الفصل الاول

تكنولوجيا الخرسانة

Concrete Technology

(1.1) تكنولوجيا الخرسانة
(1.2) الأسمنت
(1.3) الركام
(1.4) الماء
(1.5) المضافات
(1.6) خلط الخرسانة ونسب الخلط
(1.7) وضع ورص ومعالجة الخرسانة
(1.8) مقاومة الخرسانة للانضغاط
(1.9) مقاومة الخرسانة للشد
(1.10) مقاومة الخرسانة للقص
(1.11) أنواع الخرسانة
(1.12) الخرسانة خفيفة الوزن

الفصل الاول [1]

تكنولوجيا الخرسانة

(1.1) تكنولوجيا الخرسانة (Concrete Technology)

الخرسانة مادة أنشائية تتكون من مزيج متجانس من جسيمات صلده متنوعة المقاسات تعرف بالركام (Aggregate) تشغل نسبة كبيرة من حجم المادة يثبتها هيكل رابط ولاصق من معجون الاسمنت المتصلد بفعل الماء، وتحتوي على فجوات هوائية أو غازية بنسب قليلة.

يمكن الحصول على مادة الخرسانة بخلط الاسمنت، الرمل، الحصى والماء بنسب معينة.

الخرسانة = (الاسمنت + الماء) + (الرمل + الحصى) = (عجينة الاسمنت) + (الركام)

وكذلك يمكن استعمال المضافات (Admixture) في بعض الخلطات الخرسانية.

هناك ثلاثة انواع من الاسمنت شائعة الاستخدام:

- الاسمنت البورتلاندي الاعتيادي، ويستخدم في الخرسانة غير المعرضة الى الاحمال في الاعمار المبكرة.
- الاسمنت ذو المقاومة المبكرة العالية (High Early Strength) ويفضل استخدام هذا النوع عندما يكون مطلوبا" من الخرسانة ان تتحمل اجهادات ذات قيم غير قليلة بعد الصب بفترة قصيرة.
- الاسمنت واطئ الحرارة، وهو يستعمل في المنشآت ذات الكتل الخرسانية الضخمة (Massive Structure) مثل السدود عندما يكون من المهم تخفيض الحرارة الناتجة عن اماهة عجينة الاسمنت خلال عملية التصلب التدريجي للخرسانة.

ان مصطلح الركام (Aggregate) يشير الى تلك المواد الصخرية او الحجرية الخاملة التفاعل كيميائيا" والمتميزة بالقوة والصلابة والمناعة ضد تأثير العوامل الجوية. والركام هو مزيج من الركام الناعم (الرمل) (Sand) والركام الخشن (الحصى او الحجر) (Gravel) المستخدم في صناعة الخرسانة، الركام الناعم (الرمل) هو أي مادة تمر بالمنخل ذات قطر اقل من (5 mm)، اما الركام الخشن (الحصى) فهو أي مادة ذات حجم أكبر من (5 mm)، ان الركام يشغل بحدود (75 %) من الحجم الكلي للخرسانة، كما ان نوعية الخرسانة المنتجة تتأثر بنوعية الركام المستعمل في انتاجها. ان الركام المستعمل يجب ان يكون ذو مقاومة جيدة وديمومة (Durable) وان يكون خالي من الشوائب.

[1] الفصل الأول من كتاب تصميم المنشآت الخرسانية المسلحة للدكتور علاء محمود التميمي الصادر عام 1997

الماء الملائم للشرب يكون على العموم ملائم لأغراض صناعة الخرسانة والمعالجة (Curing). تستعمل احياناً بالإضافة الى الاسمنت والركام بنوعيه الخشن والناعم والماء مواد اخرى (كيميائية) غالباً تضاف الى الخلطة الخرسانية مباشرةً قبل او بعد الخلط وتستعمل هذه المضافات (Additives) لتحسين واحدة او اكثر من خواص الخرسانة المنتجة مثل المقاومة (Strength) ، المشغولية (Workability) ، الديمومة (Durability) ومقاومة تأثير تعاقب دورات الانجماد والذوبان (Freezing and Thawing) التي تتعرض لها الخرسانة في ظروف معينة.

عجينة الاسمنت (الاسمنت + الماء) تشكل المزيج الكيميائي الذي يربط جزيئات الركام السائبة (الخاملة عادةً) للحصول على كتل متجانسة (متحدة) حيث ان التفاعل الكيميائي بين الاسمنت والماء والذي يعرف بعملية الاماهة (Hydration) خلال المراحل الاولية من عملية الاماهة يؤدي الى تشكيل جل الاسمنت (Cement Gel).

ان خواص الخرسانة المتصلبة تعتمد بصورة رئيسية على درجة اماهة عجينة الاسمنت ويكون من الافضل الحفاظ على الخرسانة رطبة اطول مدة ممكنة. ان عملية الحفاظ على الخرسانة في مستويات مطلوبة من الرطوبة والحرارة تدعى بالمعالجة (Curing) وذلك برش سطح الخرسانة الطرية بالماء او تغطية السطح الخرساني بمادة حافظة للرطوبة، او باستعمال تراكيب غشائية تمنع تهريب الرطوبة من سطح العضو الخرساني.

ان تصميم الخلطة الخرسانية (Concrete mix) هو تحديد نسب المواد الداخلة في تكوين الخلطة الخرسانية (الركام الخشن والناعم، الاسمنت، الماء) في الحصول على المواصفات المطلوبة.

عندما تكون الخلطة الخرسانية معدة للاستعمال في الاعمال الانشائية الاعتيادية فيجب ات تراعى في الخرسانة المنتجة المواصفات التالية:

- الحصول على مقاومة انضغاط (Compressive Strength) محددة كما وردت في متطلبات التصميم الانشائي.
- مشغولية الخرسانة الطرية (Workability) تؤمن نفاذ الخرسانة خلال شبكة التسليح.
- الحجم الاقصى للركام المستعمل ضمن المواصفات.
- كثافة الخرسانة المنتجة ضمن المواصفات.

وهناك خواص اخرى يجب ان تراعى في الخرسانة المنتجة مثل مقاومة الشد (Tensile Strength) والنفاذية (Permeability) والديمومة (Durability) وغير ذلك.

(1.2) الاسمنت (Cement)

الاسمنت البورتلاندي هو مسحوق الكلنكر النهائي الناتج عن عملية الحرق في فرن دوار بدرجة حرارة (1450 °C)، الخليط الداخل الى الفرن يتكون من النورة (CaO)، السليكا (SiO_2) الالومينا (Al_2O_3) وأوكسيد الحديد (Fe_2O_3). ان نسب هذه الاكاسيد في الأسمنت البورتلاندي تكون بصورة تقريبية كما مبين في الجدول (1-1).

نسب الاكاسيد في الاسمنت البورتلاندي الاعتيادي (Ordinary Portland Cement)

المركب	الصيغة الكيمائية	الرمز	نسبة المركب
سيليكات الكالسيوم الثلاثي	$3CaO.SiO_2$	C_3S	40
سليكات الكالسيوم الثنائي	$2CaO.SiO_2$	C_2S	30
الومينات الكالسيوم الثلاثي	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A	11
الوميانات كالسيوم الرباعي الحديد	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF	11

جدول رقـم (1.1)

يمكن الحصول على انواع مختلفة من الاسمنت البورتلاندي بتغيير نسب الاكاسيد الرئيسية الاربعة وبطحن حبيبات الكلنكر الى درجات مختلفة من النعومة، النوعين الاكثر شيوعاً هما الاسمنت البورتلاندي الاعتيادي (Ordinary Portland Cement) والاسمنت البورتلاندي سريع التصلب (Rapid Hardening Cement).
عند خلط الاسمنت مع الماء، فأن مركبات الاسمنت المختلفة تبدأ بالتفاعل كيميائياً مع الماء. لفترة قصيرة العجينة الاسمنتية (Cement Pest) تظل لينة ومن الممكن تشكيلها واعادة خلطها دون بذل مجهود كبير ولكن باستمرار التفاعلات الكيميائية تبدأ بالتجمد (Setting). إذا كان تجمد عجينة الاسمنت سريع جدا" فأن الخرسانة ستتصلب بسرعة الامر الذي يجعل نقل الخرسانة ووضعها في القوالب المعدة لها عملية صعبة، اما إذا كان تجمد العجينة بطيء جداً فأنه قد يؤخر رفع اجزاء معينة من القالب والاستمرار بالفقرات الانشائية اللاحقة. ومن الممكن اعتبار (45) دقيقة زمناً أدني للتجميد الابتدائي للأسمنت البورتلاندي و(10) ساعات زمناً اعلى للتجميد النهائي. ان معدل سرعة التجمد يمكن السيطرة عليه بإضافة حوالي (7 - 8%) من الجيبسم الى حبيبات الكلنكر عند البدء بطحنها، ان مادة الجيبسم هذه تدعى في بعض الاحيان بالمبطأ (Retarder) وذلك لأنها تبطئ من عملية تجمد العجينة الاسمنتية.

بعد حصول ما يعرف بالتجمد (النهائي/ لعجين) الاسمنت، فأنها تستمر بالتميأ والزيادة بالمقاومة والثباتية، ان هذه الظاهرة تدعى بالأماهة (Hydration) من

الضروري ان نفهم ان عمليتي تجمد وتصلب عجينة الاسمنت تحدثان نتيجة للتفاعلات الكيميائية والتي يلعب الماء فيها دوراً هاماً، فبغياب الماء فأن هذه التفاعلات الكيميائية ستتوقف، اما بوجود الماء فأنها من الممكن ان تستمر لسنوات عديدية وبهذا تستمر العجينة الاسمنتية المتصلبة باكتساب المقاومة.

ان الخرسانة الحاوية على الاسمنت البورتلاندي الاعتيادي تحتاج عادة الى فترة (14) يوم للوصول الى مقاومة مناسبة تجعل من الممكن رفع القوالب وتحميل الخرسانة الميتة (Dead Load) واحمال التشييد (Live Load)، اما المقاومة التصميمية لهذه الخرسانة ($f'c$) فيمكن الحصول عليها بعد (28) يوم من عملية الوضع، المساحة النوعية للأســـمنت البورتلاندي الاعتيادي (Specific Surface) تكون حوالي ($225,000\ mm^2/g$) كحد أدنى.

الوزن النوعي (Specific Gravity) لجزيئات الأسمنت يكون بصورة عامه في حدود (3.1-3.2)، في أغلب الحسابات فأنه يؤخذ (3.15) أما كثافة الأسمنت (Unit Weight) فيمكن أن يؤخذ ($1450\ Kg/m^3$) كقيمة تقريبية. في العراق يزن كيس الاسمنت الواحد (50 Kg) تقريباً.

(1.3) الركام (Aggregate)

يتكون الركام عادةً من خليط الرمل (الركام الناعم) والحصى أو البحص (الركام الخشن) , وقد قمنا بتعريف كل منهما في جزء سابق من هذا الفصل.

الركام الطبيعي (Natural Aggregate) يؤخذ عادةً من مجاري الانهار أو من تكسير الصخور أما الركام المصنع فيمكن أن يصنع من الطين المحروق أو من خبث الحديد أو غيرها من المواد.

يجب أن تكون حبيبات الركام صلبة، قوية ، نظيفة وخالية من المواد الغريبة ، كما يجب أن لا تزيد نسب المواد الناعمة والمواد الاخرى عن القيم التي تحددها المواصفات الفنية ، أن أكثر المتطلبات أهمية بالنسبة للركام بنوعيه الخشن والناعم هي أن تكون ذو ديمومـــــة جيدة وخامل كيميائياً (Chemically inert) تحت الظروف التي سيتعرض لها ، هناك متطلبات أخرى تتعلق بالحجم (Size) ، الشكل (Shape) ، طبيعة السطح (Surface texture) ، والتدرج (Grading).

يشكل الركام بنوعيه بحدود (75%) من حجم الخرسانة الكلي لذلك فأن لخواصه تأثيرات كبيرة على سلوك الخرسانة المتصلبة، كما أن مقاومة الركام تؤثر على مقاومة الخرسانة بشكل كبير. أن الوزن النوعي لجزيئات الركام يعتمد على المحتوى المعدني، للحصى والرمل، يؤخذ الوزن النوعي عادةً (2.6). كثافة الركام تعتمد بصورة رئيسية على المحتوى المائي (Moisture Content) ودرجة الرص (Degree

of Compaction)، كقيمة دالة تقريبية، فأن كثافة الرمل والحصى تكون حوالي (1700 (Kg/m^3).

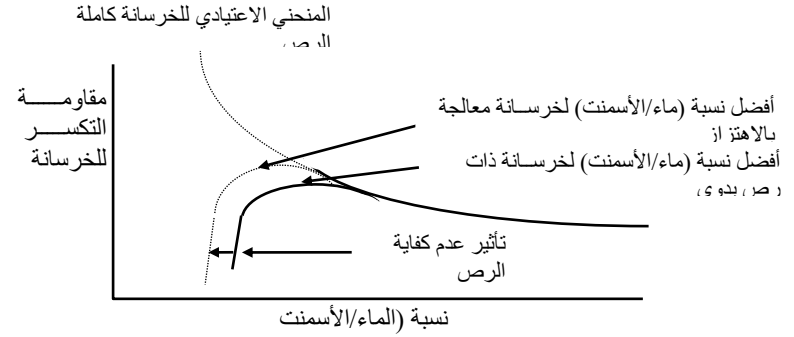
(1.4) الماء (Water)

يعتبر الماء أرخص المواد المستعملة في تصنيع الخرسانة ولكن أهميته في تحديد مقاومة الخرسانة النهائية كبيرة جداً. يجب أن يكون الماء المستعمل في الخلطة الخرسانية نظيف وخالي من المواد الضارة مثل (الزيت، الأحماض، القلويات، الأملاح ومواد أخرى) التي قد يكون تأثيرها متلفاً للخرسانة أو حديد التسليح ولا يسمح باستخدام ماء البحر في الخلطة الخرسانية المسلحة وأن كان يكون استعماله عند الضرورة في الخرسانة الاعتيادية غير المسلحة مع زيادة محتوى الاسمنت للحصول على المقاومة المطلوبة للخرسانة.

أن كمية الماء اللازمة كيميائياً لأكمال عملية الأماهة لمحتوى معين من الاسمنت تكون بحدود (25%) من وزن الاسمنت، كذلك يجب استخدام كمية أضافية من الماء (بحدود 10-15%) من وزن الاسمنت لتوفير الحركة اللازمة للماء في عجينة الأسمنت خلال عملية الأماهة ليتمكن من الوصول الى جـزيئات الأسمنت والتفاعل معها، وبهذا تصبح النسبة الكلية الدنيا الماء/الاسمنت (Water / cement) بين (35-40%) وزناً.

أن نسبة الماء/الأسمنت (Water / cement ratio) في الخرسانة تكون عادةً أعلى بكثير من النسبة الدنيا وذلك للحصول على المشغولية اللازمة (Workability) للخلطة الخرسانية. أن كمية الماء التي تزيد عن (25%) وزناً (اللازمة للتفاعل الكيميائي) تولد ثقوباً في عجينة الاسمنت، أن مقاومة الخرسانة المتصلبة تتناسب عكسياً مع نسبة (الثقوب/الحجم الكلي) أي أن المقاومة تتناسب طردياً مع نسبة (حجم الأجزاء الصلبة/الحجم الكلي) والتي تعتمد بالدرجة الاساس على نسبة (الماء/الأسمنت).

في عام 1919 وجد العالم ("Abrams") تجريبياً أنه عند تثبيت المحتوى الأسمنتي ونسب الرمل والحصى فأن مقاومة الخرسانة تعتمد أساساً على نسبة الماء والأسمنت، كما مبين في الشكل رقم (1-1) أن المنحني هو قطع مكافئ ناقص (Hyperbolic) ويمكن استخدامه عندما يتم رص الخرسانة بشكل مثالي، وعليه فأن مقامة الخرسانة تزداد بهز الخرسانة (Vibration) الأمر الذي يؤدي الى رص مكوناتها.



العلاقة بين مقاومة الانضغاط للخرسانة ونسبة (الماء/الأسمنت)

أن قابلية عجينة الأسمنت على المرور وأشغال المساحات المطلوبة داخل القوالب الخشبية وحول حديد التسليح تقاس بما يعرف بالمواصفات بفحص الهبوط (Slump Test) ، يتم هذا الفحص بمليء قالب حديدي مخروطي الشكل قطر قاعدته السفلى (20 cm) وقطر قاعدته العليا (10 cm) وارتفاعه (30 cm) يملئ القالب بالخرسانة الطرية ويتم رصها باستخدام قضيب حديدي حسب المواصفات ، يرفع القالب بشكل عمودي ويتم قياس مقدار الهطول في الخرسانة والذي يجب أن لا يتجاوز (3 cm) عن البوط المسموح والمحدد في المواصفات.
في حالة عدم وجود قيم محددة للهبوط من قبل المصمم (أورد الكود العربي) أمكانية اعتماد القيم المبينة في الجدول (2-1)

الحدود العليا للهبوط

نوع العنصر الانشائي الخرساني	الهبوط بالسنتمتر الحد الاعلى
الأجزاء الخرسانية السميكة	15.0
أرضيات وبلاطات الطرق بالخرسانة دون تسليح	12.5
الأساسات والجدران بالخرسانة دون تسليح	10.0
جدران وركائز الأساسات بالخرسانة المسلحة	7.5
البلاطات والعتبات والأعمدة والجدران بالخرسانة المسلحة	7.5

جدول رقم (1.2)

(1.5) المضافات (Admixtures)

تستعمل أحياناً (بالإضافة الى السمنت والركام (الناعم والخشن) والماء) مواد أخرى تضاف الى الخلطة الخرسانية وتستعمل هذه المضافات لتحسين خواص الخرسانة المختلفة. يشترط بالمضاف التوزيع المتساوي في الخلطة الواحدة وثبات النوعية بين الخلطات المتعددة ويجب تحديد الحد الأقصى للكمية المستخدمة من كل مضاف مقدراً كنسبة مئوية من الأسمنت. يجب أن لا تقل مقاومة الخلطة الخرسانية (باستخدام المضافات) للانضغاط والانحناء وقوة التماسك بينها وبين حديد التسليح عن (85%) من القيم المناظرة في حالة الخرسانة الغير حاوية على المضافات.

تستخدم المضافات لواحد أو أكثر من الأسباب التالية:

1- زيادة مقاومة الخرسانة للتلف الناتج عن دورات التجمد - الذوبان المتعاقبة.

2- زيادة قابلية التشغيل بدون زيادة كمية الماء، أو تقليل كمية الماء لنفس قابلية التشغيل.

3- لتعجيل اكتساب المقاومة في الأعمار المبكرة للخرسانة.

4- لأبطاء التصلب (Setting) وبذلك تقل الحرارة المتولدة.

5- لزيادة المقاومة باستعمال مقللات المـــــاء (Water Reducing) ومسيطرات التصلب (Set Controlling).

يتطلب استخدام المضافات في أعمال الخرسانة عناية كبيرة لمعرفة التأثيرات الجانبية الممكنة ويكون من الضروري معرفة نتائج استخداماتها السابقة وموافقة المختبر المختص على النوع المراد استعماله والتأكد من صلاحيته.

(1.6) خلط الخرسانة ونسب الخلط

توجد ثلاث طرق رئيسية ومعتمدة لخلط مكونات الخرسانة:

- الطريقة الحجمية

في هذه الطريقة تقاس كمية الأسمنت المطلوبة بالوزن أما الركام بنوعيه الناعم والخشن فيقاس بالحجم كل نوع على حدة بصناديق قياس معتمدة، يقاس ماء الخلطة وتحدد نسبة الماء/الأسمنت مراعين في ذلك الحصول على قوام (Consistency) ثابت وأن تكون كمية الماء أقل ما يمكن بحيث يتم الحصول على قابلية التشغيل المطلوبة.

- الطريقة الوزنية

يتم في هذه الطريقة وزن جميع مكونات الخلطة الخرسانية (الأسمنت، الحصى، الرمل) كل على حدة ويفضل أجراء تدقيق بين الآونة والأخرى للتأكد من صحة الموازين المستخدمة.

يجب قياس ماء الخلطة وتنظيمها للحصول على قابلية التشغيل المطلوبة وتحديد نسبة ثابتة بين الماء/الأسمنت لجميع الخلطات الخرسانية.

- خرسانة محددة النوعية

تصميم الخلطات وتنظم كميات الأسمنت والحصى والرمل والماء كما ورد في الطريقة الثانيــة، ويتم تحضير خلطات تجريبية تجرى عليها الفحوصات المختلفة لتعيين النسب الصحيحة للمواد الداخلة في الخلطة واللازمة للحصول على خرسانة ذات المقاومة والديمومة وقابلية التشغيل المطلوبة. عند مطابقة نوعية الخرسانة في الخلطات التجريبية مع المواصفات المطلوبة يتم اعتماد الأوزان المستخدمة في هذه الخلطات في خلط الخرسانة المطلوبة للمنشأ.

يتم نقل مادة الخرسانة من الخلاطة المركزية أو مكان الخلط في موقع العمل الى أماكن وضعها في المنشأ (القوالب) بواسطة أوعية أو عربات يد أو عجلات ميكانيكية صغيرة أو بضخها في أنابيب خاصه معدة لهذا الغرض.

(1.7) وضع ورص ومعالجة الخرسانة (Placing , Compaction , Curing)

أن وضع (Placing) الخرسانة هو عملية نقل الخرسانة الطرية من الجهاز الناقل الى مكانها النهائي في القالب فقبل وضع الخرسانة يجب أزاله الصدأ المتفكك من قضبان التسليح وتنظيف القوالب، أن للوضع والرص تأثير حرج على النوعية النهائية للخرسانة، فعند الوضع يجب تجنب حدوث الانفصال في مكونات الخرسانة الطرية أو أزاحه القوالب أو حديد التسليح داخلها.

بعد أكمال الوضع مباشرةً، يجب أن ترص الخرسانة باستعمال وسائل يدوية أو هزازات (Vibrators) أن عملية الرص (Compaction) تمنع حدوث الفجوات وتضمن الاتصال المباشر مع القوالب وحديد التسليح. أن الطريقة الأكثر شيوعاً في الوقت الحاضر هي استعمال أجهزة آلية ذات تردد عالي (الهزازات) وهذه أما تكون من النوع الداخلي الذي يغمر في الخرسانة أو من النوع الخارجي الذي يربط بسطح القالب من الخارج.

يعتمد التصميم الإنشائي عادةً على المقاومة التي تكتسبها الخرسانة بعمر (28) يوماً ، والتي يتم اكتساب (70%) منها بنهاية الأسبوع الأول. أما المقاومة النهائية للخرسانة فتعتمد على ظروف الرطوبة والحرارة خلال هذه الفترة الاولية. والحفاظ على هذه الظروف المناسبة خلال هذه الفترة يسمى المعالجة (Curing). يجب المحافظة على الخرسانة من فقدان الرطوبة لمدة لا تقل عن (7) أيام للأعمال الاعتيادية و لا تقل عن (14) يوم للأعمال الحساسة، وعند استعمال سمنت سريع التصلب يمكن تقليص فترة المعالجة الى النصف.

تتم المعالجـة بالحفـاظ على الاسطح المكشوفة رطبة باستمرار باستعمال الرش، الأحواض، الغمر ، التغطية أو ما شابه ذلك. أن المعالجة المناسبة توفر أضافة الى تحسينها للمقاومة سيطرة على الانكماش (Shrinkage) وللمحافظة على الخرسانة من

درجات الحرارة المنخفضة خلال الصب في الجو البارد يسخن ماء الخلط وأحياناً الركام.

(1.8) مقاومة الخرسانة للانضغاط (Compressive Strength)

تعتبر مقاومة الخرسانة للانضغاط من أهم خواص هذه المادة الإنشائية وهي مقياس غير مباشر لبقية خواصها، فكلما كانت الخرسانة أجود كلما زادت مقاومتها للانضغاط.

يتعين مقاومة الخرسانة للانضغاط في الولايات المتحدة الأمريكية وبعض البلدان الاخرى باختبار عينات أسطوانية بعمر (28) يوم ، تكون الأسطوانة القياسية عادةً بارتفاع (300 mm) قطر (150 mm) توضع بين سطحين مستويين ومتوازيين ومتقابلين وتعرض الى حمل طولي بمعدل انفعال بطئ (Slow Strain Rate) للوصول الى الأجهاد الأقصى خلال (2-3) دقيقة ، حيث لوحظ زيادة مقاومة الخرسانة للانضغاط عند تسليط الحمل على النماذج بمعدل انفعال سريع (Fast Strain Rate) ، في العراق تقاس مقاومة الخرسانة للانضغاط بتهيئة مكعبات بضلع (150 mm) من المزجة الخرسانية وفحصها بموجب المواصفة العراقية القياسية رقم (52) سنة 1970.

يمكن أنتاج خرسانة تتراوح حدود مقاومتها للانضغاط بين (15-70 MPA) وجرت العادة على تسمية الخرسانة تبعاً لتحملها لإجهادات الضغط، فمثلاً خرسانة (20) تعني خرسانة ذات مقاومة مميزة للضغط مقدارها (20 MPA) بعمر (28) يوم. كما جرت العادة في نظام الوحدات الدولي (SI unit) أن يكون التدرج في مقاومة الانضغاط للخرسانة المنتجة بمقدار (5 MPA) في كل مرة.

عند اختبار عدد من النماذج الخرسانية نلاحظ وجود تباين في مقاومتها للانضغاط ولا يمكن لأغراض التصميم الإنشائي أخذ معدل مقاومة الانضغاط للنماذج المفحوصة واعتباره ممثلاً لمقاومة الانضغاط للخرسانة التي تم أخذ العينات منها حيث يجوز أن تشغل الخرسانة ذات مقاومة الانضغاط الواطئة المناطق ذات الإجهادات العليا من المنشأ مما يؤدي الى فشله، وعليه فأن المقاومة التصميمية للانضغاط (f'c) هي تلك المقاومة التي يجب أن تتجاوزها كافة النماذج الخرسانية المفحوصة.

من الناحية العملية يكون من الصعب تلافي الحصول على بعض النماذج ذات مقاومة الانضغاط الواطئة حتى ولو تمت السيطرة على عملية الخلط والمعالجة بشكل جيد، وللسيطرة على الاختلافات في مقاومة النماذج المفحوصة للانضغاط حدد الكود الاميركي (ACI) في الفقرة (5.6.1) اختبار (6) نماذج لكل يوم صب على أن لا تقل عن (6) نماذج لكل (120) متر مكعب من الخرسانة أو (6) نماذج لكل (500) متر

مربع من المساحة السطحية للبلاطات والجدران، تحفظ النماذج وتعالج ويختبر ثلاثة منها بعد (7) أيام والثلاثة الباقية بعد (28) يوم.
يمكن اعتبار مقاومة الخرسانة للانضغاط للنماذج الاسطوانية بأبعاد cm (15 X 30) تعادل (80%) من مقاومة انضغاط الخرسانة المفحوصة في مكعبات بأبعاد (15 cm X 15 cm X 15 cm) ويمكن استخدام الجدول (3-1) لا يجاد معامل التصحيح للأشكال المختلفة في قوالب الاختبار.

معامل التصحيح للأشكال المختلفة لقوالب الاختبار

شكل القالب	ابعاد قالب الاختبار بالسنتمتر بفرض انها ذات اسطح مستوية ومتوازية	معامل التصحيح
الاسطوانية	قطر 15 X 30	1.00
	قطر 10 X 20	0.97
	قطر 25 X 50	1.05
الموشور	15 X 15 X 30	1.00
	15 X 15 X 45	1.05
	20 X 20 X 60	1.05
المكعب	10 X 10 X 10	0.78
	15 X 15 X 15	0.8
	20 X 20 X 20	0.83
	30 X 30 X 30	0.90

جدول رقم (1.3)

أن المقاومة القصوى للانضغاط (Maximum Compressive Strength) التي تصل اليها الخرسانة في الاعضاء الانشائية يمكن أن تختلف عن تلك التي يتم الحصول عليها من فحص النماذج الاسطوانية (f'c) وذلك بسبب الاختلاف في الحجم والشكل للخرسانة المعرضة الى الانضغاط في الحالتين.

(1.9) مقاومة الخرسانة للشد :

ان مقاومة الخرسانة لإجهادات الشد تكون قليلة نسبياً (10 - 15%) من مقاومتها للانضغاط وفي حالات خاصة (20 %) وهي غالباً ما تهمل في حسابات تصميم الاجزاء المختلفة للخرسانة المسلحة. ويمكن ايجاد مقاومة الشد للخرسانة بصورة مباشـــــرة بتعريض النماذج الى قوى شد محورية (Direct Tension Test) غير ان هذه الطريقة غير شائعة الاستعمال وذلك للصعوبات التي تبرز عند وضع النموذج بين فكي جهاز الفحص ومحاولة تعريضه لقوى الشد المحورية.

يمكن ان تحدد المقاومة المميزة للشد في الخرسانة بصورة غير مباشرة بأحدي الطريقتين التاليتين:

(1.9.1) اختبار الشد في الفلق (Tensile Splitting)

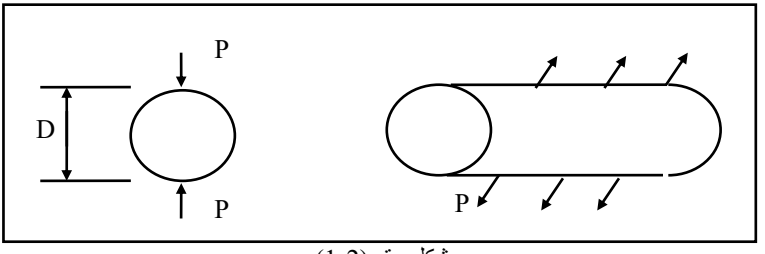
ان هذه الطريقة والتي تعرف بأسم فحص شد الانفلاق تعتبر اكثر دقة من فحص الشد المباشر وفيها تفحص اسطوانة بارتفاع (30 cm) بكسرها في جهاز فحص الضغط وذلك بتسليط قوة الضغط عليها عندما يكون محورها الطولي بوضع افقي وكما مبين في الشكل (1.2). اعتماداً على نظرية المرونة يمكن ايجاد اجهاد الشد الذي يكون منتظما" تقريباً وعمودياً عل مستوى تسليط الحمل مع العلاقة ادناه:

$$\sigma_o = \frac{2P}{\pi DL} = \frac{0.64P}{\pi DL} \quad \ldots\ldots (1.1)$$

حيث ان (P) هي حمل الانضغاط الاقصى على الاسطوانة عند الانفلاق، وتعتبر مقاومة الخرسانة للشد مساوية لـ (58 %) من مقاومة الانفلاق

$$\sigma_o = 0.55P/DL \quad \ldots\ldots (1.2)$$

(L) طول الاسطوانة
(D) قطر الاسطوانة
(σ_o) اجهاد الشد الانفلاقي



شكل رقم (2-1)
اختبار الشد بالفلق (Tensile Splitting)

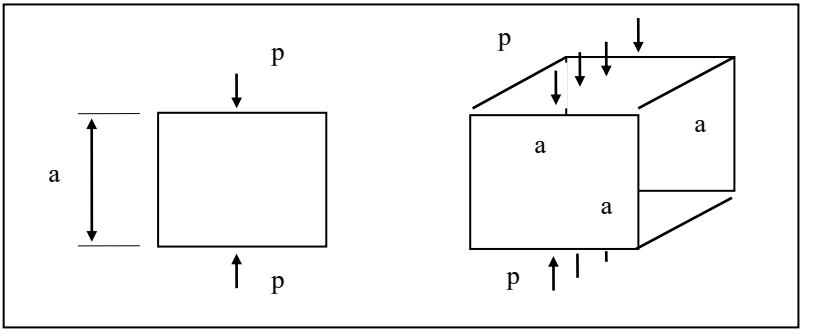
حين فحص الاسطوانة فأنها تنشطر الى جزئين بأتجاه مستوى تسليط الحمل وبأجهاد شد اقصى (fc_t) يمكن احتسابه من التعبير اعلاه. إذا كانت العينة الخاضعة للأختبار

مكعبة شكل (3-1) فأن اجهاد الشد الانفلاقي يحسب من العلاقة التالية:

$$\sigma_o = 2P/\pi a^2 \quad \ldots\ldots (1.3)$$

$$\sigma_o = 0.55P/\pi a^2 \quad \ldots\ldots (1.4)$$

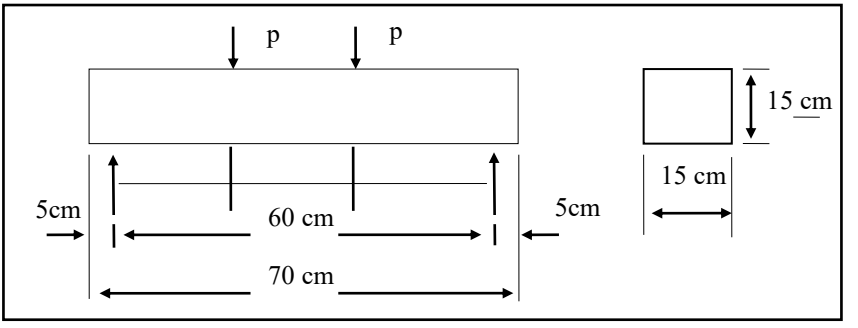
(a) تمثل طول ضلع المكعب



شكل رقم (3-1)
العينة المكعبة في أختبار الشد في الفلق

(1.9.2) اختبار الشد بالانحناء البسيط (Bending Test)

يجري الاختبار على عينات موشورية بمقطع مربع (10 cm X 10 cm) وبطول (55 cm)او بمقطع (15 X 15) وطول (55 cm) تحمل بحملين متماثلين يبعد كل منهما (15 cm اوcm 20) عن نقطة الارتكاز كما مبين في الشكل (1.4).



شكل رقم (4-1)
اختبار الشد في الانحناء البسيط (Bending Test)

مقاومة الشد في

$$\sigma_o = 6Mu/b^3$$

حيث: (Mu) عزم الانحناء عند كسر الـ
20 cm 20 cm 20 cm
(b) طول ضلع المقطع.

بصورة عامة يعتبر الكود (ACI) مقاومة الشد في الانحناء في الخرسانة اعتيادية الوزن والتي تعرف بمعامل الكسر Modulus Rupture مساوية الى:

$$f_r = 0.7\sqrt{f'c} \quad \text{.....(1.6)}$$

ان مقاومة الشد الانفلاقية للأسطوانة تتراوح عادة (60 %) من قيمة معامل الكسر والسبب الرئيسي في ذلك يعود الى ان توزيع الاجهاد في الخرسانة يكون غير خطي عندما يكون الفشل وشيكاً عكس ماتفترضه معادلة الانحناء.

$$\sigma_o = 0.6\frac{6Mu}{b^3}$$

$$\sigma_o = 3.6Mu/b^3 \quad \text{.....(1.7)}$$

(1.10) مقاومة القص

ان مقاومة الخرسانة لاجهادات القص تكون اعلى من مقاومتها لاجهـــادات الشد بحدود (20 - 30%) كما تتراوح بين (35 - 80%) من مقاومتها للأنضغاط ، وعادة لاتتعرض الى اجهادات قص صافية بل تكون جنبا" الى جنب مع احهادات الشد والضغط والعزوم الناتجةعن الاحمال ، بما ان قوى القص على أي مقطع تولد اجهاد شد قطري (Diagonal Tension) وان تحمل الخرسانة في الشد المباشر اقل من تحملها في القص لذا فأن الفشل الذي يحصل بسبب قوى القص انما يظهر على شكل فشل في الشد القطري الناتج عن القص ، غالباً مايشار خطأ على اجهادات الشد القطرية بأنها اجهادات قص.

(1.11) انواع الخرسانة

يمكن تصنيف مادة الخرسانة بالاعتماد على وحدة الوزن (الكثافة) الى ثلاث فئات(انواع) :

- الخرسانة الاعتيادية (Normal Weight Concrete)

وهي خرسانة تحتوي على ركام طبيعي (رمل وحصى او حجر مكسر) ، كثافة هذا النوع من الخرسانة تكون بصورة عامة حوالي ($2400\ Kg/m^3$) ، وهذا النوع من الخرسانة هو الاكثر استعمالاً في الاغراض الانشائية.

- الخرسانة خفيفة الوزن (Light Weight Concrete)

يستخدم هذا النوع من الخرسانة في مجالات معينة، ويصنع هذا النوع بأستعمال انواع معينة من الركام الطبيعي او المصنع، ويقل وزن الخرسانة خفيفة الوزن عن حوالي ($1800\ Kg/m^3$).

- الخرسانة ثقيلة الوزن (Heavy Weight Concrete)

يستعمل هذا النوع من الخرسانة كواق ضد الاشعاعات في المفاعلات النووية والمنشآت الاخرى حيث تسحق بعض الخامات الحديدية الطبيعية الى حجوم مناسبة لاستعمالها كركام. تتراوح كثافة هذا النوع من الخرسانة اعتيادياً بين (3200-4000 Kg/m^3).

اما بالاعتماد على تدرج مقاومة الانضغاط في الخرسانة، فأنه من المفيد تقسيم الخرسانة الى ثلاث فئات عامة:

- الخرسانة ذات المقاومة المنخفضة (Low Strength Concrete)

تكون مقاومة الانضغاط لهذا النوع اقل من 20 MPa

- الخرسانة ذات المقاومة المتوسطة (Medium Strength Concrete)

تكون مقاومة الانضغاط لهذا النوع اقل من MPa (40 - 20)

- الخرسانة ذات المقاومة العالية (High Strength Concrete)

تكون مقاومة الانضغاط لهذا النوع اعلى من Mpa (40 - 20)

كما ان هناك انواع عديدة من الخرسانة، مثل الخرسانة المسلحة بالالياف (Fiber Reinforced Concrete) وخرسانة الاسمنت التمددي (Expansive-cement Concrete)

(1.12) الخرسانة خفيفة الوزن:

يمكن تصنيف الخرسانة خفيفة الوزن بالاستناد الى طرق انتاجها الى ثلاث انواع رئيسية:

- خرسانة الركام الخفيف الوزن:

  تنتج باستخدام ركام مسامي خفيف الوزن

- الخرسانة الخلوية (Cellular) او الخرسانة المهواة (Aerated Concrete) :

  ينتج هذا النوع بادخال فجوات كبيرة خلال كتلة الخرسانة.

- الخرسانة الغير حاوية على الركام الناعم (No-fines Concrete) :

  ينتج هذا النوع بحذف الركام الناعم من الخلطة الخرسانية مما يؤدي الى تكوين عدد كبير من الفجوات البينية.

بصورة عامة تتميز الخرسانة خفيفة الوزن عن الخرسانة طبيعية الوزن (الاعتيادية) بما يلي:

- تكون اقل مقاومة من الخرسانة طبيعية الوزن.
- تسبب عزل حراري جيد بسبب احتوائها على الفجوات المملؤة بالهواء.
- مقاومتها للتآكل غير عالية.
- عملية الخلط والمناولة والوضع في الخرسانة خفيفة الوزن تتطلب عناية واهتمام أكثر منها في الخرسانة الاعتيادية.

ان وزن الخرسانة يمثل دائماً نسبة كبيرة من الحمل الكلي المؤثر على المنشأ، وان هناك فوائد كبيرة واضحة من تقليل كثافة الخرسانة. لغرض تقليل الحمل الميت، والحمل الكلي والتقليل المماثل في حجم الاسس.