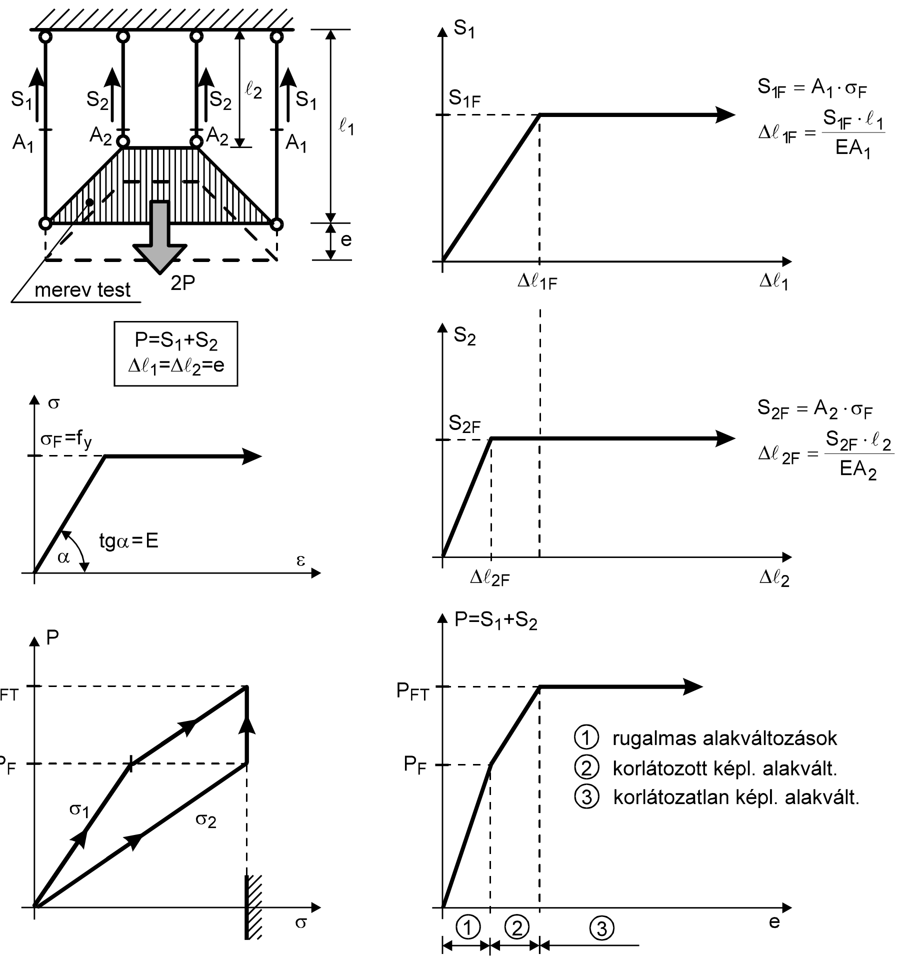
A.2. Acélszerkezetek határállapotai

A.2.1. A teherbírási határállapotok első osztálya: a szilárdsági határállapotok

A szilárdsági határállapotok (melyek között a fáradt és rideg törést e helyütt nem tárgyaljuk) közös jellemzője, hogy a korlátok elsősorban (adott teherelrendezés és szerkezeti méretek esetén) az anyag szilárdsági jellemzőitől, elsősorban a $\sigma_F = f_y$ folyáshatártól függnek.

Statikus terhelés esetén öt szilárdsági határállapotot szokás megkülönböztetni: az első folyás, a korlátozott maradó alakváltozások, a halmozódó maradó alakváltozások, a korlátozatlan folyás és a képlékeny törés határállapotát [HALÁSZ és PLATTHY, 1987].
Az elemzést a *A.2.1. ábrán* bemutatott egyszerű szerkezeten végezzük el [HALÁSZ, 1976].

A *A.2.1. ábrán* mutatott szerkesztés segítségével előállítható a *P–e erő–elmozdulás* diagram. Ennek jellemző pontjai adják a megfelelő határállapotokat.



A.2.1. ábra Az első folyás és a korlátozatlan folyás határállapota

A.2.1.1. Az első folyás határállapota

Az ezen elvet követő módszert *rugalmas méretezésnek* nevezzük.(*A.2.1. ábra)*

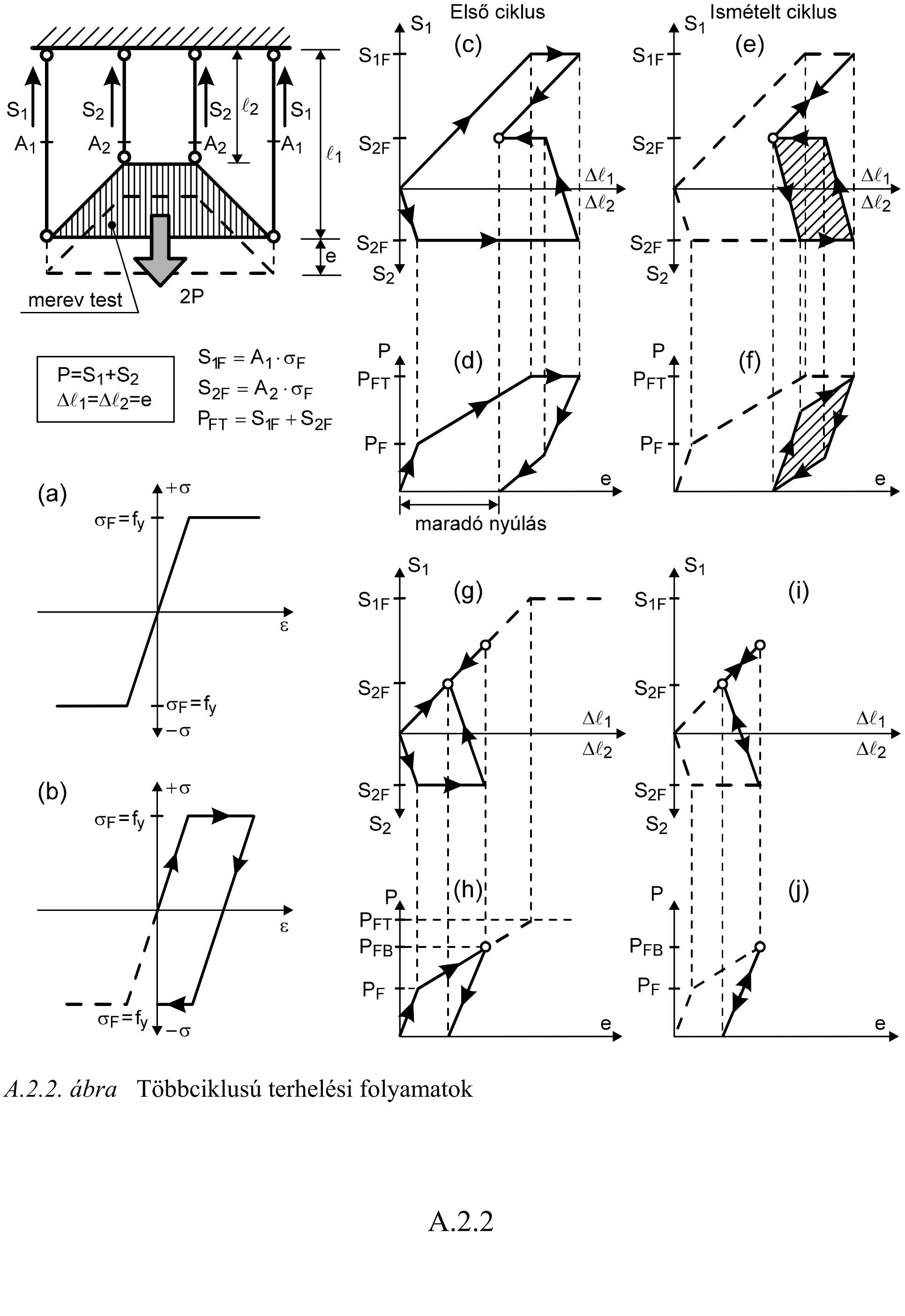
A.2.1.2. A korlátozott maradó alakváltozások határállapota ($P_F < P < P_{FT}$) (*A.2.1. ábra)*

A.2.1.3. A korlátozatlan folyás határállapota

Az erő növelésével elérünk a *korlátozatlan folyás* határállapotába ($P = P_{FT}$) (*A.2.1. ábra)*

A.2.1.4. A halmozódó maradó alakváltozások határállapota (beállási határállapot) (*A.2.2. ábra)*

$$P_F \le P_{FB} \le P_{FT} .$$

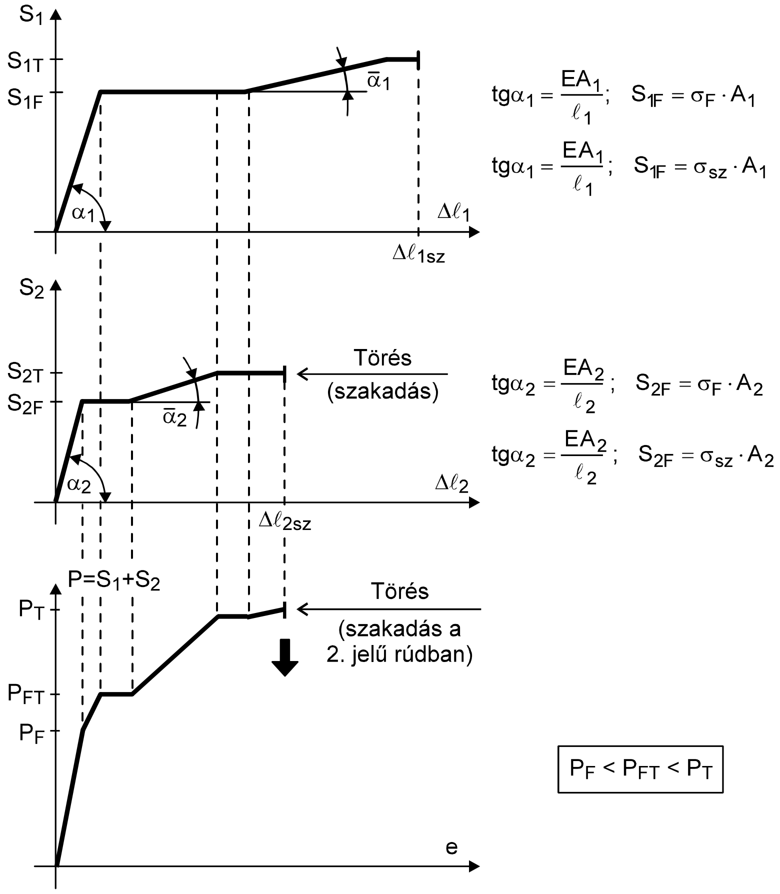


A.2.2. ábra Többciklusú terhelési folyamatok

Ezt a halmozódó képlékeny alakváltozás határterhének vagy beállási határtehernek (F_B) nevezzük.

A.2.1.5. A képlékeny törés határállapota

A *A.2.3. ábrán* megismételtük a vizsgálatokat [HALÁSZ, 1976]. Ennek tanulságai szerint a *képlékeny törés* (példánkban a „2” jelű rúd *szakadása* miatt) egy $P_T \geq P_{FT}$ erőnél következik be. Helyesen tervezett szerkezetekben ez az általános – és kívánatos – eset.

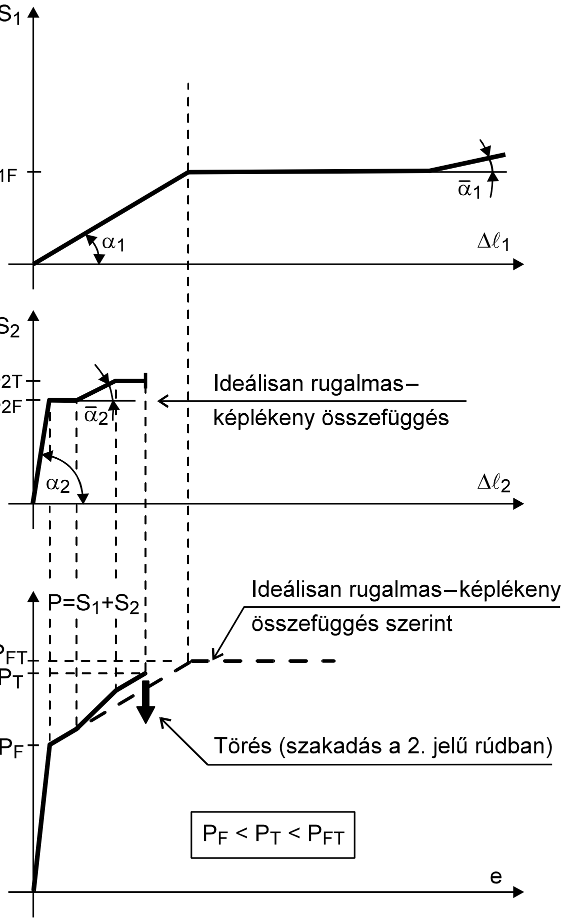


A.2.3. ábra A képlékeny törés határállapota

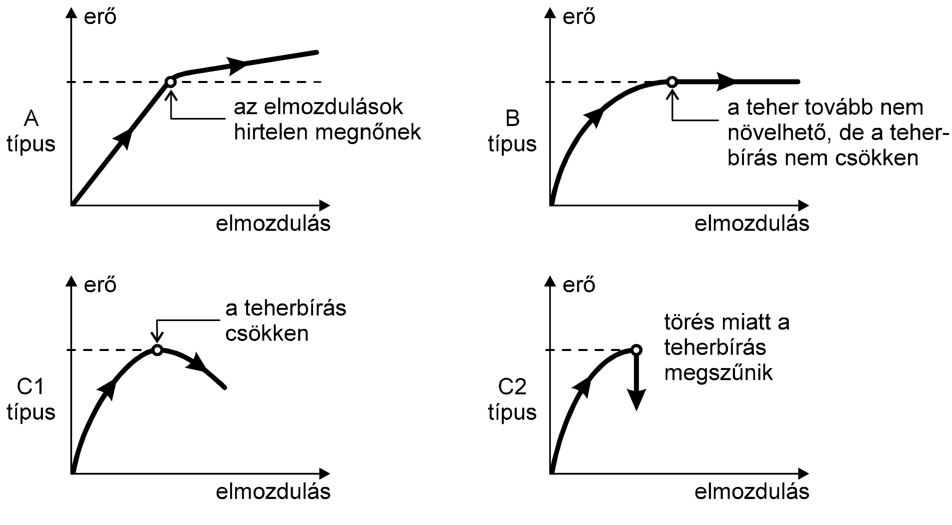
Speciális körülmények között azonban előfordulhat, hogy a képlékeny törés kisebb erőnél következik be, mint az ideálisan rugalmas–képlékeny tulajdonság feltételezésével számított P_{FT} erő (*A.2.4. ábra*) [HALÁSZ, 1976].

Ezért *statikus terhelésnél a kapcsolatok méretezése a képlékeny törés határállapotán alapszik*, ennek megfelelő biztonsági tényezők alkalmazásával. A teherbirás kimerülésének típusai a *A.2.5. ábrén* láthatók.

Legveszedelmesebb a „C” típusú teherbírásvesztés, amikor a szerkezet a csúcspont után veszít teherhordó képességéből. Ide tartoznak egyes instabilitási jelenségek és a törés. Következménye a gyorsan bekövetkező összedőlés.



A.2.4. ábra A képlékeny törés kedvezőtlen hatása



A.2.5. ábra A teherbírás kimerülésének típusai

A.2.2. A teherbírási határállapotok második osztálya: a stabilitási határállapotok

A stabilitási határállapotok közös jellemzője, hogy esetükben elvileg közvetlenül csak a teher nagyságára lehet korlátot megadni. E korlátok a szerkezet erő–elmozdulás diagramja különleges pontjainak (elágazás, tetőpont) vizsgálatából vezethetők le, és nagymértékben a szerkezet és a szerkezeti anyag merevségi jellemzőitől (például a rugalmassági modulustól) függenek.

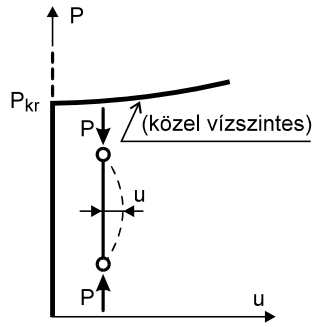
Négy stabilitási határállapotot szokás megkülönböztetni:

- az egyensúlyi út elágazása,
- az egyensúlyi út elágazása utáni teherbírás,
- a képlékeny instabilitás és
- a geometriai instabilitás

határállapotát [HALÁSZ, 1987].

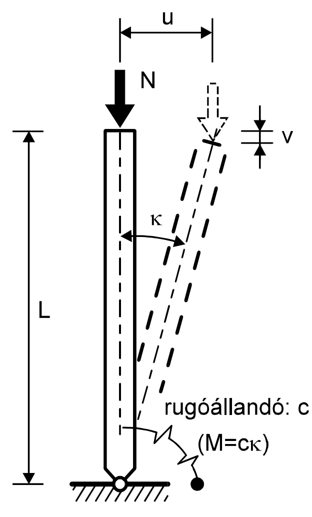
A.2.2.1. Az egyensúlyi út elágazásának határállapota

Ezek a megállapítások a *A.2.6.* ábrán látható *P–u* erő–elmozdulás diagramban úgy tükröződnek, hogy $P < P_{kr}$ esetben nincs *u* oldalirányú elmozdulás, $P \geq P_{kr}$ esetben létezik ugyan egy (a szaggatott vonalnak megfelelő) elméletileg elképzelt, egyenes tengelyű alak, de a zavarások hatására $P = P_{kr}$ erőnél a rúd gyakorlatilag egy fokozatosan növekvő kitérésű, meggörbült alakot vesz fel, *az erő–elmozdulás diagrammal ábrázolt egyensúlyi út elágazik, a nyomott rúd kihajlik.* A P_{kr} erőt *kritikus erőnek* szokás nevezni.



A.2.6. ábra A karcsú nyomott rúd viselkedése

A *A.2.7. ábrán* szereplő összeállítás egy nyomott rúdhoz hasonló szerkezet modellje, amely, ha $\kappa = 0$, akkor mindig egyensúlyban lehet, és benne csak nyomóerő keletkezik. Ha a rudat kismértékben elferdítjük



A.2.7. ábra Az egyensúlyi út elágazásának vizsgálata

($\kappa \neq 0$), és ezt az állapotot másodrendű elmélettel elemezzük, a megtámasztó rugóra

$$M = N \cdot u = N \cdot L \cdot \kappa$$

nyomaték is hat, és abban $c \cdot \kappa$ nagyságú megtámasztó nyomaték ébred. A két érték egyeztetéséből kiderül, hogy elferdült állapot (azaz a rúd „kihajlása")

$$N \cdot L \cdot \kappa = c \cdot \kappa$$

$$N_{kr} = \frac{c}{L}$$

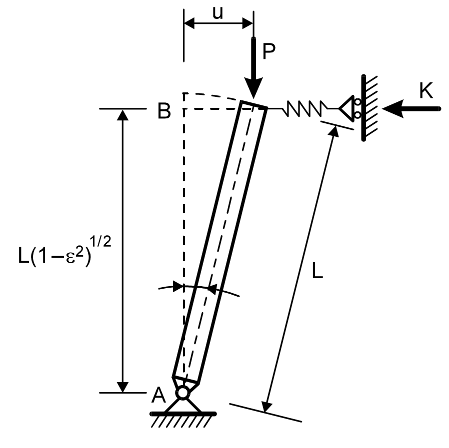
erőnél következhet be. Az eredmény szemlélteti, hogy az „elágazás" helye a merevséget jelképező *c* rugóállandótól függ.

A.2.2.2. Az egyensúlyi út elágazása utáni („posztkritikus") teherbírás határállapota

Az egyensúly-elágazás utáni teherbírási határállapotot vizsgáljuk meg merev rúdból és nemlineáris viselkedésű, állandóan vízszintes helyzetű megtámasztó rugóból álló modell segítségével (*A.2.8. ábra*). A modellt [GALAMBOS, 1988] mutatja be, [KOLLÁR, 1991] pedig más módszerrel mutatja be ugyanezt a jelenséget.

Tételezzük fel, hogy a rudat megtámasztó rugóban ébredő rugóerőt felírhatjuk az $\varepsilon = u / L$ dimenziótlan vízszintes eltolódás függvényében:

$$K = k_1 \cdot \varepsilon - k_2 \cdot \varepsilon^2 + k_3 \cdot \varepsilon^3 . \tag{2.1}$$



A.2.8. ábra Az egyensúlyi út elágazása utáni teherbírás határállapotának vizsgálata

$$P \cdot \varepsilon = K \cdot \left(1 - \varepsilon^2\right)^{\frac{1}{2}} = \left(k_1 \cdot \varepsilon - k_2 \cdot \varepsilon^2 + k_3 \cdot \varepsilon^3\right) \cdot \left(1 - \varepsilon^2\right)^{\frac{1}{2}} . \tag{2.2}$$

(i) Legyen ε infinitezimálisan kicsi, az egyensúlyi út elágazásához tartozó kritikus erő:

$$P_{kr} = k_1 . \tag{2.3}$$

(ii) *Koiter* vizsgálatai alapján megállapítható, hogy az egyensúlyi út elágazása utáni viselkedés lényeges jellemzői meghatározhatóak a másodlagos egyensúlyi út alakjából [KOITER, 1970].

Feltételezve, hogy ε kicsi, de véges nagyságú, az

$$\left(1-\varepsilon^2\right)^{\frac{1}{2}} \cong 1-\frac{\varepsilon^2}{2}$$

közelítést alkalmazva, és csak a harmadik hatványig megtartva a tagokat a (4.2) egyenlet egyszerűsödik:

$$P\cdot\varepsilon = \left(k_1\cdot\varepsilon - k_2\cdot\varepsilon^2 + k_3\cdot\varepsilon^3\right)\cdot\left(1-\frac{\varepsilon^2}{2}\right) \cong k_1\cdot\varepsilon - k_2\cdot\varepsilon^2 + \left(k_3 - \frac{k_1}{2}\right)\cdot\varepsilon^3 . \tag{2.4}$$

A (2.3) egyenlet figyelembevételével (3.4) átírható:

$$P = P_{kr}\cdot\left(1 - a\cdot\varepsilon + b\cdot\varepsilon^2\right), \tag{2.5}$$

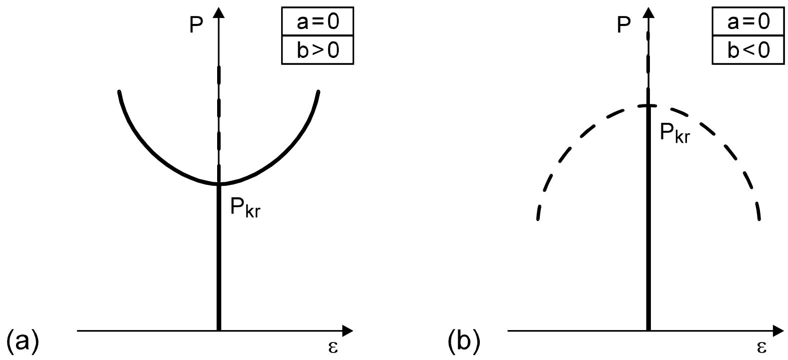
ahol

$$a = \frac{k_2}{k_1} \quad \text{és} \quad b = \frac{k_3 - \frac{1}{2}}{k_1} .$$

Szimmetrikusan viselkednek azok a szerkezetek, amelyeknél az egyensúlyi út elágazása független a deformációk előjelétől. Ez a viselkedés jellemző, ha $a = 0$, ekkor:

$$P = P_{kr}\cdot\left(1 + b\cdot\varepsilon^2\right). \tag{2.6}$$

Az erő–elmozdulás görbe alakulását a *A.2.9. ábra* mutatja.



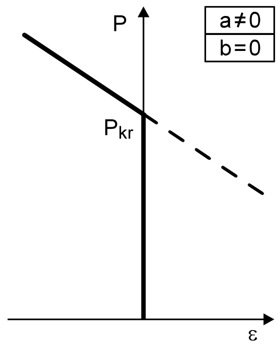
A.2.9. ábra Ideális rendszerek szimmetrikus egyensúlyi útjai: (a) stabil és (b) labilis szimmetrikus viselkedés

Az (a) esetben a rugó egyre merevebb lesz, így ahhoz, hogy a deformációk növekedjenek, a tehernek is növekednie kell; ugyanakkor a (b) esetben a rugó egyre puhább lesz, így a deformációk növekedése csökkenő tehernél következik be. Az (a) esetet stabil szimmetrikus egyensúlyi elágazásnak, a (b) esetet pedig labilis szimmetrikus egyensúlyi elágazásnak nevezzük.

Aszimmetrikus viselkedés az $a \neq 0$ esetben alakul ki (*A.2.10. ábra*). Tekintve, hogy *b* hatása kis környezetben elhanyagolható, feltételezhető, hogy $b = 0$; ekkor:

$$P = P_{kr}\cdot\left(1 - a\cdot\varepsilon\right). \tag{2.7}$$

A szimmetrikus viselkedéssel ellentétben az aszimmetrikus esetben az egyensúlyi út elágazása utáni állapot elsősorban a kialakuló deformációk előjelétől függ.



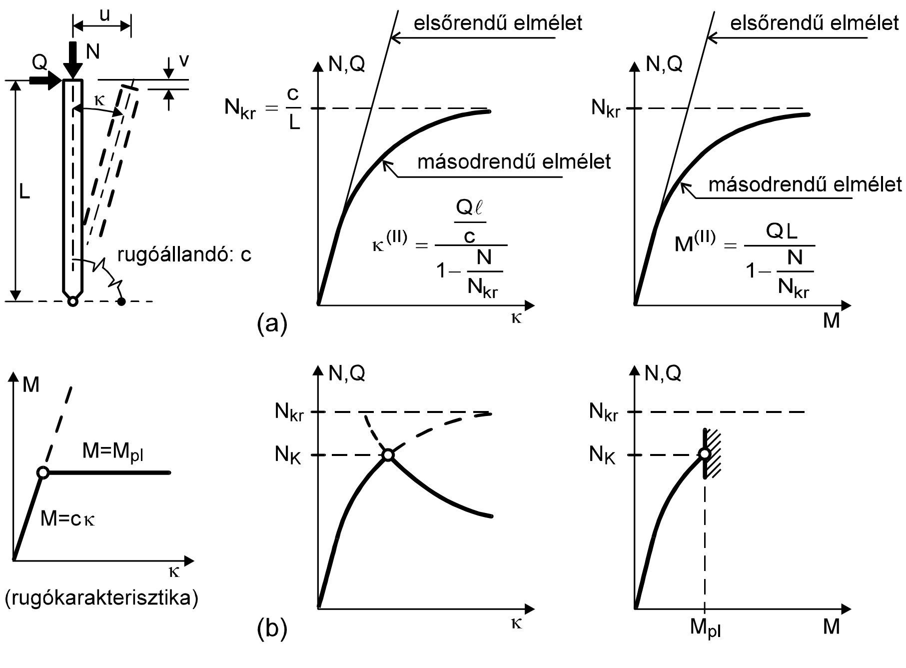
A.2.11. ábra Ideális rendszer aszimmetrikus egyensúlyi útja

A.2.2.3. A képlékeny instabilitás határállapota

A stabilitási határállapotok acélszerkezetek szempontjából egyik legfontosabb esete a képlékeny instabilitás [HALÁSZ, 1987], amely a külpontosan nyomott rúd esetén szemléltethető (*A.2.12. ábra*). Másodrendű elméletet alkalmazva ($u = l \cdot \kappa$; $v \approx 0$) az

$$M = N \cdot u + Q \cdot (L - v) = N \cdot L \cdot \kappa + Q \cdot L$$

egyensúlyi egyenlet és az



A.2.12. ábra A képlékeny instabilitás határállapota

$$M = c \cdot \kappa$$

fizikai egyenlet felhasználásával

$$\kappa^{(II)} = \frac{\kappa^{(I)}}{1 - \dfrac{N}{N_{kr}}} \quad \text{és} \quad M^{(II)} = \frac{M^{(I)}}{1 - \dfrac{N}{N_{kr}}}$$

összefüggéseket kapjuk. Ezek rugalmas állapotban érvényesek, és a külpontosan nyomott rúdszerkezetek egy jelentős csoportjánál felhasználhatók arra, hogy a bonyolultabb, *másodrendű elmélet szerinti vizsgálatot megkerüljük, az elmozdulásokat és igénybevételeket az elsőrendű elmélet eredményeiből a*

$$\psi = \frac{1}{1 - \dfrac{N}{N_{kr}}}$$

nagyító tényező segítségével számítsuk, azaz

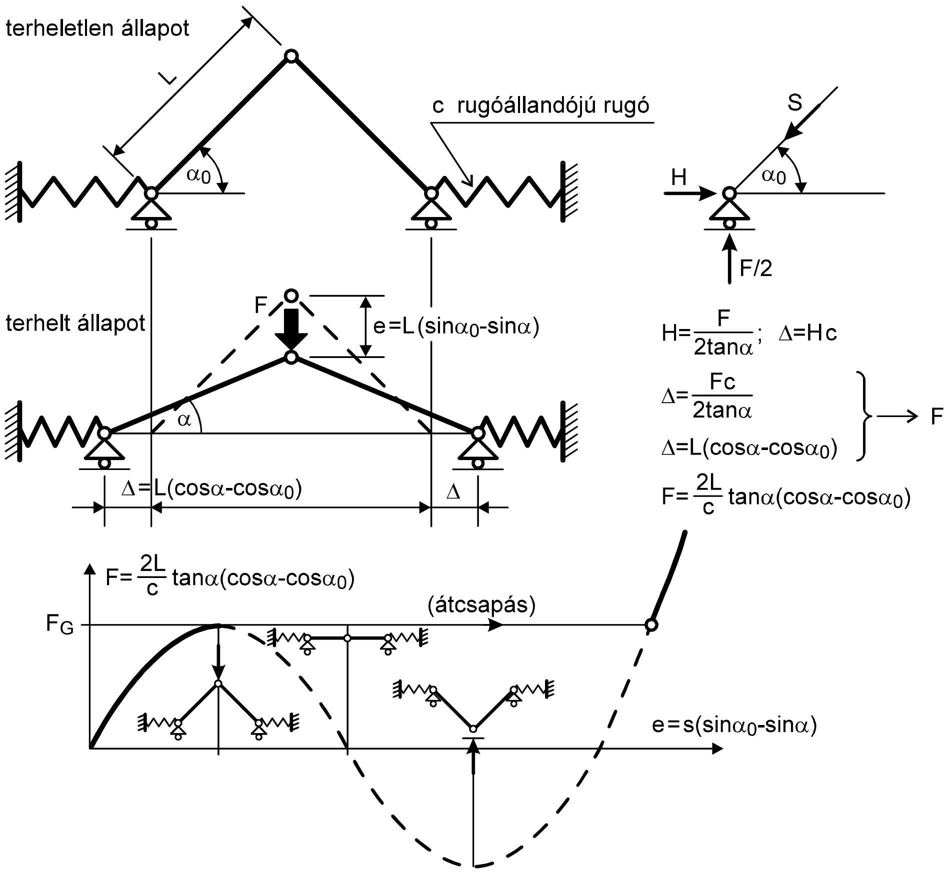
$$\kappa^{(II)} = \psi \cdot \kappa^{(I)};$$
$$M^{(II)} = \psi \cdot M^{(I)},$$

ahol az index utal a másodrendű, illetve elsőrendű elmélet használatára.
adódik (*A.2.12b ábra*). Látható, hogy az *erő–elmozdulás diagramnak maximuma („határpontja”) van*, ami a teherbírás kimerülését jelenti. Innen a *képlékeny instabilitás* elnevezés.

Ezzel egy stabilitási határállapot vizsgálatát – közelítésképpen – szilárdsági vizsgálatra vezetünk vissza. Innen származik a külpontosan nyomott elemek vizsgálatának

A.2.2.4. A geometriai instabilitás határállapota

Különleges, karcsú szerkezeteknél (például lapos ívek, héjak) előfordul, hogy az erő–elmozdulás diagramnak maximuma van anélkül, hogy képlékeny állapot lépne fel. *ponttal határállapotnak* is nevezni. A jelenségre példát egy lapos ív viselkedését érzékeltető egyszerű szerkezet (*A.13. ábra*) esete mutat [HALÁSZ, 1987].



A.2.13. ábra A geometriai instabilitás határállapota