחוזק משיכה בסביבות 2.5%. לא רק שתחום הדפורמביליות של המוטות המצולעים גבוה יותר, אלא שגם היחס המינימלי הנדרש בתקן f_t / f_y עבור הפלדה המצולעת הינו 1.25 אך עבור הפלדה לרשתות רק 1.05, ומכאן יובן מה היתרון הגדול של הפלדה המצולעת מבחינת משיכות לעומת הפלדה ממנה עשויות רשתות מרותכות.

בפרק 4 בדיון על חישוב חתך בכפיפה הובהר כי אם תסופק לחתך כמות זיון לכפיפה כך ש $A_s f_{sd} > \omega_{max} b d f_{cd}$, האיזור הלחוץ יגיע לכשל לפני האיזור המתוח. כמוכן שהכרזה זו היא בהתאם להגדרה ומבלי להביא בחשבון סטיות מחוזקי החומרים. לצורך אבטחת פרק פלסטי איננו מעוניינים בזאת אלא להיפך – להבטיח תמיד חתך מתוכנן עם "זיון חלש", כלומר - $A_s f_{sd} < \omega_{max} b d f_{cd}$. בנסיבות כאלה הפלדה היא זו שתגיע לגבול הכניעה והעיבור בה ימשיך לעלות אך שלמות איזור הלחיצה תישמר (אם כי גובהו ילך ויצטמק והעיבור המירבי בו יחד עם המאמץ המירבי יגדלו).

ניתן להדגים עקרונית את מנגנון הגידול בדפורמביליות בדוגמה לפי ציור 6.10.

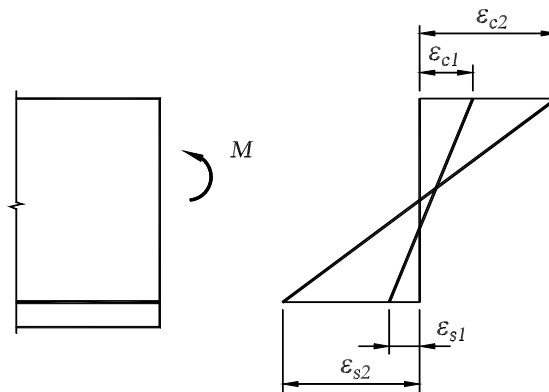
כאשר החתך הגיע לעקמומיות ϕ_y ניתן לרשום אותה כ:

$$(\varepsilon_{c1} + \varepsilon_{s1}) / d = \phi_y \quad (6.17)$$

ובהגיע החתך לעקמומיות ϕ_u ניתן יהיה לרשום אותה כ:

$$(\varepsilon_{c2} + \varepsilon_{s2}) / d = \phi_u \quad (6.18)$$

אם לדוגמה הזיון בחתך הוא מסוג מצולע (Φ) והעיבור בבטון בהגיע הפלדה לכניעה היה 1‰ הרי ש: $\phi_y = (2 + 1)10^{-3}/d = 0.0030/d$. נניח כי בהגיע הפלדה לחוזק המשיכה f_t יהיה: $\phi_u = (3.5 + 60)10^{-3}/d = 0.0635/d$, כלומר הבטון הגיע לעיבור המירבי של 3.5‰ וההפרש בין העקמומיות ϕ_u ו ϕ_y יהיה $0.0605/d$, והיחס ביניהם יהיה $\phi_u / \phi_y = 21.17$.



ציור 6.10

אותו החשבון עבור אותם עיבורים גבוליים בבטון אך בפלדה המתאימה לרשתות זיון בה העיבורים הם בהתאמה 2.5‰ בנזילה ו 2.5% במקסימום, היה נותן: $\phi_u - \phi_y = 0.025$ והיחס ביניהם: $\phi_u / \phi_y = 8.14$. לפי שני הקריטריונים, כל אחד בנפרד, המשיכות שונה באופן מהותי. תנאי מוקדם לקיום האפשרות לפרק פלסטי הוא שמנת הזיון הניתנת בחתך לא תאפשר לאיזור הלחוף להגיע ראשון לכשל (או לאפשר: $A_s f_{sd} < \omega_{max} b d f_{cd}$).

בתקן האמריקאי [5] ACI 318 קיימת דרישה פורמלית האוסרת תכנון עם מנת זיון העולה על 75% מזו הדרושה להבטיח את התסבולת המירבית של האיזור הלחוץ.

אפשר להבטיח דפורמביליות (ועל ידי כך משיכות) כאשר מרבית המומנט יועבר באמצעות זוג כוחות: זיון לחוץ-זיון מתוח, אך זה מפסיק להיות בטון מזוין שכן הבטון באיזור הלחוץ מאבד את תפקידו כנושא כוח לחיצה ונהפך למגן הזיון בלבד. עוד דרך להגביר את המשיכות היא לחזק את האיזור הלחוץ באמצעות כליאה (confinement). החיזוק נעשה על ידי עטיפת האיזור הלחוץ של הבטון בחישוקים חזקים (ראה סעיף 4.13). אלה מחזקים את האיזור הלחוץ על ידי הגבהת חוזק הלחיצה של הבטון (במקצת) ועל ידי הארכת התחום הפלסטי של דפורמציות הבטון. אין בתרומה הזאת שווה ערך להחלפת הפלדה בסוג משיך יותר אבל יש בה חשיבות בתכן אלמנטים לרעידות אדמה.