

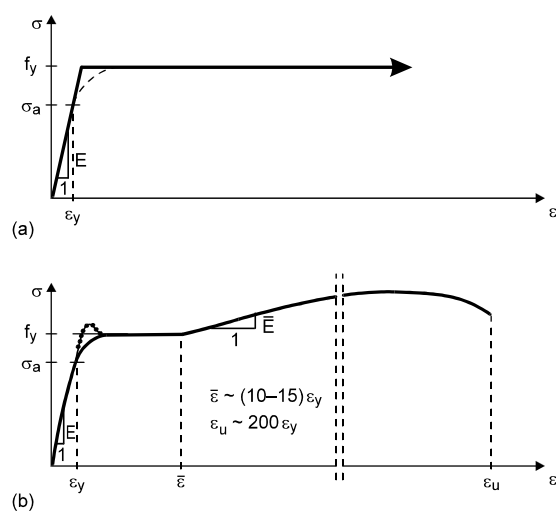
A.7. A képlékeny teherbírás-számítás alkalmazása acélszerkezetekre

A.7.1. A szerkezeti acélfajták anyagjellemzői

A képlékeny teherbírás-vizsgálat acélszerkezeti alkalmazásának legfontosabb feltétele az acélszerkezet tulajdonságainak a feltételezett tulajdonságokkal való egyezése.

A közönséges folytácél $\sigma - \varepsilon$ diagramja a feltételezethez igen közel áll, azonban három vonatkozásban eltér attól (A.7.1. ábra):

- a folyás előtt is fellépnek maradós alakváltozások;
- a folyási alakváltozás 10–15-szörösénél felkeményedés következik be, és a feszültségek utána jelentősen növekednek;
- a folyási alakváltozás mintegy 200-szorosánál szakadás következik be (ez a meghatározás egy véges nagyságú tartóelemre vonatkozik, például egy kísérleti próbapálcára).



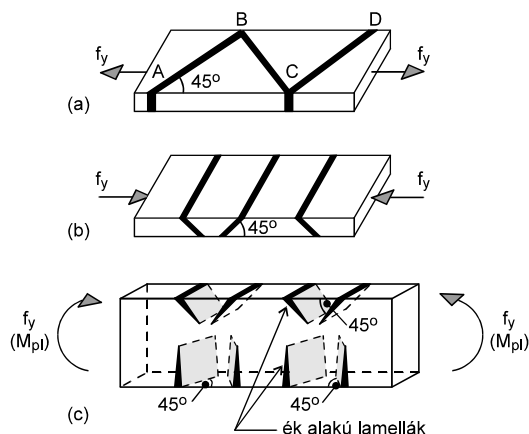
A.7.1. ábra Feszültség–alakváltozás diagramok: (a) ideálisan rugalmas–képlékeny anyag; (b) folytácél

Ezek a modell és valóság közötti eltérések az elmélet alkalmazásának kezdete óta komoly kételyeket támasztottak. A következőkben megvizsgáljuk, hogyan viselkedik az acél a folyás környezetében.

Az acél folyási állapota

Az acél próbatestek felületén a folyási határon jellegzetes, szabályos vonalrendszerek keletkeznek. Ezek a vonalak arról tanúskodnak, hogy a képlékeny alakváltozás a folyási határon nem folytonos, hanem olyan felületseregekben összpontosul, amelyeknek nyomai a próbatest felszínén éppen ezek, az ún. Lüders–Hartmann-féle vonalak vagy lamellák (A.7.2. ábra).

Az acél ideálisan rugalmas–képlékeny feszültség–alakváltozás diagramja (A.7.1a ábra) jól ismert. A szaggatott vonal szerinti összefüggés akkor alakul ki, ha figyelembe vesszük a σ_a arányossági határ és az f_y folyáshatár közötti képlékeny alakváltozásokat; a folyamatos vonal szerinti összefüggés pedig akkor alakul ki, ha feltételezések alapján az anyag az f_y folyáshatár eléréséig rugalmas marad (ideálisan rugalmas–képlékeny feszültség–alakváltozás állapot). Az ideálisan rugalmas–képlékeny anyag alapvetően homogén tulajdonságú, mivel az ε alakváltozás folyamatosan növekszik – elméletileg végtelen nagyra.



A.7.2. ábra Lüders–Hartmann-vonalak, lamellák: (a) húzás esetén; (b) nyomás esetén; (c) hajlítás esetén

Az előzőekben vázolt kísérleti és elméleti megfontolások azt mutatják, hogy egyrészt az acél a folyási határon inhomogén tulajdonságú, másrészt a felkeményedés jelenségét is figyelembe kell venni.

A.7.2. A képlékeny csukló fogalmának felhasználása

A képlékeny folyás inhomogén tulajdonsága az elméleti megfogalmazások szempontjából jelenthet csak problémát, az acél véges szakadási nyúlása azonban megkérdőjelezi a modell alkalmazhatóságát. A *A.7.3. ábrán* a rugalmas–képlékeny modellhez tartozó $M-\kappa$ (nyomaték–relatív elfordulás) ábrát és egy statikailag határozatlan, kétnyúlású tartó $P-e$ (erő–lehajlás) ábráját mutattuk be. A rugalmas rész helyett lehet merev állapotú részt is feltételezni.

Az így kialakuló idealizálást képlékeny csuklónak nevezzük. A fogalom megalkotása és elnevezése, mint már említettük, *Kazinczy Gábortól* származik. Képlékeny csukló csak akkor alakul ki egy keresztmetszetben (rúdelemben), ha a hajlítónyomaték eléri a képlékeny nyomatéket. A képlékeny csukló abban különbözik a tényleges csuklótól, hogy csak a képlékeny nyomaték hatására lép működésbe, és akkor is csak egy irányban tesz lehetővé elfordulásokat; ugyanakkor a képlékeny csukló helyén a hajlítónyomaték éppen a képlékeny nyomatékkal egyenlő [KAZINCZY, 1914].

Az *A.7.1b* ábrán az acél $\sigma-\varepsilon$ diagramját ábráztuk; ennek segítségével is meghatározható egy $M-\kappa$ diagram. I keresztmetszet esetére először *Hrennikoff* írta fel az acél $\sigma-\varepsilon$ diagramját, figyelembe véve az $M-\kappa$ (nyomaték–relatív elfordulás) összefüggést [HRENNIKOFF, 1948].

Ha így tételezzük fel az acél véges szakadó nyúlásának hatását az $M-\kappa$ összefüggésre, kéttámaszú tartókra a kísérletekkel egyező eredményre juthatunk (*A.7.3. ábra*). Az acélsanyag tulajdonságait figyelembe véve a képlékeny teherbírás-vizsgálat (a korlátozatlan folyás határállapota), a képlékeny csukló feltételezése csak korlátozott mértékben érvényes.

1. A véges szakadó nyúlás miatt csak abban az esetben kapunk a kísérletekkel egyező eredményt a képlékeny csukló viselkedésének leírására, ha az acél felkeményedésének hatását is figyelembe vesszük.
2. A felkeményedés hatásának figyelembevételével a statikailag határozott tartókban az M_{pl} törőnyomatéknál nagyobb nyomatékok is létrejöhetnek, azonban ezek nagysága nem jelentős, ezért a biztonság javára elhanyagolhatók.

A korlátozott érvényességi tartományú képlékeny teherbírás-vizsgálat (a korlátozatlan folyás határállapota) által feltételezett tönkremeneteli forma a képlékeny csukló vonatkozásában (állandó nagyságú nyomaték hatására bekövetkező, folyamatosan növekvő, korlátozatlan képlékeny alakváltozások) szigorúan véve nem lép fel. Mégis, a korlátozatlan folyás határállapotára vonatkozó elmélet jó tájékoztatást nyújt arról, mikor válik az elmozdulás növekedése rohamos mértékűvé.

Ezt a megállapítást csak az acél véges szakadási nyúlását kompenzáló felkeményedés jelenségének együttes figyelembevételével lehet megfogalmazni.

A.7.3. A képlékeny teherbírás-vizsgálat alkalmazása statikailag határozatlan, hajlított tartókon

A teherbírás elmélet egyik legfontosabb alkalmazási területe a statikailag határozatlan tartók megoldása. Jelentősége éppen abban rejlik, hogy a teherbírás elmélet szerint a képlékeny alakváltozások hatására a rugalmas alapon számított nyomatéki ábra kedvező módon megváltozik: a nyomatékok „kiegyenlítődnek”.

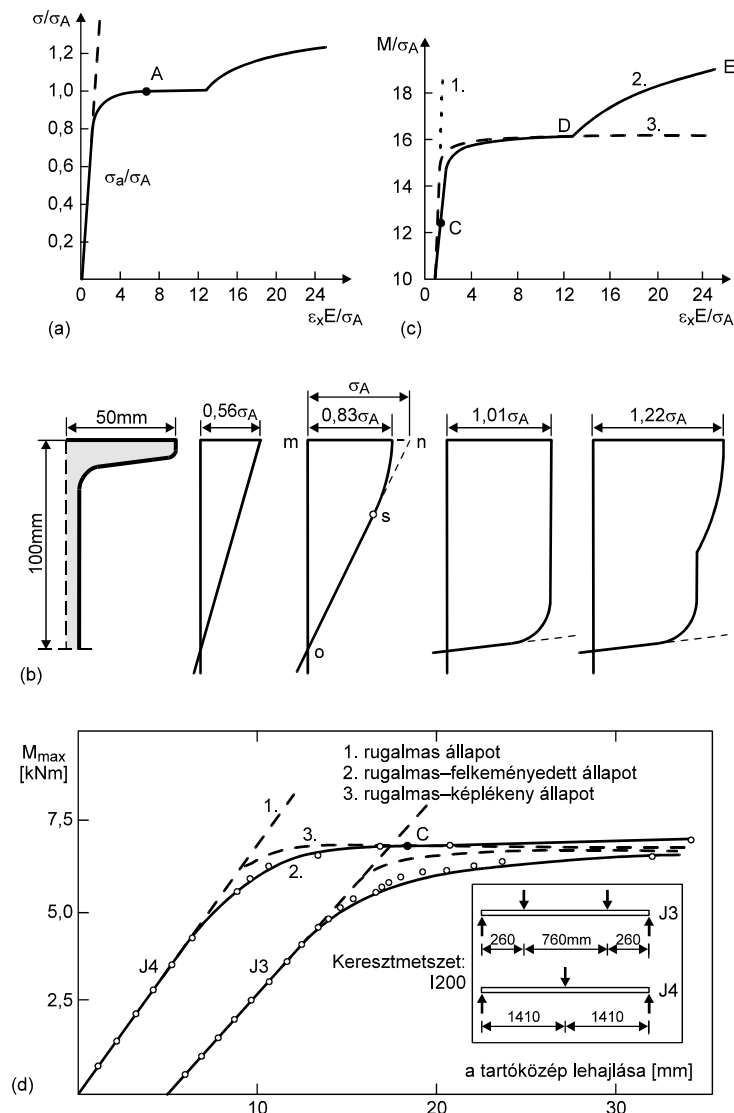
Igazolni kell azonban, hogy ez a jelenség a valóságban is legalább hasonló módon zajlik le. Erre vonatkozóan már az elmélet alkalmazásának kezdete óta komoly kételyek merültek fel.

Támadható volt az elképzelés tisztán elméleti oldalról is [LAY, 1966].

Az acél véges szakadási nyúlásának erősen redukáló hatását a felkeményedés kompenzálja, azonban a felkeményedés kompenzáló hatása megváltoztatja a nyomatékátrendeződés folyamatát.

Megállapítható, hogy a felkeményedés hatására az első képlékeny csukló megjelenése után az M nyomaték tovább növekszik, a nyomatékok teljes kiegyenlítődése láthatóan nem következik be.

A kísérlet eredményei bebizonyították, hogy a felkeményedés hiánya esetén a véges szakadó nyúlás nem



A.7.3. ábra A feszültség alakulása és a nyomaték-lehajlás görbe

engedi a korlátatlan folyási határállapot bekövetkezését.

Az elméleti és kísérleti vizsgálatok eredményeit a felkeményedés és a véges szakadási nyúlás szempontjából összefoglalóan a következőképpen értékelhetjük.

- (a) Statikailag határozatlan tartóknál a nyomatékátrendeződés tekintélyes nagyságú csuklóelfordulás (képlékeny nyúlás és összenyomódás) árán jön létre. A szerkezeti acél korlátozott mértékű nyúlóképessége esetenként gátat szabhat a nyomatékok átrendeződésének; a kísérletek tanúsága szerint azonban a felkeményedés kiegyenlíti a korlátozott nyúlóképességet.
- (b) A képlékeny teherbírás elmélete (a képlékeny csuklók feltételezése) jó tájékoztatást ad a tartó merevségének fokozatos csökkenéséről, és a számított törőerő jól jellemzi – ha nem is a teoretikusan elképzelt tönkremeneteli állapotot, de legalábbis a merevség lényeges csökkenését, vagyis az alakváltozások nagyságának megengedhetetlen mértékű meggyorsulását, a gyakorlati tönkremenetelt.
- Emellett a számított, a korlátozatlan folyás határállapotához tartozó erő szélsőséges esetektől (például nagymértékben eltérő támaszközarányok) eltekintve a biztonság javára közelíti a valóságot.
- (c) A teherbírasi határállapothoz tartozó, a folyási mechanizmus ismeretében könnyen számítható, teljes nyomatékkiegyenlítődést feltételező nyomatékeloszlás a valóságban nem jön létre, így az elmélet alapján meghatározott nyomatéki ábra nem ad pontos tájékoztatást az egyes keresztmetszetekre ható nyomatékok valódi értékéről.

Ennek sok esetben nem annyira a vizsgált tartók teherbírása szempontjából van jelentősége, hanem inkább a csatlakozó, például a befogást biztosító szerkezeti elemekre átadódó igénybevételek miatt.

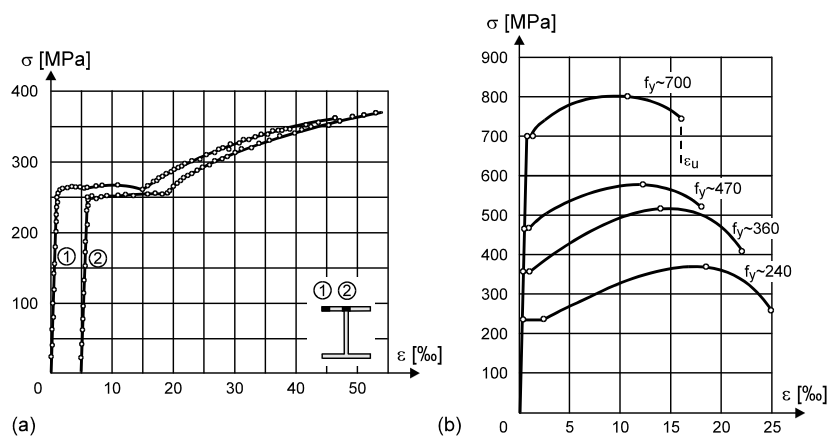
A képlékeny teherbírás-vizsgálat (a korlátozatlan folyás határállapotára vonatkozó elmélet) az acélszerkezetek vizsgálatánál tehát azért alkalmazható, mert az acélszerkezet korlátozott nyúlóképessége és a felkeményedés hatása „kiegyenlíti” egymást, és együttes hatásuk megközelíti az ideálisan rugalmas–képlékeny modell viselkedését. A *felkeményedés nélkül* tehát a képlékeny teherbírás-vizsgálat *nem volna alkalmazható* acélszerkezetek méretezésében.

A.7.4. Acélszerkezetek képlékeny teherbírásának kísérleti vizsgálata

Vizsgáljunk meg néhány kísérleti eredményt, és azokat hasonlítsuk össze az első folyás és a korlátozatlan folyás határállapotához tartozó teherbírasi értékekkel! Az 1964-ig lefolytatott kísérletek eredményeit [LAY, 1964], a hetvenes évek kezdetéig elvégzett kísérletek eredményeit pedig [W. R. C., 1971] foglalja össze.

A.7.4.1. Az acél képlékeny tulajdonsága

Az *A.7.4a* ábra két húzott próbatest kísérleti eredményeit ábrázolja. Különböző szilárdsági csoportba tartozó acélok σ – ε diagramját az *A.7.4b* ábra mutatja.



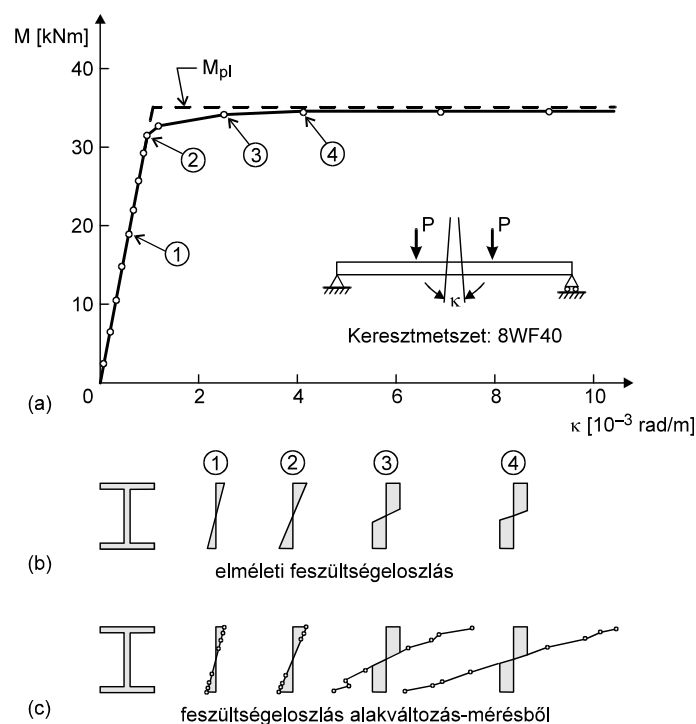
A.7.4. ábra Különböző acélfajták feszültség–alakváltozás diagramjai

A $\sigma - \varepsilon$ diagram kísérleti meghatározásának módja ismert, a nemzetközi irodalomban elterjedt módszert [BEEDLE és TALL, 1960] ismertet. Az f_y folyáshatárt úgy határozhatjuk meg, hogy 5 perc várakozási idő után mérünk, és az alakváltozást 0,5%-kal növeljük, majd újra 5 perc várakozás következik.

Az $\bar{\varepsilon}$ felkeményedési alakváltozást a folyáshatár vonala és a felkeményedés metszéspontjával definiáljuk.

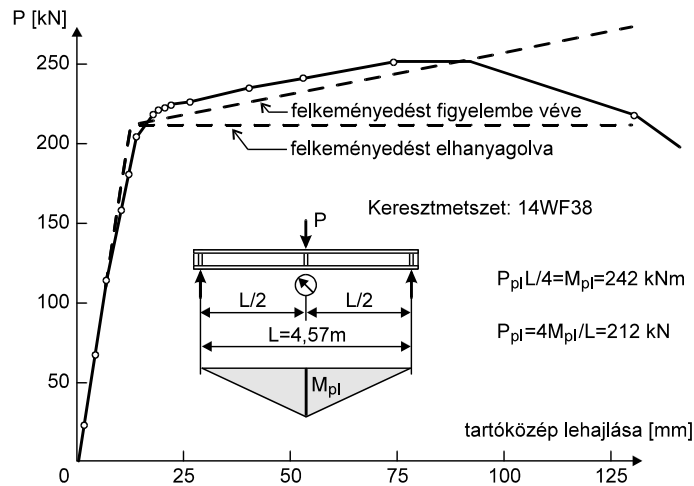
A.7.4.2. A képlékeny nyomaték és a képlékeny csukló

Luxion és Johnston ismertet egy kísérletet, amelynek során állandó nyomatékkal hajlították egy kéttámaszú tartó középső szakaszát [LUXION és JOHNSTON, 1948]. Az A.7.8. ábra bemutatja az $M - \kappa$ összefüggést, valamint az elméleti és a kísérleti alakváltozási értékekből számított feszültségeket. Megfigyelhető, hogy a keresztmetszet plasztifikálódása ténylegesen bekövetkezik, és a képlékeny nyomaték az $M_{pl} = f_y \cdot W_{pl}$ összefüggésből számítható.



A.7.8. ábra Állandó nyomatékkal hajlított gerendaszakasz viselkedése

Egy változó nyomatékkal terhelt gerenda (kéttámaszú tartó, középen koncentrált teherrel) viselkedését az A.7.9. ábra ábrázolja. Ebben az esetben a deformációk a maximális nyomaték környezetében sűrűsödnek. Mivel a képlékeny deformációk meglehetősen koncentrálnak, a felkeményedési zónát már egy kisebb lehajlásnál eléri, amiből az következik, hogy a gerenda a képlékeny nyomatékánál nagyobb nyomatékot is elbír [DRISCOLL és BEEDLE, 1957; LUKEY és ADAMS, 1969; LAY és GALAMBOS, 1967].



A.7.9. ábra Koncentrált erővel terhelt gerenda viselkedése

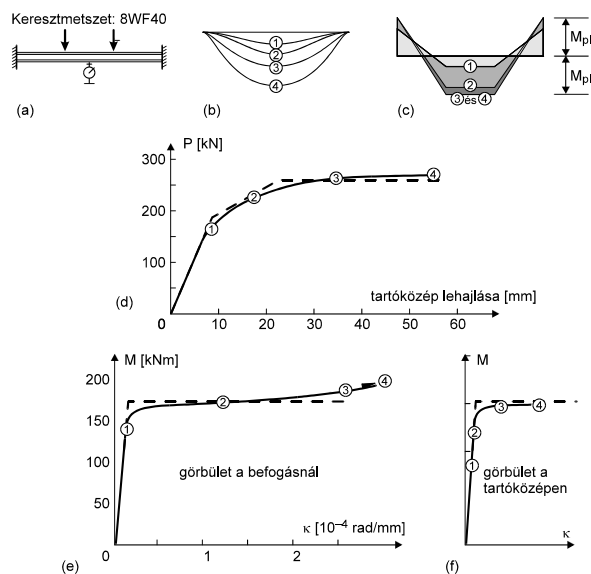
Az A.7.9. ábrán a felkeményedés figyelembevételével meghatározott értékeket is ábrázoltuk. A kísérletek alapján a gerenda a képlékeny teherbírás-vizsgálat alapján számítottnál nagyobb maximális nyomatékot bír el. (A végleges tönkremenetelt az erő melletti zónában bekövetkező lemezhorpadások okozták.)

A.7.4.3. A nyomaték átrendeződése

A képlékeny csukló kialakulása mellett a nyomaték átrendeződését kell még kísérleti módszerekkel vizsgálni. Az A.7.10. ábra a Yang, Beedle és Johnston által végrehajtott kísérlet eredményeit ábrázolja [YANG, BEEDLE és JOHNSTON, 1952]. A két végén befogott gerenda terhelési állapotai a következők voltak:

1. a számított rugalmas határ;
2. az első képlékeny csukló kialakulása utáni érték;
3. az elméleti alapon meghatározott törőteher;
4. a további alakváltozások egy viszonylag nagy értéke.

Az A.7.10a ábra a terhelés vázlatát, az A.7.10b ábra a lehajlások változását, az A.7.10c ábra pedig a nyomatéki ábra alakulását mutatja. Az A.7.10d ábrán az erő és a középső keresztmetszet lehajlása, az A.7.10e ábrán a nyomaték és a végkeresztmetszet relatív elfordulása, míg az A.7.10f ábrán a nyomaték és a középső keresztmetszet relatív elfordulása látható.



A.7.10. ábra Két végén befogott gerenda viselkedése