الباب الثامن

خواص و اختبارات الخرسانة المتصلدة

Properties and Testing of Hardened Concrete

٨-١ مقاومة الضغط Compressive Strength

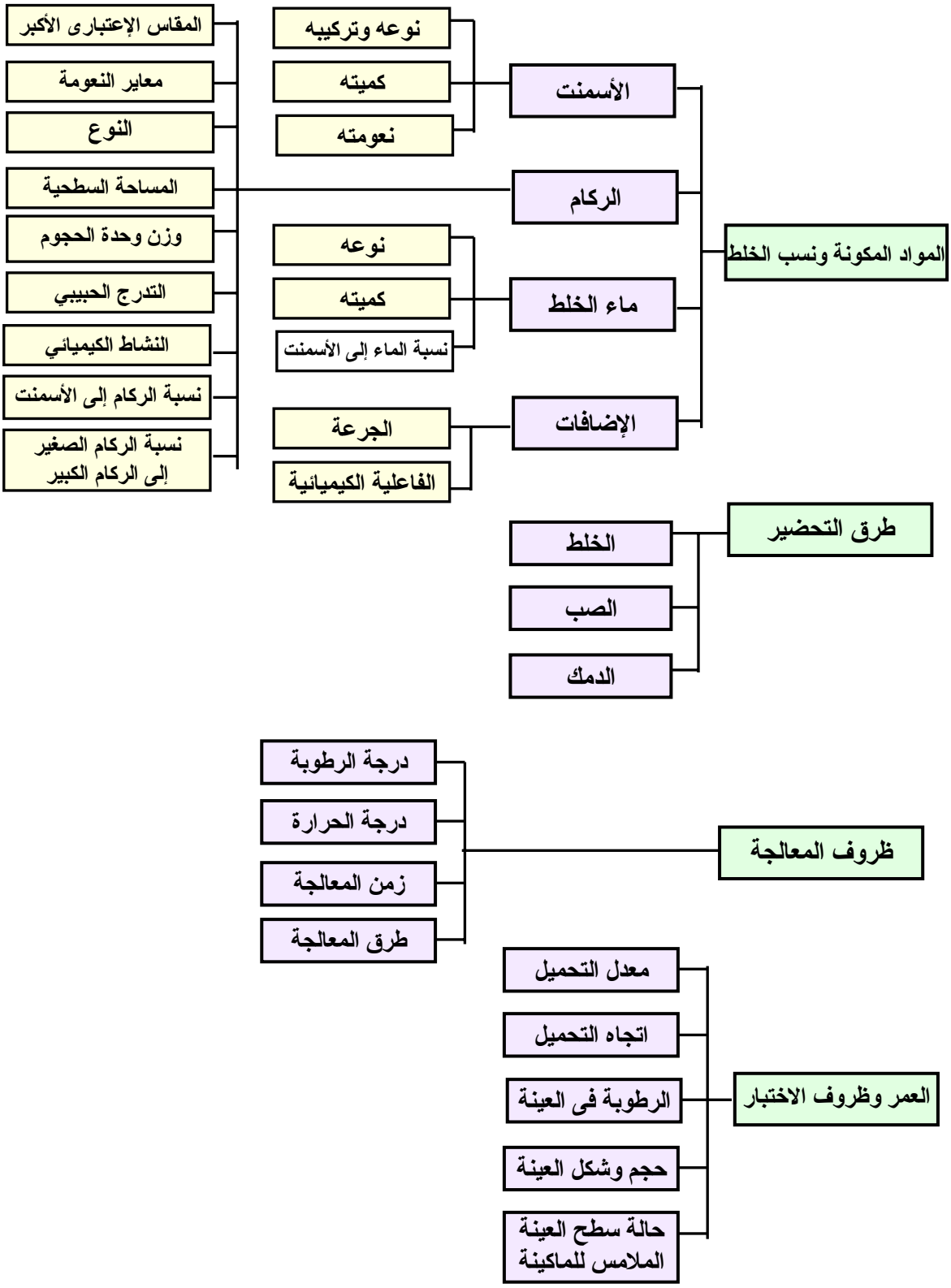
إن مقاومة الضغط هى أهم خواص الخرسانة المتصلدة على الإطلاق وهى تعبر عن درجة جودتها وصلاحيتها ، ومقاومة الضغط هى المقاومة الأم للخرسانة حيث أن معظم الخواص والمقاومات الأخرى مثل الشد و الانحناء والقص والتماسك مع حديد التسليح تتحسن وتزيد بزيادة مقاومة الضغط والعكس صحيح. لذلك يجرى اختبار الضغط بغرض التحكم فى جودة إنتاج الخرسانة فى موقع المشروع كما يستخدم هذا الاختبار فى أغراض التصميم الإنشائى لتحديد المقاومة المميزة Characteristic Strength وإجهاد التشغيل Working Stress للخرسانة فى الضغط الذى يؤخذ كنسبة من المقاومة القصوى للضغط. كما يفيد اختبار الضغط فى تحديد صلاحية الركام وماء الخلط للتعرف على تأثير الشوائب التى قد توجد بهما على مقاومة الضغط للخرسانة. والواقع حالياً أن مقاومة الضغط لخرسانة المنشآت التقليدية تتراوح بين ٢٥٠ - ٣٥٠ كج/سم^{٢} أما بالنسبة للمنشآت الخاصة والوحدات سابقة التجهيز فمقاومة الضغط تزيد عن ذلك وتصل إلى ٤٠٠ - ٥٠٠ كج/سم^{٢} والوحدات الخرسانية سابقة الإجهاد يجب أن تكون ذات مقاومة للضغط تزيد عن ٤٠٠ كج/سم^{٢} وقد تصل إلى ٦٠٠ كج/سم^{٢}. وقد سبق الإشارة فى الأبواب السابقة عن إمكانية صناعة الخرسانة عالية المقاومة (مقاومة الضغط أكبر من ٨٠٠ كج/سم^{٢}) والتى نأمل أن تأخذ طريقها إلى الواقع العملي فى مصر فى المستقبل القريب.

٨-١-١ العوامل المؤثرة على مقاومة الضغط

تتأثر مقاومة الضغط بعوامل عديدة ومتنوعة يلخصها الرسم البياني شكل (٨-١) فى أربعة مجموعات رئيسية هى:

- ❒ المواد المكونة ونسب الخلط.
- ❒ طرق صناعة الخرسانة من خلط ونقل وصب ودمك.
- ❒ ظروف المعالجة.
- ❒ العمر وظروف الاختبار.

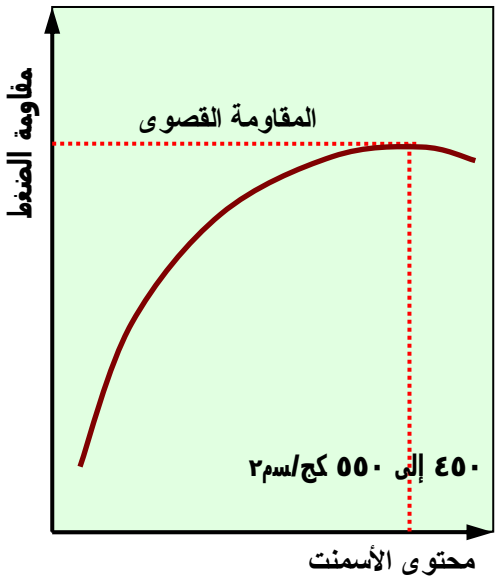
وفيما يلي شرح بإيجاز لبعض هذه العوامل.



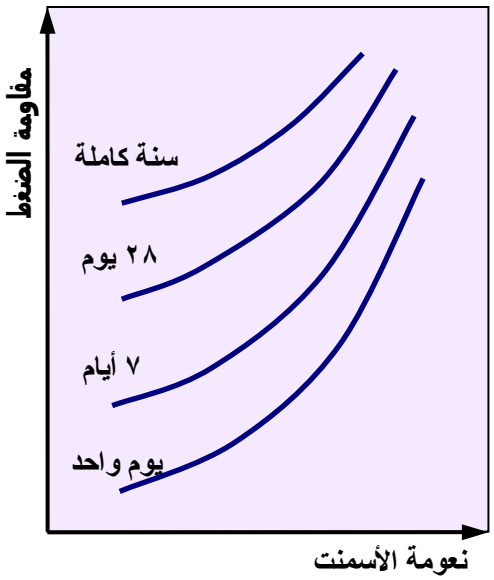
شكل (٨-١) العـوامل التى تؤثر على المقاومة.

أولاً: تأثيـــر الأســـمنت

الأسمنت هو المكون الرئيسي الفعال الذى تتوقف عليه مقاومة الخرسانة وأهم العوامل المؤثرة فى الأسمنت هى كميته ونعومته وتركيبه الكيميائي. فنجد أن مقاومة الخرسانة تزيد بزيادة محتوى الأسمنت وذلك حتى محتوى معين يقل عنده معدل الزيادة فى المقاومة ثم تتوقف الزيادة فى المقاومة بعد ذلك وربما تقل. وهذا المحتوى يختلف باختلاف نسب مكونات الخلطة وكذلك يتوقف على وجود أو عدم وجود إضافات كيميائية أو معدنية. وعموماً فقد وجد أن المحتوى الأقصى للأسمنت الذى يعطى أعلى مقاومة ضغط للخرسانة يقع بين ٤٥٠ و ٥٥٠ كج/م^{٣} (شكل ٨-٢). أما بالنسبة لنعومة الأسمنت فهي تؤثر تأثيراً كبيراً على مقاومة الخرسانة وخاصة فى الأعمار المبكرة حتى ٢٨ يوم. بعد ذلك يقل معدل الزيادة فى المقاومة تدريجياً بتقدم عمر الخرسانة حتى يكاد ينعدم عند الأعمار المتأخرة جداً كما هو موضح بشكل (٨-٣).

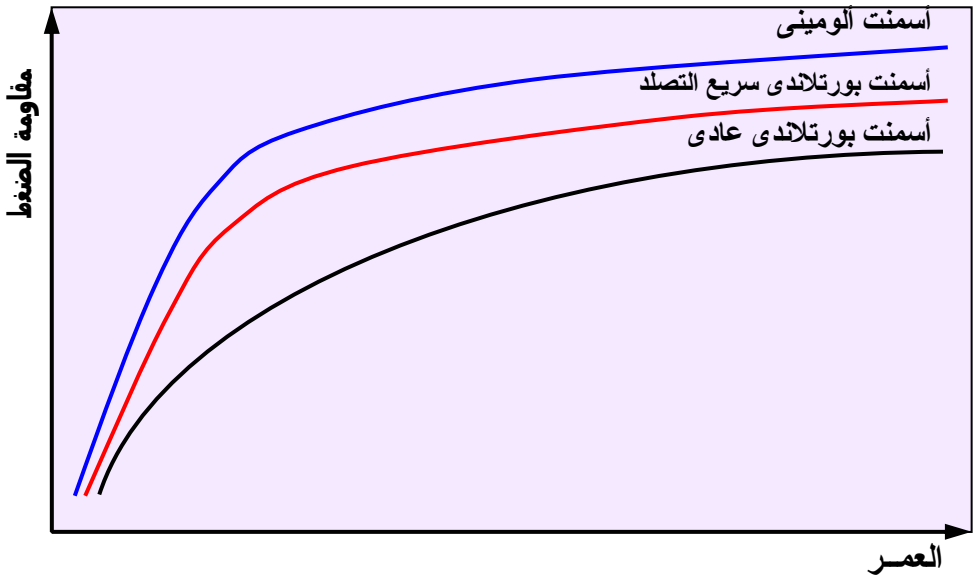


شكل (٨-٢) تأثير محتوى الأسمنت.



شكل (٨-٣) تأثير نعومة الأسمنت.

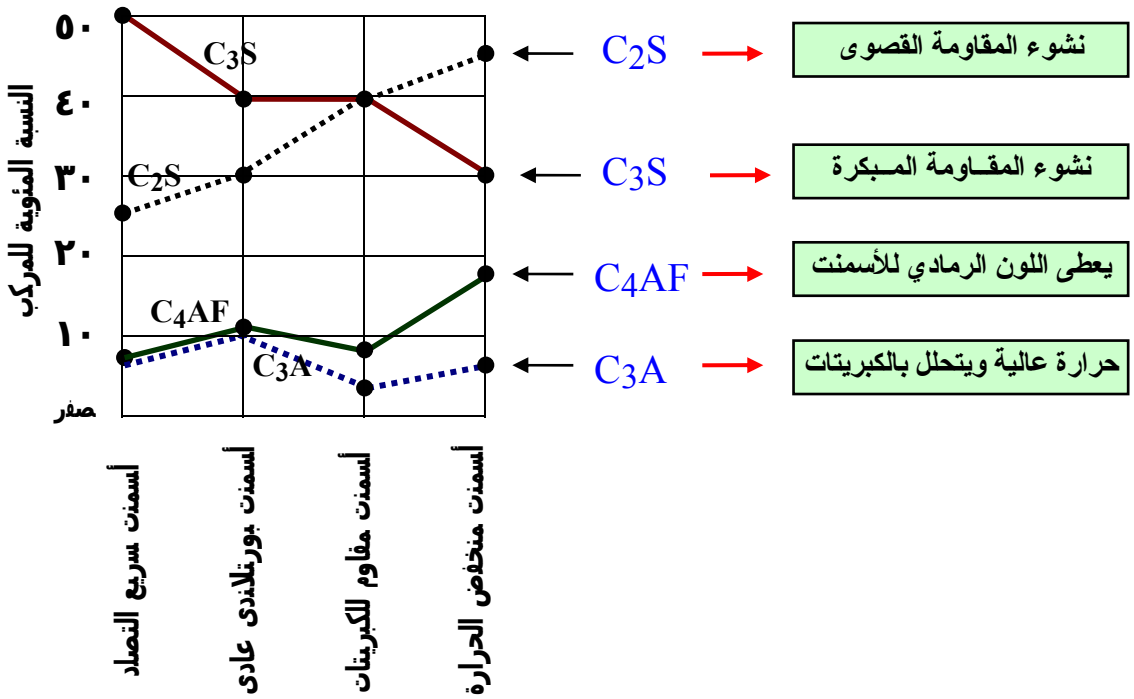
أما بالنسبة لتأثير التركيب الكيميائي للأسمنت فيعتمد ذلك بصورة كبيرة على نسب المكونات الرئيسية الأربعة للأسمنت وهى سيليكات ثنائي الكالسيوم C_2S وسيليكات ثلاثي الكالسيوم C_3S وثالث ألومينات الكالسيوم C_3A ورابع ألومينات حديد الكالسيوم C_4AF. أما العنصرين الأولين C_2S و C_3S فهما الذين يتحكمان فى المقاومة ويتراوح مجموع نسبتيهما حوالى ٧٥% . وعموماً فإن الأسمنت الذى يحتوى على نسبة عالية من C_3S يكتسب مقاومة أسرع من الأسمنت المحتوى على نسبة عالية من C_2S حيث أن C_3S هو المركب المسئول عن المقاومة المبكرة للأسمنت. أما العنصر الثالث فى الأسمنت و هو ثالث ألومينات الكالسيوم فهو المسئول عن انبعاث حرارة عالية أثناء الخلط وهو المتسبب فى وجود الخواص غير المرغوبة فى الأسمنت مثل حدوث التغيرات الحجمية و التشققات و التدهور عند التعرض للكبريتات. إلا أن هذا العنصر موجود فى الأسمنت بحكم تواجده فى المواد الخام. أما العنصر الرابع وهو رابع ألومينات حديد الكالسيوم فهو عنصر خامل تقريباً ويحل محل العناصر النشطة فى الأسمنت وبالتالي فلا يرغب فى تواجده بنسبة عالية. وبالتحكم فى نسبة المكونات الرئيسية للأسمنت وكذلك نعومته يمكننا صناعة الأنواع المختلفة من الأسمنت مثل الأسمنت سريع التصلد والأسمنت البورتلاندى العادي والأسمنت فائق النعومة والأسمنت المقاوم للكبريتات ..... إلخ. والشكل رقم (٨-٤) يوضح تأثير نوع الأسمنت حيث نجد أن الأسمنت السريع التصلد يظهر مقاومة مبكرة عالية ولكن بعد ثلاثة شهور تقريباً تكون المقاومة مساوية لتلك التى نحصل عليها من الأسمنت البورتلاندى العادي. جدول (٨-١) وشكل (٨-٥) يوضحان المكونات الكيميائية لأنواع الأسمنت المختلفة وكذلك تأثيرها على خواص الأسمنت.



شكل (٨-٤) تأثير نوع الأسمنت على مقاومة الضغط.

جدول (٨–١) خواص الأنواع المختلفة للأسمنت.

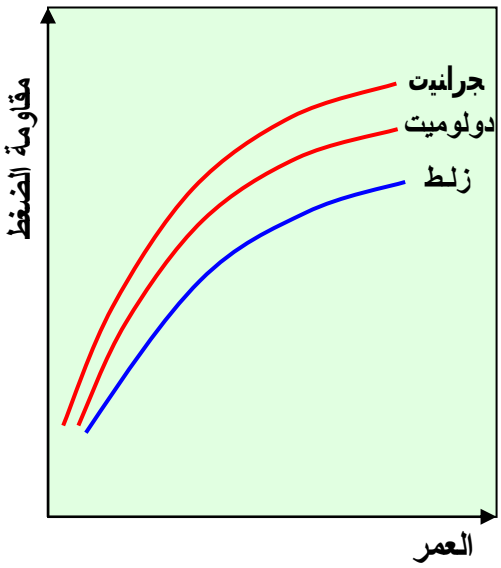
نوع الأسمنت	معدل زيادة المقاومة	الحرارة المنبعثة	الانكماش بالجفاف	مقاومة التشريخ	المقاومة للكيماويات كبريتات	أحماض
بورتلاندى عادى	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	منخفض	منخفض
بورتلاندى سريع التصلد	عالي	عالي	متوسط	منخفض	منخفض	منخفض
بورتلاندى منخفض الحرارة	منخفض	منخفض	فوق المتوسط	عالي	متوسط	منخفض
مقاوم للكبريتات	منخفض/متوسط	منخفض/متوسط	متوسط	متوسط	عالي	منخفض
بورتلاندى حديدي	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	فوق المتوسط	فوق المتوسط



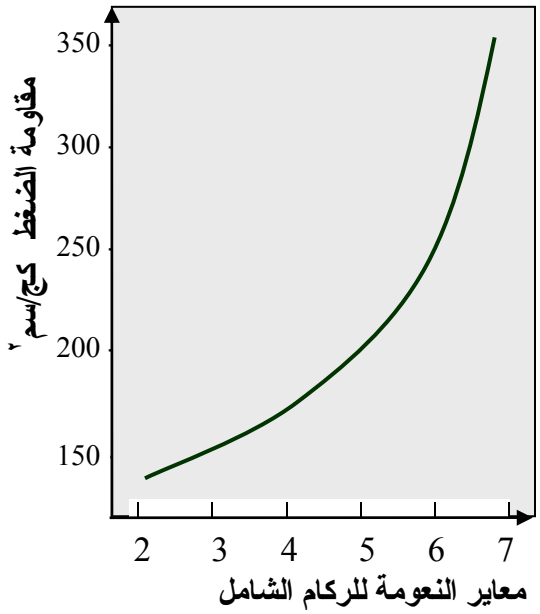
شكل (٨–٥) التركيب الكيميائي للأنواع المختلفة من الأسمنت.

ثانياً: تأثير الركام

الركام هو المادة المالئة بالخرسانة والتى يُفترض أنها خاملة كيميائياً. وعموماً فإن مقاومة الخرسانة تتوقف على التماسك بين العجينة الأسمنتية والركام المستخدم حيث ينبغي أن تغلف العجينة الأسمنتية بكفاءة أسطح الركام المستخدم ومن ثم نجد أن نوع الركام وشكله ونعومته ومساحته السطحية وطبيعة سطحه من العوامل الرئيسية التى تؤثر على مقاومة الخرسانة. شكل (٨-٦) يوضح تأثير نوع الركام على مقاومة الضغط حيث نجد أن الحجر الجيري أو الدولوميت يعطى مقاومة أكبر من الزلط. كذلك يبين شكل (٨-٧) أن مقاومة الضغط تزيد بزيادة قيمة معاير النعومة للركام الشامل. أما المساحة السطحية للركام فتؤثر تأثيراً كبيراً على مقاومة الضغط حيث نجد أنه عند مساحة سطحية حوالى ٢٥ سم^{٢}/جم فإننا نحصل على المقاومة القصوى التى تقل تدريجياً إذا زادت المساحة السطحية أو قلت عن ذلك كما هو موضح بشكل (٨-٨). ومساحة الركام السطحية تعتمد على نسبة الركام الصغير إلى الركام الكبير وكذلك على نعومة أو خشونة الركام المستخدم.



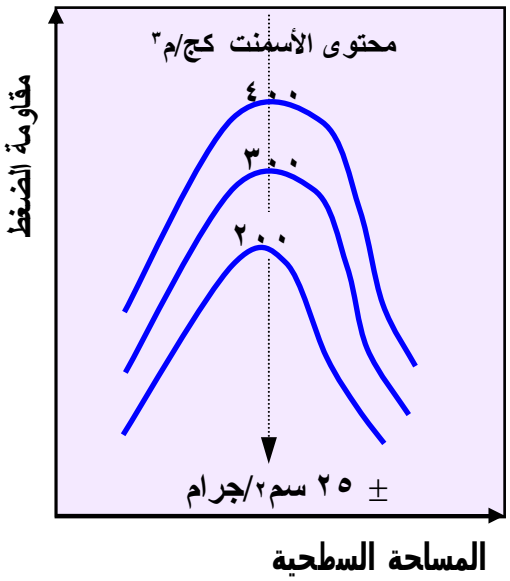
شكل (٨-٦) تأثير نوع الركام.



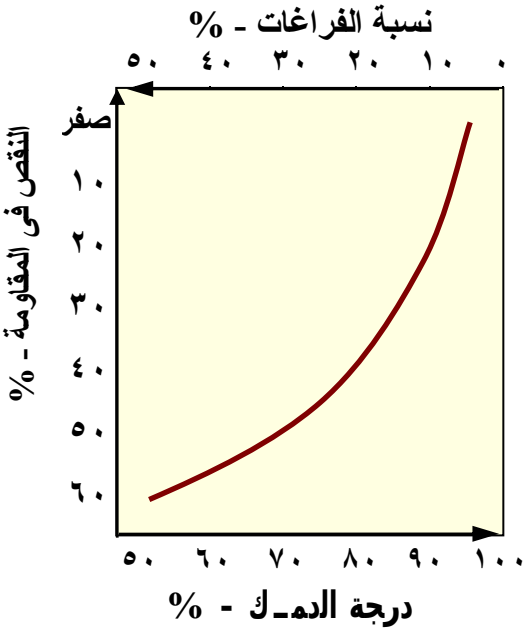
شكل (٨-٧) تأثير معاير نعومة الركام

ثالثاً: تأثير ماء الخلط و الدمك

إن تأثير نسبة الماء إلى الأسمنت (م/س) هو بلا شك من أهم العوامل التى تؤثر ليس فقط على مقاومة Strength الخرسانة بل أيضاً على متانتها Durability. وعموماً فإن تقليل الماء فى الخلطة إلى درجة معينة هو أساس الحصول على الخرسانة عالية المقاومة High Strength Concrete أو الخرسانة عالية الأداء High Performance Concrete. وقد سبق الحديث فى الباب الأول من هذا الكتاب عن تأثير نسبة (م/س) على الخرسانة وكذلك كيفية التحكم فى نسبة الماء فى الخرسانة باستخدام الإضافات الكيميائية (الملدنات). وقد وجد أنه عند درجة دمك محددة للخرسانة الطازجة فإن هناك نسبة معينة من (م/س) تكون عندها مقاومة الخرسانة نهاية عظمى. وعموماً فإن مقاومة الخرسانة تتأثر تأثراً كبيراً بدرجة دمكها كما هو موضح فى شكل (٨-٩) حيث أن الدمك الغير جيد يؤدى إلى وجود فراغات هوائية فى الخرسانة تعمل على تقليل المقاومة وتدهور الخرسانة.



شكل (٨–٨) تأثير المساحة السطحية للركام.



شكل (٨–٩) تأثير الدمك.

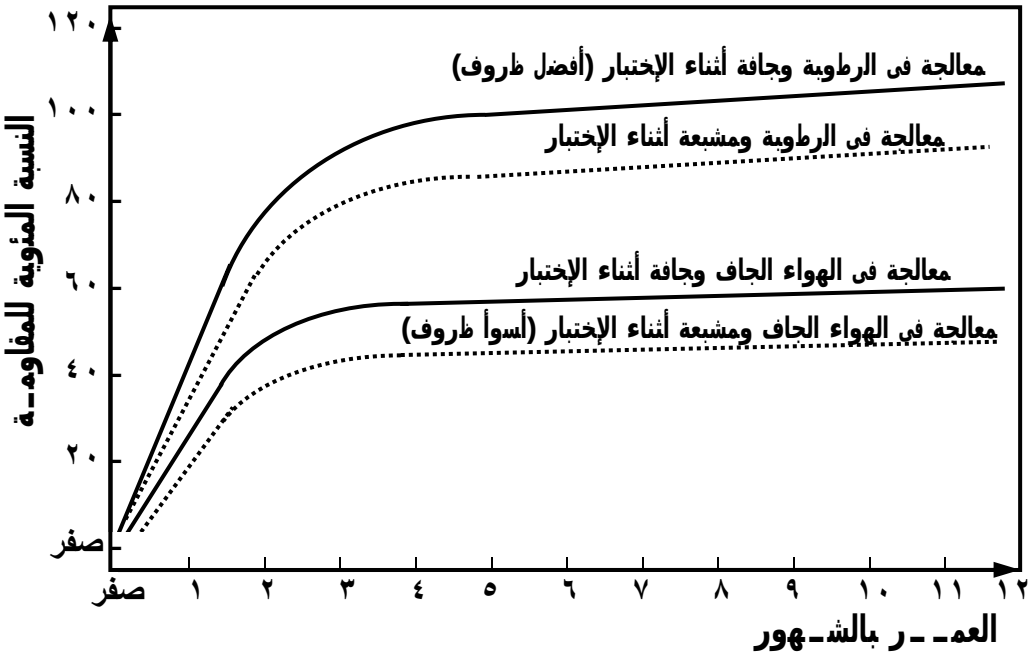
رابعاً: تأثير العمر والمعالجة

إن زيادة مقاومة الخرسانة مع الزمن Strength Gain يتوقف بدرجة كبيرة على الظروف المحيطة بها وكذلك على ظروف المعالجة من حيث مدتها ودرجتي الرطوبة والحرارة. فكلما زادت فترة معالجة الخرسانة فى الرطوبة كلما زادت مقاومتها. كما أن الخرسانة المعالجة فى الهواء تظهر مقاومة أقل كثيراً من الخرسانة المعالجة تحت الماء. إن الخرسانة المعالجة فى الهواء مع تعرضها لدورات الجفاف يقيد عملية الإماهة وربما يوقفها ومن ثَمَ تتوقف الزيادة فى المقاومة. ولقد أوضحت الاختبارات طويلة المدى على الخرسانة المعالجة فى الماء تحت درجة الحرارة العادية أن عملية الإماهة مستمرة حتى أعمار تصل سنوات عديدة ولكن بمعدل متناقص. و يتضح من شكل (٨-١٠) أن الخرسانة المعالجة فى الماء تظهر مقاومة أعلى بمقدار مرتين أو أكثر من مقاومة الخرسانة الغير معالجة. ولقد أوضحت الاختبارات أيضاً أن العينات الخرسانية المعالجة فى الهواء ومختبرة فى جو جاف تُظهر مقاومة أكبر من العينات المناظرة التى عُرضت للهواء نفس المدة ولكنها شُبعت بالرطوبة قبل الاختبار مباشرة. وعموماً فإن المعدل الذى تتحسن به المقاومة Rate of Strength Gain يكون كبيراً فى الأعمار المبكرة خاصة فى الأسابيع الأربعة الأولى ويقل تدريجياً مع تقدم العمر. ولذلك تم اعتبار المقاومة بعد ٢٨ يوم هى المقاومة القياسية للخرسانة.

ولقد أجريت اختبارات عديدة على أنواع مختلفة من الخرسانة لدراسة مقاومة الضغط عند أعمار مختلفة وإيجاد العلاقة بينها. والواقع أن هناك علاقات كثيرة تربط مقاومة الخرسانة فى الأعمار المختلفة بمقاومتها عند ٢٨ يوم إلا أن جميع هذه العلاقات تقريبية وتعطى قيم استرشادية فقط. وفى جميع الأحوال ينبغي اختبار الخرسانة بعد ٢٨ يوم حتى نتأكد تماماً من قيمة مقاومة الخرسانة الفعلية. وتجدر الإشارة أن اختبار الضغط بعد ٢٨ يوم لا يعطى قناعة تامة عن حقيقة مقاومة الضغط لبعض أنواع الخرسانة وخاصة تلك المحتوية على إضافات كيميائية مثل معجلات أو مؤخرات الشك وكذلك تلك المحتوية على مواد بوزولانية مثل غبار السيليكا وفى هذه الحالة ينبغي قياس المقاومة بعد ٥٦ يوم أو ٩٠ يوم على الأقل وذلك حتى تعطى صورة حقيقية عن المقاومة. وعموماً فإن الكود المصري قد أعطى بعض القيم الاسترشادية (جدول ٨-٢) للعلاقة بين مقاومة الضغط فى الأعمار المختلفة ومقاومة الضغط بعد ٢٨ يوم وذلك فى حالة الخرسانة المصنوعة فى الظروف العادية والغير محتوية على إضافات.

جدول (٨–٢) قيم استرشادية لنسبة مقاومة الضغط فى أعمار مختلفة.

عمر الخرسانة (يوم)	٣	٧	٢٨	٩٠	٣٦٥
أسمنت بورتلاندى عادى	٠,٤	٣/٢	١	١,١٨	١,٣٣
أسمنت بورتلاندى سريع التصلد	٠,٥٥	٦/٥	١	١,١١	١,١٨

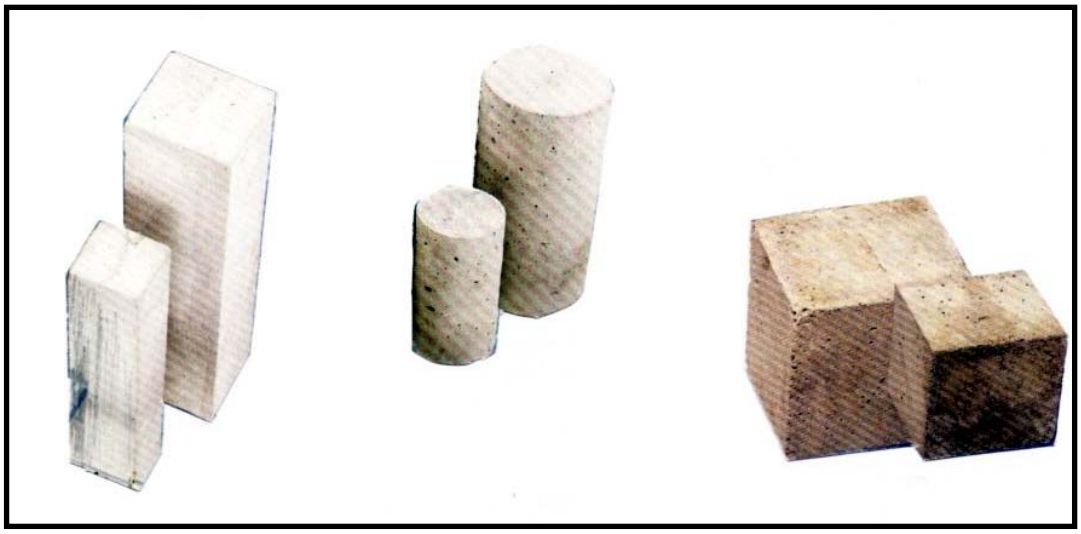


شكل (٨–١٠) معدل زيادة مقاومة الخرسانة مع الزمن فى ظروف معالجة مختلفة.

خامساً: تأثير شكل العينات على مقاومة الضغط

هناك ثلاثة أشكال شائعة للعينات الخرسانية التى تستخدم فى اختبار الضغط وهى: المكعبة والاسطوانية و المنشورية كما بشكل (٨-١١) وقد لوحظ معملياً أن المقاومة المقاسة لخلطة معينة من الخرسانة تختلف باختلاف شكل العينات المختبرة. كما دلت التجارب على أنه لنفس الشكل من العينات تختلف المقاومة المقاسة معملياً باختلاف مقاس العينات المختبرة.

ولقد أجريت عدة أبحاث معملية بغرض الوصول إلى شكل ومقاس موحد ومناسب للعينات الممكن استخدامها فى اختبار الضغط إلا أنه لا توجد حتى الآن طريقة نظرية أو رياضية لإعطاء حل جازم لهذه المشكلة وبذلك ظلت المواصفات الدولية مختلفة فيما بينها فى اختيار الشكل والمقاس المناسب لعينات اختبار الضغط فنجد أن المواصفات القياسية البريطانية تنص على استخدام العينات المكعبة مقاس ١٥,٨×١٥,٨×١٥,٨ سم بينما تنص المواصفات القياسية الأمريكية على استخدام العينات الاسطوانية مقاس ١٥×٣٠ سم ومن ناحية أخرى تنص المواصفات القياسية السويسرية على استخدام العينات المنشورية مقاس ١٥×١٥×٣٠ سم فى حين أن بعض دول وسط أوربا تشترط اختبار مجموعة عينات مكعبة بالإضافة إلى عينات منشورية من نفس الخلطة الخرسانية. ونظراً للاختلاف الواضح بين المواصفات القياسية الدولية بشأن شكل ومقاس عينات اختبار الضغط فإن الأبحاث العلمية أولت هذا الموضوع اهتماما كبيراً لمحاولة ربط المقاومة المستنتجة من أحد الأشكال بالمقاومة المستنتجة من الأشكال الأخرى. وتجدر الإشارة هنا إلى أنه نظراً لتزايد استخدام الخرسانة عالية المقاومة فى وقتنا الحاضر فقد ظهر الميل لاستخدام عينات صغيرة مثل المكعب ١٠×١٠×١٠ سم والاسطوانة ١٠×٢٠ سم وذلك حتى تناسب سعات ماكينات الضغط المتاحة.



شكل (٨-١١) الأشكال المختلفة من العينات الخرسانية المستخدمة فى الضغط.

ولقد بينت الاختبارات أن العلاقة بين مقاومة الضغط للمكعب ومقاومة الضغط للاسطوانة غير ثابتة لأنها تتغير نتيجة اختلاف مقاومة الخرسانة ومقاس الركام الكبير وعوامل أخرى. ويعتبر تولد قوى الاحتكاك بين سطحي عينة الاختبار ورأس ماكينة الضغط من العوامل المؤثرة على تغير العلاقة بين مقاومة الضغط للعينة المكعبة و الاسطوانية و المنشورية حيث تؤثر قوى الاحتكاك على المقاومة الظاهرية للعينات المكعبة. بينما يحدث الانهيار فى العينات الاسطوانية و المنشورية دون تأثير واضح لقوى الاحتكاك وبالتالي نجد دائماً أن مقاومة الضغط للعينة المكعبة أكبر من مقاومة الضغط للعينة الاسطوانية أو المنشورية. وسوف تتضح طبيعة تأثير هذا الاحتكاك على نتائج اختبارات الضغط فيما بعد. وتمتاز العينات الاسطوانية الشكل بأن توزيع الإجهادات على سطحها يكون منتظماً وبذلك تعطى إنعكاساً واضحاً لخواص الخرسانة. وإذا أخذنا المكعب القياسي (١٥×١٥×١٥) كأساس للمقارنة فإن الاختلاف فى نتائج اختبار العينات المكعبة و الاسطوانية و المنشورية يكون كما هو موضح بالجدول (٨-٣). غير أن النسبة الموضحة للمقاومة فى الجدول (٨-٣) تختلف باختلاف عمر الخرسانة عند اختبارها كما تختلف أيضا باختلاف مقاومة الخلطة المختبرة وكذلك تتوقف على طبيعة المواد المكونة للخرسانة فنجد مثلاً أن نسبة مقاومة المنشور إلى مقاومة المكعب تزيد كلما كانت الخرسانة المختبرة بها نسبة أكبر من الرمل والمواد الناعمة.

جدول (٨-٣) قيم استرشادية لمعامل التصحيح لنتائج مقاومة الضغط طبقاً للكود المصري ٢٠٠١.

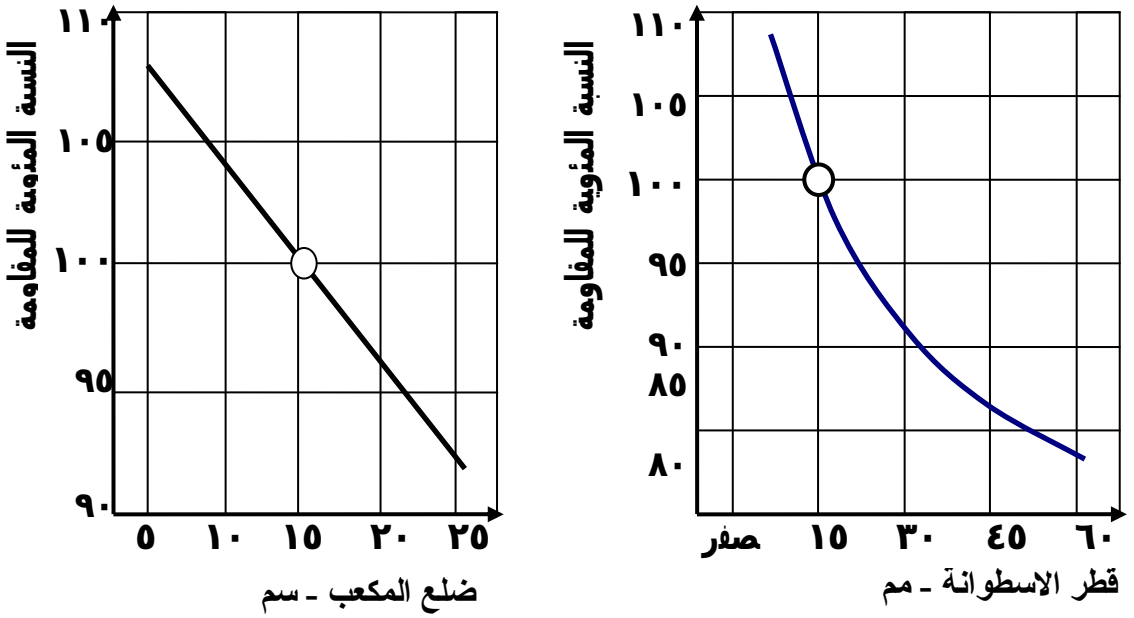
شكل القالب	الأبعاد (سم)	معامل التصحيح
مكعب	١٠×١٠×١٠	٠,٩٧
مكعب	١٥×١٥×١٥ أو ١٥,٨×١٥,٨×١٥,٨	١,٠٠
مكعب	٢٠×٢٠×٢٠	١,٠٥
مكعب	٣٠×٣٠×٣٠	١,١٢
اسطوانة	٢٠×١٠	١,٢٠
اسطوانة	٣٠×١٥	١,٢٥
اسطوانة	٥٠×٢٥	١,٣٠
منشور	٣٠×١٥×١٥ أو ٣١,٦×١٥,٨×١٥,٨	١,٢٥
منشور	٤٥×١٥×١٥ أو ٤٧,٤×١٥,٨×١٥,٨	١,٣٠
منشور	٦٠×١٥×١٥	١,٣٢

سادساً: تأثير المقاس على مقاومة العينات

وجد أن مقاومة الخرسانة للضغط تختلف بالنسبة للعينات المتشابهة فى الشكل والمختلفة فى الأبعاد ، فكلما زادت الأبعاد تقل مقاومة الضغط المقاسة معملياً كما بشكل (٨-١٢). ولقد أدت هذه الظاهرة بالباحثين إلى محاولة عمل توحيد قياسي على أبعاد عينات اختبار الضغط سواء كانت مكعبة أو اسطوانية أو منشورية الشكل. وبالنسبة للعينات الاسطوانية الشكل نجد أن المقاومة المقاسة تتغير تبعاً لتغير مقاس الاسطوانة كما أنها تتغير أيضا تبعاً لاختلاف نسبة ارتفاع الاسطوانة إلى قطرها (ع/ق) ، ويوضح جدول (٨-٤) عامل التصحيح لمقاومة الضغط الذى يضرب فى المقاومة التى يحصل عليها من العينات الاسطوانية غير القياسية وذلك بغرض حساب المقاومة المطلوب الحصول عليها من العينات القياسية المأخوذة من نفس الخلطة والتى يعادل ارتفاعها ضعف قطرها. و يتضح من جدول (٨-٤) أن المقاومة التى نحصل عليها من العينات التى لها (ع/ق) أقل من ٢ تكون أكبر من المقاومة القياسية مما يستدعى ضربها بعامل تصحيح يقل بقيمته عن الواحد الصحيح تبعاً لنسبة (ع/ق).

جدول (٨-٤) عامل تصحيح المقاومة المناظر لنسب (ع/ق) المختلفة للاسطوانة (ASTM C 457)

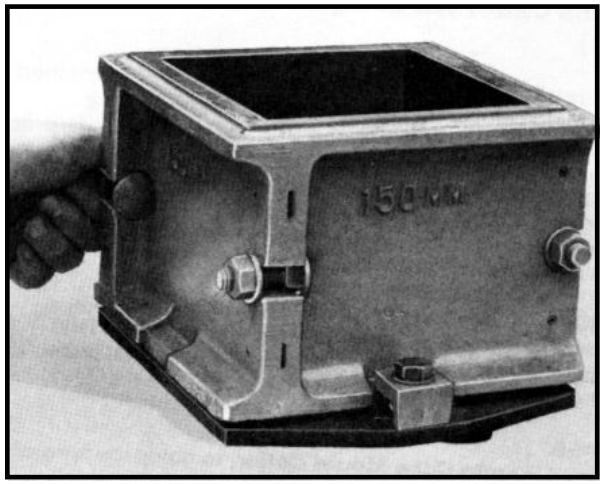
نسبة الارتفاع إلى القطر (ع/ق)	١,٠	١,٧٥	٢,٠	١,٥٠	١,٢٥	١,١٠	١,٠٠	٠,٧٥	٠,٥٠
عامل تصحيح المقاومة	٠,٣٠	٠,٧٠	٠,٨٥	٠,٩٠	٠,٩٤	٠,٩٦	٠,٩٨	١,٠	



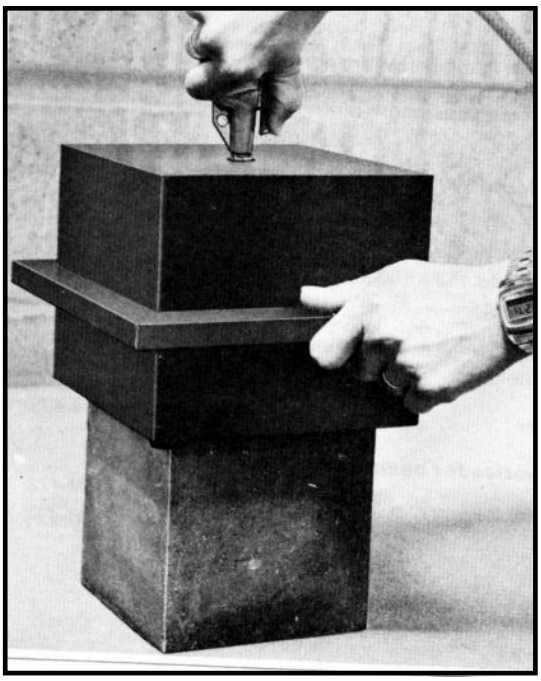
شكل (٨-١٢) تأثر مقاومة الخرسانة بتغير مقاس العينة.

سابعاً: نـوع قالب الصـب

هناك عدة أنواع من القوالب يمكن إستخدامها لصب عينات إختبار الضغط سواء للعينات المكعبة أو الإسطوانية أو المنشورية الشكل. إلا أن أكثر هذه الأنواع شيوعاً هى القوالب المعدنية ثم تأتىقوالب البلاستيك والكرتون وقوالب ورق الشمع البرافينى. ويؤثر نوع مادة القالب المستخدم على مقاومة الضغط المقاسة معملياً تبعاً لقابلية القالب لإمتصاص الماء وقابليته لتسريب الماء الأسمنتى من خلال الجدران أو إحتمال حدوث تغير فى شكل القالب Deformation خلال زمن تصلد الخرسانة. ومع أن القوالب المعدنية تُعتبر أفضل الأنواع لتجهيز عينات الإختبار إلا أن النوعين الآخرين يمتازان بقلة التكاليف وسهولة الإستعمال فى موقع العمل. وتُظهر العينات المصبوبة فى قوالب من البلاستيك مقاومة أقل من تلك التى تُظهرها مثيلاتها المصبوبة فى القوالب المعدنية. وجدير بالذكر أن المواصفات القياسية تنص على إستخدام القوالب المعدنية لتجهيز عينات إختبار الضغط إلا أنه قد يلزم فى بعض الظروف إستخدام أنواع أخرى من القوالب وفى هذه الحالة تصحح المقاومة المقاسة بضربها بعامل التصحيح المناسب. شكل (٨-١٣) يبين شكل القالب المكعب المعدنى أثناء تربيط جوانبه بينما يبين شكل (٨-١٤) القالب المناظر من البلاستيك أثناء تفريغ العينة الخرسانية منه بضغط الهواء.



شكل (٨-١٣) قالب مكعب معدنى.



شكل (٨-١٤) قالب مكعب بلاستيك.

ثامناً: ظروف التحميل

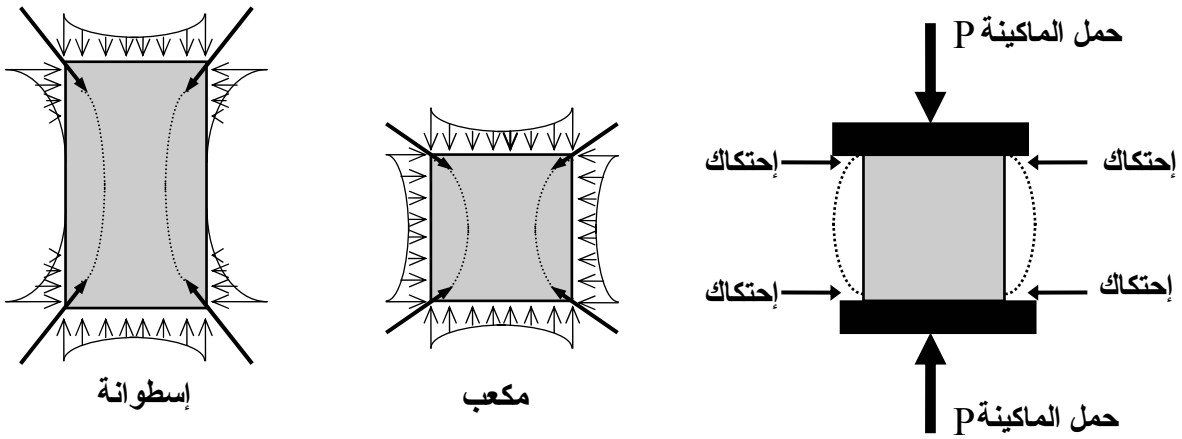
تتأثر المقاومة المقاسة لعينات اختبار الضغط بظروف التحميل المؤثرة عليها مثل طبيعة نهايات كلٍ من عينة الاختبار وماكينة الضغط وكذلك الاحتكاك الناشئ بين سطحي العينة وماكينة الاختبار. وفيما يلي توضيح موجز لتأثير هذه الظروف على نتائج اختبار الضغط.

١- طبيعة نهايات العينة

فى بعض الأحيان يُغطى السطح السفلى والعلوي لعينة اختبار الضغط بواسطة وسائد لمحاولة التغلب علي خشونة عدم استواء سطح التحميل وتختلف المقاومة المقاسة للعينات ذات الوسائد عن تلك المقاسة للعينات العادية بدون وسائد حيث وُجد أن العينات ذات الوسائد تُظهر مقاومة أعلى من مقاومة العينات العادية القياسية وذلك لأن الوسائد تعمل على توزيع الحمل بانتظام على كامل مقطع العينة المختبرة. ويعتمد اختلاف المقاومة المقاسة على نوع مادة الوسادة وعلى طريقة صبها فوق سطحي العينة. وتوصى بعض الدراسات باستعمال طبقة رقيقة من عجيبة الأسمنت كوسائد لأسطح تحميل عينات الضغط حيث أنه كلما كانت الوسادة رقيقة كانت نتائج الاختبار ممثلة للواقع. ويلاحظ أن استواء سطحي التحميل أو سطحي وسادتي التحميل يؤثر تأثيراً واضحاً على المقاومة المقاسة لعينة الاختبار حيث أن أي نسبة من الانحناء الناشئ فى هذين السطحين تسبب نقصاً كبيراً فى المقاومة الظاهرية للعينة.

٢- طبيعة أطراف ماكينة الاختبار

توضع عينات الضغط عند اختبارها بين فكي ماكينة الضغط اللذين يشكلان لوحي التحميل المعدنيين. ويجب أن تكون مساحة لوح التحميل المعدني مساوية على الأقل أو أكبر من مساحة سطح العينة المعرض للتحميل. ومن المعروف أنه كلما كانت العينة كبيرة أو ذات مقاومة عالية جداً فإنه يلزمها ألواح تحميل معدنية سميكة حتى لا تكون هذه الألواح مرنة بالنسبة للأحمال الكبيرة التى ستؤثر عليها مما قد يسبب تركيز الإجهادات على سطح العينة. أما إذا كانت عينة الاختبار صغيرة وألواح التحميل المعدنية سميكة نوعا ما فإنه يمكن اعتبار هذه الألواح جاسئة تماما بالنسبة للأحمال الصغيرة التى سوف تتعرض لها وبذلك تستطيع هذه الألواح أن تعطى أحمالاً موزعة بانتظام على سطح عينة الاختبار.



شكل (٨–١٥) تأثير الإحتكاك بين العينة والماكينة.

٣- الاحتكاك بين سطحي العينة وماكينة إختبار الضغط

عند تحميل الأسطح الأفقية لعينة الإختبار تنضغط هذه العينة رأسيا أو تنكمش بسبب إجهادات الضغط الواقعة عليها بينما تحاول جوانب العينة أن تتمدد أفقيا إلا أن حركة التمدد الجانبى هذه سوف تقاوَم بواسطة الإحتكاك الذى ينشأ فى هذه اللحظة بين لوحى التحميل المعدنين والسطحين الأفقيين لعينة الإختبار. وتتولد قوى الإحتكاك هذه بقيمة قصوى عند أطراف سطحى العينة وتقل قيمتها تدريجيا كلما إتجهنا إلى الداخل حتى تتلاشى تماماً كماهو موضح بشكل (٨-١٥). ولقد وجد أن الإحتكاك الناشئ بين سطحى العينة وفكى ماكينة الإختبار يؤثر تأثيراً بالغاً على نتائج الإختبارات ويلعب دوراً كبيراً فى الإختلاف الملحوظ فى نتائج إختبارات العينات الخرسانية ذات الأشكال والمقاسات المختلفة ويرجع هذا إلى أن قوى الإحتكاك المتولدة تحاول أن تقاوم الإنفعال الجانبى للعينة وبذلك فهى - بطريقة غير مباشرة - تقاوم الإنفعال الرأسى الناتج عن التحميل وبذلك تكسب العينة مقاومة زائدة لأحمال الضغط مما يسبب تسجيل مقاومة أعلى للعينة على تدريج ماكينة الإختبار.

ويلاحظ أن تأثير قوى الإحتكاك المتولدة بين سطحى العينة وفكى الإختبار يظهر فى العينات المكعبة بوضوح بالمقارنة مع العينات المنشورية حيث أنه تنعدم إجهادات الإحاطة على جوانب المنشور فى المنطقة القريبة من منتصف الإرتفاع بينما لا تنعدم هذه الإجهادات على جوانب المكعب تقريباً مما يسبب تقوية زائدة للمكعب. وتشبه إجهادات الإحاطة فى حالة الإسطوانة مثيلتها فى حالة المنشور. وذلك يفسر ميل العينات المكعبة بصفة دائمة إلىإظهار مقاومة ضغط أعلى من المقاومة التى تظهرها عادة الإسطوانة أو المنشور. كذلك يزيد تأثير قوى الإحتكاك وإجهادات الإحاطة الناتجة عنها لنفس العينات المكعبة كلما صغُر مقاس تلك العينة وبذلك تظهر العينات المكعبة صغيرة المقاس مقاومة أعلى من المقاومة التى تظهرها العينات المكعبة كبيرة المقاس.

٤- معدل التحميل

عند إختبار عينات الضغط لوحظ أنه كلما أسرعنا من معدل التحميل فإن هذه العينات تُظهر مقاومة أعلى للضغط. ولذلك فإنه ينبغى أن تحمل العينات الخرسانية المكعبة بحمل ضغط بحيث لاينتج عنه أى صدم على العينة ثم يزداد الحمل تدريجيا بمعدل ١٤٠ كج/سم٢/دقيقة حتى لحظة تسجيل العينة لأقصى حمل على ماكينة الإختبار. ولقد أظهرت بعض الدراسات المعملية أن زيادة فترة التحميل بحيث تصل إلى عدة أيام تسبب نقصا كبيراً فى المقاومة المقاسة بالإضافة إلى أن الإنفعالات المقاسة للعينة تكون أكبر بكثير من المعتاد. ولما كانت الإنفعالات المقاسة على العينة تتأثر أيضا بمعدل التحميل حيث تقل كلما زاد معدل التحميل فإنه بناءاً على ذلك يزداد معاير المرونة المقاس للعينة الخرسانية كلما زاد معدل التحميل.

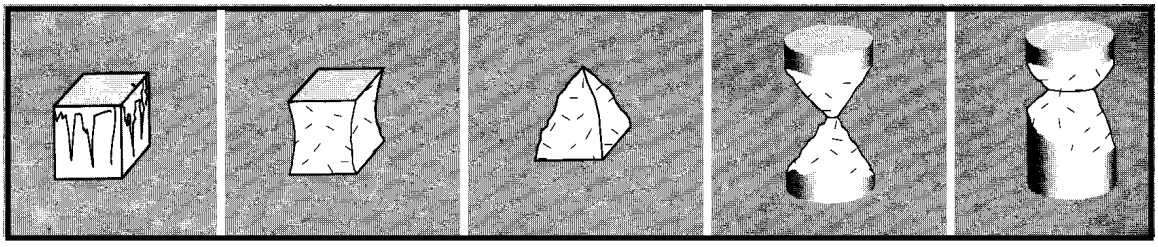
تاسعاً: إتجاه التحميل

عند اختبار العينات المكعبة فإن تحميلها فى ماكينة الضغط يكون إما فى إتجاه الصب أو فى الإتجاه العمودى عليه ويؤثر إتجاه تحميل العينة بالنسبة لإتجاه الصب تأثيراً واضحاً على مقاومة العينة للضغط. ويُلاحظ أنه بالنسبة للعينات الإسطوانية أو المنشورية الشكل فإن إتجاه التحميل يكون دائماً فى إتجاه الصب بينما يكون إتجاه التحميل فى العينات المكعبة عمودياً على إتجاه الصب وذلك بغرض جعل الأسطح المصقولة للمكعب ملامسة لرأس ماكينة الإختبار. ولقد أظهرت بعض الأبحاث التى أجريت بهذا الشأن أن العينات التى تُختبر بحيث يكون إتجاه التحميل المؤثر عليها مطابقاً لإتجاه الصب تُظهر مقاومة أكبر بحوالى ٨% من المقاومة التى تُظهرها العينات التى تُختبر بإتجاه تحميل عمودى على إتجاه الصب. بينما أظهرت دراسات أخرى أن الخرسانة إذا كانت غنية بالأسمنت ومخلوطة ومدموكة جيداً فإن تأثير إتجاه التحميل على مقاومة الضغط المقاسة يتلاشى تقريباً خصوصاً إذا كان التحميل مؤثراً بحيث يعطى إجهادات موزعة بإنتظام على سطح العينة طوال فترة الإختبار.

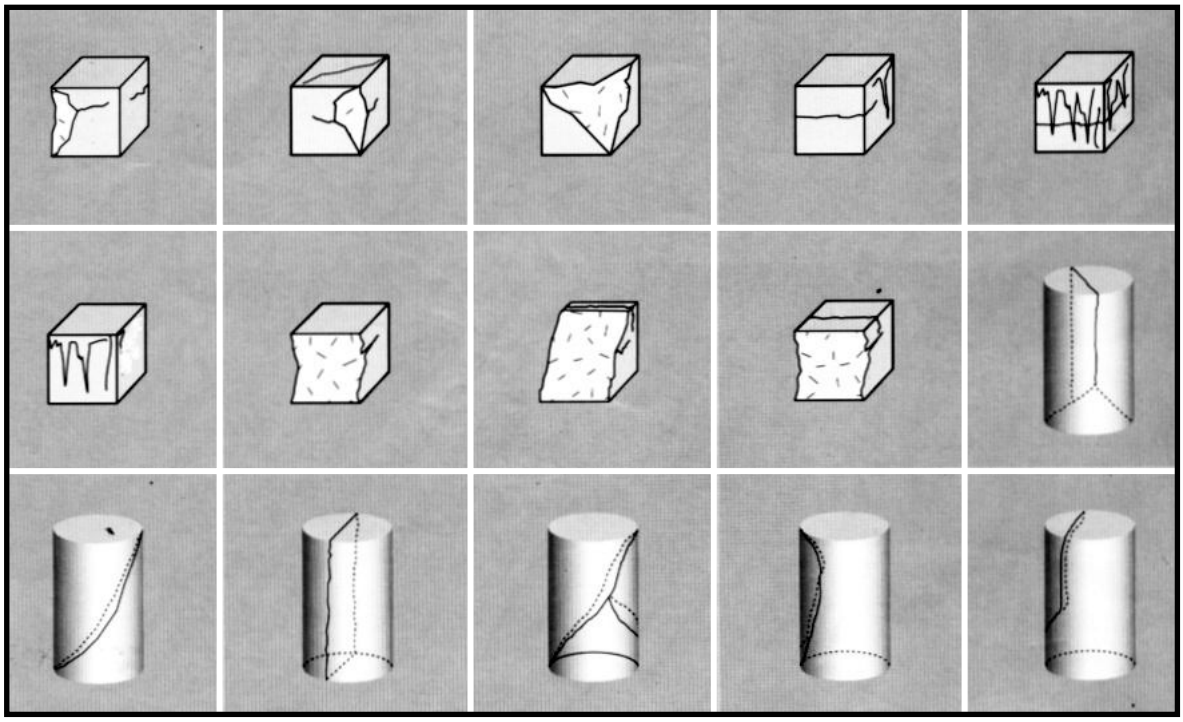
وقد يرجع سبب ضعف المقاومة للمكعبات القياسية التىتختبر فى إتجاه عمودى على إتجاه الصب إلى أن مركز ثقل المكعب الخرسانى فى هذه الحالة يكون مزحزحاً عن محور التحميل بسبب ميل هذا المركز لأن يكون قريباً من الطبقات الأفقية السفلى أثناء عملية الصب مما يسبب لا مركزية فى التحميل تضعف المقاومة المقاسة نظراً لتولد إجهادات الإنحناء.

٨-١-٢ أشكال الانهيارات المحتملة للخرسانة تحت تأثير حمل الضغط

إن الانهيارات الحادثة فى العينات علىإختلاف أشكالها نتيجة إختبارات الضغط نادراً ما تكون بسبب إجهادات الضغط فقط وإنما هى فى الغالب إنهيار قص أو إنهيارات شد ضلعى. هذا بالإضافة إلى أن الإنهيارات التى تحدث فى عينات الإختبار تختلف فى أشكالها كليةً عن الإنهيارات الممكن حدوثها فى الأعضاء الخرسانية فى المنشأ. ومن خلال الدراسات المعملية يمكن ملاحظة أن عينات إختبار الضغط القصيرة نسبيا مثل المكعبات والإسطوانات القياسية تتأثر بإجهادات الإحاطة الجانبية الواقعة عليها من إحتكاك نهايتها مع رأس الماكينة فتنهار على شكل مخروط ناقص كما هو موضح بشكل (٨-١٦). وهذا الشكل المخروطى ناتج عن تأثير إجهاد الضغط المحورى مضافاً عليه إجهادات الإحاطة الجانبية. بينما يلاحظ أنه لو حاولنا ملاشاة الإحتكاك الناشئ من نهايات العينة ورأس الماكينة بواسطة طبقة من الزيت تفصل بينهما فإن إجهادات الإحاطة تقل وبالتالى تقل مركبة القوى الأفقية المؤثرة على العينة ويتحول شكل الإنهيار الحادث إلى شكل إنفلاق Splitting. وقد تحدث بعض الأخطاء أثناء التأثير بالحمل نتيجة عدم مركزية الحمل أو عدم إستواء أوجه العينة أو أى أسباب أخرى مما يؤدى إلى حدوث الإنهيار بشكل غير طبيعى أو غيرصحيح كما فى شكل (٨-١٧) وغالباً تكون المقاومة الحقيقية لهذه العينات أكبر من القيمة التى تقرأها الماكينة بنسبة قد تصل إلى ٣٠% .



شكل (٨-١٦) شكل انهيار صحيح لعينات إختبار فى الضغط.



شكل (٨-١٧) شكل إنهيار غير صحيح لعينات اختبار فى الضغط.

٨-١-٣ اختبار مقاومة الضغط Compressive Strength Test

يجرى إختبار تحديد مقاومة الضغط للخرسانة المتصلدة عادة بعد مرور ٢٨ يوماً على صب العينات وفى بعض الأحيان بعد ٧ أيام أو بعد فترة أخرى حسب الحاجة.

عينات الاختبار :

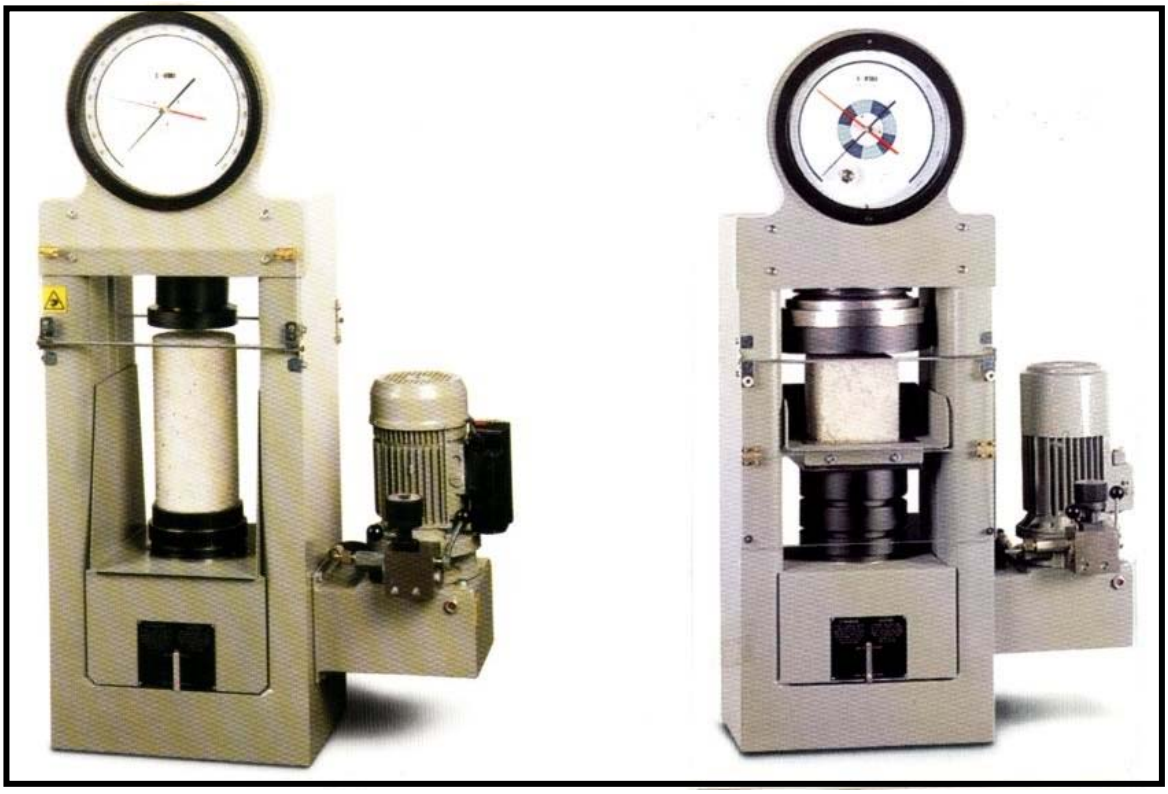
تكون عينة الإختبار بشكل مكعب طول ضلعه ١٥,٨ سم أى مساحة الوجه = ٢٥٠ سم٢ أو مكعب طول ضلعه ١٥ سم أو إسطوانة قطرها ١٥ سم وإرتفاعها ٣٠ سم.

طريقة إجراء الاختبار:

- **توزن الكميات اللازمة من الأسمنت والركام الصغير والركام الكبير (أو المقاسات المحجوزة على المناخل منفصلة) والماء ويراعى عند حساب الوزن أن تزيد كمية الخرسانة المخلوطة عن الخرسانة اللازمة لملء القوالب بحوالى ١٥% وذلك لتعويض أى فقد أو هالك قد يحدث أثناء الإختبار.**

- **يُعد قالب الإختبار وتُغطى أوجه القالب الداخلية بطبقة رقيقة من الزيت الخفيف.**
- **تخلط مكونات الخرسانة إما ميكانيكياً أو يدوياً خلطاً جيداً حتى يصبح لونها متجانس.**
- **بمجرد الإنتهاء من الخلط تُجرى إختبارات القوام (الهبوط مثلاً) وأى إختبارات أخرى تكون مطلوبة مثل إختبارات القابلية للتشغيل (عامل الدمك أو فيبى) أو إختبار تحديد نسبة الهواء فى الخلطة.**
- **بعد إختبارات الخرسانة الطازجة يُملأ القالب مباشرة بالخرسانة على ٣ طبقات وتدك كل طبقة إما بمكنةالإهتزاز أو يدويا حتى تدمك الخرسانة دمكاً تاماً دون حدوث إنفصال حبيبى.**
- **تغطى القوالب بعد صبها مباشرة وتوضع فى مكان درجة حرارته ١٥ إلى ٢٠ درجة مئوية لفترة ٢٤ ساعة ويلاحظ أن لا تتعرض لأى إهتزازات.**
- **تُعلم العينات الخرسانية بعد ذلك ثم تفك من القوالب وتُغمر فى الحال فى ماء نقى درجة حرارته حوالى ١٥ ـ ٢٠ درجة مئوية وتُترك حتى وقت الإختبار ويُفضل ترك مسافات بين المكعبات وبعضها فى أحواض المعالجة كما يُنصح بعدم وضع المكعبات فوق بعضها.**
- **تختبر العينة بوضعها بماكينة الإختبار حيث يكون محورها منطبقاً مع محور رأس الماكينة وفى حالة العينة المكعبة يلزم أن يكون وجهى العينة الملامسين لسطحى رأس الماكينة هما الوجهين المقابلين للسطح الداخلى للقالب المعدنى لضمان استوائهما وتوازيهما. أما فى حالة العينة الإسطوانية فيلزم عمل مخدة Capping لسطح كل من نهايتى الإسطوانة بطريقة تجعل سطح النهايتين مستويين ومتوازيين. شكل (٨-١٨) يبين وضع المكعب والإسطوانة فى ماكينة الضغط. ولكل إختبار تختبر ثلاث عينات وتؤخذ القيمة المتوسطة للنتائج. أما شكل (٨-١٩) فيوضح شكل الكسر فى عينات خرسانية مكعبة بعد إجراء إختبار الضغط عليها.**
- **تعرض العينة لحمل ضغط محورى بمعدل حوالى ١٤٠ كج/سم٢/دقيقة حتى الكسر وتدون النتائج فى جدول كما يلى:**

رقم العينة	التاريخ	عمر الخرسانة	وزن العينة	أبعاد العينة	مساحة الوجه	حمل الكسر	مقاومة الضغط كج/سم٢
١ ٢ ٣	تاريخ الصب تاريخ الكسر	٧ أيام					
٤ ٥ ٦	تاريخ الصب تاريخ الكسر	٢٨ يوم					



شكل (٨-١٨) وضع للعينات المكعبة والاسطوانية فى ماكينة الضغط.

شكل (٨-١٩) الكسر للعينات المكعبة فى إختبار مقاومة الضغط.

٨–٢ مقاومة الشد Tensile Strength

٨–٢–١ العلاقة بين مقاومتى الشد والضغط

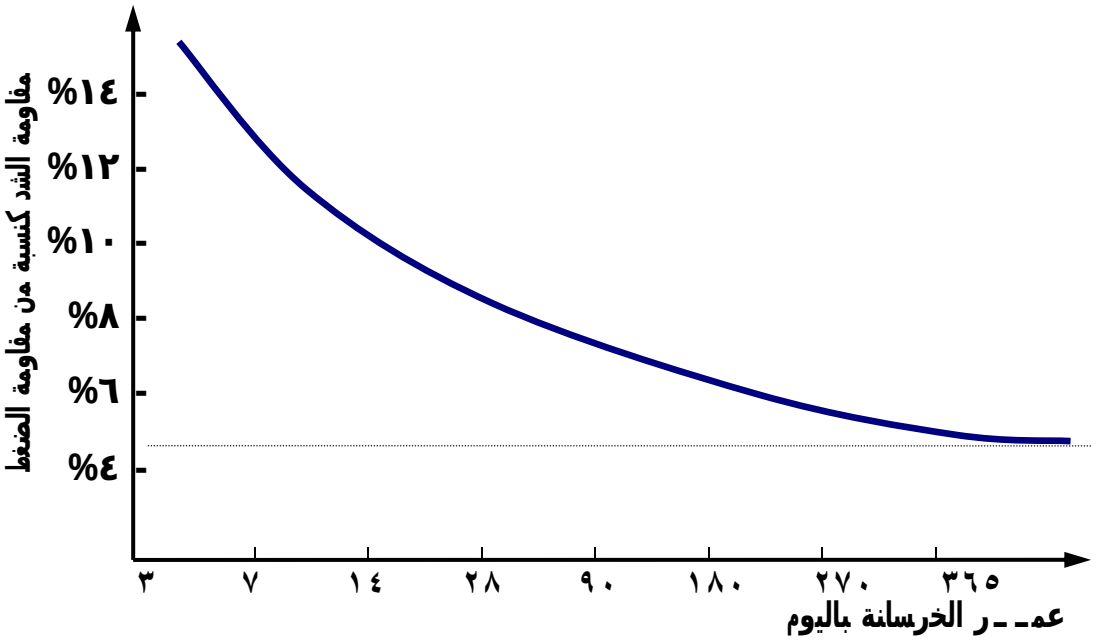
تتحمل الخرسانة العادية المتصلدة مقاومة الضغط بدرجة كبيرة ولذلك يجرى تصميم الخرسانة بإعتبارها تقاوم إجهادات الضغط أساساً أما بالنسبة لمقاومتها لقوى الشد (سواء المباشر أو غير المباشر) فإنها تعتبر ضعيفة المقاومة للشد إذا ما قورنت بمقاومتها للضغط ويرجع هذا لكونها مادة قصفة ومع ذلك إهتم الباحثون بمقاومة الشد فى الخرسانة لأن حدوث معظم التشققات والشروخ فيها ناتج عن صغر مقاومتها للشد. ومقاومة الشد فى الخرسانة تتراوح ما بين ٧% إلى ١٤% من مقاومتها للضغط أى بنسبة متوسطة قدرها ١٠% وتختلف هذه النسبة تبعاً لعمر الخرسانة كما بشكل (٨-٢٠) وكذلك تعتمد هذه النسبة على رتبة الخرسانة كما بشكل (٨-٢١) ويلاحظ أنه كلما زادت مقاومة الخرسانة للضغط كلما قلت الزيادة النسبية لمقاومة الشد إلى أن تصل مقاومة الضغط إلى حوالى ٨٠٠ كج/سم٢ عندها تصل مقاومة الشد إلى أقصى قيمة لها والتى تتراوح من ٦٠ إلى ٧٠ كج/سم٢. ويمكن إستخدام المعادلتين التاليتين فى حساب مقاومة الشد للخرسانة:

١- للأعمار المبكرة

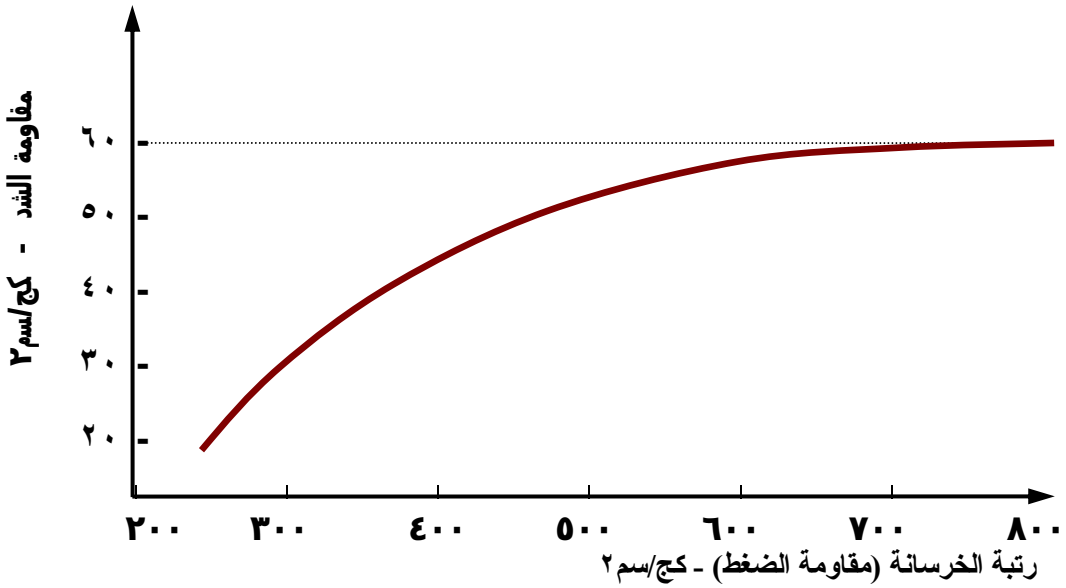
$$\frac{\text{مقاومة الشد}}{\text{مقاومة الضغط}} = \frac{١}{٨} : \frac{١}{١٢} = ١٠\%$$

٢- للأعمار المتأخرة

$$\frac{\text{مقاومة الشد}}{\text{مقاومة الضغط}} = \frac{١}{٢٠} = ٥\%$$



شكل (٨–٢٠) اختلاف مقاومة الشد بإختلاف عمر الخرسانة.



شكل (٨-٢١) إختلاف مقاومة الشد بإختلاف رتبة الخرسانة.

٨-٢-٢ طرق إختبار مقاومة الشد للخرسانة

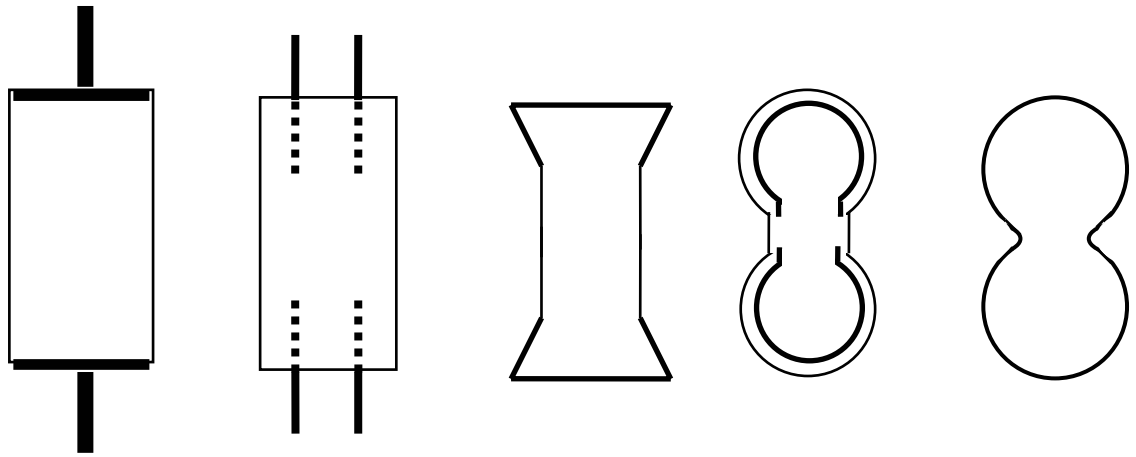
يمكن تعيين مقاومة الشد فى الخرسانة بعد ٧ أيام أو ٢٨ يوم أو أى مدة أخرى بطرق مباشرة وغير مباشرة كما يلى:

أولاً: إختبار الشد المباشر Direct Tensile Strength

تطورت أشكال العينات الخرسانية فى إختبار الشد المباشر كما هو موضح بشكل (٨-٢٢).

- تحضر العينات للإختبار بإجراء عمليات الخلط والصب والدمك والمعالجة بنفس الطريقة السابق ذكرها فى إختبار الضغط.
- يجرى الإختبار بمسك العينة عند نهايتيها بماكينة الإختبار والتأثير بحمل الشد تدريجيا وببطء ويعين الحمل المسبب لكسر العينة حيث تنكسر معظمها فى المنتصف وتحسب مقاومة الشد فى هذه الحالة بقسمة الحمل الأقصى على مساحة مقطع العينة.

$$\text{مقاومة الشد المباشر} = \frac{\text{الحمل الأقصى}}{\text{مساحة المقطع}} = \frac{P_{max}}{A} \quad \text{كج/سم}^2$$



شكل (٨-٢٢) أشكال العينات الخرسانية فى إختبار الشد المباشر.

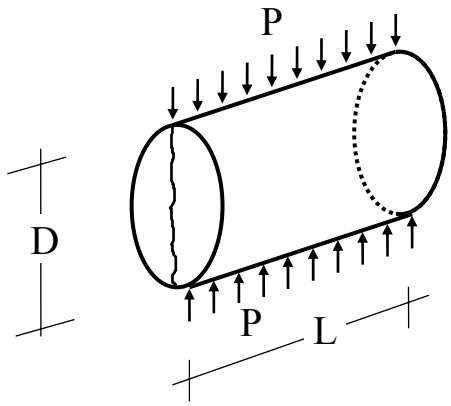
ونظراً لصعوبة إجراء إختبار الشد المباشر نتيجة الصعوبة النسبية فى صب و فك عينة الإختبار ونظراً لوجود إجهادات ضغط مركزة بين كلابات التثبيت وعينة الإختبار وكذلك إحتمال عدم مركزية حمل الشد فإنه يتم اللجوء إلى طرق غير مباشرة لقياس مقاومة الشد.

ثانياً: إختبار الشد غير المباشر (الطريقة البرازيلية) Indirect Tensile Strength

عينة الاختبار القياسية عبارة عن إسطوانة خرسانية قطرها ١٥ سم وطولها ٣٠ سم حيث توضع هذه الإسطوانة بين رأسى ماكينة الإختبار فى وضع أفقى وعلى جانبيها بين شريحتين من الخشب الأبلكاج أو المطاط بعرض ٢ سم ويعين حمل الضغط المسبب لكسر العينة وعند إنهيارها يسجل الحمل الأقصى.

$$\text{مقاومة الشد غير المباشر (البرازيلي)} = \frac{\text{٢} \times \text{الحمل الأقصى}}{\text{ط} \times \text{الطول} \times \text{القطر}} \quad \text{كج/سم}^{\text{٢}}$$

$$\text{مقاومة الشد البرازيلي} = \frac{2P}{\pi DL} \quad \text{كج/سم}^{\text{٢}}$$

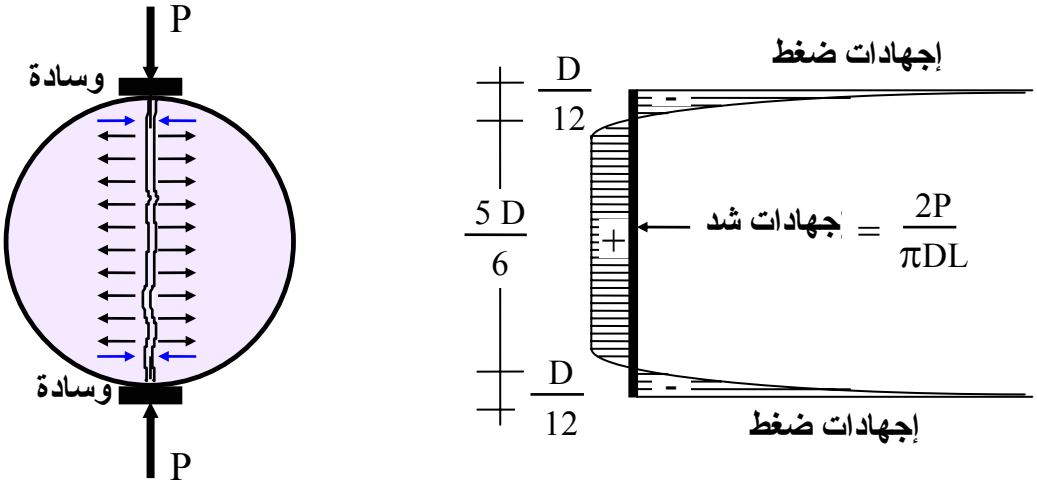


حيث:

P = الحمل الأقصى ..... كج
D = قطر الإسطوانة ..... سم
L = طول الإسطوانة ..... سم

شكل (٨-٢٣) اسطوانة الشد البرازيلى.

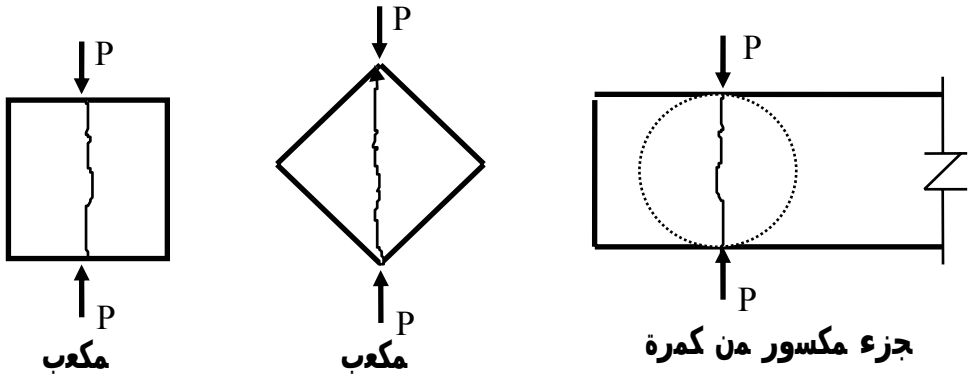
ويكون المستوى الرأسى للإنهيار هو مستوى إجهادات الشد الرئيسية حيث تكون موزعة على ٨٠% من طوله وفى نفس الوقت توجد إجهادات ضغط تتراوح قيمتها من ١٦ إلى ١٨ مرة قدر إجهادات الشد وذلك فى المنطقتين تحت تأثير الحمل مباشرة (فى طرفى مستوى الإنهيار). ويتميز إختبار الشد غير المباشر بسهولة الإجراء وكذلك لوجود إجهادات الشد بقيمة ثابتة و منتظمة على حوالى ٦٠% من طول مستوى الإنهيار كما بشكل (٨-٢٤). وعموماً تؤخذ مقاومة الشد للخرسانة مساوية لـ ٨٥% من قيمة مقاومة الشد البرازيلى.



شكل (٨-٢٤) توزيع الإجهادات فى عينة الشد البرازيلى.

ويمكن إجراء الإختبارعلى عينات بشكل منشور أو مكعب أو جزء من كمرة كما بشكل (٨-٢٥). وفى هذه الحالة يجب تصحيح قيمة المقاومة بضربها فى عامل k يتوقف علىتغير أبعاد العينة ويعين معمليا.

مقاومة الشد البرازيلى $= k \frac{2P}{\pi DL}$ كج/سم٢ .



شكل (٨-٢٥) إمكانية إجراء إختبار الشد البرازيلى على عينات مختلفة.

وعموماً فإن الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية قد أعطى بعض القيم الإسترشادية (جدول ٨-٥) للعلاقة بين مقاومة الشد فى الأعمار المختلفة ومقاومة الشد بعد ٢٨ يوم وذلك فى حالة الخرسانة المصنوعة فى الظروف العادية والغير محتوية على إضافات.

جدول (٨–٥) قيم إسترشادية لنسبة مقاومة الشد فى أعمار مختلفة.

عمر الخرسانة (يوم)	٣	٧	٢٨	٩٠	٣٦٥
أسمنت بورتلاندى عادى	٠,٥	٠,٧١	١	١,٠٥	١,٠٥
أسمنت بورتلاندى سريع التصلد	٣/٢	٦/٥	١	١,٠٥	١,٠٥

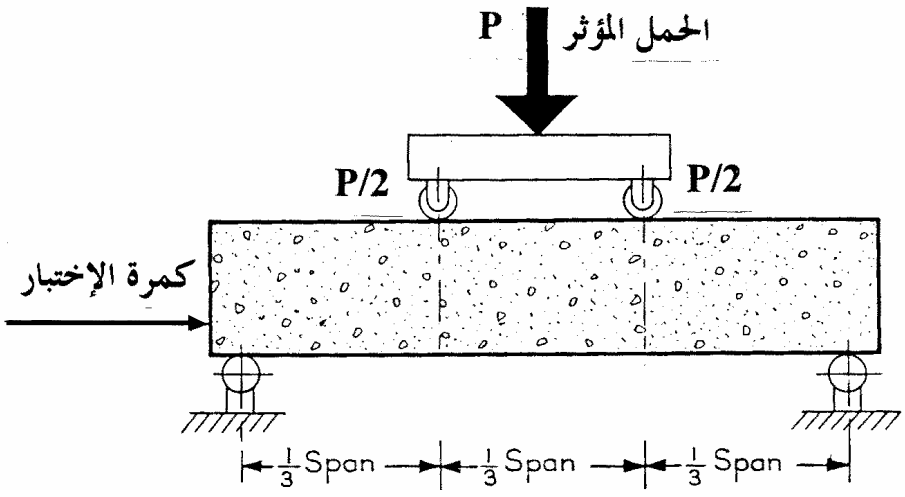
٨-٣ مقاومة الانحناء Bending Strength

عندما تتعرض كمرة خرسانية للإنحناء فإنه يمكن حساب مقاومة الإنحناء (التى تعتبر أيضاً مقياساً لمقاومة الشد غير المباشر) وتسمى معاير الكسر فى الإنحناء Modulus of Rupture وتتراوح قيم إجهادات معاير الكسر فى الإنحناء بين ١٢% - ٢٠% من مقاومة الضغط. وبالتالى فإن مقاومة الإنحناء تزيد عن مقاومة الشد للخرسانة بنسبة من ٦٠ إلى ١٠٠%. وعموماً تؤخذ مقاومة الشد للخرسانة مساوية لـ ٦٠% من قيمة مقاومة الإنحناء. ومن ذلك يتضح أن مقاومة الإنحناء تزيد عن مقاومة الشد البرازيلى بحوالى ٤٠%. ويجرى إختبارالإنحناء لتعيين مقاومة الخرسانة المتصلدة للإنحناء ودراسة سلوك الكمرات الخرسانية عند تعرضها لأحمال إنحناء وكذلك شكل الكسر الناتج عن إنهيار هذه الكمرات.

طريقة إجراء الإختبار :

توضع الخرسانة فى قوالب على شكل كمرات أبعادها الداخلية ١٥×١٥×٧٠سم أو ١٠×١٠×٥٠ سم وذلك للركام الذى لا يزيد مقاسه الإعتبارى الأكبر عن ٢٠ مم. تخلط الخرسانة وتملأ القوالب وتدمك وتعالج بنفس الطريقة المتبعة فى الضغط ويعمل من نفس الخلطة الخرسانية عينات ضغط لإعطاء فكرة عن العلاقة بين الضغط والإنحناء.

توضع الكمرة فى ماكينة الإختبار على ركيزتين كما هو مبين بشكل (٨-٢٦) ويراعى أن يكون كل من قضيب الإرتكاز والتحميل بطول أكبر من عرض الكمرة كما يكون التحميل تدريجيا وبمعدل منتظم يؤدى إلى الوصول بالقيمة النهائية للحمل فى مدة حوالى ٥ دقائق.



شكل (٨-٢٦) شكل الكمرة فى إختبار الانحناء.

ويفضل إجراء اختبار الانحناء للخرسانة بتحميل عينة الإختبار فى نقطتين Two-Point Loading لأن ذلك يجعل جزء الكمرة الذى يحدث بداخله الكسر معرض إلى عزم خالص Pure Bending دون تواجد قص فى ذلك الجزء الأمر الذى يجعل الكسر نتيجة مقاومة الإنحناء فقط وتعبر نتائج الإختبار عن مدى تأثر الخرسانة بالإنحناء. ويمكن فى بعض الأحيان -عند الضرورة- عمل إختبار الإنحناء بالتحميل فى نقطة واحدة وهى منتصف الكمرة المختبرة ولايعطى ذلك الإختبار إنحناء خالص بل إنحناء مصحوب بتأثير القص ويكون معاير الكسر له أقل من معاير الكسر فى حالة التحميل فى نقطتين.

يدون حمل الكسر P_{max} وتحسب مقاومة الإنحناء (معاير الكسر) من المعادلة:

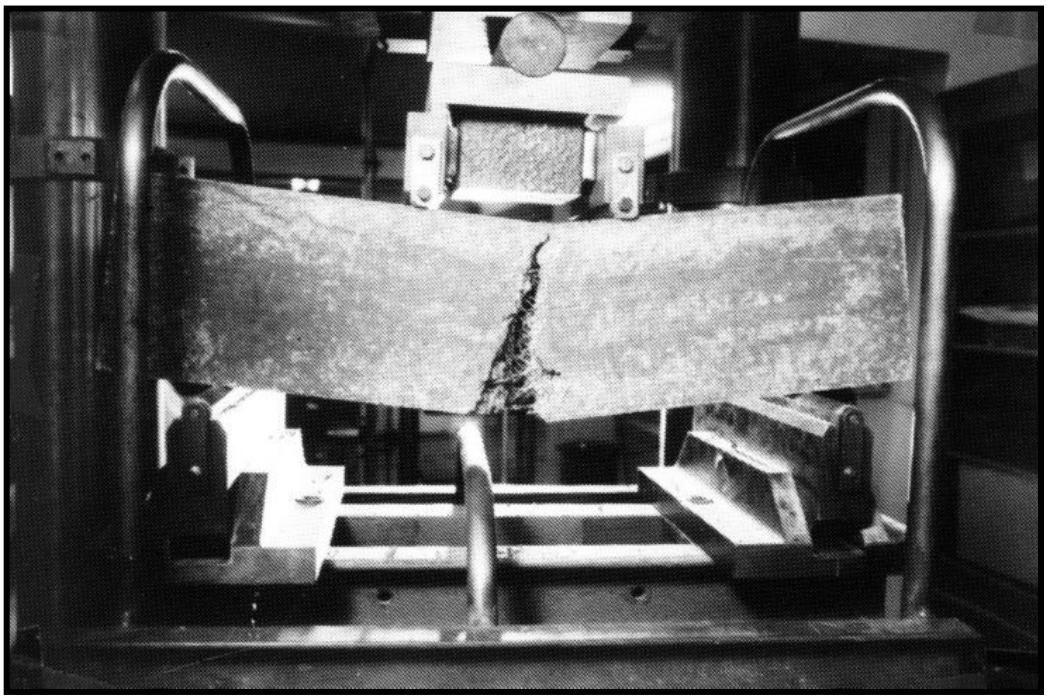
$$f_b = \frac{M_{max} \cdot Y}{I}$$

(حالة حملين مركزين) M_{max} = Maximum bending moment = P_{max} L / 6

Y = h/2 ,

I = Moment of inertia = $bh^3/12$

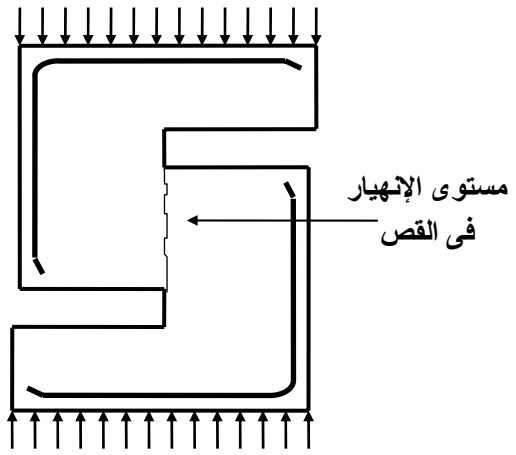
ويبين شكل (٨-٢٧) الكسر فى كمرة خرسانية معرضة لحملين مركزين.



شكل (٨-٢٧) شكل الكسر لكمرة فى إختبار الانحناء.

٨-٤ مقاومة القص Shear Strength

لا يمكن تعيين مقاومة القص فى حالة الخرسانة بقيمة صحيحة تماماً نظراً لأن قوى القص المباشرة (قوتين متساويتين ومتوازيتين تؤثران على مستويين على مسافة صغيرة جداً من بعضهما) تكون دائما مصحوبة بعزم إنحناء أى بإجهادات شد وضغط لذلك فمن النادر إجراء إختبار مقاومة القص المباشر للخرسانة وخصوصاً أنه فى إستعمالات الخرسانة نادراً ما تتعرض للقص الخالص وإنما تتعرض للقص المصحوب بإنحناء ويمكن إجراء إختبار تحديد مقاومة القص المباشر للخرسانة كما هو مبين بشكل (٨-٢٨) وهو إختبار غير دقيق النتائج. ويكون تعريض عينات الخرسانة لتأثير القص الخالص أحياناً بإجراء إختبار الإلتواء Torsion على عينة خرسانية غالباً ما تكون إسطوانية وذلك لأن الإلتواء يعطى إجهادات قص خالصة. ولكن هذا الإختبار من الصعب إجراؤه بدقة كما أن كسر العنصر الخرسانى يكون غالباً نتيجة تأثير الشد القطرى Diagonal Tension وليس بتأثير القص نظراً لأن الخرسانة ضعيفة فى الشد عنها فى القص. ولقد وجد أن مقاومة القص فى الخرسانة أكبر من مقاومتها للشد بحوالى ٢٠ إلى ٣٠% أى أنها حوالى ١٠ إلى ١٢% من مقاومة الضغط. أما إذا أجرى إختبار الإنحناء لبيان تأثير القص المصاحب لعزم الإنحناء وذلك بتقوية الكمرة المختبرة من جهة الشد بحديد تسليح لمنع الإنهيار بالشد الناتج من الإنحناء فإن القص المصاحب لعزم الإنحناء يظهر تأثيره بكسر العينة بواسطة إجهادات الشد القطرى الناتج من القص وليس بتأثير القص المباشر كما فى شكل (٨-٢٩). يتبين مما تقدم أن مقاومة الخرسانة للشد القطرى تعبر عن مدى مقاومة الخرسانة للقص لذلك لا يجرى إختبار القص للخرسانة إكتفاء بتعيين مقاومة الشد لها.



شكل (٨-٢٨) شكل عينة إختبار خرسانية فى القص.

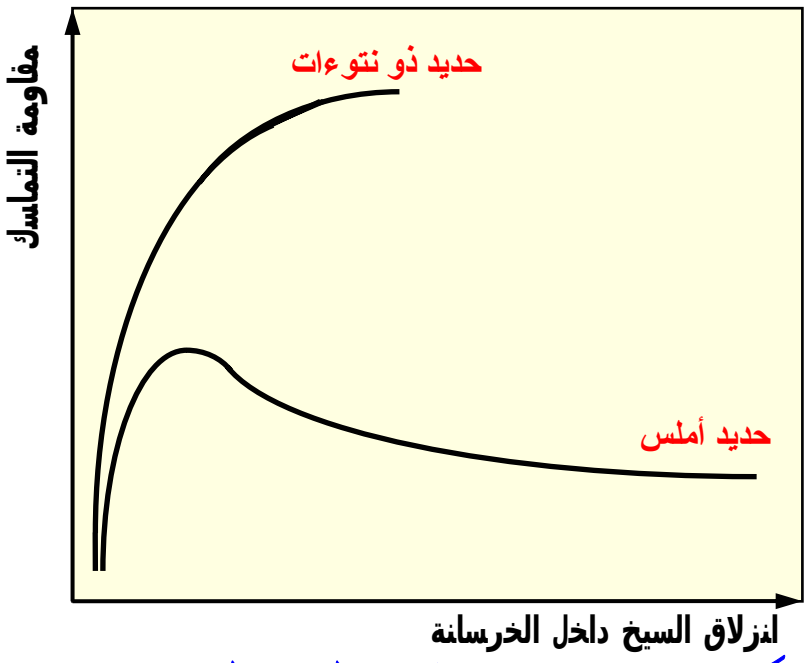
شكل (٨-٢٩) انهيار قص (شد قطرى) فى كمرة من الخرسانة المسلحة بدون كانات.

٨-٥ مقاومة التماسك Bond Strength

مقاومة التماسك هى مقاومة الخرسانة لإنزلاق سيخ التسليح الملتصق بها والموجود بداخلها ويعتبر تماسك أسياخ الحديد مع الخرسانة هو أساس فكرة التصميم الإنشائى للأعضاء الإنشائية من الخرسانة المسلحة ويتم هذا التماسك بواسطة:

- الإلتصاق مع الخرسانة Adhesion
- قوى الإحتكاك بين السيخ والخرسانة Friction
- التحميل على النتوءات البارزة فى الأسياخ Bearing

وتعتمد مقاومة التماسك على كلٍ من خواص الخرسانة وخواص الحديد وكذلك على مساحة التلامس بينهما. ومن البديهى أن تكون مقاومة التماسك أكبر فى حالة الأسياخ ذات النتوءات عنها فى حالة الأسياخ الملساء (شكل ٨-٣٠). وتتراوح مقاومة التماسك من ٢٥ إلى ٤٥ كج/سم^{٢} وذلك فى حالة الخرسانة ذات المقاومة العادية ($\cong$ ٢٥٠ كج/سم^{٢}) أما فى حالة الخرسانة عالية المقاومة فإن مقاومة التماسك قد تصل إلى ٨٠ كج/سم^{٢} أو أكثر. ويجرى إختبارتعيين مقاومة التماسك بين الخرسانة وحديد التسليح وذلك بتحديد الحمل المسبب لإنهيار وإنزلاق سيخ حديد التسليح داخل الخرسانة. وتوجد إختبارات عديدة لتعيين مقاومة التماسك تختلف عن بعضها فى كيفية تحميل سيخ حديد التسليح. وفيما يلى عرض سريع لبعض هذه الإختبارات.



شكل (٨-٣٠) مقاومة التماسك بين الحديد والخرسانة.

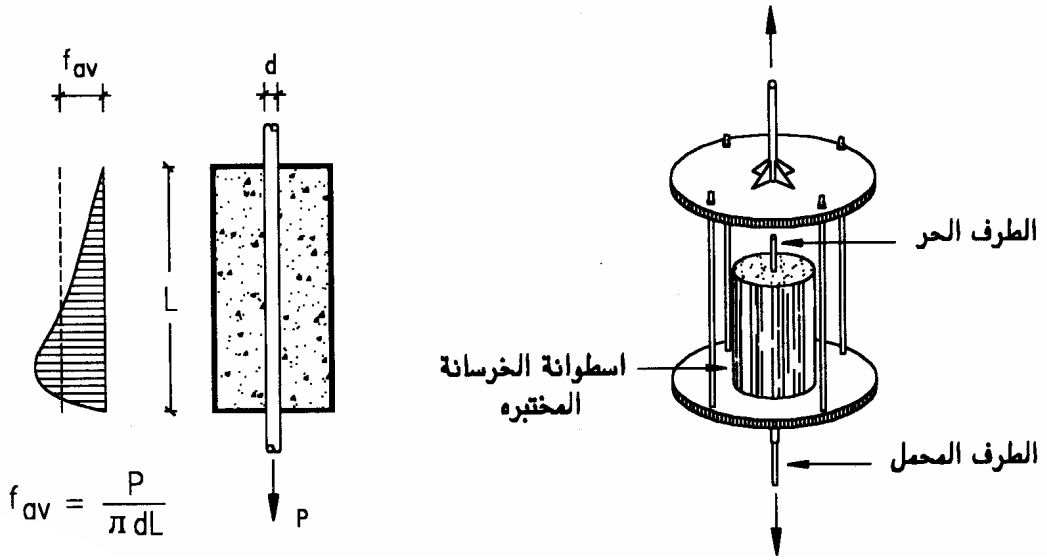
أ - اختبار الاقتلاع (الشد) Pull Out Test

- تُصب عينة الإختبار من الخرسانة على هيئة إسطوانة أو منشور على أن يكون فى محورها سيخ حديد تسليح بالقطر المعين المراد إختبار تماسكه.
- يُجرى معالجة العينة للمدة المناسبة المطلوبة وغالباً تكون ٢٨ يوما.
- تُوضع العينة بماكينة الإختبار بالطريقة التى تجعل السيخ معرضاً للشد من أحد طرفيه فقط وذلك لإقتلاعه من الخرسانة كما هو موضح بشكل (٨-٣١) وعلى ذلك يكون لسيخ الحديد طرف محمل وطرف آخر حر.
- يُركب جهاز قياس التشكل على سيخ التسليح من ناحية الطرف المحمل أو الطرف الحر أو من الناحيتين معاً وذلك لقياس الحركة النسبية بين الحديد والخرسانة.
- يُشد سيخ حديد التسليح من الطرف المحمل تدريجيا فيحدث إنزلاق Slip للطرف المحمل ويتبين ذلك بحركة نسبية بينه وبين الخرسانة يبينها جهاز قياس التشكل وتسجل قراءات الحمل والإنزلاق للطرف الآخر المحمل.
- تلاحظ قراءات جهاز قياس التشكل عند الطرف الحر حيث لا يبين الجهاز أى قراءة إلا عند تمام إنهيارتماسك السيخ مع الخرسانة وعندما يبدأ مؤشر الطرف الحر فى التحرك أى عندما يحدث أول إنزلاق للطرف الحر Initial Slip يسجل الحمل المسبب لذلك.
- تحدد من قراءات الحمل والإنزلاق للطرف المحمل قيمة الحمل المسبب لإنزلاق قيمته ٠,٢٥ مم.
- يعتبر التماسك بين الحديد والخرسانة فىحالة إنهيار فى إحدى الحالتين:

إما حدوث أول إنزلاق للطرف الحر أو حدوث إنزلاق قيمته ٠,٢٥ مم للطرف المحمل.

وعلى ذلك تحسب مقاومة التماسك أنها الحمل المسبب للإنزلاق مقسوماً على مساحة السيخ المتماسكة مع الخرسانة أى:

$$\text{مقاومة التماسك} = \frac{P}{\pi\, d\, L} \quad \text{كج/سم}^2.$$



شكل (٨-٣١) قياس مقاومة التماسك بين الخرسانة وحديد التسليح.

ب- إختبار الدفع (الضغط) Push Out Test

يجرى الإختبار بنفس الطريقة السابقة لإختبار الإقتلاع لكن يكون تحميل حديد التسليح بالضغط بدلاً من الشد كما فى شكل (٨-٣٢). ولهذا الإختبار ميزة سهولة الإجراء إلا أنه يعطى مقاومة عالية للتماسك نظراً لأن كلا من الحديد والخرسانة فى حالة ضغط.

ج- إختبار السيخ المدفون Embedded Rod Test

يجرى الاختبار بتعريض السيخ المدفون فى عينة الإختبار والبارز من كل من نهايتها إلى حمل الشد من كل من طرفية ثم قياس الحركة النسبية بين حديد التسليح والخرسانة عند كل من نهايتي العينة بإستخدام جهاز قياس التشكل (شكل ٨-٣٣). ويعتبر الحمل المسبب لإنهيار التماسك هو الحمل الذى يحدث تغيير مفاجئ فى قيمة الحركة النسبية بين حديد التسليح والخرسانة. وتحسب مقاومة التماسك من المعادلة المذكورة سابقا وهذا الإختبار وإن كان يمثل الحالة الواقعية الفعلية لحديد التسليح داخل الخرسانة إلا أن من عيوبه صعوبة إمكان مقارنة نتائجة.

د- إختبار الإلتواء للسيخ Torsion Test

يجرى هذا الاختبار بتعريض سيخ حديد التسليح الموجود فى محور العينة المختبرة إلى عزم إلتواء (M_t) بعد تثبيت العينة فى مكنة الإختبار وزيادة التحميل (شكل ٨-٣٤). وتسجل قيمة زاوية الإلتواء المصاحبة لكل عزم إلتواء لحديد التسليح بالنسبة للخرسانة الموجودة عند الطرف المحمل والطرف الحر لحديد التسليح ثم يعين عزم الإلتواء الذى يحدث عنده الإنزلاق ثم تحسب مقاومة التماسك من المعادلة:

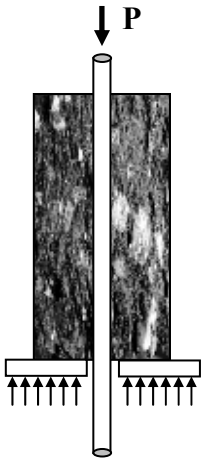
$$\text{مقاومة التماسك} = \frac{2\,M_t}{\pi\,d^2\,L}$$

حيث d = قطر السيخ

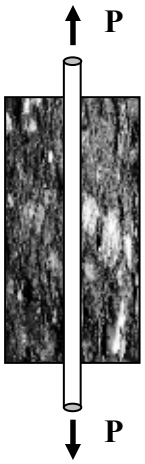
M_t = عزم الألتواء عند الإنزلاق

L = الطول المدفون من السيخ فى الخرسانة.

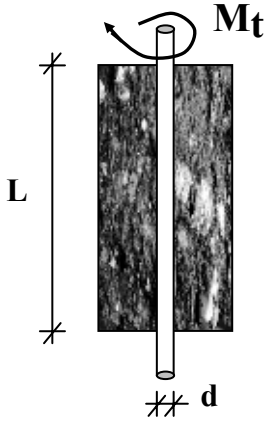
وهذا الاختبار محدود جداً ونادر إجرائه.



شكل (٨-٣٢) الدفع



شكل (٨-٣٣) السيخ المدفون



شكل (٨-٣٤) الإلتواء.

هـ- اختبار الكمرة Beam Test

يجرى هذا الاختبار بتحميل كمرة خرسانية بها أسياخ تسليح فى ناحية الشد بحمل فى منتصفها أو بحمل فىنقطتين وزيادة التحميل تدريجيا كما فى شكل (٨-٣٥) فيحدث ذلك إنهيار التماسك فى المنتصف عند حمل معين ويزحف ذلك الإنهيار على طول السيخ على جانبية حتى طرفيه بإزدياد التحميل وتقاس الحركة النسبية بين حديد التسليح والخرسانة عند أى مقطع من مقاطع الكمرة ثم تحسب مقاومة التماسك عند أى مقطع على أساس الحمل المسبب لحدوث أول إنزلاق Slipبين الخرسانة وحديد التسليح عند هذا المقطع وذلك من المعادلة :

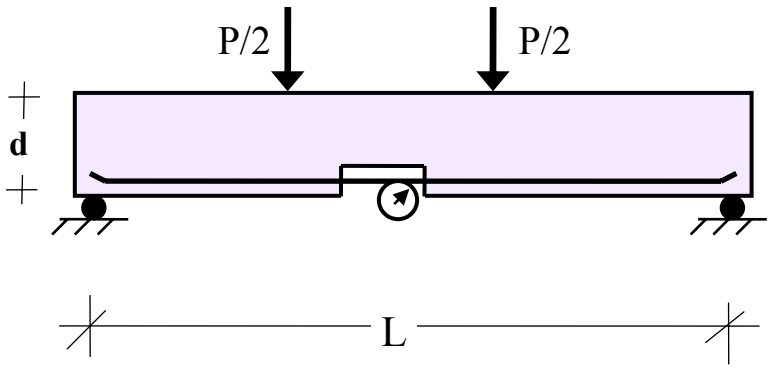
$$\text{مقاومة التماسك} = \frac{V}{Y_{ct} \sum \phi}$$

حيث V = قوة القص عند المقطع المستعرض

Y_{ct} = العمق الفعال للكمرة = $0.87\ d$

$\sum \phi$ = مجموع محيط أسياخ حديد التسليح

وهذا الإختبار يمثل تماماً حالة التماسك بين حديد التسليح والخرسانة ويمكن إستخدام نتائجه مباشرة فىالتصميم إلا أنه أكثر تكلفة علاوة على صعوبة إجرائه. ويراعى تعرية الجزء الأوسط من أسفل للكمرة حتى يمكن قياس الإنزلاق بين الحديد والخرسانة.



شكل (٨-٣٥) إختبار الكمرة لتعيين مقاومة التماسك بين الحديد والخرسانة.

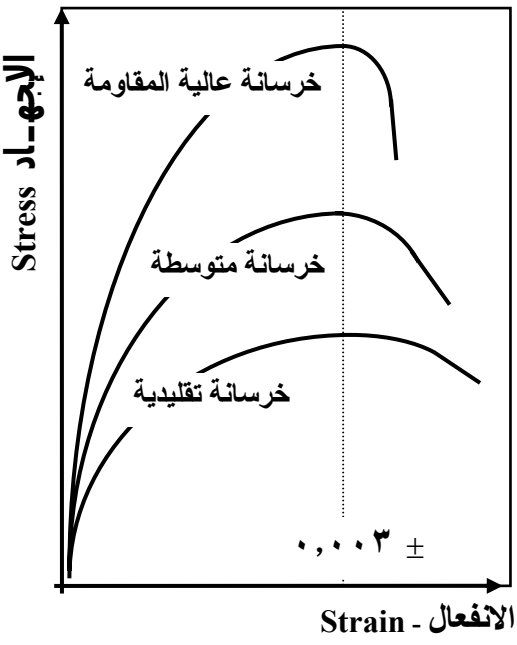
٨-٦ معايير المرونة Modulus of Elasticity

٨-٦-١ تعريف

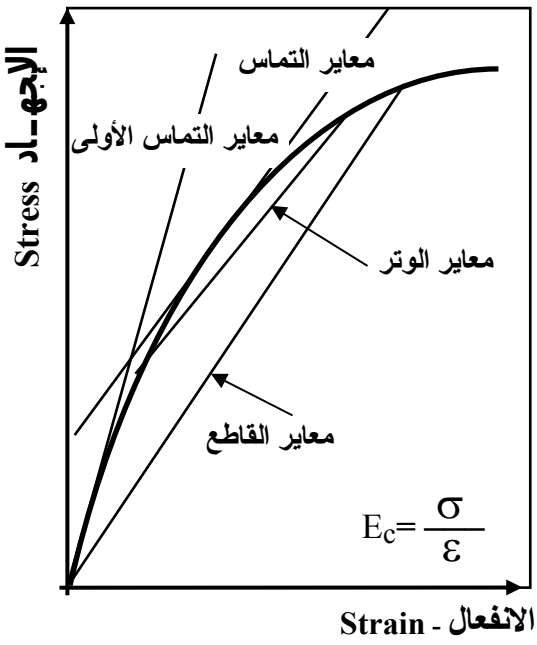
معايير المرونة هو التغير فى الإجهاد بالنسبة إلى التغير فى الإنفعال المرن. وهو يُعبر عن صلابة المادة أى مقاومتها للتشكل.

و معايير المرونة دالة فى مقاومة الخرسانة للضغط $E_c = \varphi\ (f_c)$ ونظراً لأن الخرسانة المتصلدة مادة ليست مرنه تماماً Elasto-plastic فإن العلاقة بين الإجهاد والإنفعال تكون غالباً منحنى ويقل هذا الإنحناء كلما أرتفعت رتبة الخرسانة أنظر شكل (٨-٣٦). ويمكن التعبير عن معايير المرونة بأحد الصور الأربعة الآتية والتى يوضحها شكل (٨-٣٧).

١- معايير التماس الأولى Initial Tangent Modulus
٢- معايير التمـــاس Tangent Modulus
٣- معايير القـاطـع Secant Modulus
٤- معايير الـوتـــر Chord Modulus



شكل (٨-٣٦) العلاقة بين الإجهاد والانفعال.



شكل (٨-٣٧) الصور المختلفة لمعاير المرونة.

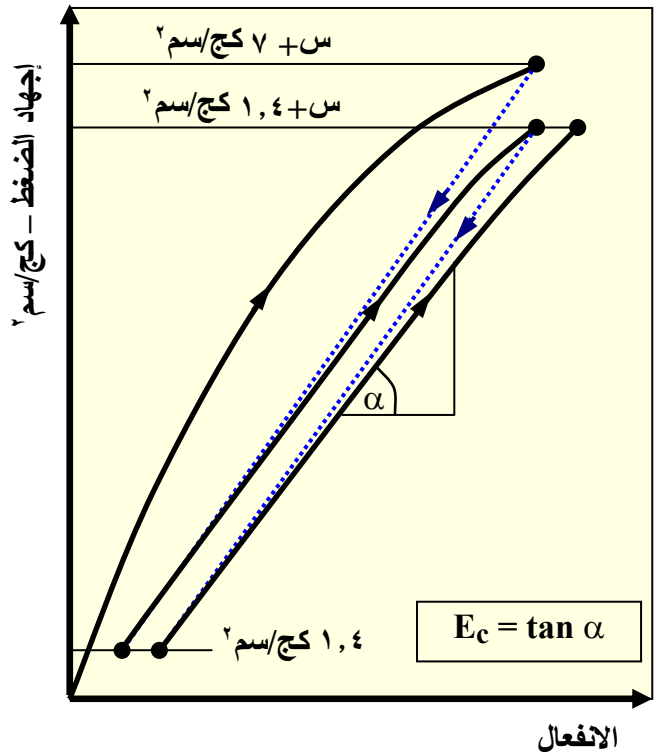
٨-٦-٢ اختبار معاير المرونة فى الضغط Modulus of Elasticity Test

يهدف هذا الإختبار لتعيين معاير المرونة للخرسانة لفائدة ذلك فى معرفة صلابة Stiffness الخرسانة وكذلك لمعرفة قيمة معاير المرونة فى حساب تشكل المنشآت الخرسانية Deformation كما يفيد فى تعيين نسبة معاير مرونة الحديد إلى الخرسانة لأهميتها فى التصميم $n = E_s / E_c$. وفيما يلي شرح لكيفية تعيين معاير المرونة للخرسانة وذلك طبقاً لما جاء بالمواصفات الإنجليزية B.S.S. 1881

❐ طريقة التحميل الإستاتيكى

- تُعمل خلطة خرسانية وفقاً للبيانات المطلوبة وتصب وتدمك هذه الخلطة فى قوالب إما على شكل إسطوانات بقطر ١٥ سم وإرتفاع ٣٠ سم أو منشورات بحيث تكون النسبة بين الإرتفاع إلى العرض لا تقل عن ٢ وتصب من نفس الخلطة عينات للضغط بعد ٢٨ يوما.

- بعد المعالجة لمدة ٢٨ يوماً أو المدة المحددة يُثبت مقياسين للإنفعال على سطح العينة وفى مقابل بعضها وموازيين لمحور عينة الإختبار كما بشكل (٨-٣٨). تحمل العينة بمكنة الإختبار بمعدل ١٤٠ كج/سم٢/دقيقة حتى يصل الإجهاد إلى (س + ٧) كج/سم٢ حيث س = ثلث متوسط مقاومة الضغط.



شكل (٨–٣٨) قياس معاير المرونة للخرسانة.

- **يستمر التحميل بهذا الإجهاد لمدة دقيقة على الأقل ثم يقلل تدريجيا إلى ١,٤ كج/سم٢ ثم تؤخذ قراءات مقياس الإنفعال ثم يعاد التحميل ثانياً وبنفس المعدل إلى أن يصل الإجهاد إلى (١,٤+س) كج/سم٢ ويستمر التحميل عند هذه القيمة لحين أخذ قراءات الإنفعال ثم يقلل التحميل ثانياً وتدريجيا وتؤخذ القراءات ثانياً عند ١,٤ كج/سم٢.**

- **يعاد التحميل مرة ثالثة وتؤخذ ١٠ قراءات لمقياس الإنفعال عند ١٠ زيادات للإجهاد تكون متساوية تقريباً إلى أن يصل الإجهاد إلى (١,٤ + س) كج/سم٢. يتم مقارنة قيم الإنفعال الكلى الحادث فى حالتى التحميل الثانية والثالثة فإذا كان هناك إختلاف أكثر من ٥% يتم عمل دورة تحميل رابعة وهكذا حتى يصل الفرق بين دورتى تحميل متتاليتين إلى ٥% أو أقل وبذلك يمكن تحديد العلاقة بين الإجهاد والإنفعال الناتج عنه من حالة التحميل الأخيرة ويتم قياس معاير المرونة كما فى الشكل.**

- **تدون النتائج فى جدول يوضح الزيادة فىالحمل ومقدار التشكل المناظر ثم تحسب قيم الإجهادات والإنفعالات المناظرة ومنها يمكن رسم بيانى يوضح العلاقة بين الإجهاد والإنفعال للخرسانة ثم يعين معاير المرونة للخرسانة والذى يساوى ميل هذا الخط البيانى.**

الحمل	قراءة أجهزة قياس الإنفعال			الإجهاد	الإنفعال
كج	الجهاز الأيمن	الجهاز الأيسر	المتوسط	كج/سم٢	مم/مم

❑ تعيين معاير المرونة بالطريقة الديناميكية

يمكن تحديد معاير المرونة ديناميكياً وذلك بتعريض عينة الخرسانة إلى إهتزازات ترددية وتحديد عدد الدورات فى الثانية الذى يحدث عندما تكون إهتزازات الخرسانة فى حالة رنين ثم حساب معاير المرونة من معادلة معينة ترفق مع جهاز الإختبار.

٨-٦-٣ تعيين معاير المرونة فى الإنحناء

وقد يقاس معاير المرونة للخرسانة من إختبار الإنحناء الكمرى (شكل ٨-٣٩) وذلك بتعريض كمرة خرسانية لحمل مركز فى منتصفها وقياس الترخيم الحادث ثم حساب قيمة معاير المرونة كما يلى:

$$E_C = \frac{PL^3}{48\Delta I}$$

حيث:

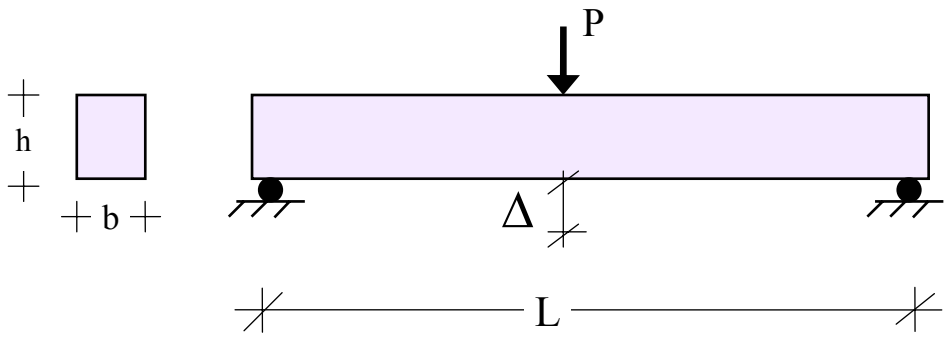
- P هو الحمل فى منتصف الكمرة
- L هو بحر الكمرة
- I هو عزم القصور الذاتى للمقطع المستعرض
- Δ هو الترخيم عند متصف الكمرة Deflection

ونظراً لأن النسبة بين الإرتفاع و البحر للكمرة المستخدمة فى هذا الإختبار $(\frac{h}{L})$ تكون كبيرة
نسبياً فيفضل أخذ قيمة الترخيم الناتجة عن تأثير قوى القص فى الإعتبار. وعليه يمكن حساب معاير المرونة من المعادلة الآتية:

$$E_c = \frac{PL^3}{48\Delta I}\left[1+(2.4+1.5\,\nu)\left(\frac{h}{L}\right)^2-0.84\left(\frac{h}{L}\right)^3\right]$$

حيث:

- h هو إرتفاع (عمق) الكمرة
- ν نسبة بواسون (الإنفعال العرضى / الإنفعال الطولى) وهى تتراوح من ٠,١٥ إلى ٠,٢ للخرسانة.



شكل (٨-٣٩) قياس معاير المرونة من إختبار الإنحناء.

٨-٦-٤ العوامل التى تؤثر على قيمة معاير المرونة

تؤثر العوامل المختلفة المؤثرة على مقاومة الضغط غالباً على معاير المرونة بنفس الطريقة تقريباً إلا أنه بمعدل أقل. وأهم هذه العوامل هى كمية الأسمنت - نسبة م/س - العمر - نوع وتدرج الركام - حالة المعالجة - درجة الرطوبة عند الإختبار - معدل التحميل. وهناك عاملان هامان يؤثران على قيمة معاير المرونة وهما:

- معاير مرونة الركام المستخدم.
- كثافة الخرسانة .

٨-٦-٥ بعض العلاقات لتعيين معاير المرونة

$$E_c = 14000 \sqrt{f_{cu}} \quad \text{.....} \quad (١)$$

$$E_C = 0.136\,\gamma^{1.5} \sqrt{f_{CU}} \quad \text{.....} \quad (٢)$$

حيث γ هى كثافة الخرسانة طن/م^٣ و E_c , f_{cu} تقاس بـ كج/سم^٢.

المعادلة رقم (١) هى معادلة الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية المسلحة وهى قابلة للتطبيق للخرسانة المعتادة الإستخدام فى مصر والتى لاتزيد مقاومة الضغط لها عن ٤٥٠ كج/سم^٢. أما المعادلة رقم (٢) فهى معادلة معهد أبحاث الخرسانة الإمريكى ACI وتأخذ كثافة الخرسانة فى الإعتبار وهى قابلة للتطبيق للخرسانة ذات الكثافة من ١٥٠٠ إلى ٢٥٠٠ كج/م^٣ ويعرف معاير المرونة فيها بأنه ميل الخط الواصل من إجهاد قيمته صفر إلى إجهاد قيمته $0.45\,f_c$ (معاير القاطع).

٨-٦-٦ النسبة المعيارية Modular Ratio (n)

وهى النسبة بين معاير المرونة للصلب (Es) ومعاير المرونة للخرسانة (Ec) وهى مفيدة فى تصميم الخرسانة المسلحة بنظريات المرونة.

أى أن $$n = \frac{E_S}{E_C}$$

و معاير المرونة لصلب التسليح غالباً يتراوح بين ٢٠٠٠ إلى ٢١٠٠ طن/سم٢ أما بالنسبة للخرسانة فنظراً لأنها تتعرض لإجهادات متغيرة أو دائمة وأيضا إلى إجهادات نتيجة الزحف فإن قيمة معاير المرونة غالباً تؤخذ أقل من القيمة المقاسة معملياً. فإذا فرضنا أن معاير مرونة للخرسانة = ١٤٠ طن/سم٢ وللصلب = ٢١٠٠ طن/سم٢ فإن النسبة المعيارية (n) = ٢١٠٠ ÷ ١٤٠ = ١٥ أما فى حالة الخرسانة عالية المقاومة فقد يؤخذ معاير المرونة من ٢٠٠ إلى ٣٥٠ طن/سم٢ أى أن قيمة n قد تصل إلى ١٠ أو أقل.

٨-٦-٧ نسبة بواسون Poisson's Ratio (ν)

هى النسبة بين الإنفعال العرضى الى الإنفعال الطولى عندما يؤثر على الخرسانة إجهاد ضغط فى حدود المرونة. وقيمة نسبة بواسون للخرسانة حوالى ٠,٢٠ فى حالة الحمل المؤثر ببطء أما إذا كان الحمل متزايد فتصل نسبة بواسون إلى حوالى ٠,٢٢ كذلك فإن نسبة بواسون تكون أقل نسبياً فى الخرسانة عالية المقاومة ، ونسبة بواسون لها أهميتها فى التحليل الإنشائى للبلاطات المسطحة والأنفاق ولكنها لا تؤخذ فى الإعتبار فى التصميمات العادية للخرسانة.

$$\nu = \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_v}$$

حيث:

ν هى نسبة بواسون

ε_h الإنفعال العرضى

ε_V الإنفعال الطولى

****