الباب السادس

سلوك المواد الهندسية تحت تأثير
الانحناء الاستاتيكى

(STATIC BENDING)

مقدمة :

أولا : اجهادات الانحناء فى حدود المرونة
ثانيا : اجهادات الانحناء فوق حدود المرونة
ثالثا : أنواع اختبار الانحناء
رابعا : اختبار الانحناء الكمرى

ا ــ عينات الإختبار ب ــ أجزاء الإختبار
جـ ــ الخواص الميكانيكية فى الإختبار د ــ إنهيار المواد بالانحناء الكمرى

خامسا : الثنى على البارد

ا ــ قطع الإختبار ب ــ أجزاء الإختبار
جـ ــ مكنات الإختبار د ــ إنهيار المواد فى إختبار الثنى على البارد

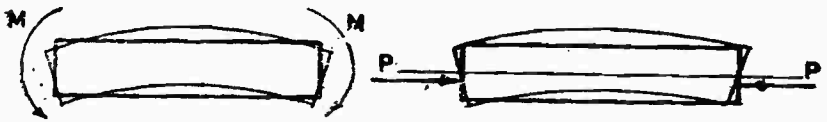
سادسا : اختبارات ثنى أخرى للمعادن

ا ــ إختبار الثنى على الساخن ب ــ إختبار ثنى القسقية
جـ ــ إختبار ثنى الحز ،

مقدمة :

يعتبر الجسم فى حالة إنحناء إذا تعرض إلى حمل أو مجموعة من الأحمال بحيث يتولد عنها إجهادات شد على جزء من مقطع الجسم مصحوبة بإجهادات ضغط على باقى المقطع وتحدث حالة الانحناء إذا ما تعرضت كمرة (Beam) إلى أحمال جانبية (Lateral Loads) أو إلى عزوم إنحناء (Bending Moments) أو إلى تحميل لامركزى (Eccentric Loading) كما يتبين ذلك من الشكل رقم (٦ — ١) .

وتتعرض المنشآت الهندسية المختلفة والمكنات أثناء أدائها الأعمال المتنوعة إلى إجهادات الإنحناء التى قد تكون مصحوبة بإجهادات شد مباشر أو ضغط مباشر أو إجهادات قص (Shear Stresses) أو إجهادات إلتواء (Torsional Stresses).

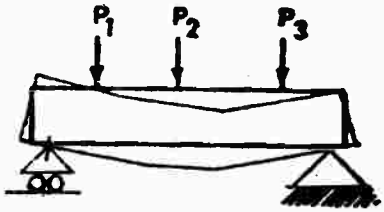


Bending moments

عزوم إنحناء

Eccentric loading

تحميل لامركزى (اكستريك)

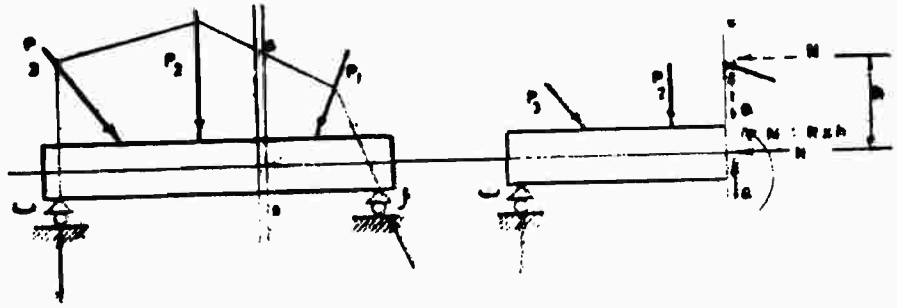


Lateral loads

أحمال جانبية

شكل رقم (٦ — ١) حالات التحميل بالأنحناء

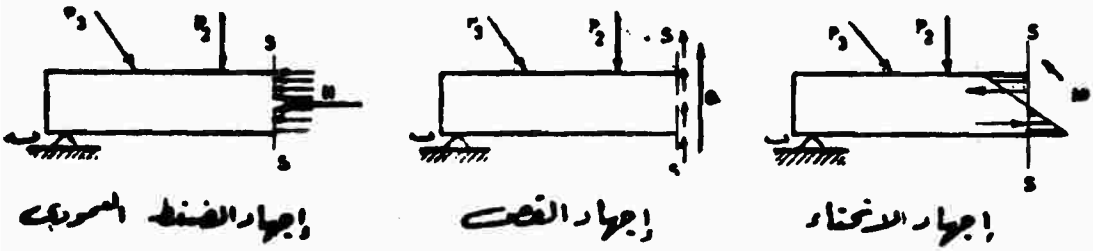
فمثلا الكمرة (ا ب) المبينة بالشكل رقم (٦ — ٢) والمحملة بالأحمال الجانبية p_1 ، p_2 & p_3 الواقعة فى نفس مستوى الكمرة ، يتعرض مقطعها (S–S) إلى



توزيع القوى على المقطع المستعرض لكمرة محملة جانبيا

شكل رقم (٦ ـ ٢)

إجهادات ضغط مباشرة عمودية على مستواه وإلى اجهادات قص موازية لمستواه وإلى إجهادات انحناء (Bending stresses) أى إجهادات شد وضغط عمودية على مستوى المقطع ، كما يتبين ذلك من الشكل رقم (٦ — ٣) .

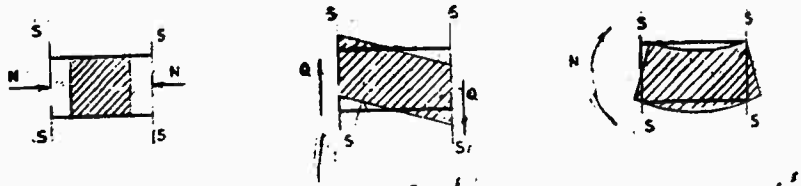


الاجهادات الموجودة عند مقطع فى كمرة محملة

شكل رقم (٦ ـ ٣)

وينتج عن الإجهادات المذكورة المؤثرة على المقطع (S–S) انفعال (Strain) عبارة عن انضغاط وانزلاق وانحناء لهذا المقطع كما هو مبين بالشكل رقم (٦ — ٤) وذلك نتيجة لإجهاد الضغط المباشر والقص والانحناء على التوالى .

يتضح مما سبق أن اجهادات الإنحناء والانفعالات المصاحبة لها عند أى مقطع لكمرة ما

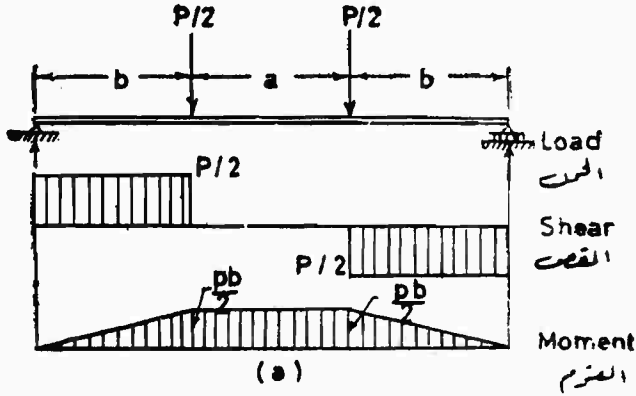


تأثير القوى الموجودة عند المقطع المستعرض للكمرة .

شكل رقم (٦ - ٤)

ينتج من عزم الانحناء عند هذا المقطع والذى يساوى مجموع عزوم القوى المؤثرة على شمال أوعلى يمين المقطع والذى يعين من الرسم البيانى لتوزيع عزم الانحناء على طول الكمرة كما يتضح من الشكل رقم (٦ — ٥) حيث يبين الجزء (b) الكمرة محملة بحمل جانبي (p) فى منتصفها حيث المقطع (S — S) فى منتصف بحر الكمرة معرض إلى عزم انحناء $\frac{p \times L}{4}$ مصحوباً بقوة قص $\frac{p}{2}$ ، بينما فى الجزء (a) والكمرة محملة جانبياً فى نقطتين بالأحمال p/2 & p/2 فإن المقطع (S—S) فى منتصف بحر الكمرة معرض لعزم انحناء فقط pb/2 وبذلك يكون المقطع (S—S) فى الحالة (a) معرضاً لانحناء خالص (pure bending) .

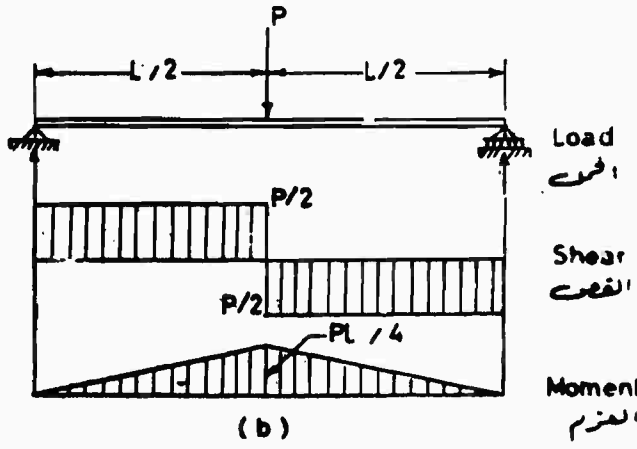
وتصمم أجزاء المنشآت والمكنات المعرضة إلى انحناء طبقاً للمعادلات الهندسية الخاصه بإجهاد الإنحناء وعلاقتها بقيمة الحمل المؤثر وأبعاد المقطع ونوع المادة المستخدمة فى التصميم وعلى ذلك يلزم إجراء اختبار الإنحناء على المادة قبل استخدامها فى المنشأ أو المكنة لاسيما وأن معادلات الإنحناء التصميمية لا تمثل تماما الحالة بل تحوى شيئاً من التقريب نتيجة لإهمالها الإجهادات المحلية (Local stresses) الناتجة لأسباب مختلفة مثل تغير المقطع من مكان لآخر كذلك نتيجة لإغفالها عدم انتظام المادة أو نتيجة اختلاف ظروف التحميل النظرية عن واقع التحميل أثناء التشغيل بالإضافة إلى أن الفروض التى بنيت عليها معادلات الانحناء التصميمية لا يمكن اعتبارها حقيقية أو كاملة الدقة لجميع المواد المعدنية وغير المعدنية ذات الخواص المختلفة والتركيبات الجزئية ذات التنوع الكبير فى الشكل والتكوين .



(a)

TWO - POINT LOADING

التحميل على نقطتين



(b)

ONE - POINT LOADING

التحميل على نقطة واحدة

FLEXURE TEST LOADING

تحميل اختبار الانحناء

شكل رقم (٦ — ٥)

ونظرا لأن اختبار الانحناء يمثل اختباراً تحت ظروف واقعية بالنسبة للمادة والتحميل والاجهادات والانفعالات المصاحبة لها لذلك يعطى اختبار الانحناء نتائج تعبر تماما عن مدى مقاومة الجسم المختبر لأحمال الإنحناء . ويمكننا إختبار الانحناء

من تعيين الخواص الميكانيكية للمواد مثل مقاومة الانحناء (Flexural Strength) والصلابة (Stiffness) والرجوعية فى الانحناء (Resilience) والمتانة علاوة على بيان مدى الاتزان الانشائى (Structural Stability) للكمرات ذات القطاعات والأحجام المختلفة .

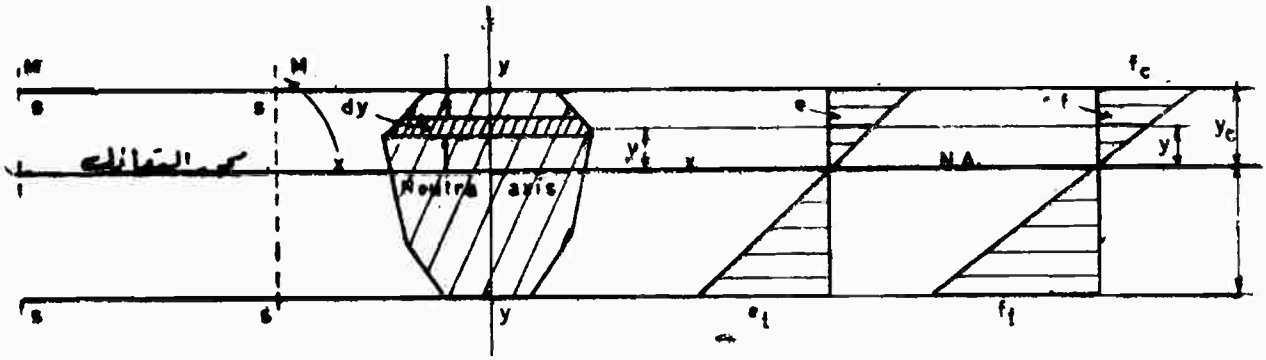
ومن مميزات إختبار الانحناء أن إجراءه غالباً مايكون باستخدام حمل صغير لذلك فإن مكناته غير غالية الثمن كما أنه يعبر بدقة — أكثر من إختبار الشد — عن خاصيتى الصلابة والرجوعية للمواد عن طريق تحديد سهم الإنحناء (Deflection) للكمرة المختبرة بسهولة ودقة خصوصاً للمواد القصفة مثل الحديد الزهر حيث يكون التشكل الذى يستخدم لتعيين خاصتى الصلابة والرجوعية فى إختبار الشد صغيراً جداً ومن الصعب تحديده بدقة فى الوقت الذى يكون فيه سهم الإنحناء ذاقيمة كبيرة مرات عديدة من قيمة التشكل المعين من إختبار الشد .

ونظراً لفوائد إختبار الإنحناء للموادفى بيان الخواص الميكانيكية لها فإنه يعتبر اختباراً هاماً وضرورياً كاختبار قبول للمواد (Acceptance Test) كما يعتبر أساساً ضمن الاختبارات اللازمة التى تنص عليها المواصفات القياسية لتحديد صلاحية أو رفض المواد فى الأعمال الهندسية .

اولا : اجهادات الانحناء فى حدود المرونة

يرتكز تعيين الاجهادات الناتجة من عزم الانحناء فى حدود المرونة على الافتراضات الآتية :

١ — مقطع الكمرة المجهدة تحت تأثير عزم الانحناء يتكون من مادة متجانسة .
٢ — تخضع مادة الكمرة أثناء تحميلها لقانون هوك أى أنها مجهدة فى حدود المرونة ويتبع ذلك التناسب الخطى بين الاجهاد والانفعال المصاحب له .
٣ — ثبوت مقطع الكمرة المحملة بعزم الانحناء فى جميع أجزائها على كامل طولها .
٤ — معاير المرونة فى الشد يساوى معاير المرونة فى الضغط لمادة الكمرة .



شكل رقم (٦ - ٦) توزيع الإجهاد والانفعال على مقطع مستعرض لكمرة معرضة لعزم إنحناء

٥ ــ القوى المؤثرة على الكمرة وردود الأفعال الناتجة تقع جميعها فى مستوى واحد هو مستوى محور الكمرة .

٦ ــ مستوى أى مقطع فى الكمرة يظل كما هو مستويا بعد تأثير عزم الانحناء عليه.

وإذا اعتبرت الكمرة المبينة بالشكل رقم (٦ ــ ٥) توفى الاشتراطات سالفة الذكر فيمكن حساب إجهادات الانحناء فى أى مقطع بها كالآتى .

يسبب عزم الإنحناء M للمقطع دوراناً حـــول خط يسمى خط التعادل (Neutral axis) نتيجة انضغاط أجزاء مقطع الكمرة العليا واستطالة أجزاء المقطع السفلى وأيضا لكى يستوفى شرط استواء المقطع قبل وبعد التحميل أى يحدث على المقطع S ــ S إجهادات ضغط فى جزئياته العلوية وإجهادات شد فى جزئياته السفلية كما أن الإجهادات عند خط التعادل تساوى صفراً وعلى ذلك تكون الإجهادات على المقطع S ــ S والناتجة من عزم الانحناء M موزعة توزيعاً مستويا على المقطع وتتناسب قيمتها فى أى نقطة حسب بعد هذة النقطة عن خط التعادن كما هو مبين بالشكل رقم (٦ ــ ٦).

وطبقاً للفرض السابق الذى ينص على أن التحميل فى حدود المرونة حيث يتناسب خطياً الإجهاد والانفعال المصاحب له يكون توزيع الانفعال على المقطع توزيعاً مستويا وتتناسب قيمة الانفعال فى أى نقطة مع بعدها عن خط التعادل ، وينتج من ذلك أن:

$$\frac{f}{y} = \frac{f_t}{y_t} = \frac{f_c}{y_c} = c = \text{ثابت}$$

$$\text{i. e.} \qquad f = y \times c$$

ويمكن الحصول على النتائج الآتية لأى مقطع للكمرة تحت تأثير عزم الانحناء :

(ا) حيث أن المقطع S ــ S واقع تحت تأثير عزم الانحناء M فقط فيكون مجموع القوى فى اتجاه محور السينات فى المقطع تساوى صفراً .

$$\Sigma\, F_x = \Sigma\,(f.\,da) = \int f.da = \int c.\,y.da$$

$$= c \int y,\, da = \text{Zero}$$

$$\therefore \int y da = \text{Zero}$$

أى أن عزم المساحة الأولى (1st moment of area) للمقطع حول خط التعادل يساوى صفراً ، ويعنى ذلك أن خط التعادل يمثل محور يمر بمركز الثقل للمقطع ، أى

محور مركزى للمقطع (Central axis) .

(ب) حيث أن المقطع S—S فى حالة اتزان فيكون بمجموع عزوم القوى الداخلية (عزوم إجهادات الانحناء) حول محور الصادات يساوى عزوم القوى الخارجية المؤثرة على المقطع حول محور الصادات . وحيث أن القوى الخارجية هى فقط عزم الانحناء N الذى يؤثر بعزم حول السينات (لأنه يقع فى مستوى محور الصادات) لذلك فإن عزم M حول محور الصادات يساوى صفراً .

مجموع العزوم حول محور الصادات = صفر

مجموع عزوم إجهادات الانحناء حول محور الصادات = صفر

$$\therefore (f.da).x = \text{Zero}$$

$$\text{i.e. } \int (cy.da).x = \text{zero}$$

$$c\int xy.da = \text{zero}$$

$$\therefore \int xy.da = \text{Zero}$$

أى أن عزم المساحة حول محور السينات ومحور الصادات للمقطع يساوى صفراً ، ويعنى هذا أن محور السينات ومحور الصادات للمقطع عبارة عن محاور عزم القصور الذاتى الرئيسية (Principal exes of inertia) للمقطع والتى تمر بمركز ثقله .

(جـ) حيث أن المقطع S—S فى حالة اتزان فيكون بمجموع عزوم القوى الداخلية (عزوم إجهادات الانحناء) حول محور السينات يساوى عزوم القوى الخارجية المؤثرة على المقطع حول محور السينات أى تساوى عزم الانحناء M الذى يعمل حول محور السينات .

M = بمجموع عزوم اجهادات الانحناء حول محور السينات .

$$\therefore \Sigma(f.da).y = M$$

$$\text{i-e } \int fy.da = M$$

$$\int cy.y.da = M$$

$$c\int y^2.da = M$$

ولكن $\int y^2 \, da$ = عزم المساحة الثانى للمقطع أى عزم القصور الذاتى للمقطع حول محور السينات = I_x

$$\therefore C \cdot I_x = M$$

$$\text{but } C = \frac{f}{y} = \frac{M}{Ix}$$

$$\therefore f = \frac{M \cdot y}{Ix}$$

أى أن إجهاد الانحناء (f_y) فى أى جزء من المقطع يبعد مسافة y عن خط التعادل يساوى:

$$\frac{\text{عزم الانحناء } (M) \times \text{بعد الجزء من المقطع عن خط التعادل } (y)}{\text{عزم القصور الذاتى للمقطع حول المحور الذى يدور حوله } (I_x)}$$

وبذلك تكون أكبر قيمة لإجهادات الضغط والشد على المقطع s — s الناتجة من عزم الانحناء M تقع فى نقط المقطع الطرفية العليا والسفلى حيث أكبر قيمة للمسافة y كما يتضح ذلك من شكل رقم (٦ — ٦) ، وتكون قيمتها تساوى :

$$f_t = \frac{M \cdot y_t}{Ix}$$

$$f_c = \frac{M \cdot y_c}{Ix}$$

حيث y_t ، y_c يمثلان على التوالى البعد عن محور التعادل النقط الطرفية المجهدة بالشد والنقط الطرفية المجهدة بالضغط .

وإذا اعتبر أن قيمة :

معاير المقطع الضغط = $\frac{I_x}{y_c} = Z_c$

ومعاير المقطع الشد = $\frac{I_x}{y_t} = Z_t$

وفى حالة المقاطع المتماثلة حول محور السينات حيث $y_c = y_t$ فتكون

$$Z_c = Z_t = Z$$

$$\therefore f_c = f_t = \frac{M}{Z}$$

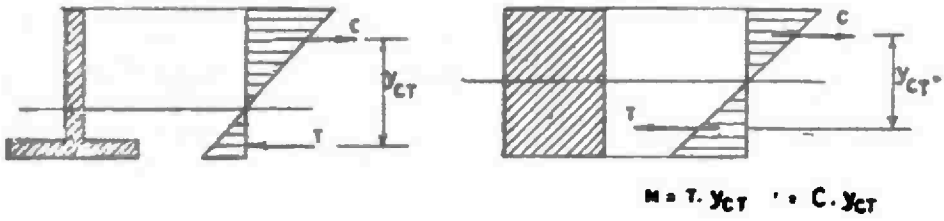
$$\text{i. e. } M = f \cdot Z$$

ولهذه النتيجة أهمية كبيرة فى تصميم المنشآت والمكنات المعرضة لعزوم الانحناء لاختبار مقطع الكمرة لأى تحميل يؤثر بعزم إنحناء M معلوم على هذا المقطع بشرط أن لا يتعدى أكبر إجهاد إنحناء بمقطع الكمرة عن إجهاد معين f وذلك بتعيين قيمة معاير المقطع Z (Section Modulus) من المعادلة : $Z = \frac{M}{f}$

ويمكن باستخدام جداول خاصة تعيين المقطع المصاحب لهذا المعاير كما تستخدم هذه النتيجة أيضاً فى تعيين الحمل (أى عزم الانحناء M) الذى لو حملت به كمرة معلوم مقطعها أى معلوم معاير المقطع (Z) نحصل على أكبر إجهاد إنحناء f معلوم وذلك بالمعادلة : $M = Z\,f$ ويبين الجدول رقم (٦ — ١) قيمة عزم الانحناء M الذى يمكن أن تقاومه المقاطع من ذات الأشكال المختلفة للكمرات .

ويلاحظ أن عزم الانحناء M المؤثر على مقطع أى كمرة يساوى عزم إنحناء مقاومة مقطع الكمرة الناتج من قوى الشد والضغط كما أن مجموع قوى الضغط تساوى مجموع الشد للإجهادات الناتجة على المقطع من عزم الانحناء M وذلك من ضرورة إتزان المقطع أى أن : $M = C \cdot y_{CT} = T \cdot y_{CT}$

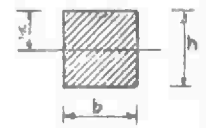
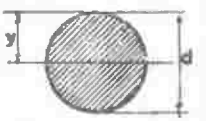
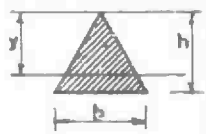
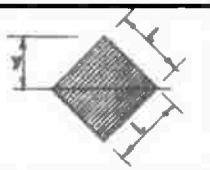
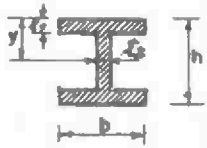
كما يتبين من الشكل رقم (٦ — ٧) $\therefore C = T$



عزم المقاومة للانحناء

شكل رقم (٦ — ٧)

جدول رقم (٦ — ١)ـ قيمة عزم الانحناء التى يمكن أن تقاومه المقاطع ذات الأشكال المختلفة للكمرات

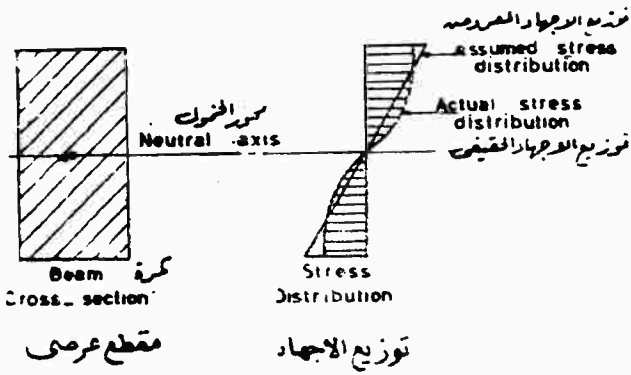
شكل المقطع	المسافة بين النقط الطرفيه عن خط التعادل y	عزم القصور الذاتى حول المحور الأفقى المار بمركز الثقل (I_x)	عزم المقاومة للانحناء وهو دالة الإجهاد الموجود فى النقط الطرفيه ($M = Z \cdot f$)
	$\frac{h}{2}$	$\frac{bh^3}{12}$	$\frac{I}{\frac{1}{2}} \quad \frac{1}{6} bh^2 f$
	$\frac{d}{2}$	$\frac{\pi d^4}{64}$	$\frac{\pi d^3}{32} f$
	$\frac{2}{3} h$	$\frac{bh^3}{36}$	$\frac{bh^2}{24} f$
	$\frac{L}{2} \cdot \sqrt{2}$	$\frac{L^4}{12}$	$\frac{L^3}{6\sqrt{2}} f$
	$\frac{h}{2}$	$\frac{bh^3 - (b - t_2)(h - 2t_1)^3}{12}$	$\frac{bh^3 - (b - t_2)(h - 2t_1)^3}{6h} f$

ثانيا : اجهادات الانحناء فوق حد المرونة

(Inelastic or Hyperelastic Bending Stresses)

يعين إجهاد الإنحناء فى حدود المرونة بالمعادلة $f = \frac{M \times y}{I}$ حيث يتناسب الإجهاد والانفعال المصاحب له ولكن عندما يتعدى إجهاد الانحناء حد المرونة تصبح المعادلة المذكورة غير صحيحة للتطبيق حيث أن بعض الفروض التى استنتجت على أساسها هذه المعادلة تكون غير متوافرة الأركان ومن أهمها تناسب الإجهاد والانفعال

خطياً وهو الفرض الذى يتوافر فى حدود المرونة فقط أما فوق حد المرونة فتكون العلاقة بين الإجهاد والانفعال متمشية مع المنحنى البيانى للإجهاد والانفعال تحت تأثير أحمال الشد والضغط وبذلك يكون توزيع إجهادات الانحناء على مقطع الكمرة غير مستو ولا تتناسب إجهادات الانحناء خطياً مع بعضها على طول المقطع كما هو الحال فى إجهادات الانحناء فى حد المرونة كما يتضح فى الشكل رقم (٦ — ٨) .



شكل رقم (٦ — ٨) توزيع الإجهادات فوق المرونة

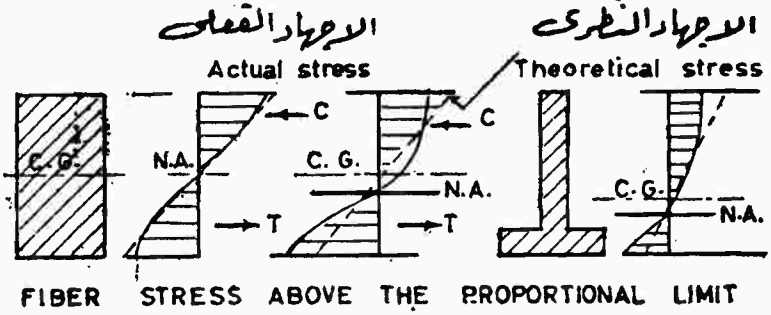
كما يلاحظ أنه إذا اختلف المنحنى البيانى للإجهاد والانفعال فى الشد عنه فى حالة الضغط للمادة المجهدة بالانحناء فى خط التعادل لا يمر بمركز ثقل المقطع ولكن يتزحزح ناحية الجسم الأصلب من الكمرة حتى يحقق التساوى بين قوى الشد وقوى الضغط المؤثر على المقطع ليتكون متهما عزم المقاومة (Moment of Resistance) كما يتضح من الشكل رقم (٦ — ٩) .

حيث : $M = T.Y_{cT} = C.Y_{cT}$ & $T = C$

وتوجد حلول متعددة لتعيين إجهادات الانحناء فوق حد المرونة بعضها نظرى شبه بيانى وقد بنيت جميعها على أساس معادلتى الاتزان الآتيتين :

١ — مجموع القوى المؤثرة على مقطع الكمرة المعرضة لعزم انحناء N فقط يساوى صفراً ($\Sigma P = 0$) أى أن قوى الشد = قوى الضغط ($T = C$) .

٢ — مجموع عزوم القوى المؤثرة على مقطع الكمرة يساوى صفراً أى أن عزم الانحناء



شكل رقم (٦ — ٩) إجهاد الجزيئات الطرفية المقطع فوق حد التناسب

الخارجى M = عزم إنحناء مقاومة المقطع الناتج من إجهادات الشد والضغط الموجودة عليه نتيجة عزم الانحناء الخارجى ($M = T.Y_{cT} = C.Y_{cT}$) .

وهاتان المعادلتان تطبقان على أى مقطع معرض لإنحناء بإجهادات فوق حد المرونة مع فرض أن المقطع المستوى للكمرة يظل مستويا بعد الانحناء أى أن استطالة طبقات الكمرة طوليا وانكماشها تتناسب مع بعد هذه الطبقات عن خط التعادل وهذا الفرض صحيح تؤكده نتائج التجارب العملية .

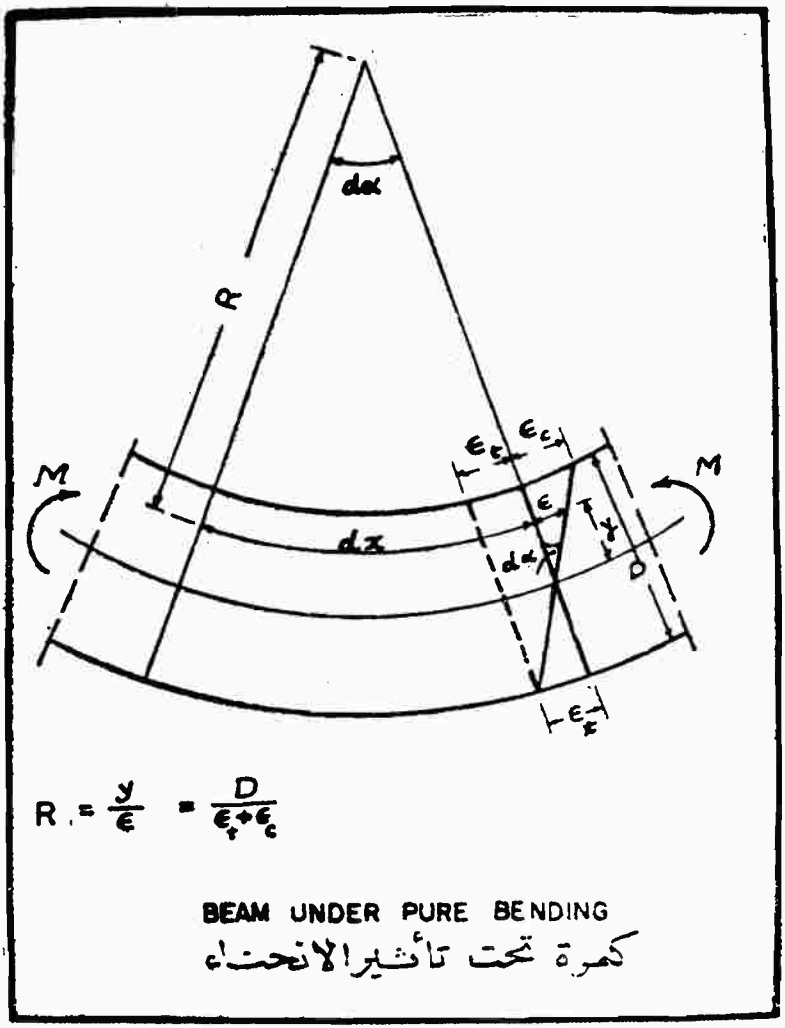
ولإيجاد العلاقة بين عزم الإنحناء M والإجهاد والانفعال الناتجين منه فوق حد المرونة نفترض أن الكمرة المبينة بالشكل رقم (٦ — ١٠) تحت تأثير عزم انحناء M ونعتبر مقطعين متوازيين S - S ، S'-S' على مسافة قريبة جداً من بعضهما وهذان المقطعان لا يظلان متوازيين بعد انحناء الكمرة ولكن يصنعا مع بعضهما زاوية صغيرة ($d\theta$) وبالرجوع إلى الشكل رقم (٦ — ١٠) فإن :

$$\frac{e\,dv}{y} = \tan d\theta = d\theta$$

$$\therefore e\,dx = y\,.d\theta \; ; \; but \; dx = R\,d\theta$$

$$\therefore e = \frac{v}{R} \; i.e \; y = R.e \; \& \; dy = R\,de$$

حيث : e = الانفعال . y = بعد الجزء المجهد عن محور التعادل ، R = نصف قطر التقوس (الانحناء) .



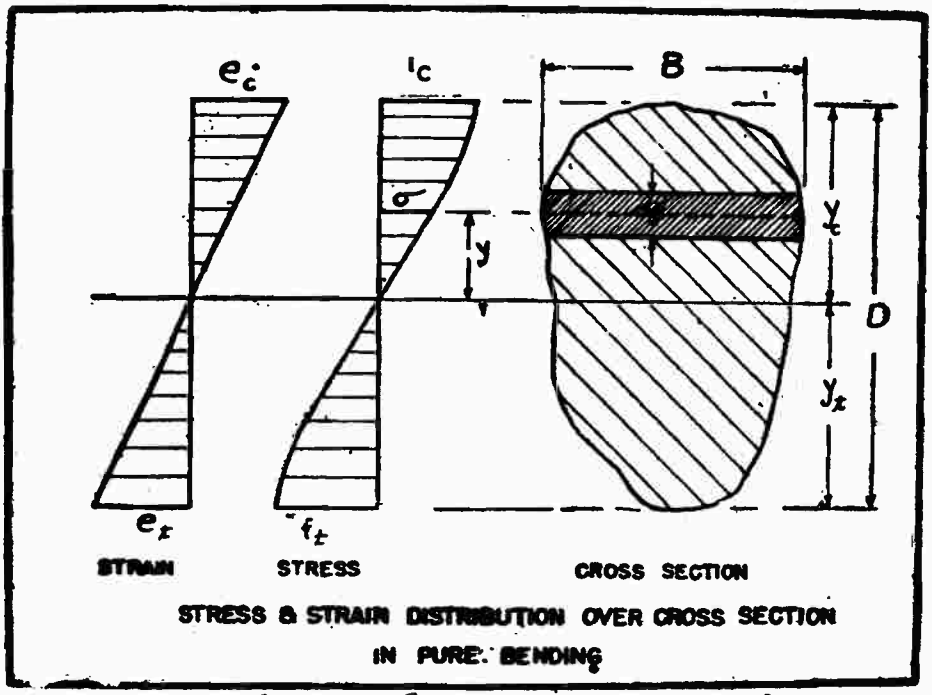
شكل رقم (٦ — ١٠)

فإذا كانت e_t ، e_c أكبر انفعال شد وضغط عند الأجزاء الطرفية للمقطع ، فبنفس الطريقة السابقة ينتج أن : $D = R \cdot (e_t + e_c)$

$$\text{i. e } R = \frac{D}{e_t + e_c}$$

وبتطبيق معادلات الاتزان على المقطع ينتج أن :

١ — قوة الشد = قوة الضغط أى $T = C$



توزيع الاجهاد والانفعال على مقطع كمرة تحت تأثير الانحناء الخالص

شكل رقم (٦ — ٢٠ ب)

$$\text{i.e. } {}_{o}\int^{yt} (b.dy).f = {}_{o}\int^{yc} (b.dy).f$$

$$\text{i. e. } c\,{}_{o}\int^{et} b.f.de = {}_{o}\int^{e} cb.f.de$$

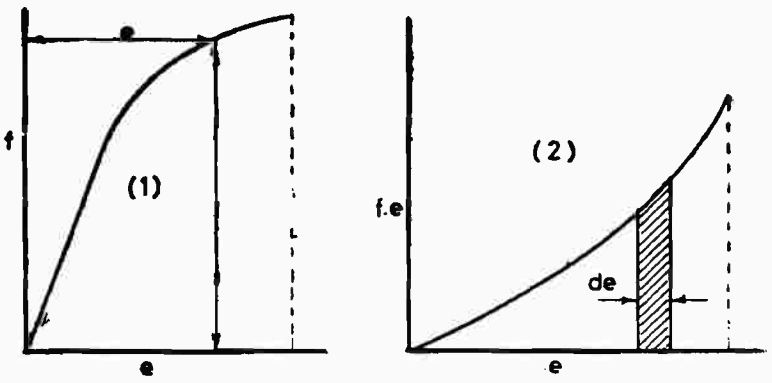
ب — عزم الانحناء الخارجى = عزم انحناء مقاومة المقطع

$$\text{i. e } \quad M = yc\int^{yt} (b.d.y).f.y$$

$$= ec\int^{et} b.R^2 f.e.de$$

$$M = \frac{1}{(e_t + e_c)}\left[{}_{o}\int^{et} b.f.e.de + {}_{o}\int^{ec} b.f.e.de \right]$$

ويمكن إيجاد قيمة التكامل فى كل من المعادلتين السابقتين بالتعويض عن قيمة الاجهاد f بما يعادلها من الانفعال e وذلك من العلاقة بين الاجهاد والانفعال المبينة بواسطة الرسم البيانى لمنحنى الاجهاد والانفعال العادى أو بواسطة الرسم البيانى



تعيين قيمة المعاير المخفض E_r

إذا علمت قيمة e أقصى انفعال طرفى يمكنه تعيين قيمة الإجهاد f المقابلة لها من الشكل (١) ومنه يمكن عمل الرسم البيانى فى (٢) بين (f.e) و(e) . فتكون المساحة تحت الشكل (٢) هى : $E_r = \int f de$

شكل رقم (٦ — ١١)

لمنحنى الاجهاد والانفعال الحقيقى أو من العلاقة الجبرية بين الاجهاد والإنفعال المستنتجة من منحنيات الاجهاد والانفعال أو بواسطة فرض منحنى بيانى للإجهاد والانفعال يقرب من المنحنى الأصلى وذلك لتسهيل عمليات الحساب. ويمكن تلخيص بعض الطرق لايجاد قيمة التكامل وبالتبعية تعيين عزم الانحناء الذى يمكن لمقطع الكمرة مقاومته عند إجهاده فوق حد المرونة . وذلك كما يلى :

١ — باستخدام العلاقة الجبرية بين الاجهاد والانفعال :

يعوض فى معادلة عزم الانحناء عن قيمة الاجهاد f بما تساويه من قيمة الانفعال باستخدام إحدى العلاقات الجبرية المستنتجة من منحنى الإجهاد والإنفعاد وفيما يلى مثال لبعض هذه العلاقات :

منحنى عادى

$$f = ae + be^2 + ce^3 + de^4$$

$$f = ae + be \tanh \left(\frac{1-a}{b}\right) e$$

منحنى حقيقى

$$f = (ae) + (dec) + Ke + m$$

(ب) باستخدام منحنى الإجهاد والإنفعال :

إذا افترض أن منحنى الإجهاد والانفعال فى الشد هو نفسه لحالة الضغط مثلا ومقطع الكرة مستطيل فتصير معادلة عزم الانحناء كالآتى :

$$M = \frac{2\,b\,D\,2}{(e_t + e_c)^2} \cdot \int_0^{e} f.\,e.\,de$$

$$= \frac{2\,bD^3}{R\,(e_t + e)^3} \cdot \int_0^{e} f.\,e.\,de$$

وذلك بالضرب والقسمة بالقيمة : $\frac{R}{D} = (e_t + e_c)$

$$\therefore M = \frac{I}{R} \cdot \frac{24}{(e_t + e_c)^3} \cdot \int_0^{e} f.\,e.\,de = \frac{I}{R} \cdot E_r$$

حيث E_r = معاير التخفيض (Reduced modulus)

$$\frac{24}{(e_t + e_c)^3} \cdot \int e f.\,e.\,de =$$

، I = عزم القصور الذاتى لمقطع مستطيل بارتفاع D = $\frac{bD^3}{12}$

R = نصف قطر الانحناء .

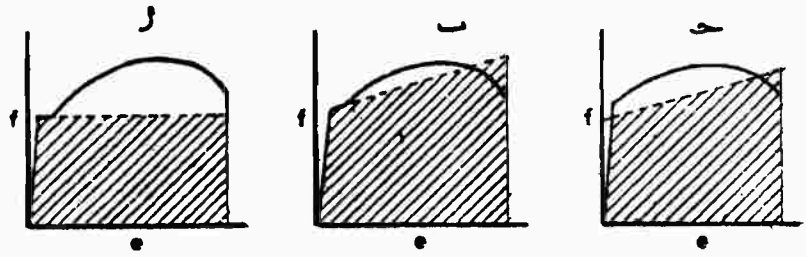
وتعين قيمة E_r لأى إنفعال أقصى طرفى $e_t = e_c$ معلوم للمقطع بيانيا من منحنى الإجهاد والانفعال كما فى الشكل رقم (٦ — ١١) كما تعين قيمة R من المعادلة :

$$R = \frac{D}{e_t + e_c}$$

(ح) باستخدام منحنى تقريبى مفروض للإجهاد والانفعال .

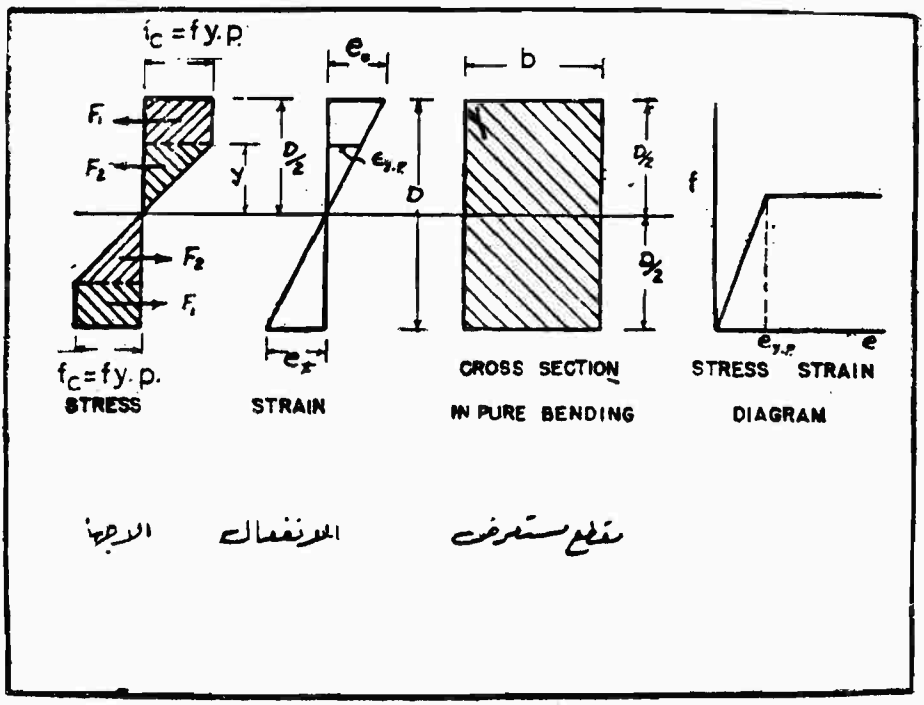
يمكن فرض علاقة بيانية مقربة لتسهيل الحسابات ، ومن أمثلة ذلك التقريبات المبينة بشكل رقم (٦ — ١٢) .

ولتطبيق ذلك نفرض أن مقطع الكرة مستطيل وأن منحنى الإجهاد والانفعال التقريبى كما هو فى شكل (٦ — ١٢) أى أننا كبر إجهاد شد أو ضغط لا يتعدى فرضاً إجهاد الخضوع . وتحسب قيمة عزم الانحناء كما هو مبين بالشكل رقم (٦ — ١٢) كما يأتى :—



بعض تقريب المنحنى البيانى للاجهاد والانفعال لتسهيل حساب مساحته

شكل رقم (٦ — ١٢)



شكل رقم (٦ — ١٣)

توزيع الاجهاد والانفعال على مقطع مستعرض نتيجة تعرضه لانحناء خالص فوق حد المرونة

$$M = 2\ \{b.\ f_{yield}\ [\ D/2 - y\ ] \cdot [\ \tfrac{1}{2}\ (\ D - y\ ) + y\ ]\}$$
$$+\ \{2\ b.\ (\ f_{yield}\ .\ y\ /2\ ).\ 2/3\ y\ \} = b.\ f_{yield}\ [\ D^{2}/4 - y^{2}/3\ ]$$

Introducing $y = (\ e_{yield}\ /\ et\ ).\ D/2$ then :

$$M = b\ D^{2}/\ 12\ .\ f_{yield}\ .\ [\ 3 - (\ e_{yield}\ /\ et\ )^{2}\ ]$$

i. e. $M\ /\ M_{yield} = \tfrac{1}{2}\ [\ 3 - (\ e_{yield}\ /\ et\ \ 2\ ]$

والنسبة المذكورة بين عزم الانحناء فوق حد المرونة وعزم الانحناء عند الخضوع تكون بحد أقصى ١ ½ فى حالة مقطع الكرة المستطيل، أما إذا تغير مقطع الكرة فيتغير ذلك الحد الأقصى لتلك النسبة كما يتبين من الشكل رقم (٦ — ١٤) الذى يوضح أنه للحصول على إنفعال معين فى الجزيئات الطرفية للكرة فإن تحملها لعزم الانحناء تختلف قيمتها باختلاف شكل مقطع الكرة أى أن شكل المقطع يؤثر فى قيمة عزم مقاومتها للانحناء .

ثالثا ـ انواع اختبار الانحناء :

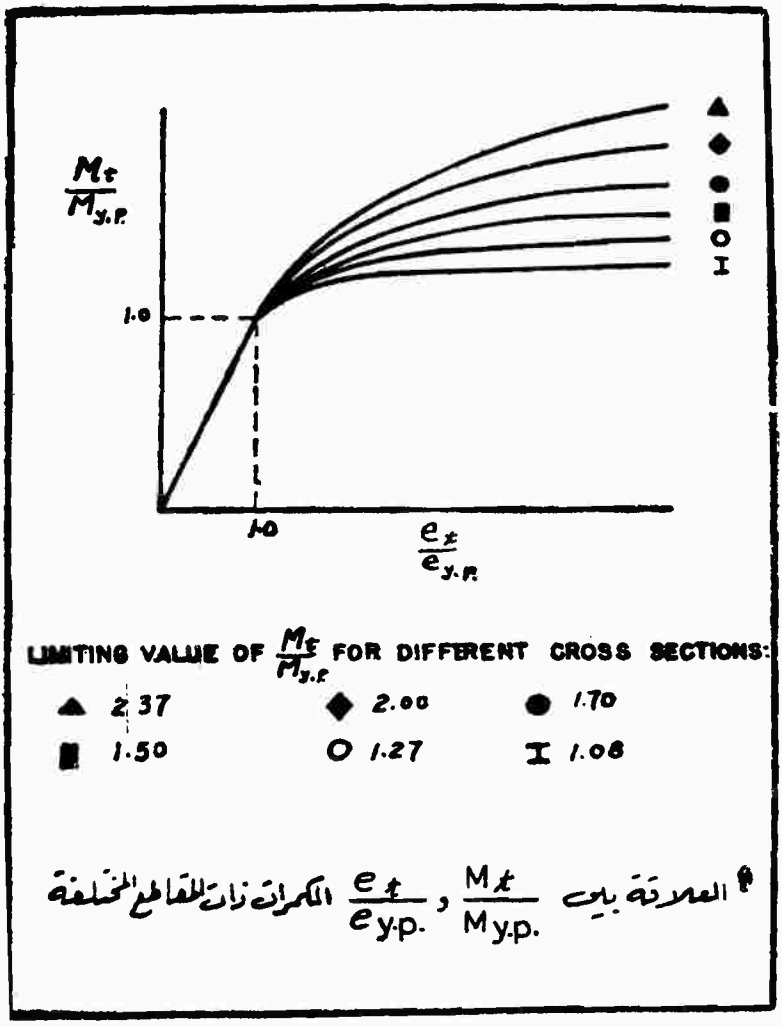
يمكن تقسيم الإختبار تبعاً لطبيعة إستخدامه إلى النوعين الرئيسيين التاليين :

ا — إختبار الانحناء الكمرى : (Bending beam test)

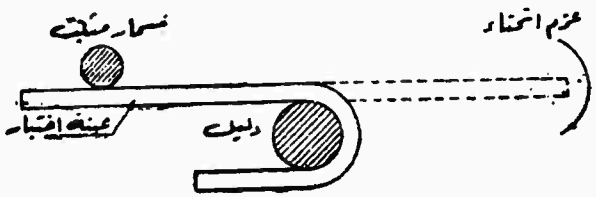
وفيه تحمل القطع المختبرة وهى على شكل كمرات بحمل جانبي أو أحمال جانبية ويحدد حمل الكسر وسهم الانحناء عند الكسر لتعيين مقاومة التحميل للإنحناء وصلابة مادة الكرة وقد يحدد أيضاً أثناء الاختبار قراءات مختلفة للحمل المؤثر وسهم الانحناء المصاحب له لرسم منحنى الحل وسهم الانحناء لتعيين خواص المواد الميكانيكية. كما قد تقاس قيم الانفعال أو زوايا التقوس فى مقاطع الكرة المختلفة . ويجرى هذا الاختبار على المواد القصفه مثل الحديد الزهر . وتنص المواصفات القياسية لقبول هذه المواد أو منتجاتها فى الصناعة ضرورة إجراء هذا الاختبار لتحديد خاصيتى المقاومة لتحمل الانحناء والصلابة .

ب — إختبار الثنى البارد : (Cold bend test) .

وفيه تثنى القطع المختبرة بعزم إنحناء حتى يتوازى طرفاها وذلك فى درجة حرارة معمل الاختبار العادية كما هو مبين بالشكل رقم (٦ — ١٥) .



شكل رقم (٦ — ١٤)



اجراء الثني على البارد لقضيب معدني

ويجرى هذا الاختبار فقط على المواد المطيلة للتأكد من تواجد خاصية المطولية بها فإذا كسرت أو شرخت عند ثنيها وقبل أن يتوازى طرفاها تعتبر غير صالحة بالنسبة لكونها مادة مطيلة وتنص المواصفات القياسية على ضرورة اجراء اختبار الثنى البارد للمواد المطيلة مثل الصلب الطرى عند استخدام هذه المواد فى الاعمال الهندسية للتأكد من استيفائها هذه الخاصية وذلك بالاضافة إلى معرفة النسبة المئوية للاستطالة من إختبار الشد التى تحدد خاصية المطولية للمادة .

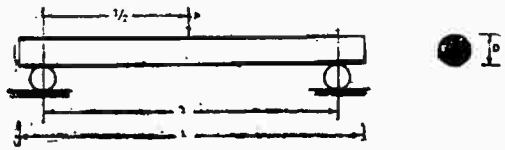
رابعا ـ اختبار الانحناء الكمرى

ا ـــ عينات الاختبار :

تصمم عينات الانحناء بأبعاد معينة بشرط أن يكون كسر العينة ناتج من تأثير الانحناء وليس نتيجة لقوى القص الافقية أو الرأسية كذلك ليس نتيجة لاجهادات الشد الضلعية القطرية (Diagonal Stress) الحادثة من تأثير قوة القص . لذلك يجب ألا يكون طول العينة صغيرا جدا بالنسبة لعمقها أى لارتفاع العينة. ويمكن أن نعتبر أن العينة مناسبة لاختبار الانحناء وتوفى الاشتراطات السالفة الذكر إذا كان بحر العينة أى المسافة بين نقطتى الارتكاز (Span) L تساوى من ٦ إلى ١٢ مرة عمق العينة أى : L= 6d to 12d

وتنص المواصفات القياسية لكل مادة على أبعاد عينات إختبار الانحناء الكمرى وشكل تلك العينات وعلى طريقة تحضيرها وعلى طريقة تحميلها ، فمثلا تنص بعض المواصفات القياسية على أن عينات الحديد الزهر عبارة عن قضبان مستديرة المقطع تصب منفصلة عن الأجسام المصبوبة التى يراد معرفة خواص مادتها فى الانحناء ولكن تصب فى نفس الوقت أثناء صب تلك الأجسام وفى نفس ظروف قوالب الصب وبنفس ملعقة الصب وبنفس مادة الصب وفى نفس المكان مثل الأجسام المراد معرفة خواصها ، وقد حددت المواصفات القياسية المصرية أربعة أنواع لعينات الحديد الزهر فى الانحناء الكمرى طبقا لسمك مقطع الصبة المراد معرفة خواصها حيث أن سمك الصبة يؤثر فى خواصها نتيجة تأثير سرعة تبريد الجزء الخارجى عن الجزء الداخلى منها لذلك يلزم أن يزيد عمق عينة الاختبار بزيادة سمك الصبة التى تمثلها هذه العينة وتقل بقلتها ، وهذه الأنواع الأربعة من العينات عبارة عن كمرات مبينة أبعادها بالشكل رقم (٦ — ١٦) وترتكز كل عينة على نقطتى ارتكاز وتحمل فى منتصف البحر (Mid span) حتى الكسر .

أما المواصفات القياسية الأمريكية (A . S . T . M .) فإنها تحدد أبعاد عينات الحديد الزهر كما فى جدول رقم (٦ — ٢) .



سمك العينة ك	القطر د ك	الطول ل ك (على الأقل)	المسافة بين نقطتى الارتكاز ع ك
٤ — ٨	١٣	٣٠٠	٢٦٠
أكبر من ٨ — ١٥	٢٠	٤٥٠	٤٠٠
أكبر من ١٥ — ٣٠	٣٠	٦٥٠	٦٠٠
أكثر من ٣٠ — ٥٠	٤٥	٩٥٠	٩٠٠

المواصفات القياسية المصرية للحديد الزهر (م . ق ١) اختبار الانحناء الكمرى

شكل رقم (٦ — ١٦)

جدول رقم (٦-٢) أبعاد عينات الحديد الزهر للمواصفات الأمريكية (A.S.T.M)

السمك الرئيسى للصبة (بوصة)	الأبعاد الاعتيادية للعينة (بوصة)		المسافة بين نقطتى الارتكاز (بحر الكمرة) (بوصة)
	القطر D - بوصة	الطول L- بوصة	
٠,٥٠ أقل	٠,٨٧٥	١٥	١٢
من ٠,٥١ إلى ١,٠٠	١,٢٠	٢١	١٨
من ١,٠١ وأكبر	٢,٠٠	٣٧	٢٤

أما المواصفات القياسية البريطانية (B.S.S) فتستخدم للحديد الزهر نفس الشكل والتحميل السابق ولكن بأبعاد أخرى كما فى الجدول رقم (٦ — ٣).

جدول رقم (٦ — ٣) المواصفات القياسية البريطانية (B.S.S).

السمك الرئيسى للصبة (بوصة)	قطر العينة D — بوصة	السماح فى أبعاد القطر — بوصة	الطول الكلى L — بوصة	المسافة بين نقطتى الارتكاز li — بوصة
لاتزيد على $\frac{3}{8}$	٠,٦٠	٠,٠٤٥	١٠	٩
أكبر من $\frac{3}{8}$ إلى $\frac{3}{4}$	٠,٨٧٥	٠,٠٦٥	٢٥	١٢
أكبر من $\frac{3}{4}$ إلى $1\frac{1}{8}$	١,٢٠	٠,٠٩٠	٢١	١٨
أكبر من $1\frac{1}{8}$ إلى $1\frac{3}{8}$	١,٦٠	٠,١٠٠	٢١	١٨
أكبر من $1\frac{3}{8}$	٢,١٠	٠,١٠٠	٢٧	٢٤

ب — إجراء الاختبار :

يجرى اختبار الانحناء الكمرى باستخدام مكنات الاختبار العامة كما يستخدم

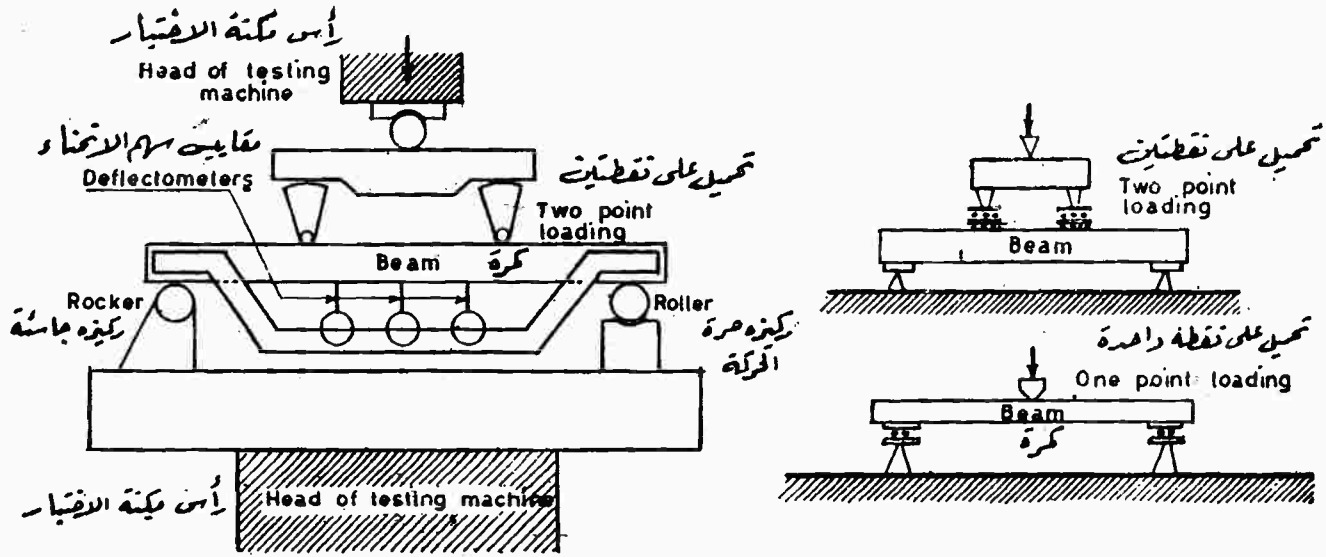
لذلك أحياناً مكنات تعمل باليد مصممة خصيصاً لهذا الغرض . والأجزاء الرئيسية التى يشملها جهاز اختبار الانحناء هى قواعد الارتكاز للكمرة (Supports) وأجزاء التأثير بالحمل على الكمرة (Loading device) وقرص مدرج لبيان قيمة هذا الحمل وجهاز أو أجهزة لقياس سهم الانحناء (Deflectometers) وقد يلزم أحياناً مقياس الانفعال لقياس الانفعال أو التغير فى الطول فى أجهزة الكمرة إذا أريد ذلك . وتكون هذه الأجزاء الرئيسية كما يلى :

١ — قواعد الارتكاز . (Supports)

يشترط فى قواعد الارتكاز أن تكون بشكل يمكن من حرية حركة الكمرة عليها أثناء التحميل وألا تسبب نقط تماسها مع الكمرة أى تركيز فى الإجهادات عندها (Stress concentration) كذلك توضع بحالة تمكن من الحركة الجانبية القليلة حتى لاتتولد أية إجهادات التوائية (Torsional stresses) بالكمرة كما يجب أن تكون متزنة تحت تأثير الأحمال . وقد بنيت معظم مواصفات الاختبار على أن تلك القواعد تكون من كتل معدنية أسطوانية أى مستديرة المقطع أو من كتل معدنية ذات أسطح مستديرة المقطع كما يتبين من الشكل رقم (٦ — ١٧) ويحسن عند اختبار المواد غير المعدنية كالخرسانة والخشب وضع قطعة لوحية صغيرة بين قواعد الارتكاز والكمرة لتوزيع الحمل توزيعاً مناسباً يمنع تركز الاجهاد بالكمرة عند نقطة ارتكازها على القواعد كما يتضح من الشكل رقم (٦ — ١٧) كما يحسن أن تكون إحدى قواعد الارتكاز مثبتة بجسم جهاز الاختبار وذات سطح مستدير على أن تكون القاعدة الأخرى للإرتكاز كتلة معدنية أسطوانية حرة الحركة على جسم الجهاز كما يتضح من الشكل رقم (٦ — ١٧).

٢ — قطع التحميل : (Loading blocks)

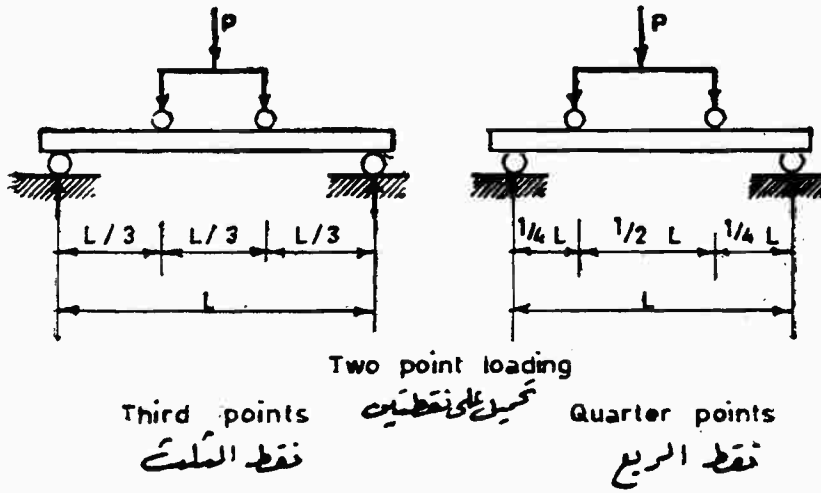
إن الاشتراطات التى سبق ذكرها فى قواعد الارتكاز هى نفسها الاشتراطات الواجب توافرها فى القطع المعدنية المستخدمة لنقل الحمل من مكنة الاختبار إلى العينة المختبرة

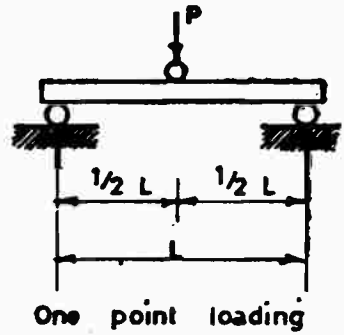


شكل رقم (٦ — ١٧) قواعد الارتكاز لاختبار الانحناء

وتوضع قطع التحميل بمكنة الاختبار بحيث تنقل الحمل إلى الكمرة فى نقطة منتصف الكمرة أو بحيث ينقل الحمل إلى الكمرة فى نقطتين بحر الكمرة وهى نقطتى الثلث أو الربع للبحر كما يتبين من الشكل رقم (٦ — ١٨)

والتحميل فى نقطتين ميزة الحصول على منطقة بالكمرة المختبرة تحت تأثير عزم انحناء خالص ويفضل هذا التحميل فى بعض الاختبارات مثل اختبار الخرسانة فى الانحناء





شكل رقم (٦ — ١٨) التحميل فى اختبار الانحناء

أما عند اختبار المواد المعدنية القصفة كالحديد الزهر فقد رأت المواصفات القياسية جعل التحميل فى نقطة منتصف الكمرة لسهولته رغم تعرض الكمرة إلى عزم وانحناء وقوة قص حيث أن هذه المواد لها مقاومة أكبر فى القص عنها فى تحمل الشد ويسبب تحميل الكمرة كسرها بقوة الشد الناتجة من عزم الانحناء وليس بقوى القص الأمر الذى يجعل الاختبار هو مقاومة الكمرة لعزم الانحناء .

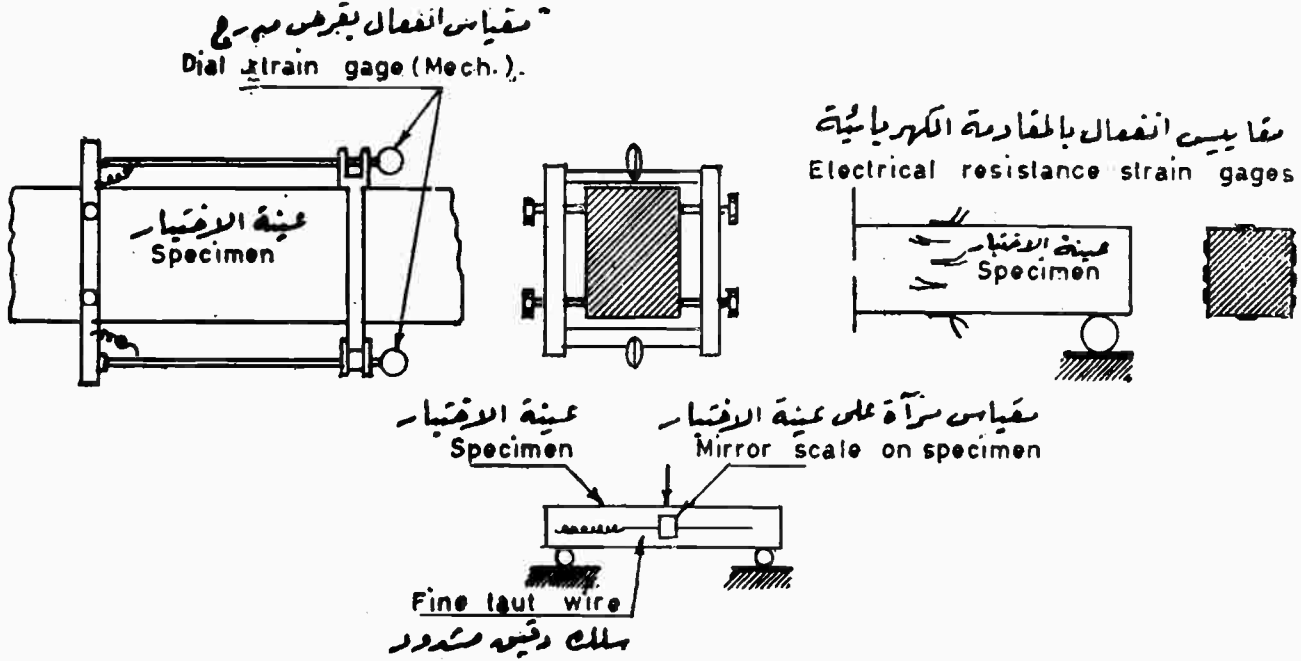
٣ — أجهزة قياس سهم الانحناء :(Deflectometers)

عند وضع مقياس القرص على الكمرة لقياس سهم الانحناء فى منتصف بحرها أوالأجهزة المتعددة لقياس سهم الانحناء فى أكثر من نقطة حسب مطلوبات الاختبار يراعى أن يصمم ذلك بشكل يجعل أى تهشيم عند قواعد الارتكاز أو أى هبوط (Settlement) فى هذه القواعد أو أى تشكل لقواعد الارتكاز أو قطع التحميل لا يتسبب عنه أخطاء ملحوظة فى قراءات المقياس . وإحدى الطرق لتفادى مصادر هذه الأخطاء هى قياس سهم الانحناء بالنسبة الى النقط الموجودة على خط الانحناء عند مقطع الكمرة فوق قاعدتى الارتكاز ومثل هذا التصميم مبين بالشكل رقم (٦ — ١٧) بوضع أجهزة القياس مثبتة فى اطار يرتكز على نقطتين فى منصف مقطع الكمرة عند قاعدتى الارتكاز .

٤ — مقاييس الانفعال (Strain gages)

تستخدم مقاييس الانفعال لقياس التشكل عند استعمال الأجهزة الميكانيكية أو الأجهزة الضوئية أو لقياس الانفعال مباشرة عند استخدام مقياس المقاومة الكهربائى وذلك بتثبيتها رأسياً على السطح العلوى والسفلى للكمرة حيث يوجد أكبر اجهاد للشد والضغط وأحيانا على السطح الجانبى للكمرة لبيان الاجهادات فى النقط المختلفة لمقطع الكمرة كما يتبين من الشكل رقم (٦ — ١٩)

ويجرى اختبار الانحناء الكمرى القياسى لتعيين حمل الكسر (Breaking load) وسهم الانحناء فى منتصف بحر الكمرة (Mid deflection) عند الكسر ليعبر الأول



شكل رقم (٦ — ١٩) تثبيت مقاييس الانفعال على الكمرة في اختبار الانحناء

عن مقاومة الكمرة للإنحناء ويعبر الثانى عن صلابة الكمرة ، وقد يكون الغرض من إجراء اختبار الانحناء الكمرى دراسة خواص ميكانيكية معينة أو ظواهر معينة لخصائص معدن الكمرة مثل معاير الرجوعية أو معاير المتانة أو دراسة التشكل الطولى للكمرة أو شكل مقاطعها ... الخ .

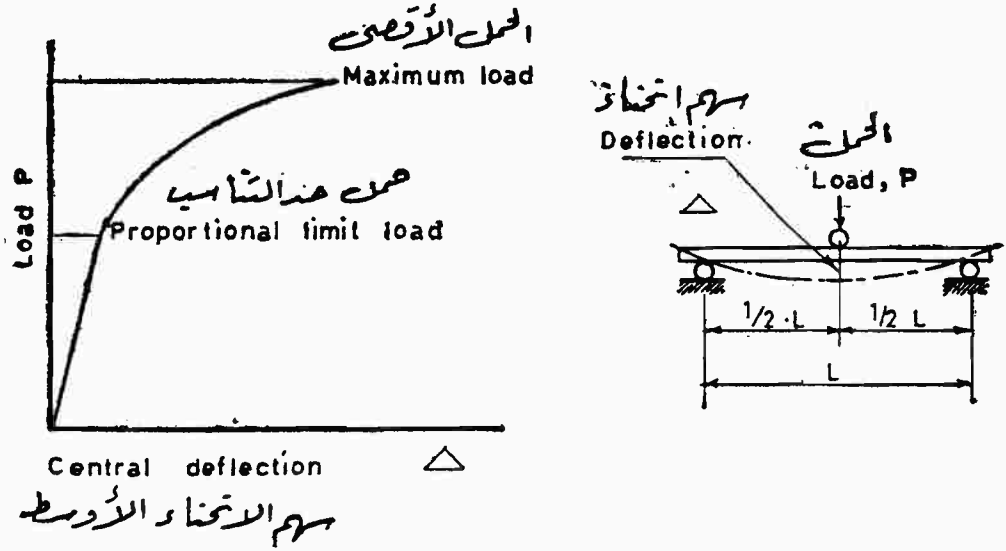
جـ ــ الخواص الميكانيكية فى الانحناء :

من أهم الخواص الميكانيكية فى الانحناء ما يأتى :

١ ــ مقاومة الانحناء : (Flexural strength)

تعين مقاومة الانحناء فى حدود المرونة عن طريق حساب إجهاد الانحناء عند حد التناسب وذلك برسم المنحنى البيانى للحمل وسهم الانحناء من واقع القراءات المعملية كما يتبين الشكل رقم (٦ ــ ٢٠) وتحديد الحمل عند حد التناسب ثم حساب الاجهاد بالمعادلة $f = \frac{M}{I} y$

أما المقاومة القصوى للانحناء والتى تسمى معاير الكسر (Modulus of rupture)



شكل رقم (٦ ــ ٢٠) تعين الخواص الميكانيكية فى إختبار الانحناء

فتعين للمواد القصفة وهى التى يجرى عليها اختبار الانحناء الكمرى غالبا باستخدام المعادلة : $f = \frac{M.y}{I}$.

ومع أن هذه المعادلة مستنتجة على أساس حد المرونة فقط إلا أنه يمكن استخدامها مع التقريب البسيط للمعادن القصفة نظراً لعدم تغير مقطع الكمرة تغيرا ذا قيمة ملحوظة عند الكسر عن أثناء التحميل الأولى، ويمكن التعبير عن مقاومة الانحناء بالإضافة إلى معايير الكسر بحمل الكسر أى الحمل الأقصى فى الانحناء والقبول أو رفض المواد طبقا للمواصفات القياسية تقارن هذه القيم بالمنصوص عنها كحد أدنى فى المواصفات للعينات ذات الأبعاد القياسية .

٢ — الصلابة : (Stiffness)

تحدد صلابة المادة بقيمة معاير المرونة فتزيد بزيادته وبالعكس تقل بقلته، ويعين معاير المرونة من المعادلة :

$$\Delta = \frac{PL^3}{48\,EI} \quad \therefore \quad E = \frac{pL^3}{48\Delta I} = \frac{P}{\Delta} \cdot \frac{L^3}{48\,I} = \frac{P}{\Delta} \times \text{Constant}$$

حيث $\frac{P}{\Delta}$ ميل الخط المستقيم من منحنى الحمل وسهم الإنحناء ويمكن التعبير عن صلابة المادة علاوة على معاير المرونة بقيمة سهم الانحناء القصوى عند الكسر أى : Δ_{max} وتقارن هذه القيم بالحد الأدنى المبين بالمواصفات القياسية عند إجراء اختبار الانحناء الكمرى القياسى لقبول أو رفض المواد .

٣ — الرجوعية فى الانحناء : (Bending resilience)

وتحدد قيمة الرجوعية فى الانحناء بقيمة أكبر طاقة يمكن للكمرة أن تختزنها وهى تحت تأثير الحمل ثم إعادة هذه الطاقة كاملة بعد إزالة التحميل أى تكون والكمرة محملة بأكبر حمل فى حدود المرونة وهو حد التناسب فى الانحناء . وبذلك تكون الرجوعية تساوى مساحة المثلث الواقع تحت خط التناسب بين الحمل وسهم الانحناء ويمكن التعبير عن رجوعية المواد ومقارنتها فى المواد المختلفة بمعاير الرجوعية ويساوى الرجوعية مقسومة على حجم الجزء المجهد من الكمرة .

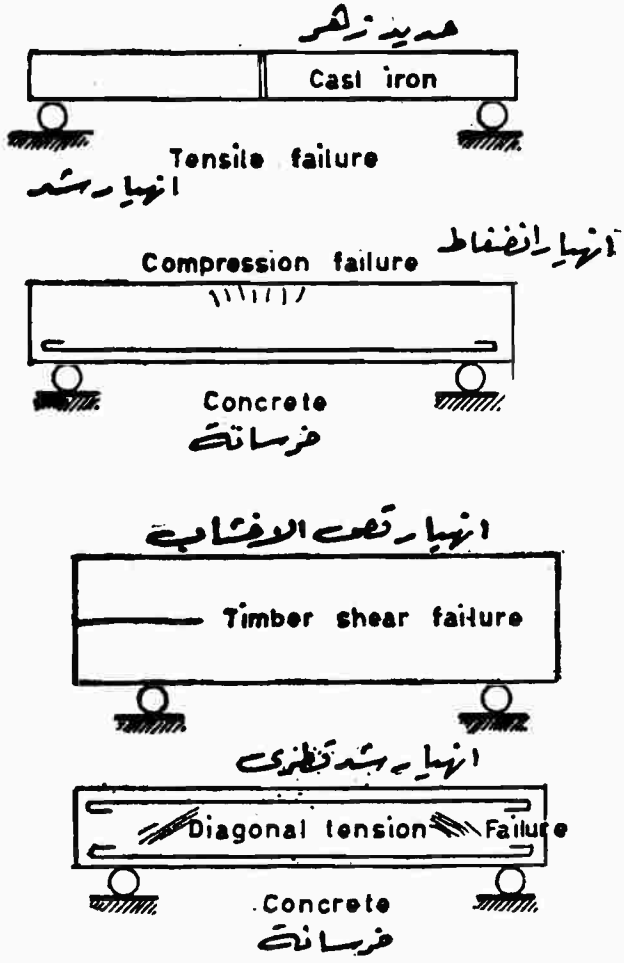
٤ ـــ المتانة فى الانحناء (Toughness in Bending)

وتحدد قيمتها بالطاقة القصوى التى يمكن للكمرة المختبرة تحملها حتى الكسر وتمثلها المساحة الكلية تحت المنحنى البيانى للحمل وسهم الانحناء ويمكن التعبير عن مقاومة المادة للصدم فى تحميل الانحناء بحساب معاير المتانة والذى يساوى المساحة سالفة الذكر مقسومة على حجم المجهد من الكمرة وهو الموجود بين نقطتى الارتكاز فقط .

د ـ انهيار المواد بالانحناء الكمرى :

يختلف شكل إنهيار الكمرات المختبرة طبقا لنوع المادة ونوع الإجهادات المسببة للإنهيار وأبعاد العينة المختبرة وشكل وأبعاد المقطع والعلاقة بين عمق وبحر الكمرة وفى المواد القصفة يكون الانهيار غالبا بالكسر نتيجة ابتداء الكسر فى المقطع الأكثر إجهاداً عند جزيئاته الطرفية (Outer fibers) المجهدة بالشد حيث تحمل هذه المواد للشد ضعيف بالنسبة لتحملها فى الضغط فمثلا الحديد الزهر تحمله فى الشد حوالى ٢٥٪ من مقاومته فى الضغط والخرسانة مقاومتها فى الشد حوالى ١٠٪ من مقاومتها فى الضغط ويكون شكل مقطع المكسر فى الحديد الزهر عمودى على المحور الطولى للكمرة بكامل المقطع ، كذلك الأمر فى الخرسانة العادية أما فى الخرسانة المسلحة والخشب فيكون الإنهيار الكمرى بالكسر على هيئة شروخ متعددة نتيجة إجهاد الشد أو القص أو الشد الضلعى القطرى (Diagonal tension) الناتج من القص أو من إجهاد الضغط أحيانا ، كما يتبين من الشكل رقم (٦ - ٢١) .

وتؤثر سرعة التحميل وكيفيته عند إجراء إختبار الانحناء الكمرى فى قيمة المقاومة لذلك تحدد المواصفات القياسية لاختبار المواد فى الانحناء السرعة المناسبة للاختبار لكل مادة كما يلاحظ أن المقاومة للانهيار فى المواد القصفة عند تعرضها للانحناء الكمرى أكبر منها عند تعرضها للشد وذلك لوجود مقاومة ضغط لها أثناء الانحناء الكمرى تحسن من مقاومتها للانهيار . فمثلا معاير الكسر للحديد الزهر حوالى ١,٨ من قيمة المقاومة للشد ، وفى الخرسانة العادية يتراوح من ١½ إلى ٢ من قيمة المقاومة للشد ، كما يلاحظ أيضاً أن مقاومة الإنحناء الكمرى لهذه المواد غالباً ماتكون أقل من



شكل رقم (٦ — ٢١) أنواع الانهيارات للمواد المختلفة فى اختبار الإنحناء

مقاومتها فى الضغط فمثلا نسبة معاير الكسر فى الإنحناء إلى مقاومة الضغط تساوى حوالى ½ للحديد الزهر وحوالى ١٥ر٠ إلى ٢٠ر٠ فى حالة الخرسانة العادية .

خامسا — اختبار الثنى على البارد
(Cold Bend Test)

تجرى اختبارات الثنى على البارد للتأكد من تواجد خاصية المطولية للمعادن التى ستعمل أثناء التشغيل فى أغراض خاصة وكذلك لبيان مدى نقص المطولية نتيجة تعريض المعادن لبعض معاملات معينة ميكانيكية أو حرارية أثناء التشكيل والتصنيع ،

كما تستخدم هذه الاختبارات للمعادن لمعرفة تواجد كمية عالية من الكربون أو الفسفور بها وكذلك لمعرفة عدم إنتظام ومناسبة ظروف الدلفنة — الأمر الذى يجعلها ضعيفة المطولية . لذلك تتطلب مواصفات معظم أنواع الصلب ضرورة اجراء اختبار الثنى على البارد لاسيما الصلب على شكل أسياخ وألواح مثل أسياخ الصلب للخرسانة المسلحة وصلب مسامير البرشام (Rivet Steel) والصلب الإنشائى (Strctural Steel) وصلب المستودعات المعرضة لضغط داخلى. كما يجرى غالبا اختبار الثنى على البارد لاختبار مطولية الوصلات الملحومة (Welded Joints) ويكون اجراء اختبار الثنى على البارد كما يلى:

١ — قطع الاختبار (Test pieces)

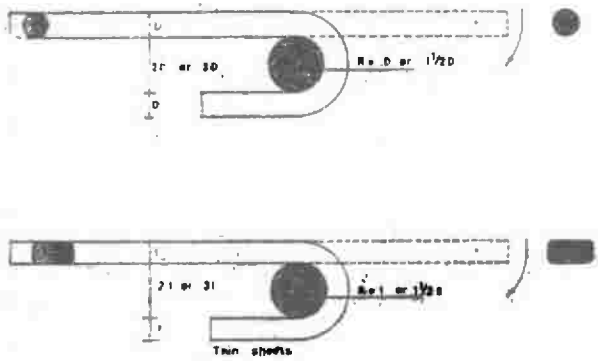
تجهز قطع الاختبار للأسياخ أو القضبان أو الأسلاك بقطعها بالطول المناسب الذى يمكن من اجراء الاختبار بمكنات الاختبار الموجودة ويلاحظ ترك قطر السيخ أو القضيب أو السلك كما هو بدون ازالة أية طبقة سطحية منه الا اذا نقص على ذلك فى مواصفات التعاقد وقد يجهز القضيب من كتلة أو مقطع انشائى معين فيكون قطره مناسبا وحسب مواصفات الاختبار فى التعاقد . أما الألواح (Plates) تجهز قطع اختبارها بتحضير شرائح (Strips) بطول مناسب لمكنة الاختبار وبنفس سمك اللوح . وتكون هذه غالباً بعضها فى اتجاه دلفنة الألواح والبعض الآخر عمودى على اتجاه الدلفنة لمعرفة المطولية فى كل من هذين الإتجاهين ويراعى ضرورة عمل استدارة بسيطة بأركان مقاطع قطعة اللوح المختبرة أى عمل استدارة للسوكة بطول القطعة وذلك للألواح ذات السمك الكبير لتفادى تأثير تركز الإجهاد الناتج من الحروف المدببة على نتيجة الاختبار.

ب اجراء الاختبار :

١ — القضبان :(Bars)

تثنى العينة حتى يتوازى طرفاها وتكون العلاقة بين قطر القضيب (D) ونصف قطر القطعة الاسطوانية التى يثنى حولها القضيب (R) كالآتى :

اذ كان قطر القضيب يساوى ٢,٥ سم أو أقل فإن R = D أما اذا كان قطر القضيب أكثر من ٢,٥ سم فإن R=1½D كما يتضح من شكل رقم (٦ — ٢٢)



إختبار الثنى على البارد للقضبان والألواح الرقيقة

شكل رقم (٦ — ٢٢)

والغرض من هذا التحديد لتلك العلاقة بين R ، D هو توحيد إجراء اختبار الثنى على البارد حتى يمكن أن تكون نتيجة الاختبار صالحة للمقارنة مهما اختلفت أماكن إجراء الاختبار لتكون أساس مؤحد صالح لقبول أو رفض المواد حيث أن اختلاف قطر الاسطوانة التى يثنى حولها القضيب يؤثر فى نتيجة الاختبار فالقطر الكبير قد لا يظهر الكسر بينما لنفس القضيب لو ثنى حول قطر صغير يكون الاختبار شديداً على المادة ويكسرها قبل تمام الثنى .

٢ — الألواح : (Plates) .

يجرى هذا الاختبار تماماً كالقضبان على أن يحل سمك اللوح (t) محل قطر القضيب D أى أن العلاقة بين (t ، K) تكون كالآتى شكل (٦ — ٢٢) .

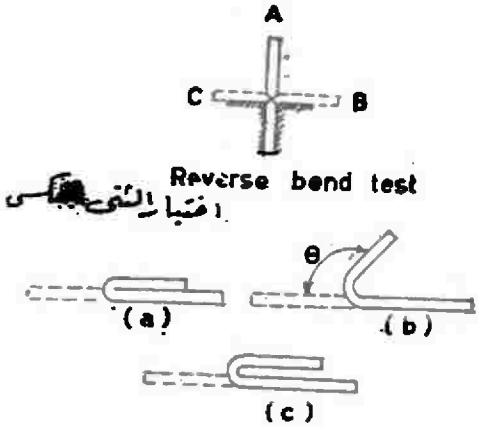
إذا كانت t تساوى ٢٥ مم أو أقل R = t وإذا كانت t تساوى أكثر من ٣٥ مم فإن R = 1 ½ t .

٣ — الألواح الرقيقة (الرقائق) : (Thin Sheets) .

نظرا لصعوبة إجراء الثنى على البارد حول قطعة اسطوانية بقطر ذى علاقة بسمك اللوح الرقيق كما هو الحال فى القضبان والألواح سالفة الذكر لذلك فإن إجراء اختبار الثنى على البارد للألواح الرقيقة يكون بثنى قطعه الاختبار على نفسها كما هو مبين بالأشكال رقم (٦ — ٢٣) ، (٦ — ٢٤) ، (٦ — ٢٥) .

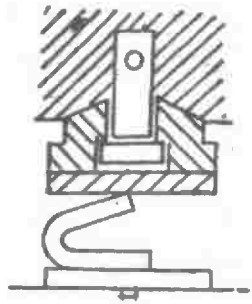
إختبار الثنى على البارد للألواح الرقيقة (الرقائق)

شكل رقم (٦ — ٢٣)



BENT TESTS FOR SHEET METAL

شكل رقم (٦ — ٢٤) اختبار الثنى على البارد للالواح الرقيقة

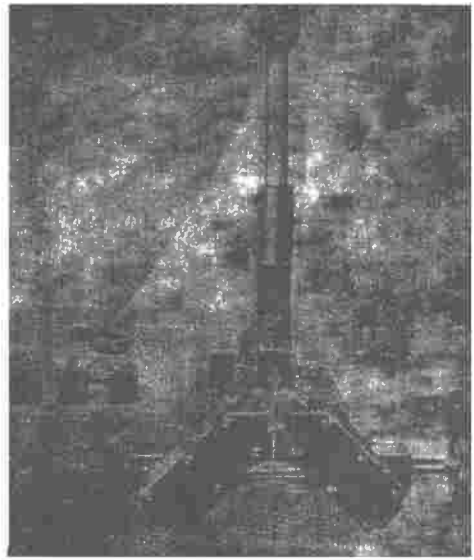


FOLDING FLAT BETWEEN THRUST PLATES.

شكل رقم (٦ — ٢٥) ثنى الرقائق ثنياً مسطحاً بين لوحى ضغط

٤ — الأسلاك : (Wires) .

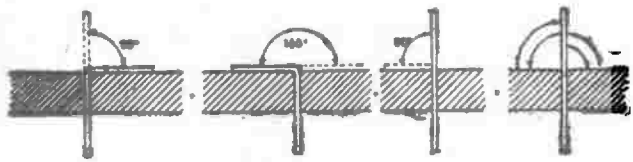
تثنى على البارد قطع الاختبار للسلك بعد شدها شداً بسيطاً وتثبيتها بالمكنة الخاصة بذلك والتى تشبه المنجلة شكل رقم (٦ — ٢٦) وذلك بثنيها جانبياً ٩٠ درجة



شكل رقم (٦ — ٢٦) مكنة اختبار ثنى الأسلاك على البارد

ثم جانبياً فى الاتجاه المعاكس ١٨٠ درجة ثم جانبيا فى الاتجاه الأول ٩٠ درجة أى لترجع لوضعها الرأسى الأول . ويكون الاختبار قد تم بثنى السلك دورتين كاملتين كما هو فى الشكل (٦ — ٢٧) فاذا لم ينكسر يعتبر مقبولا ، ويمكن مقارنة مدى تحمل قطعتين من السلك للثنى على البارد باجراء الثنى جانبياً عدة مرات حتى كسر السلك فيكون عدد الدورات التى كسرت السلك هو مقياس لهذه المقارنة .

ويمكن — طبقا للمواصفات أو لاشتراطات التعاقد — أن تختبر الألواح الرقيقة جداً بنفس اختبار الاسلاك المذكورة .



اختبار الثنى على البارد للأسلاك

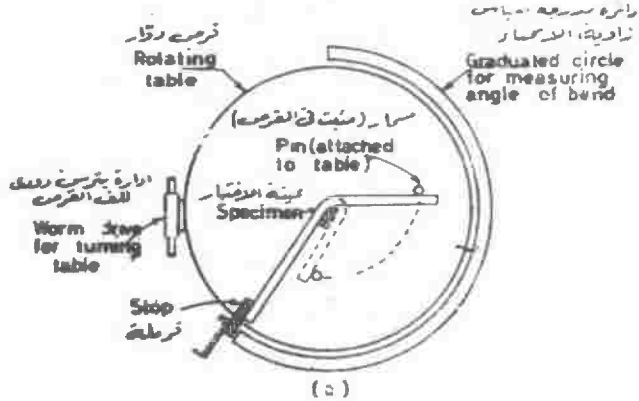
شكل رقم (٦ —

جـ – مكنات الاختبار (Testing Machines)

يجرى اختبار الثنى على البارد بإحدى الاجهزة الآتية :

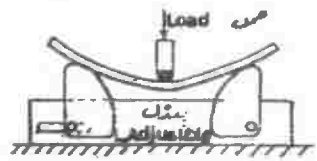
١ – قطع اسطوانية (pins) مثبتة توضع بينها قطعة الاختبار التى يؤثر عليها بعزم انحناء يدويا أو ميكانيكيا بطرق مختلفة شكل (٦ – ٢٢) .

٢ – مكنة اختبار خاصة بالثنى على البارد فقط مثل مكنة ألسن (Olsen) أو جهاز شلر (Scheler) كما فى شكل رقم (٦ – ٢٨) .



(a)

OLSEN COLD BEND MACHINE



(b)

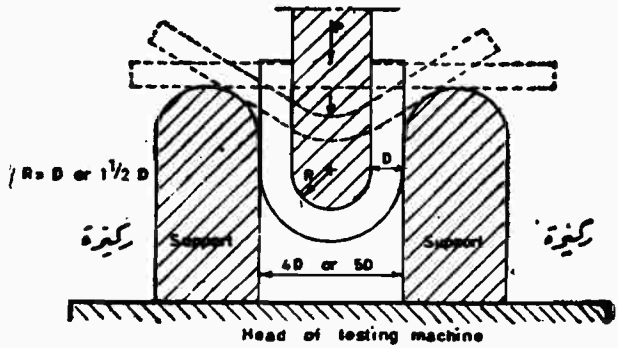
SCHELER DEVICE FOR COLD BEND TEST

جهاز شلر لاختبار الثنى على البارد

شكل رقم (٦ – ٢٨)

٣ – مكنة الاختبار العامة باستخدام قواعد ارتكاز إسطوانية وقطع تحميل ذات طرف لنصف دائرى تتغير حسب قطر أو سمك العينة المختبرة بحيث تكون العلاقة بين نصف قطر طرف قطعة التحميل وقطر أو سمك عينة الاختبار طبقا للعلاقة التى سبق

ذكرها بين R و D أو t و D ويراعى عند جراء الاختبار أن يكون التحميل فى منتصف العينة والمسافة بين حافتى قاعدتى الارتكاز تساوى 4 D أو 4 t (فى حالة قطر أو سمك العينة ١٥ مم وأقل) أو تساوى 5D أو 5t (فى حالة قطر أو سمك العينة أكثر من ٢٥ مم) . حتى يمكن تحميل العينه بالضغط والاستمرار فى التحميل حتى يتوازا طرفا العينة تماما كما يتضح من الشكل رقم (٦ — ٢٩) .



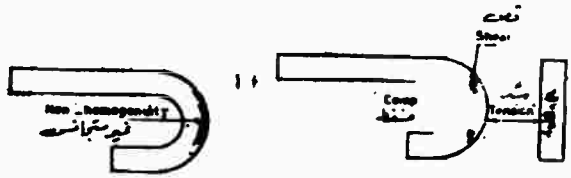
رأس مكنة الاختبار

اختبار الثنى على البارد باستخدام مكنة الأختبار العامة

شكل رقم (٦ — ٢٩)

واد فى اختبار الثنى على البارد :

يحدث للمواد المطيلة انهيار فى اختبار الثنى على البارد نتيجة اجهاد الشد أو اجهاد الضغط أو اجهاد القص أو بالتشقق والكسر نتيجة لعدم تجانسها (Non—homogeneous) وذلك فى الأماكن و بالحالة المبينة بالشكل رقم (٦ — ٣٠) .



انهيار المواد فى اختبار الثنى على البارد

شكل رقم (٦ — ٣٠)

سادسا — اختبارات ثنى أخرى للمعادن :

تختبر المعادن فى الثنى باختبارات أخرى خلاف الثنى على البارد لأغراض متنوعة منها ما يلى :

ا — اختبار الثنى على الساخن (Hot bend test)

يجرى هذا الاختبار أحياناً على الحديد المطاوع (Wrought iron) لبيان كمية الكبريت العالية الموجـــودة به والتى تسبب له قلة كبيرة فى المطولية فى درجات الحرارة العالية . ويكون إجراء الاختبار بتسخين الحديد المطاوع لدرجة اللحام حوالى ١٨٠٠° ف (٨٨٠° م) ثم ثنى القطعة المسخنة على سندان .

ب — اختبار ثنى التسقية (Quench bend test)

ويستخدم هذا الاختبار لصلب مسامير البرشام (Rivet steels) المستخدمة فى صناعة المراجل (Boilers) ويكون ذلك بتسخين الصلب وتسقيته ثم ثنيه والغرض من الاختبار بيان كمية الكربون العالية به حيث أن تواجدها يسبب نقص كبير فى مطولية الصلب .

جـ — اختبار ثنى الحز (Nick bend test)

يجرى هذا الاختبار إذا أريد إجراء اختبار سريع للمعادن لبيان أن جزيئاتها كبيرة التكوين أو لبيـان العيوب الداخلية التى تسبب نقص المطولية للمعـادن . ويكون إجراء الاختبار بحز العينة المختبرة بأزميل (chisel) ثم تثبيتها فى منجل وثنيها بواسطة مطرقة ويمكن إجراء هذا الاختبار بعناية أكثر بعمل الحز بمنشـار معادن أو بمكنة تفريز ثم تثنى العينة قليلا بمطرقة ويكمل الثنى بضغط العينة بحمل مركزى فى مكنة الاختبار .

أمثلة محلولة

١ ــ اجرى اختبار انحناء على كمرة من الخشب مربعة المقطع ومحملة بحمل مركز في منتصفها . وكانت المسافة بين نقطتي الارتكاز ٩٠ سم فإذا كان معاير مرونة هذا النوع من الخشب مساويا ١٠,٠٦٤ × ١٠^٤ كجم / مم^٢ وكانت قراءات الحمل وسهم الانحناء في منتصف البحر المقابل لكل حمل كما يلي :

الحمل (كجم)	٢٠٠	٤٠٠	٦٠٠	٩٠٠	١٢٠٠	١٥٠٠	١٨٠٠	٢٠٠٠	٣٢٠٠
سهم الانحناء (مم)	٠,٥٥	١,١٥	١,٨٨	١,٧٦	٣,٦٠	٤,٤٠	٥,٤٨	٦,١٣	٧,١٠

ارسم منحنى الحمل وسهم الانحناء وعين ما يأتي :

ا ــ أبعاد مقطع الكمرة ب ــ إجهاد حد التناسب

حـ ــ معاير الرجوعية د ــ معاير الكسر في الانحناء

هـ ــ معاير المتانة

الحـــل :

شكل رقم (٦ ــ ٣١) يبين منحنى الحمل وسهم الانحناء

ا ــ يعين معاير المرونة E من المعادلة : $E = \frac{P}{\Delta} \cdot \frac{l^3}{48 I}$

$P = 200$ kg $\quad \Delta = 0.55$ mm

$I = 900$ mm $\quad E = 1.064 \times 10^4$ kg /mm2

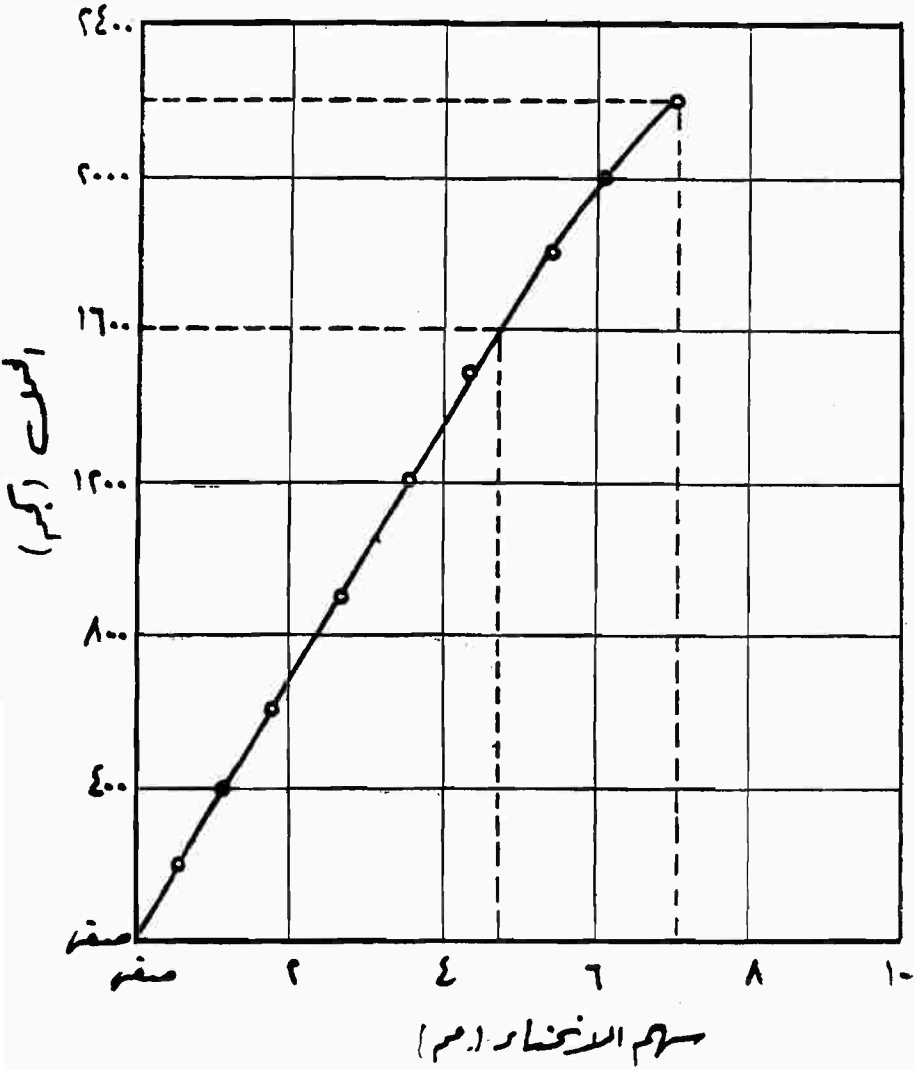
$$\therefore I = \frac{P}{\Delta} \cdot \frac{l^3}{48 E} = \frac{200}{0.55} \cdot \frac{(900)^3}{48 \quad 6.4 \times 10^4} = 52.0 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

وحيث أن مقطع الكمرة مربع طول ضلعه b

$$\therefore I = \frac{(b)^4}{12}$$

$$\therefore b = \sqrt[4]{12\ I} = \sqrt[4]{12 \times 52.0 \times 10^4} = 50.0 \text{ mm}$$

$$\therefore b = 50 \text{ cm}$$



شكل رقم (٦ — ٣١) العلاقة بين الحمل وسهم الانحناء

ب — من الرسم نجد أن حمل حد التناسب (P_{pl}) = ١٦٠٠ كجم

∴ يعين إجهاد حد التناسب (f_{pl}) من المعادلة :

$$f_{pl} = \frac{P_{Pl.l}}{4} \times \frac{v}{I} = \frac{1600 \times 90.0}{4} \times \frac{5}{\frac{2}{52}}$$

$$= 1730 \quad kg/cm^2$$

حـ ــ معاير الرجوعية $= \frac{\frac{1}{4} \times \text{حمل حد التناسب} \times \text{سهم الانحناء عند حد التناسب}}{\text{الحجم}}$

$$= \frac{\frac{1}{4} \times ١٦٠٠ \times ٠,٤٧٥}{٥ \times ٥ \times ٩٠} = ٠,١٧٠ \text{ كجم ، سم/سم}^{٣}$$

و ــ معاير الكسر فى الانحناء (f_b) :

$$f_b = \frac{P_{max} \cdot l}{4} \times \frac{y}{I} = \frac{2200 \times 90}{4} \times \frac{2.5}{52} = 2400 \quad Kg/cm^2$$

هـ ــ معـــاير المتانة $= \frac{\text{المساحة تحت منحنى الحمل وسهم الانحناء}}{\text{الحجم}}$

$$= \frac{\frac{1}{4} \times ٢٢٠٠ \times ٠,٧١}{٥ \times ٥ \times ٩٠} = ٠,٣٥ \text{ كجم ، سم/سم}^{٣}$$

٢ ــ كرة من الحديد الزهر ذات مقطع مستدير قطر ٥ سم مرتكزة ارتكازاً حراً فى نقطتين المسافة بينهما (البحر) تساوى ٤٦ سم ومحملة فى منتصف البحر بحمل مركز بقيمة تزداد تدريجياً حتى الكسر . وكانت قيمة الحمـــل بالطن وقيمة سهم الانحناء بالملليمتر عند منتصف البحر كما يلى :

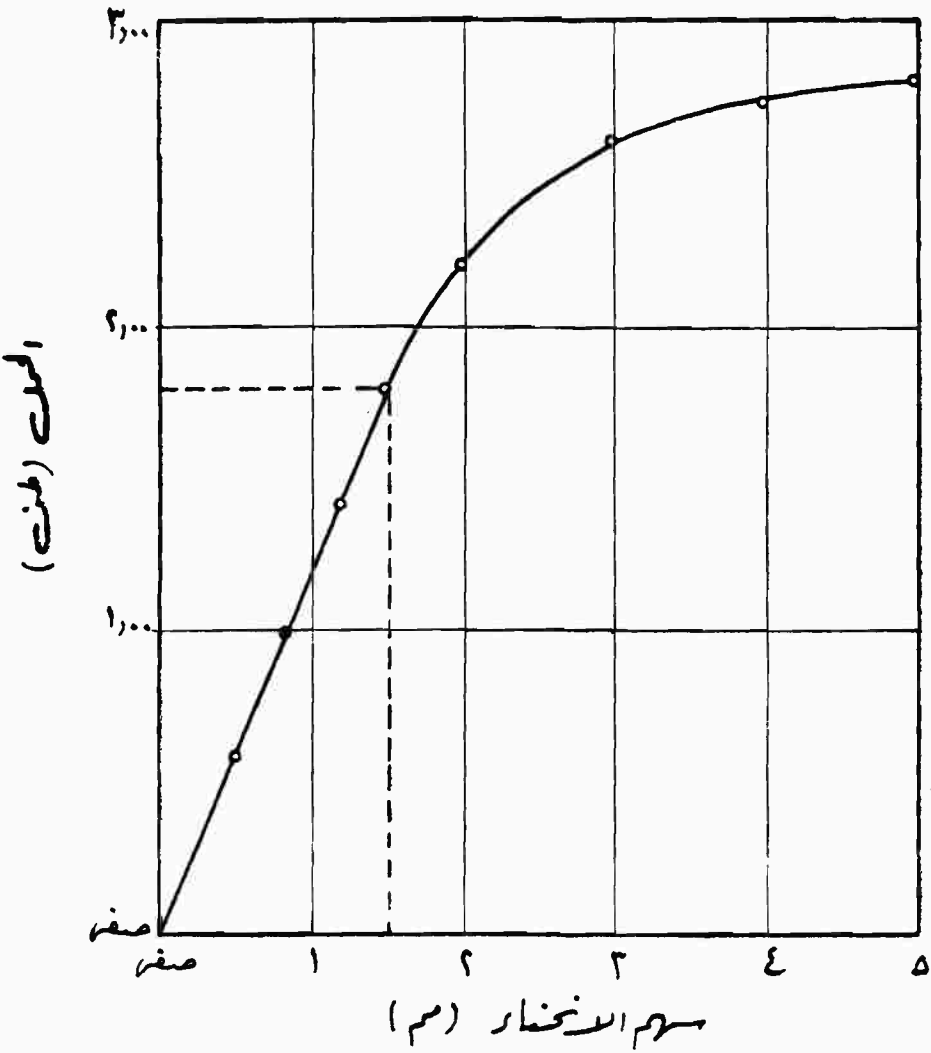
الحمـــل	صفر	٠,٦	١	١,٤	١,٨	٢,٢	٢,٦	٢,٧٤	٢,٨
سهم الانحناء	صفر	٠,٥	٠,٨	١,٢	١,٥	٢	٣	٤	٥

ارسم منحنى الحمل وسهم الانحناء ثم عين :

إجهاد حد التناسب ــ معاير الكسر ــ معاير المرونة فى الانحناء ــ معاير الرجوعية فى الانحناء.

الحـــل :

شكل رقم (٦ ــ ٣٢) يبين منحنى الحمل وسهم الانحناء ومنه نجد أن حمل حد التناسب (Ppl) = ١,٨ طن .



شكل رقم (٦ — ٣٢) العلاقة بين الحمل وسهم الانحناء

∴ يعين إجهاد حد التناسب (fpl) من المعادلة : $P_{pl} = \frac{P_{pl}\, l}{4} \cdot \frac{y}{I}$

حيث $l = 46$ cm و $y = 5/2 = 2.5$ cm

$$I = \frac{\pi \cdot (5)^4}{64} = 30.6 \text{ cm}^4$$

$$\therefore f_{pl} = \frac{1800 \times 46}{4} \times \frac{2.5}{30.6} = 1690 \text{ Kg/cm}^2$$

يحسب معاير الكسر فى الأنحناء (f_b) من المعادلة :

$$f_b = \frac{P_{max,l}}{4} \cdot \frac{y}{I} = \frac{2800 \times 46}{4} \times \frac{2.5}{30,6} = 2600 \quad Kg/cm^2$$

يحسب معاير المرونة (E) من المعادلة :

$$E = \frac{P}{\Delta} \cdot \frac{(l)^3}{48\ I} = \frac{0.6}{0.05} \times \frac{(46)^3}{46+30.6}$$

$$\therefore E = 790 \quad t/cm^2$$

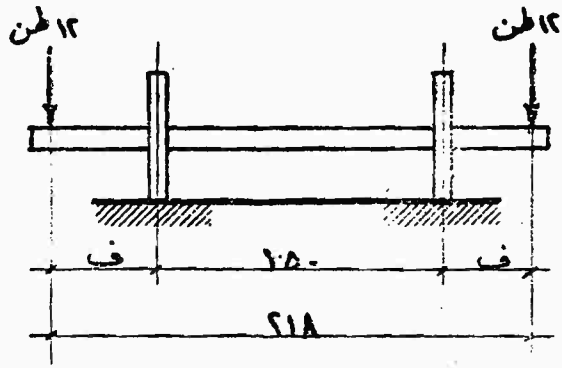
$$\text{معاير الرجوعية} = \frac{\frac{1}{2} \text{ حمل التناسب} \times \text{سهم الأنحناء عند حد التناسب}}{\text{الحجم}}$$

$$= \frac{\frac{1}{2} \times ١٨٠٠ + ٠,١٥}{٤٦ \times \frac{ط (٥)^٢}{٥}} = ٠,١٨٨ \text{ كجم / سم}^٢$$

٣ — دنجل قاطرة قطره ٢٥ سم والبعد بين العجلتين ١٥٠ سم والبعد بين كرسى الحمل على الدنجل ٢١٨ سم . فإذا كان الحمل على كل كرسى ١٢ طن. فاوجد أكبر إجهاد فى الدنجل كذلك نصف قطر التقوس بفرض معاير مرونة الصلب ٢١٠٠ طن/سم٢ .

الحـــل :

من شكل رقم (٦ — ٣٣) نجد أن :



شكل رقم (٦ ٣٣)

(M_{max}) أقصى عزم انحناء يؤثر على الدنجل = الحمل (P) × المسافة (ف)

= ١٢ × ٣٤ = ٤٠٨ طن.سم

وأكبر إجهاد بالدنجل (f_{max}) يحسب من المعادلة : $f_{max} = M_{max} . \frac{y}{I}$

حيث : $y = 25/2 = 12.5 \text{ cm}$

$$I = \frac{\pi(25)^4}{64} = 19100 \text{ cm}^4$$

$$\therefore f_{max} = \frac{408000 \times 12.5}{19100} = 265 \quad \text{Kg/cm}^2$$

$$\frac{M}{I} = \frac{E}{R}$$

حيث (R) هو نصف قطر التقوس

$$\therefore R = \frac{I.E}{M} = \frac{19100 \times 2100}{408} = 96000\text{cm} = 960\text{m}$$

٤ ــ أوجد أكبر إجهاد فى سلك صلب قطره ٠,٨ مم إذا ثنى على بكرة قطرها ٥٠ سم . اعتبر معاير المرونة فى الضغط والشد E = ٢١٠٠ طن / سم٢ .

الحـــل :

بفرض أن الإجهادات بالسلك فى حدود المرونة : $\therefore \frac{f_{max}}{y_{max}} = \frac{E}{R}$

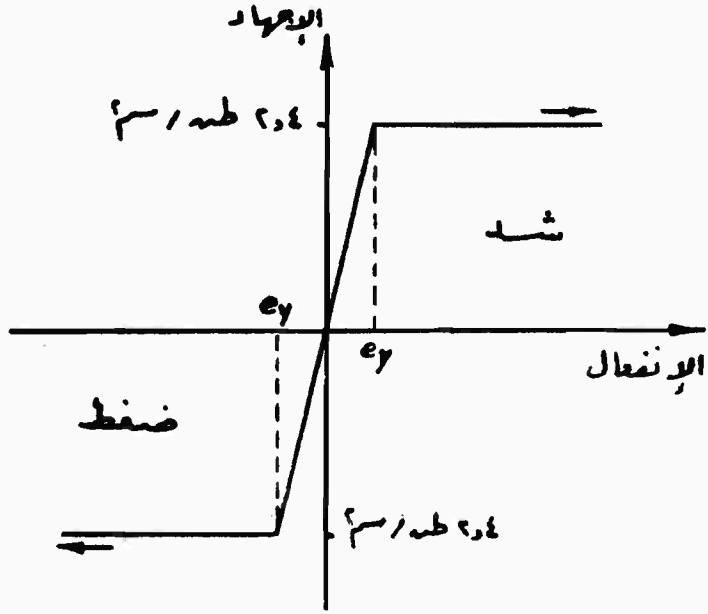
حيث f_{max} = أكبر إجهاد بالسلك

y_{max} = نصف قطر السلك E = معاير المرونة

R = نصف قطر التقوس = نصف قطر البكرة

$$f_{max} = \frac{E.y_{max}}{R} = \frac{2100 \times 0.04}{25} = 3.35 \quad t/cm^2$$

٥ ــ إذا فرض أن منحنى الاجهاد والانفعال للصلب الطرى فى أى من الشد والضغط كما هو مبين فى شكل رقم (٦ ــ ٣٤) أوجد أقصى عزم انحناء تتحمله كرة بسيطة من هذا الصلب مقطعها مربع أبعاده ٥ × ٥ سم بحيث لا تتعدى الاجهادات



العلاقة التقريبية للإجهاد والانفعال

شكل رقم (٦ — ٣٤)

بالكمرة حدود المرونة . كذلك احسب أقصى عزم انحناء يمكن أن تتحمله هذه الكمرة.

الحـــل :

من شكل رقم (٦ — ٣٥) الذى يبين توزيع الإجهادات على مقطع الكمرة فى نهاية منطقة المرونة نجد أن :

يحسب أقصى عزم إنحناء فى منطقة المرونة (M_e) من المعادلة :

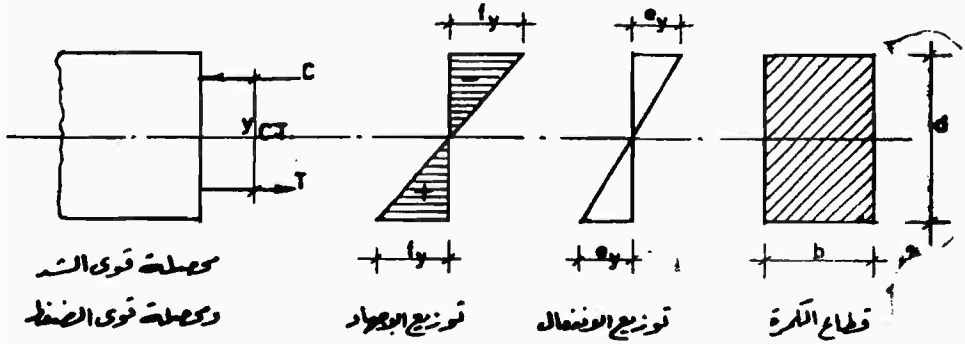
$$M_e = C y_{cT} = T \cdot y_{cT}$$

$$C = T = \frac{f_v \, d/2}{2} \cdot b = \frac{1}{4} f_y \cdot d.b$$

$$y_{c.T} = 2 \cdot \frac{2}{3} d/2 = \frac{2}{3} d$$

$$\therefore M_e = \frac{1}{6} f_y \cdot d^2 \cdot b$$

$$\therefore f_y = 2.4 \ t/cm^2 \quad , \quad b = d = 5 \ cm$$



توزيع الاجهاد والانفعال على قطاع الكمرة فى نهاية المرونة

شكل رقم (٦ – ٣٥)

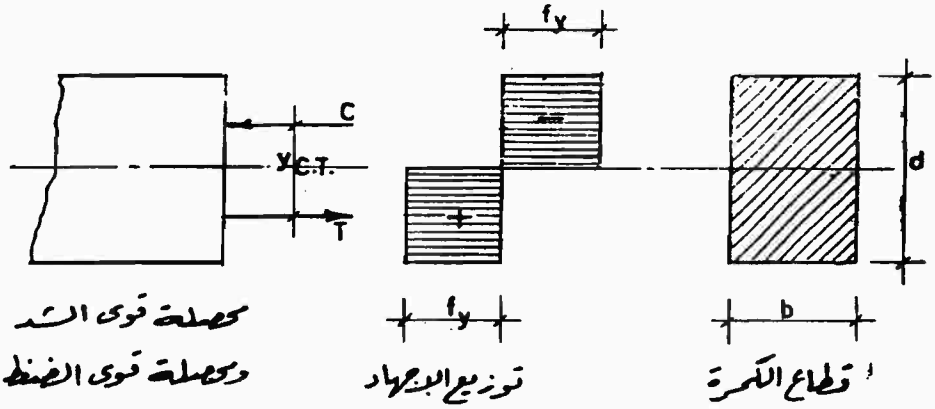
$$\therefore M_e = \frac{1}{6} \times 2.4 \times (5)^2 \times 5 = 50 \text{ t. cm}$$

كذلك من شكل رقم (٦ – ٣٦) الذى يبين توزيع الإجهادات على مقطع الكمرة بعد حدوث خضوع فى كل مقطع نجد أن أقصى عزم انحناء (M_{max}) يحسب من المعادلة

$$M_{max} = C \cdot y_{c\,T} = T \cdot y_{c\,T}$$

$$C = T = \tfrac{1}{2} f_y \cdot d\, b \quad \text{و} \quad y_{c\cdot T} = \tfrac{1}{2} d$$

$$\therefore M_{max} = \frac{1}{4} f_y d^2 b = \frac{1}{4} \times 2.4 \times (5)^2 \times 5 = 75 \text{ t.cm}$$



شكل رقم (٦ – ٣٦) توزيع الاجهادات على مقطع الكمرة بعد حدوث الخضوع فى كل المقطع

مسائل

١ — كمرة خشبية ذات مقطع مربع ٥ سم × ٥ سم مرتكزة على قطبين إرتكاز المسافة بينهما ٨٠ سم ، حملت تدريجياً حتى الكسر بحمل مركز فى منتصف البحر وكانت نتائج الاختبار بين الحمل وسهم الانحناء المصاحب له فى منتصف الكمرة كما يلى :

الحمل : (كجم)	صفر	١٠٠	٢٠٠	٤٠٠	٦٠٠	٨٠٠	١٠٠٠	١٢٠٠
سهم الانحناء (مم)	صفر	١,٢٥	٢,٥	٥	٨	١٢,٥	١٧	٥٢,٥

ارسم منحنى الحمل وسهم الانحناء ثم عين ما يأتى :

ا — معاير الكسر . ب — معاير المرونة فى الانحناء .

حـ — معاير الرجوعية فى الإنحناء .

ء — بين بالرسم أربع حالات متوقعة لشكل الكسر للكمرة المختبرة .

٢ — كمرة بسيطة من الحديد الزهر الرمادى ذات مقطع مربع ٣٠ × ٣٠ مم وبحر ٦٠٠ مم ، حملت بحمل مركز فى منتصفها تدريجياً حتى الكسر . وكانت نتائج الحمل بالكيلو جرام وسهم الإنحناء المصاحب له فى منتصف الكمرة بالملليمتر كما يلى :

الحمل (كجم)	صفر	٢٠٠	٤٠٠	٦٠٠	٨٠٠	١٠٠٠	١٢٠٠	١٣٥٠	١٤٤٠
سهم الإنحناء (مم)	صفر	٠,١٦	٠,٣٤	٠,٥٠	٠,٦٦	٠,٨٢	١,٠	١,٢	١,٤

ا — إجهاد حد التناسب فى الإنحناء . ب — معاير الكسر .

حـ — معاير المرونة . ء — معاير المتانة .

هـ — ارسم شكل الكسر المتوقع للكمرة الزهر .

٣ — اجرى اختبار الإنحناء على كمرتين ا ، ب من الحديد الزهر بتحميل كل كمرة فى منتصفها حتى الكسر وقد سجلت القراءات الآتية :

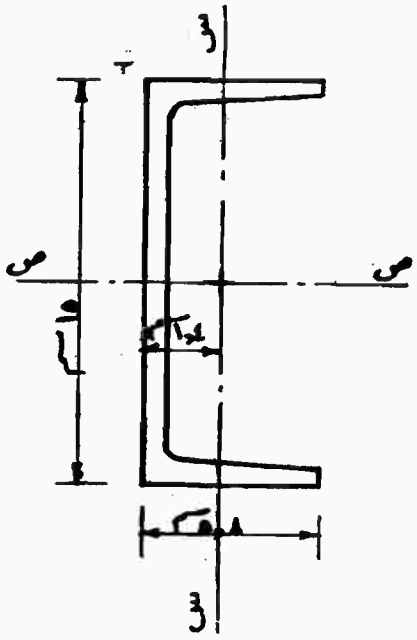
الكمرة	قطر مم	بحر سم	حمل الكسر كجم	سهم الإنحناء فى المنتصف عند حمل الكسر — مم
أ	٤	٦٠	١٥٠٠	١,٤
ب	٦	٨٠	٢٠٠٠	١,٦

بين أى الكمرتين تفوق الأخرى من جهة خاصية المقاومة ومن جهة خاصية الصلابة ؟

٤ ــ كمرة بسيطة من الصلب بحرها ٣,٠ متر ومقطعها مجرى ـ شكل رقم (
فإذا كان عزم القصور الذاتى لمقطع الكمرة حول المحور س س = ٢ ٣٢ سم٤ وحول المحور ص ص = ٨١٠ سم٤ ، إوجد قيمة الحمل الموزع بانتظام على طول الكمرة الذى يمكن التأثير به بحيث لا يزيد الاجهاد بالمقطع عن ٦٠٠ كجم/سم٢ وذلك فى الحالتين الآتيتين :

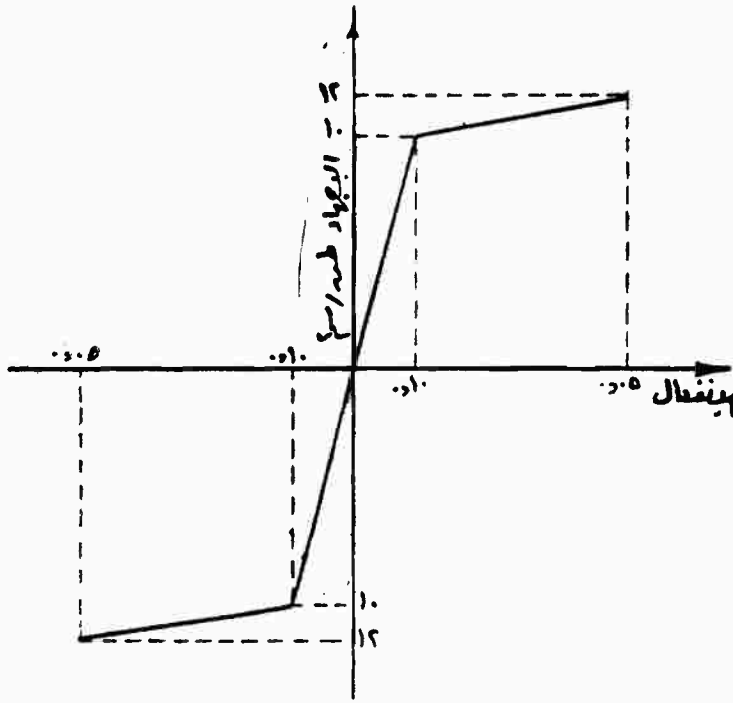
ا ــ إذا وضعت الكمرة بحيث يكون ارتفاع المقطع (غ) رأسياً .

ب ــ إذا وضعت الكمرة بحيث يكون ارتفاع المقطع (ع) أفقياً .



شكل رقم (٦ ــ ٣٧)

٥ — إذا كان منحنى الإجهاد والانفعال لسبيكة مافى أى من الشد أو الضغط مكون من خطين مستقيمين كما فى شكل رقم (٦ — ٣٨) — أوجد أقصى عزم انحناء يمكن أن تتعرض له كرة مصنوعة من هذه السبيكة مقطعها مستطيل عرضه ٢,٥ سم وعمقه ٥ سم .



العلاقة التقريبية للإجهاد والانفعال

شكل رقم (٦ — ٣٨)

تمرين (١٠)

اختبار الانحناء الكمرى لعينة من الحديد الزهر الرمادى

١ — المجال :

يهدف هذا الاختبار إلى دراسة سلوك الحديد الزهر الرمادى تحت تأثير الانحناء وذلك بتحميل كمرة مرتكزة عند طرفيها ومحملة فى منتصف المسافة بين قطعتى الارتكاز ثم تعيين سهم الانحناء المصاحب لكل حمل وذلك الكمرة فى منتصف المسافة بين قطعتى الارتكاز (منتصف البحر) ثم رسم المنحنى البيانى للحمل وسهم الانحناء وتعيين الخواص الميكانيكية للحديد الزهر فى الانحناء ، كذلك ملاحظة شكل كسر عينة الاختبار نتيجة التحميل بالانحناء الكمرى .

٢ — عينات الاختبار :

يجرى الاختبار على كمرة من الحديد الزهر الرمادى مستطيلة المقطع (عرض المقطع ٣٠ مم وعمقه ٥٠ مم) وطولها الكلى ١١٠ سم .

٣ — ادوات الاختبار :

مكنة خاصة لاجراء الانحناء الكمرى ويوجد بها جزء خاص لقياس سهم الإنحناء فى منتصف بحر الكمرة ـ مسطرة مدرجة .

٤ — خطوات اجراء الاختبار :

ا ـ تقاس أبعاد مقطع كمرة الحديد الزهر بالمسطرة المدرجة ، ثم تضبط ركيزتى مكنة الاختبار على طول البحر المطلوب فى الاختبار وهو ٩٠ سم .

ب ـ توضع الكمرة فى مكنة الاختبار مرتكزة على الركيزتين (Supports) ويضبط جهاز قياس سهم الانحناء على قراءة الصفر .

حـ ـ تحمل الكمرة بحمل مركز فى منتصف البحر ويزداد التحميل على دفعات مع تسجيل سهم الانحناء فى منتصف البحر المناظر لكل حمل حتى يحدث الكسر .

• — النتائج :

يمكن من البيانات المسجلة فى هذا الاختبار الحصول على النتائج التالية .

١ — رسم المنحنى البيانى للحمل وسهم الانحناء لكمرة الحديد الزهر .

٢ — من المنحنى البيانى للحمل وسهم الانحناء يمكن تعيين ما يلى :

(ا) حمل حد التناسب : وهو الحمل عند نهاية الخط المستقيم من هذا المنحنى البيانى . (P_{pl}) .

(ب) سهم الانحناء عند حد التناسب : وهو سهم الانحناء عند نهاية الخط المستقيم من منحنى الحمل وسهم الانحناء (Δp_l) .

حمل الكسر (P_{max}) .

٣ — تعين الخواص الميكانيكية الآتية للحديد الزهر فى الإنحناء :

(ا) اجهاد حد التناسب فى الانحناء (f_{pl}) كما يلى : $f_{pl} = \frac{M_{pl} \cdot y}{I}$

حيث (M_{pl}) هو عزم الانحناء فى منتصف الكمرة عند حد التناسب

$M_{pl} = \frac{P_{pl} \cdot l}{4}$ و (l) هو بحر الكمرة و (y) نصف عمق الكمرة

و I هو عزم القصور الذاتى لمقطع الكمرة حول محور التعادل $I = \frac{b\,d^3}{12}$

حيث (b) عرض قطاع الكمرة و (d) عمق الكمرة .

(ب) معاير الكسر فى الانحناء (f_b) : $f_b = \frac{M_{max} \cdot y}{I}$

حيث (M_{max}) هو عزم الانحناء فى منتصف الكمرة عند الكسر

$M_{max} = \frac{P_{max} \cdot l}{4}$

(حـ) معاير المرونة : $E = \frac{P}{\Delta} \cdot \frac{l^3}{48I}$

حيث $\frac{P}{\Delta}$ هو ميل الخط المستقيم من المنحنى البيانى للحمل وسهم الانحناء .

د ـــ معاير الرجوعية = المساحة تحت الخط المستقيم من منحنى الحمل وسهم الانحناء / حجم الجزء المجهد من الكمرة

$$= \frac{P_{pl} \cdot \Delta_{pl}}{2.\ b.\ d.\ f}$$

هـ ـــ معاير المتانة = المساحة الكلية تحت منحنى الحمل وسهم الانحناء / حجم الجزء المجهد من الكمرة

$$= \frac{2}{3} \frac{P_{max} \cdot \Delta_{max}}{b.\ d.\ f}$$

٤ ـــ يلاحظ أن مقطع الكسر عمودى على محور الكمرة وفى منتصفها ويكون الكسر نتيجة انفصال المنطقة المعرضة لإجهادات الشد من مقطع الكمرة ثم يمتد الانفصال بسرعة حتى يشمل كل عمق الكمرة .

١ ـــ مثال تطبيقى :

عند اختبار كمرة من الحديد الزهر الرمادى فى الانحناء بحمل مركز فى منتصف البحر كانت قراءة الحمل وسهم الانحناء عند منتصف الكمرة المناظر له كما يلى :

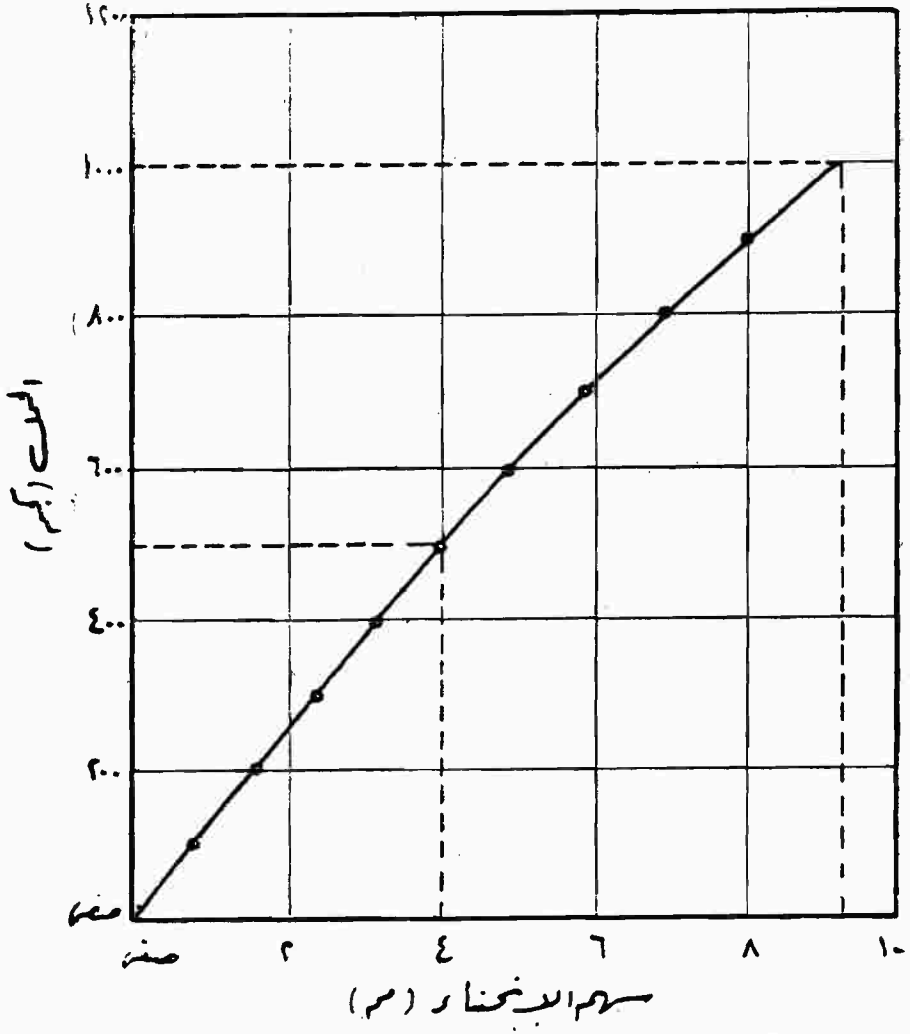
الحمل (P) (كجم)	صفر	١٠٠	٢٠٠	٣٠٠	٤٠٠	٥٠٠	٦٠٠	٧٠٠	٨٠٠	٩٠٠	١٠٠٠
سهم الإنحناء (Δ) (مم)	صفر	٠,٨	١,٦	٢,٤	٣,٢	٤	٤,٩	٥,٩	٦,٩	٨,١	الكسر

فإذا كانت أبعاد مقطع الكمرة هى ٢٨ مم × ٤٧ مم وبحرها ٩٠ سم فالمطلوب رسم منحنى الحمل وسهم الإنحناء وتعيين الخواص الميكانيكية المختلفة للحديد الزهر .

الحل :

شكل رقم (٦ ـــ ٣٩) يبين العلاقة البيانية بين الحمل وسهم الانحناء لكمرة الحديد الزهر المختبرة ، ومنه يمكن تحديد ما يلى :

حمل حد التناسب (P_{pl}) = ٥٠٠ كجم



شكل رقم (٦ — ٣٩) العلاقة بين الحمل وسهم الانحناء لعديد الزهر

سهم الانحناء عند التناسب (Δ_{pl}) = ٤ مم

الحمل الأقصى (P_{max}) = ١٠٠٠ كجم

سهم الانحناء عند الكسر (Δ_{max}) = ٩,٢ مم

وحيث أن : $l = 900$ mm و $d = 47$ mm , $b = 28$ mm

$$\therefore y = \frac{47}{2} = 23.5 \text{ mm}$$

$$\therefore I = \frac{28 \cdot (47)^3}{12} = 241500 \text{ mm}^4$$

وعلى ذلك يمكن تعيين الخواص الميكانيكية فى الانحناء للحديد الزهر كما يلى :

(ا) اجهاد حد التناسب (f_{pl}) :

$$f_{pl} = M_{pl} \cdot \frac{y}{I} = \frac{P_{pl}\, l}{4} \cdot \frac{y}{I}$$

$$= \frac{500 \times 900}{4} \times \frac{23.5}{241500} = 10.9 \ \text{Kg/mm}^2$$

(ب) معاير الكسر فى الانحناء (f_b) :

$$f_b = M_{max} \cdot \frac{y}{I} = \frac{P_{max}\, l}{4} \cdot \frac{y}{I}$$

$$= \frac{1000 \times 900}{4} \times \frac{23.5}{241500} = 21.8 \ \text{Kg/mm}^2$$

(حـ) معاير المرونة (f_b) :

$$E = \frac{P}{\Delta} \cdot \frac{l^3}{481} = \frac{100}{0.8} \cdot \frac{(900)^3}{48 \times 241500} = 7.85 \times 10^3 \ \text{Kg/mm}^2$$

(د) معاير الرجوعية :

$$\text{Modulus of Resilience} = \frac{P_{pl}\, \Delta_{pl}}{2} \Big/ b \cdot d\, l$$

$$= \frac{500 \times 4}{2} \Big/ 28 \times 47 \times 900 = 8.5 \times 10^{-4} \ \text{Kg/mm}^2$$

(هـ) معاير المتانة :

$$\text{Modulus of Toughness} = \frac{2}{3} P_{max} \cdot \Delta_{max} \Big/ b.d\, l$$

$$= \frac{2}{3} \times 1000 \times 9.3 / 28 \times 47 \times 900$$

$$= 5.23 \times 10^{-3} \ \text{Kg/mm}^2$$

المناقشة :

١ — لماذا يعتبر إختبار الانحناء الكرى إختبار قبول للحديد الزهر ؟

٢ — ما هى الاحتياطيات الواجب اتخاذها عند إجراء إختبار الانحناء الكرى للحديد الزهر ، وضح إجابتك بالرسومات .

٣ ــ عين معاير الكسر للحديد الزهر المختبر باستخدام قيمة حمل الكسر المعين من إختبار الانحناء الكرى .

٤ ــ هل يمكن اعتبار أن معاير الكسر هو المقاومة القصوى للمعادن تحت تأثير حمل الانحناء ؟ لماذا ؟

٥ ــ احسب معاير المرونة فى الانحناء من واقع البيانات المعملية لاختبار الانحناء الكرى للحديد الزهر .

٦ ــ ما هى الخاصية التى تعبر عنها قيمة سهم الانحناء القصوى للكرة المختبرة عند انهيارها ؟ اشرح لماذا ؟

٧ ــ كيف يمكن تعيين معاير الرجوعية ومعاير المتانة للمعادن فى الانحناء ؟ احسب قيمة كل منهما للحديد الزهر المختبر فى الانحناء الكرى .

٨ ــ قارن بين نتائج اختبار الانحناء الكرى للحديد الزهر واشتراطات المواصفات القياسية للحديد الزهر م.ق.م ــ ١ ــ ١٩٦٠ ؟ وهل يعتبر الحديد الزهر المختبر مقبولا ؟

٩ ــ ارسم تخطيطاً لعينة الحديد الزهر بعد إنهيارها باختبار الانحناء الكرى واشرح سبب ذلك الانهيار .

١٠ ــ هل يمكن إجراء اختبار الانحناء الكرى للمواد المطيلة ؟ اشرح سبب ذلك .

تمرين رقم (١١)

اختبار الثنى على البارد لعينة من الصلب الطرى

١ — المجال :

يهدف هذا الاختبار إلى دراسة مطولية الصلب الطرى تحت تأثير الثنى على البارد وملاحظة شكله وحالته بعد إجراء ذلك الاختبار .

٢ — عينة الاختبار :

يمكن إجراء هذا الاختبار على قطع ذات طول مناسب من أسياخ أو ألواح أو أسلاك الصلب الطرى .

٣ — ادوات الاختبار :

يحتاج الاختبار إلى مكنة الاختبار العامة لاختبار الأسياخ أو الألواح. أما فى حالة اختبار الأسلاك فتستخدم منجلة خاصة بذلك .

٤ - طريقة اجراء الاختبار :

أولا : فى حالة الأسياخ أو الألواح :

تثنى قطعة الاختبار حتى يتوازى طرفاها حول قطعة اسطوانية نصف قطرها (R) بحيث يكون : $R = D$ فى حالة $D \leqslant 2.5$ cm

$R = 1\frac{1}{2} D$ فى حالة $D \geqslant 5.2$ cm

حيث (D) هو قطر قطعة الاختبار .

ويلاحظ أنه فى حالة الألواح يحل سمك اللوح محل (D) فى الاشتراطات السابقة. كما يلاحظ أنه يجب عمل استدارة بسيطة بأركان مقطع قطعة اللوح وبكامل طولها قبل اختبارها لتفادى تأثير تركز الإجهاد عند هذه الأركان على نتائج الاختبار .

ثانيا : فى حالة الألواح الرقيقة :

فى هذه الحالة تثنى شرائح من هذه الألواح على نفسها .

ثالثا : فى حالة الأسلاك :

تثبت قطعة السلك فى المنجلة وتشد شداً بسيطاً وتثنى جانبياً ٩٠° ثم جانبياً فى الاتجاه المعاكس ١٨٠° وبعد ذلك جانبياً فى الاتجاه الأول ٩٠° — أى يثنى السلك دورتين كاملتين .

وقد يستمر ثنى قطعة السلك حتى تنكسر مع تسجيل عدد درجات الثنى اللازمة وذلك بغرض مقارنة مطولية قطعتين من السلك حيث يزداد عدد دورات الثنى حتى الكسر بزيادة مطولية السلك .

٥ — النتائج :

تفحص قطعة الاختبار بعد ثنيها لمعرفة تواجد الشروخ من عدمه ، وتقبل العينات فى هذا الاختبار إذا لم تنكسر أو يحدث بها شروخ بعد الثنى .

٦ — المناقشة :

١ — ما هو الغرض من إجراء اختبار الثنى على البارد للمعادن ؟ وهل يمكن إجراؤه لجميع المعادن ؟ لماذا ؟

٢ — هل يعتبر هذا الاختبار اختبارا كميا أو اختبارا وصفيا لقياس قدرة المعادن للتشكيل أثناء عمليات الثنى . ؟

٣ — اشرح كيف يمكن إجراء اختبار الثنى على البارد للقضبان مستديرة المقطع المستعرض وذات المقطع المستعرض المستطيل الشكل وضح إجابتك بالرسومات .

٤ — كيف يمكن استخدام مكنات الاختبار العامة لاجراء اختبار الثنى على البارد ؟ وضح إجابتك بالرسومات .

٥ — اشرح كيف يمكن إجراء اختبار الثنى على البارد على الرقائق (الألواح الرقيقة) وضح إجابتك بالرسومات .

٦ — ماهى الاحتياطات الواجب اتخاذها عند إجراء اختبار الثنى على البارد على عينات المعادن ؟ لماذا ؟

٧ ــ كيف يجرى اختبار الثنى على البارد لعينة من السلك الصلب ؟ ارسم تخطيطياً مكنة الاختبار الخاصة بذلك : وهل يمكن استخدام هذه المكنة لاختبار الثنى على البارد للألواح الرقيقة من المعادن ؟

٨ ــ ارسم تخطيطياً الحالات المختلفة للشروخ المنتظر حدوثها للعينات مستديرة المقطع إذا حدث لها انهيار باختبار الثنى على البارد . وضح إجابتك بالرسومات .