الباب التاسع

الإختبارات غير المتلفة للخرسانة

Non-Destructive Testing of Concrete

٩-١ الهدف والمجال Scope

تهدف الإختبارات غير المتلفة للخرسانة إلى إختبار العضو الخرسانى دون حدوث أى تلف أو إنهيار به. وتتنوع الإختبارات تبعاً لنظرية إجرائها ومن أهم طرق هذه الإختبارات ما يلى:

١- طرق الإشعاع
٢- طرق الصلادة وتشمل نوعين من الإختبار:
أ - الإختبار بطريقة العلامة
ب- الإختبار بطريقة الإرتداد
٣- طرق النبضات
٤- طرق الرنين

❐ أهم تطبيقات الإختبارات غير المتلفة

١- أختبار مقاومة الضغط للخرسانة المتصلدة.
٢- إختبار صلادة السطح.
٣- تحديد أماكن حديد التسليح.
٤- كشف الشروخ الداخلية وتحديد أماكنها وأتساعها.
٥- تعيين محتوى الرطوبة.
٦- تعيين الكثافة.
٧- قياس معاير المرونة للخرسانة.

وتعتبر إختبارات مقاومةالضغط من أهم الإختبارات التى تساعد المهندس الإنشائى فى كتابة تقرير هندسى عن حالة مبنى قائم.

❐ أسباب اللجوء لهذه الإختبارات

١- عدم إجراء إختبارات مقاومة الضغط للخرسانة.
٢- عند وجود مشكلة بالمنشأ - مثل ظهور شروخ وتصدعات.
٣- عدم إلتزام المقاول ببعض التعليمات مثل فك الشدات المبكر والصب دون إشراف هندسى.

٤- عدم قيام المقاول بإتمام أعمال المعالجة للخرسانة.
٥- عند الشك فى نوع الأسمنت المستخدم.
٦- ورود نتائج إختبارات مقاومة الضغط غير مطابقة للمقاومة المطلوبة وقد يكون ذلك نتيجة ضعف الخرسانة أو نتيجة أسباب أخرى مثل:

- طريقة أخذ مكعبات الخرسانة.
- طريقة وضع المكعب فى الماكينة ومعدل توقيع الحمل على العينة.
- سقوط المكعب أثناء المناولة.
- فك المكعب قبل مرور ٢٤ ساعة.
- كسر المكعبات قبل مرور المدة المطلوبة (٧ أو ٢٨ يوم).
- ترك المكعبات دون معالجة حتى تاريخ الإختبار.
- عدم تجانس خرسانة المكعب (أثناء أخذها).
- تكسير أحرف المكعب عند فك القوالب نتيجة عدم إستخدام مادة عازلة.

❐ أهم الإختبارات الشائعة الإستعمال فى مجال إختبارات الخرسانة

١- إختبار مطرقة شميدت	Schmidt Hammer
٢- إختبار قياس سرعة النبضات	Ultrasonic Puls Velocity
٣- إختبار القلب الخرسانى (نصف متلف)	Core Test
٤- إختبار التحميل للعناصر الإنشائية	Loading Test

٩-٢ مطرقة شميدت Schmdit Hammer

تستخدم مطرقة شميدت لتعيين رقم الإرتداد Rebound Number حيث يعتمد عمل الجهاز على النظرية التى تنص على أن قوة إرتداد كتلة مرنة يعتمد على قوة السطح الذى تصطدم به. ويستخدم رقم الإرتداد هذا فى الإسترشاد عن القيمة التقريبية لمقاومة الضغط للخرسانة.

❐ مميزات مطرقة شميدت

١- جهاز صغير الحجم يمكن إستعماله فى المواقع وحمله فى اليد.
٢- يعطى نتائج سريعة لمقاومة الضغط وسهل الإستعمال.
٣- لا يسبب تلف للخرسانة.
٤- جهاز لا يتطلب إحتياطات معقدة.
٥- أرخص الأجهزة المستخدمة لهذا الغرض.
٦- يتحمل العمل الشاق فى جو التنفيذ مقارنة بالأجهزة الأخرى.
٧- سهولة معايرته من وقت لآخر.

❐ طريقة عمل الجهاز

١- بالضغط الخفيف على زرار بالجهاز تخرج الرأس المتحرك Plunger.
٢- يوضع الجهاز عموديا على المكان المراد إختباره ثم يضغط الجهاز فتنزلق الرأس إلى داخل لجهاز وقبل إختفائها ينفك الشاكوش ويحدث طرقة على الرأس (صدمة).
٣- عند حدوث الصدمة يجب أن يكون الجهاز عمودياً تماماً على السطح المختبر ولا يُلمس الزرار Button الموجود على الجهاز.
٤- عند الاصدام يرتد الشاكوش الطارق بمقدار يتناسب مع صلادة السطح المختبر محركاً مؤشر يتحرك على مقياس لتعيين قيمة الإرتداد.
٥- يُنقل الجهاز إلى نقطة أخرى وتُكرر العملية.
٦- بعد إنتهاء العمل يُعاد الجهاز إلى وضعه الأصلى بجعل الرأس داخل الجهاز.

❐ أنواع الأجهزة

تختلف الأجهزة من حيث قراءة رقم الإرتداد إلى نوعين كما فى شكل (٩-١):
أ - أجهزة تقرأ النتيجة على تدرج بجسم الجهاز.
ب - أجهزة مزودة بأداة تسجيل للقراءة على شريط ورقى.

يفضل النوع الثانى للأسباب الآتية:
١- يمكن لشخص واحد إستخدامه حيث أن تسجيل القراءة يتم أوتوماتيكيا.
٢- يعتبر أسهل فى الإستخدام و يمكن الرجوع إلى التسجيل البيانى للقراءة فى أى وقت.
٣- منع التلاعب أثناء إستخدام الطريقة الأولى عند تدوين القراءة بواسطة شخص آخر غير الذى يقوم بأخذ القراءات.
٤- نسبة الخطأ أقل من الحالة الأولى.

❐ طريقة الإختبار وإعداد النتائج

١- تحدد مساحة على العضو الإنشائى فى حدود ٣٠ × ٣٠ سم.
٢- يؤخذ عدد من القراءات حوالى ١٥ قراءة موزعة داخل المساحة.
٣- لا تقل المسافة بين كل قرائتين عن ٢,٥ سم.
٤- يعمل كروكى للجزء المراد إختباره وتحدد عليه مواقع النقط.
٥- لكل نقطة على حدة يحسب متوسط رقم الإرتداد وتحذف القراءات الشاذة بحيث لا يزيد الفرق بين أى رقم إرتداد و المتوسط عن ٥ وحدات. ويعتبر رقم الإرتداد مقبول إذا كان ثلثى القراءات لا تنحرف عن المتوسط بمقدار $\pm$ ٢,٥ وحدة.
٦- يتم تحويل رقم الإرتداد المتوسط الخاص بكل نقطة إلى مقاومة ضغط نيوتن/مم^2 أو كج/سم^2 بإستخدام جدول (٩-١) أو شكل (٩-٢).
٧- توضع النتائج الخاصة بجميع النقط فى جدول وتحسب مقاومة الضغط المتوسطة للخرسانة بحيث لا يزيد معامل الإختلاف لمفردات مقاومة الضغط عن ١٥%.

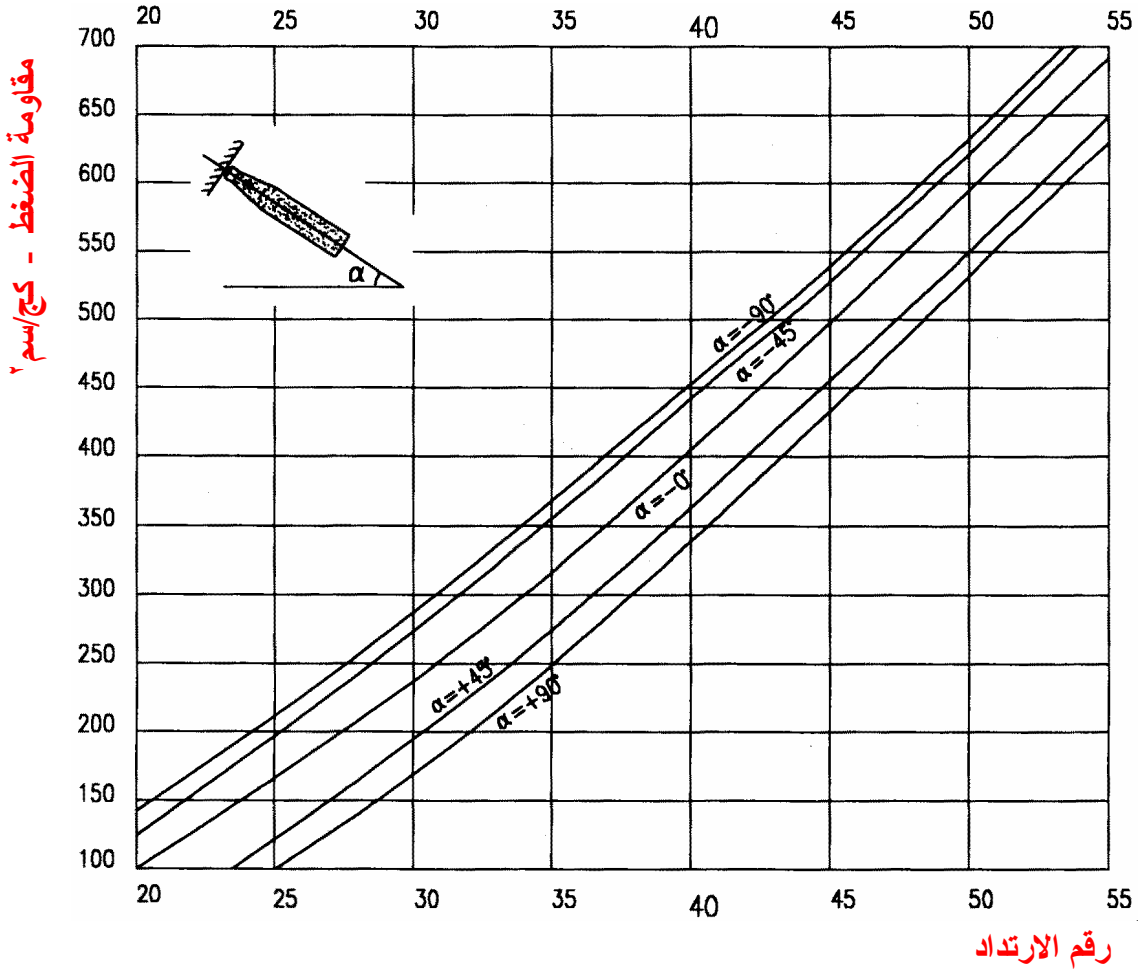
(أ) مطرقة عادية.

(ب) مطرقة مزودة بشريط ورقى لكتابة النتائج.

شكل (٩-١) الأشكال الشائعة من مطرقة شميدت.

جدول (٩-١) مقاومة الضغط بدلالة رقم إرتداد المطرقة (R) .

R	عمر الخرسانة ١٤ - ٥٦ يوم				عمر الخرسانة ٧ أيام			
	القيمة المتوسطة		أقل قيمة محتملة		القيمة المتوسطة		أقل قيمة محتملة	
	kg/cm²	MPa	kg/cm²	MPa	kg/cm²	MPa	kg/cm²	MPa
20	101	9.9	54	5.3	121	11.9	74	7.3
21	113	11.1	64	6.3	132	12.9	83	8.1
22	126	12.4	75	7.4	145	14.2	94	9.2
23	139	13.6	86	8.4	157	15.4	104	10.2
24	152	14.9	98	9.6	169	16.6	115	11.3
25	166	16.3	110	10.8	183	18.0	127	12.5
26	180	17.7	122	12.0	196	19.2	136	13.3
27	195	19.1	135	13.2	210	20.6	150	14.7
28	210	20.6	149	14.6	225	22.1	164	16.1
29	225	22.1	163	16.0	239	23.4	177	17.4
30	241	23.6	176	17.3	254	24.9	191	18.7
31	257	25.2	193	18.9	269	26.4	205	20.1
32	274	26.9	209	20.5	285	28.0	220	21.6
33	291	28.5	225	22.1	300	29.4	234	23.0
34	307	30.1	240	23.5	315	30.9	248	24.3
35	324	31.8	256	25.1	331	32.5	263	25.8
36	342	33.6	273	26.8	348	34.1	279	27.4
37	360	35.3	290	28.4	365	35.8	295	28.9
38	377	37.0	307	30.1	381	37.4	311	30.5
39	395	38.7	324	31.8	398	39.0	327	32.1
40	413	40.5	341	33.5	416	40.8	344	33.7
41	432	42.4	359	35.2	434	42.6	361	35.4
42	450	44.1	377	37.0	451	44.2	378	37.1
43	469	46.0	395	38.7	470	46.1	396	38.8
44	488	47.9	414	40.6	488	47.9	414	40.6
45	507	49.7	432	42.4	507	49.7	432	42.4
46	526	51.6	451	44.2	526	51.6	451	44.2
47	546	53.5	470	46.1	546	53.5	470	46.1
48	565	55.4	489	48.0	565	55.4	489	48.0
49	584	57.3	508	49.8	584	57.3	508	49.8
50	604	59.3	527	51.7	604	59.2	527	51.7
51	623	61.1	546	53.6	623	61.1	546	53.6
52	643	63.1	565	55.4	643	63.1	565	55.4
53	663	65.0	584	57.3	663	65.0	584	57.3
54	683	67.0	593	58.2	683	67.0	603	59.2
55	703	69.	622	61.0	703	69.0	622	61.0



شكل (٩-٢) العلاقة بين مقاومة الضغط ورقم الإرتداد (R) .

❐ زاوية ميل الجهاز

تمت معايرة هذه الأجهزة على الوضع الأفقى أى لإختبار أسطح رأسية مثل الحوائط والأعمدة وبذلك أعتبرت زاوية ميل الجهاز بالنسبة للمستوى الأفقى $\alpha = 0$ (شكل ٩-٣).

يمكن أستخدام الجهاز للأسطح المائله بزاوية ٤٥ $\alpha = \pm 45^{\circ}$

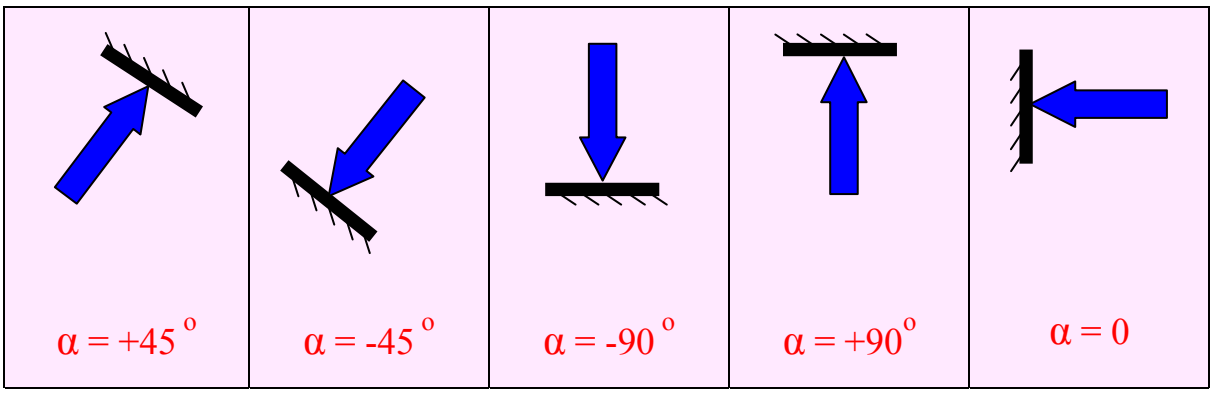
أوفى الوضع رأسيا لإختبار الأسقف $\alpha = +90^{\circ}$

أو الأرضيات وفى هذه الحالة $\alpha = -90^{\circ}$

يتم تصحيح القراءات طبقا للمنحنيات المناسبة (شكل ٩-٢) أو جدول (٩-٢).
فى حالة الزوايا الموجبة يتم التصحيح بطرح بعض القيم من قراءة المؤشر نتيجة تأثير الجاذبية الأرضية أما فى حالة الزوايا السالبة فيتم التصحيح بإضافة بعض القيم الى قراءة المؤشر.

جدول (٩-٢) التصحيح الخاص بزاوية ميل مطرقة الإرتداد .

رقم الإرتداد (R)	التصحيح الخاص بتأثير زاوية ميل المطرقة			
	لأعلى ↑		لأسفل ↓	
	$+90^{o}$	$+45^{o}$	-45^{o}	-90^{o}
10			+ 2.4	+ 3.2
20	- 5.4	- 3.5	+ 2.5	+ 3.4
30	- 4.7	- 3.1	+ 2.3	+ 3.1
40	- 3.9	- 2.6	+ 2.0	+ 2.7
50	- 3.1	- 2.1	+ 1.6	+ 2.2
60	- 2.3	- 1.6	+ 1.3	+ 1.7



شكل (٩-٣) إستخدام المطرقة بزوايا مختلفة.

❐ إحتياطات عامة عند إجراء الإختبار

١- أن يكون الجهاز المستخدم معاير قبل الإستخدام.
٢- يكون السطح المختبر نظيف خالى من التعشيش أو المسامية.
٣- يكون السطح خالى من النتوءات وبعيد عن أماكن أعمال الخرسانة.
٤- تنظف الأسطح المختبرة باحجار الكاربورندوم المزودة مع الجهاز.
٥- لا توضع مقدمة الجهاز على زلط أو حديد تسليح فى الخرسانة المتصلدة.
٦- تزال أى مونة أو طبقات بياض قبل إجراء الإختبار وينظف مكان أخذ القراءات.
٧- فى حالة الأسطح الأفقية تزال طبقة الخرسانة الضعيفة (الجزء الزائد بالماء نتيجة النضح).
٨- فى حالة الخرسانة القديمة يتم إزالة السطح المتصلد لمسافة واحد سنتيمتر بواسطة صاروخ يدوى ذو قرص حوالى ١٢,٥ سم حيث أن هذه الطبقة لا تمثل الخرسانة.
٩- حيث أن الخرسانة تكون أكثر دمكا فى الأجزاء السفلية من العضو الإنشائى فيتم أختبار النقط فى المناطق العلوية.
١٠- يفضل إستخدام الأسطح الرأسية لإجراء الإختبارات - أعمدة - حوائط خرسانية - جوانب كمرات - جوانب قواعد.
١١- فى حالة الأعضاء النحيفة (أسقف ١٠ سم - أعمدة ١٥ سم) تؤخذ إحتياطات خاصة حيث أن مرونة هذه الأعضاء قد تؤثر على رقم الإرتداد.
١٢- الأسطح المبلله: قد نضطر الى إستخدام الجهاز فى حالة الأسطح المبللة وذلك فى الأماكن القريبه من مصادر المياه (مثل دورات المياه) وفى المنشآت المائية وكذلك فى أحواض السباحة. وفى هذه الحالة فإن المطرقة تعطى نتائج مضللة تقل بحوالى ٣٠% عن القيمة الحقيقية. ولذلك تستخدم جداول خاصة بالتصحيح (أو إجراء إختبارى مطرقة شميدت وسرعة النبضات معاً).

❐ معايرة الجهاز

يتم معايرة الجهاز فى الحالات الآتية :
١- عند تغيير نوع الركام المستخدم (دولوميت - بازلت - جرانيت - حجر جيرى)
٢- يتم معايرة الجهاز كل ٢٠٠٠ صدمة على الأكثر.
٣- كل فترة زمنية وعند ترك الجهاز مدة دون إستعمال.
٤- بعد عمل أى صيانة للجهاز.

❐ مصادر الأخطاء

١- إستخدام ركام مختلف
٢- الأجزاء النحيفة
٣- وجود فراغات وتعشيش
٤- الخرسانة الرطبة حديثة الصب سطحها أقل صلادة من داخلها (رقم إرتداد أقل من الحقيقة).
٥- الخرسانة الجافة القديمة سطحها أكثر صلادة من داخلها ويكون رقم الإرتداد اكبر من حقيقته.

٩-٣ الموجات فوق الصوتية Ultrasonic Pulse Velocity

❐ الفكرة العامة

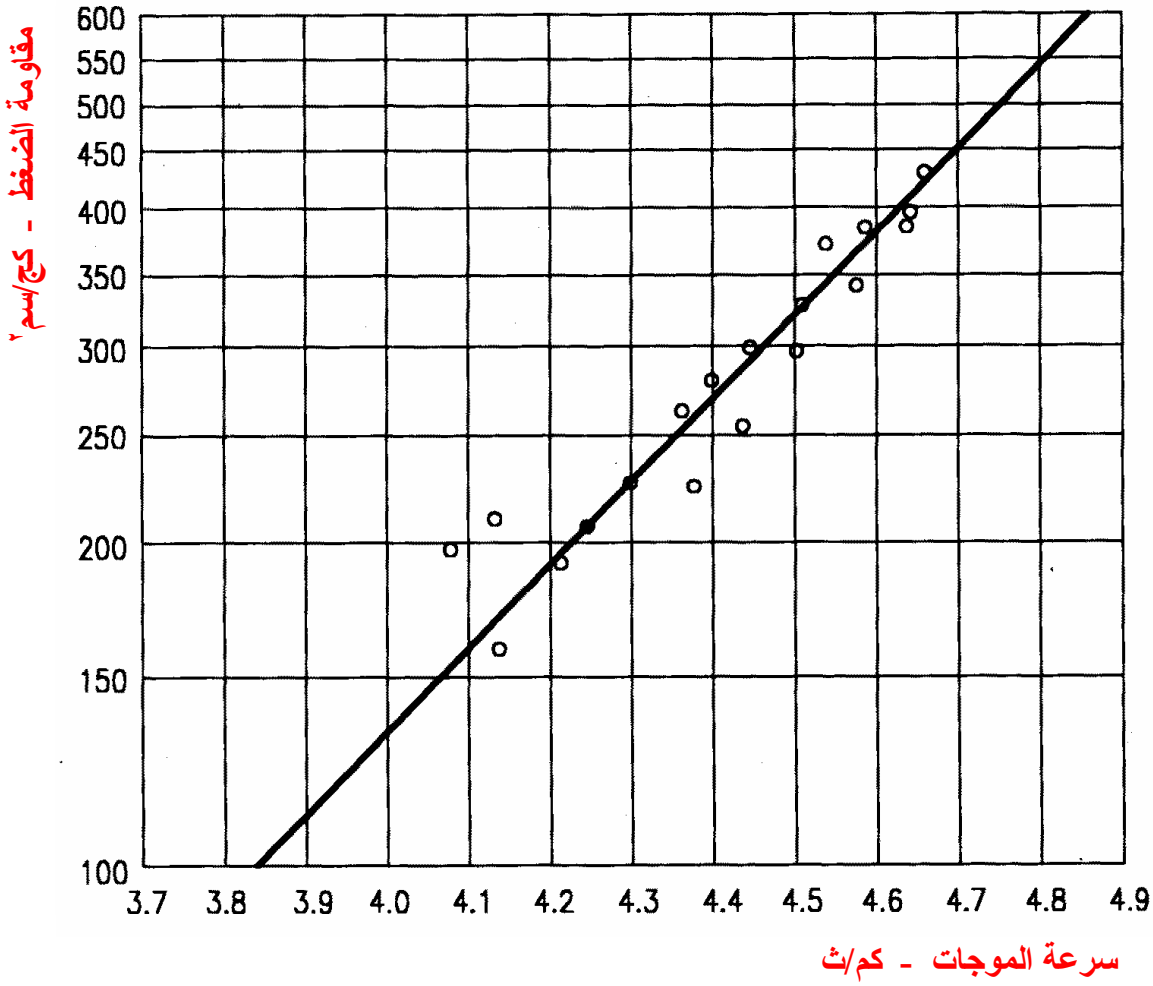
فى هذه الطريقة يتم إحداث نبضات عبارة عن موجات فوق صوتية لتسرى خلال الجزء المختبر ويتم تعيين زمن إنتقالها. حيث وجد أن سرعة النبضات خلال جسم صلب يعتمد على كثافة المادة المختبرة وخواص المرونة لها.

❐ إستخدامات طريقة الموجات فوق الصوتية

تستعمل هذه الطريقة (شكل ٩-٤) فى مجال الخرسانة لإستنتاج الآتى:

١- قيمة مقاومة الخرسانة للضغط.
٢- قياس معاير المرونة للخرسانة.
٣- مدى تجانس الخرسانة.
٤- إكتشاف الشروخ والفجوات بالخرسانة.
٥- تحديد درجة تلف الخرسانة.
٦- قياس عمق طبقة الخرسانة.
٧- مراقبة تطور قيم مقاومة الخرسانة للضغط.

شكل (٩-٤) جهاز الموجات فوق الصوتية الشائع الإستخدام فى مجال الخرسانة.



شكل (٩-٥) العلاقة بين سرعة الموجات و مقاومة الضغط.

❐ طريقة إجراء الإختبار

١- يتطلب إجراء هذا الإختبار كفاءة عالية.
٢- إستخدام أجهزة لإنتاج نبضات مناسبة مع المادة.
٣- يتم ضبط الجهاز مع جزء المعايرة المرفق مع الجهاز قبل بدء الإختبار على العينة.
٤- يتم قياس المسافة التى تسيرها النبضات Path Length بدقة (أى طول السير).
٥- يوضع المرسل Transmitter والمستقبل Receiver على العينة وأن يكون الإتصال تام بين سطحى المرسل والمستقبل وسطح العينة (يستخدم لهذا الغرض الشحم أو عجينة الجلسرين أو الصابون السائل).
٦- عند وضع المرسل والمستقبل على العينة يستمر هذا الوضع حتى تثبت القراءة وإذا تأرجحت النتائج بين قرائتين يؤخذ المتوسط.
٧- يكون الرقم معبراً عن الوقت T لسريان النبضات خلال الجزء المختبر.
٨- تكون سرعة النبضات (V) كالآتى:

$$V = L / T \quad km/sec.$$

L = Length طول المسار المقاس
T = Transit Time زمن إنتقال الموجة

٩- يستخدم منحنى المعايرة الخاص (شكل ٩-٥) لإيجاد مقاومة ضغط المكعب المكافئ. وقد وضع هذا المنحنى على أساس إختبار مجموعة كبيرة من العينات ذات المقاومة المختلفة وتم قياس سرعة النبضات فى كل حالة. دقة النتائج تتراوح بين ± ٢٠% من القيمة الفعلية لمقاومة الضغط.

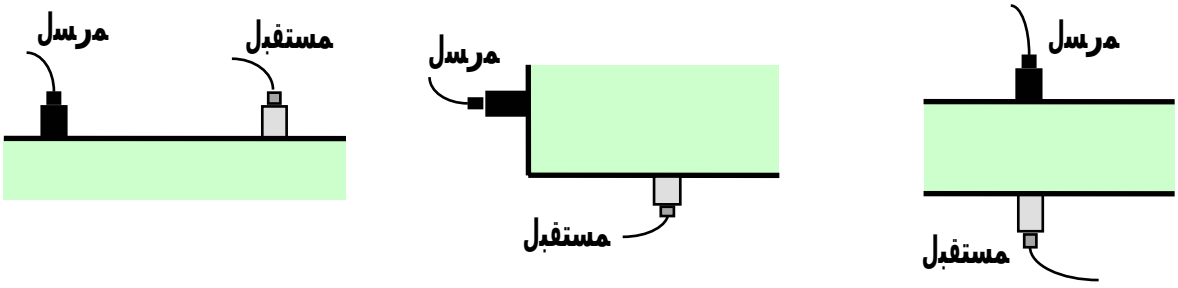
❐ وضع المرسل والمستقبل Transducers Arrangement

توجد ثلاث طرق لوضع المرسل والمستقبل كما بشكل (٩-٦) هى:

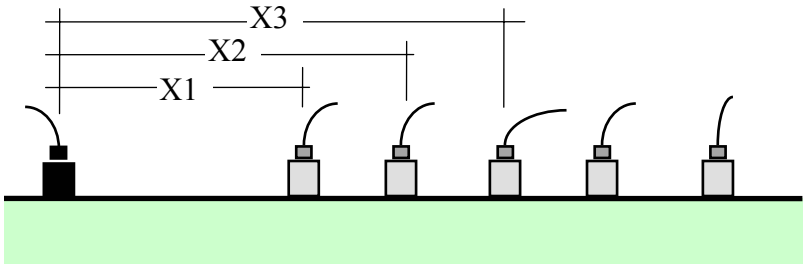
١- فى إتجاهين متضادين (قياس مباشر) Direct Transmission
٢- فى الجوانب المجاورة (قياس نصف مباشر) Semi-direct Transmission
٣- فى نفس السطح (قياس غير مباشر) Indirect Transmission

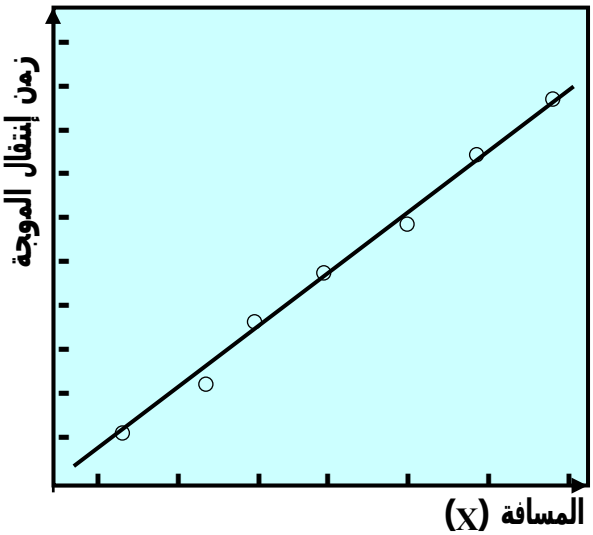
تستخدم الطريقة الأولى فى حالة إمكانية وضع المرسل والمستقبل بهذا الوضع ويمثل ذلك أفضل وضع. أما فى الطريقة الثانية فيتم الإنتقال على طول السطح وذلك فىحالة إمكانية الوصول الى سطح واحد فقط من العنصر المختبر. وفى هذه الحالة تكون العملية أقل كفاءة من السابق لأن أكبر طاقة تتجه إلى داخل الخرسانة.

والطريقة الغير مباشرة لا تعطى معلومات عن الخرسانة الضعيفة والتى تكون تحت السطح القوى المتصلد كما أن تحديد طول المسار أقل دقة وقد وجد أن السرعة فى هذه الحالة أقل من الحالة المباشرة شكل (٩-٧).



شكل (٩-٦) الأوضاع المختلفة للمرسل والمستقبل.





العلاقة بين زمن إنتقال الموجة والمسافة (X) فى القياس غير المباشر

شكل (٩-٧) الإستخدام غير المباشر على طول السطح المختبر.

❐ العوامل المؤثرة على النتائج

١ـ نسبة الرطوبة

العينات المشبعه تعطى نتائج أعلى من العينات الجافة (عكس إختبار مطرقة شميدت ولهذا أمكن دمج الطريقتين معا) أنظر شكل (٩-٨).

٢ـ درجة الحرارة

درجات الحرارة العادية لا تؤثر على سرعة النبضات.

٣ـ نوع الركام

يتأثر زمن إنتقال النبضات بنوع الركام المستخدم وشكله وحجمة ونسبة الخلط لذلك يعمل منحنيات خاصه لكل نوع ركام على حده كما بشكل (٩-٩).

٤ـ تأثير درجة التصلد

الخرسانة التى وصلت لدرجة تصلد تعادل ٥٠% من قوتها لا تؤثر على سرعة سريان الموجات.

٥ـ تأثير طول المسار

لا يؤثر طول المسار على نتائج قياس سرعة النبضات مع ملاحظة أن لا يكون صغيراً جداً وإلا سيكون الوسط الغير متجانس للخرسانة ذات تأثير كبير. وقد وُجد أن سمك أكبر من ١٠٠ مم أو ١٥٠ مم مع إستخدام ركام من ٢٠ مم إلى ٤٠ مم يعتبر غير مؤثر على النتائج (شكل٩-١٠)

٦ـ تأثير عمر الخرسانه

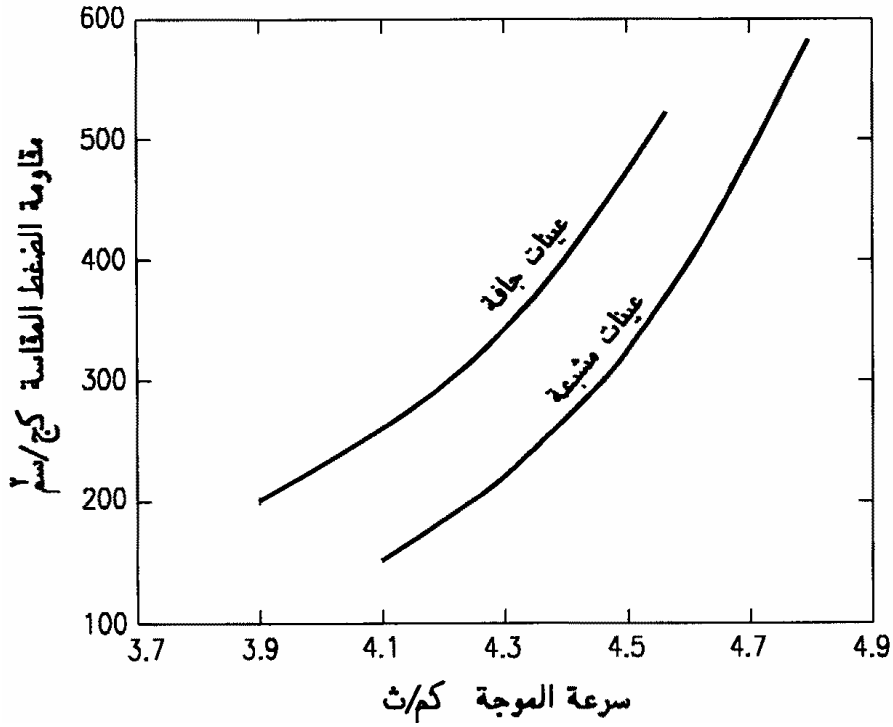
تتأثر سرعة الموجات بزيادة العمر حتى عمر ٧ أيام كما بشكل (٩-١١).

٧ـ تأثير حديد التسليح

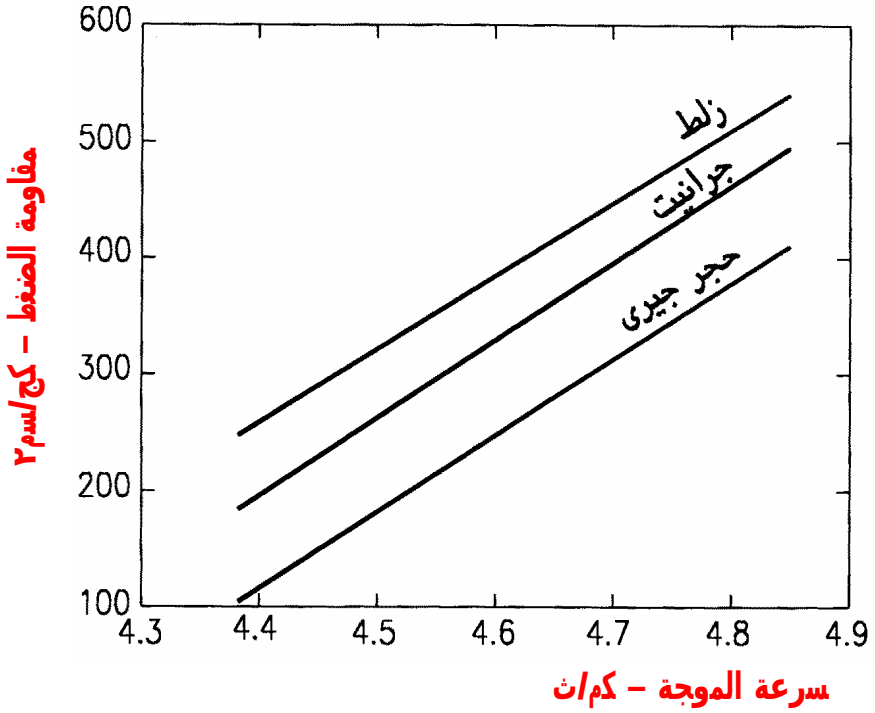
يفضل تفادى حديد التسليح إذا أمكن ذلك حيث أن له تأثير فىزيادة سرعة النبضات (سرعة النبضات فى الحديد ٥,٩ كم/ث). هذا وتوجد حالتين لوضع حديد التسليح بالنسبة لخط سريان النبضات.

الحالة الأولى أن يكون محور السيخ عمودى على مسار النبضات وفى هذه الحالة تتأثر القراءات بقطر الأسياخ التى تعترض مسارها ويتم تطبيق معامل تصحيح يعتمد على قطر الأسياخ بالخرسانة كما هو مبين بشكل (٩-١٢).

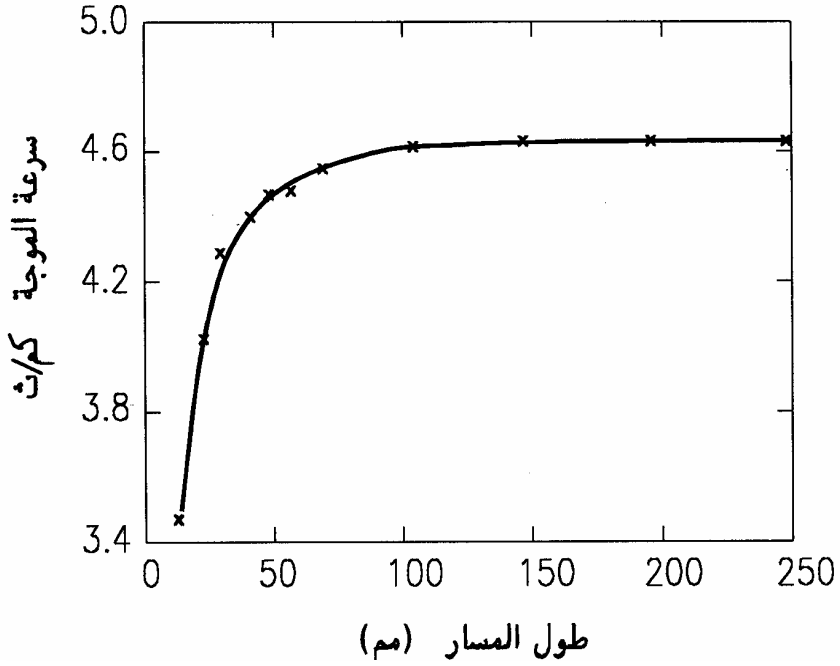
الحالة الثانية عندما يكون محور السيخ موازى لخط السريان فى هذه الحالة تخرج أول موجه وتتجه لتسير خلال السيخ فى المنطقة الموجود فيها. فى هذه الحالة يطبق معامل تصحيح كما مبين بشكل (٩-١٣).



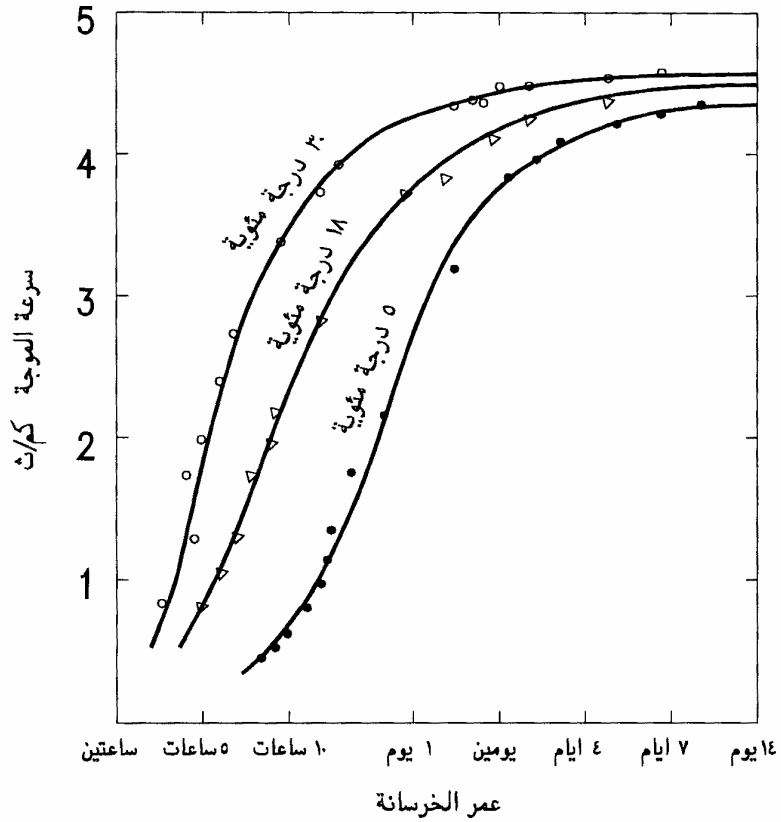
شكل (٩-٨) تأثير حالة رطوبة العينة على سرعة الموجات.



شكل (٩-٩) تأثير نوع الركام على نتائج الموجات.



شكل (٩-١٠) تأثير طول مسار الموجة.



شكل (٩-١١) تأثير عمر الخرسانة على نتائج الموجات.

إستعمالات أخرى

فيما يلى نذكر بإيجاز بعض الإستعمالات الأخرى لجهاز الموجات فوق الصوتية فى مجال الخرسانة

❐ قياس درجة التجانس فى الخرسانة

معامل الإختلاف للسرعات (V) يعطى دلالة عن حالة تجانس الخرسانة وقد أعتبر أن معامل إختلاف مقداره ١,٥ - ٢,٥ % يدل على أن الخرسانة جيدة وذلك فى حالة إجراء الإختبار على القلوب الخرسانية Core Sample ويعتبر الإختلاف من ٦ إلى ٩ % مناسب فى حالة إجراء الإختبار على العنصر الإنشائى ذاته.

❐ إكتشاف الشروخ والفجوات

تعتمد فكرة إستخدام الجهاز فى إكتشاف الشروخ والفجوات على حقيقة أن النبضات لا تسرى فى الفراغ فتسلك الموجه مساراً أطول وعليه تختلف السرعة. حيث أن زمن إنتقال النبضات يزيد نتيجة لوجود الشروخ ويمكن معرفة ذلك مقارنة بزمن الإنتقال خلال الخرسانة السليمة للتعرف على خواص وطبيعة الشرخ والفجوات بدقة ± ١٥%. كذلك يمكن قياس عمق الشرخ تقريبياً وذلك بإستخدام العلاقة والمنحنى الموضح فى شكل (٩-١٤).

❐ تحديد درجة تلف الخرسانة

تستعمل الموجات فى التعرف على درجة تلف الخرسانة الناتج من تأثير حريق أو عوامل كيمائية أو ميكانيكية وذلك بتحديد سرعة الموجات بالأجزاء السليمة من العنصر الإنشائى وإعتبار أن سرعة إنتقال الموجه خلال الطبقة التالفة مساوياً للصفر. وتحسب عمق الطبقة التالفة من العلاقة:

$$t = (T V_c - L)$$

حيث:

t = عمق الطبقة التالفة

V_c = السرعة الفعلية للموجات خلال الخرسانة

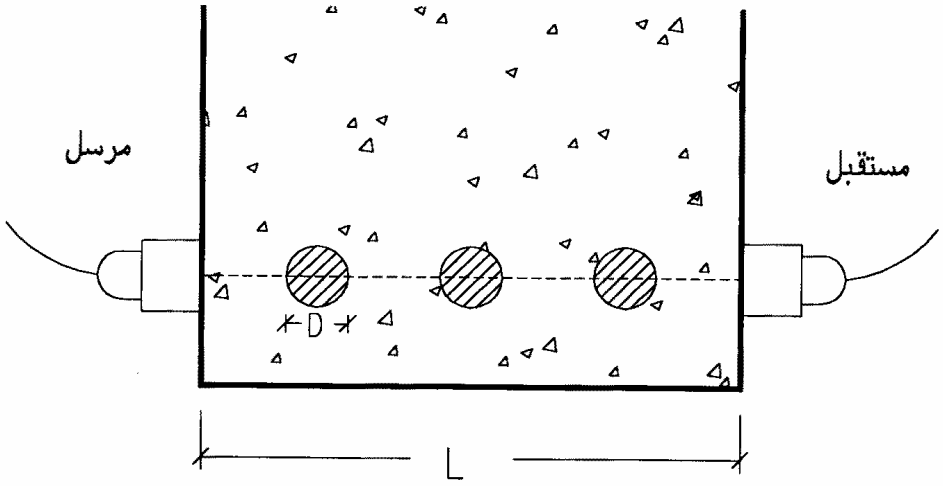
T = زمن إنتقال الموجة خلال الخرسانة الموجودة

L = طول مسار الموجه خلال الخرسانة

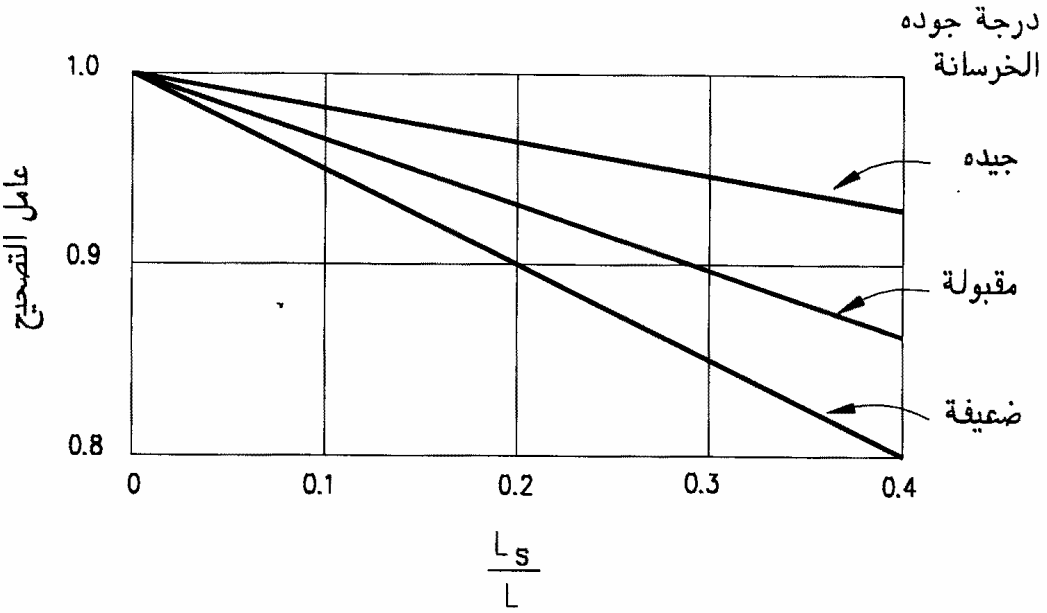
ونسبة الخطأ فى هذه العلاقة كبير فى حالة عدم الدقة فى القياس.

❐ قياس معايير المرونة

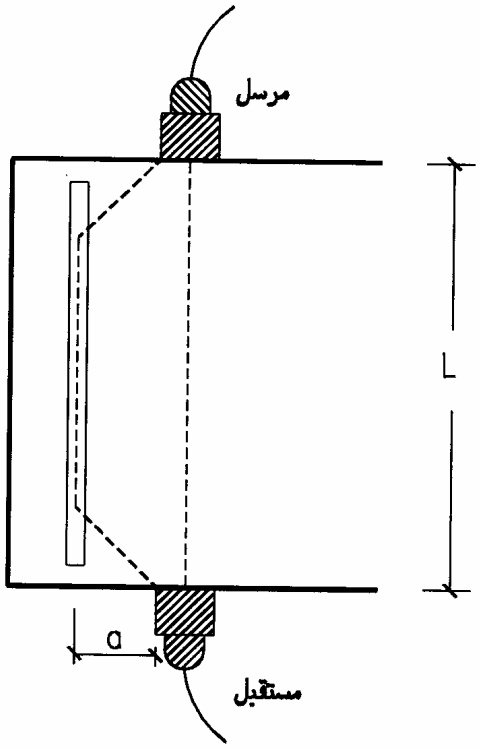
يستعمل جهاز الموجات فوق الصوتية أيضاً فى قياس معايير المرونة للخرسانة وذلك بإستخدام منحنيات تم معايرتها على خرسانات ذات قيم مختلفة لمعايير المرونة كما بشكل (٩-١٥).

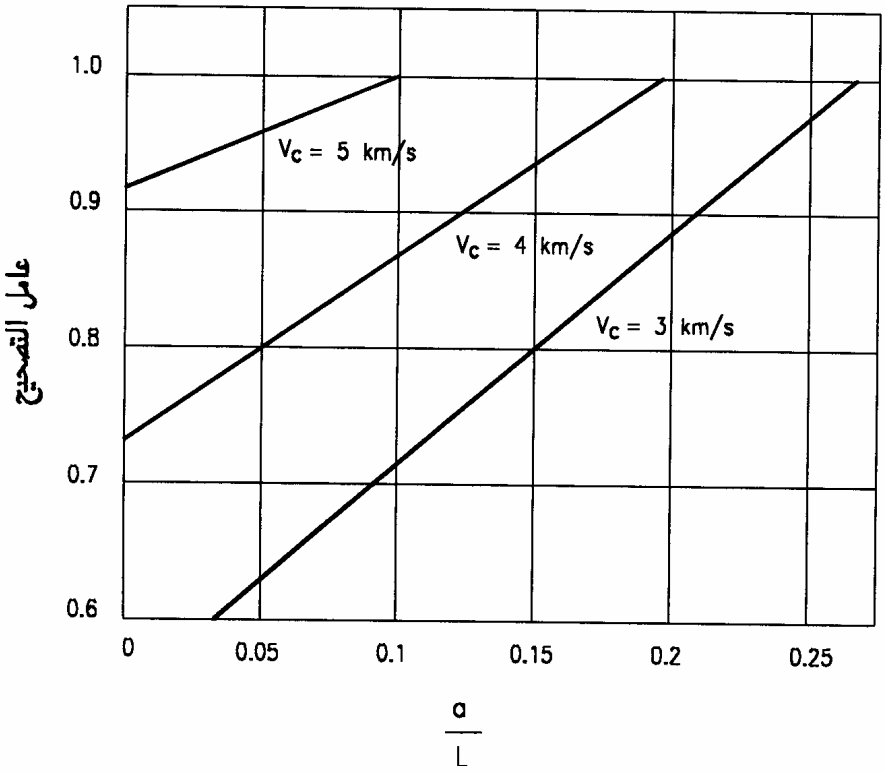


L_s = مجموع اقطار الاسياخ التى اعترضت مسار الموجة

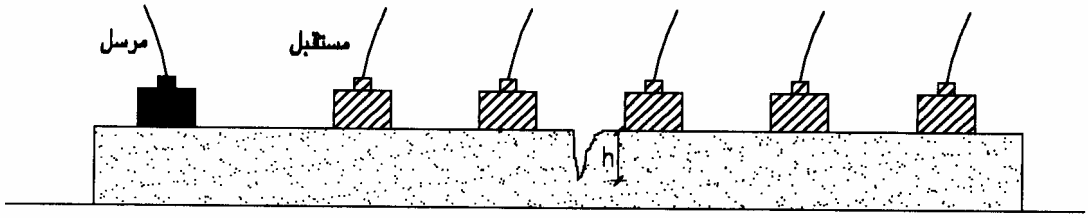


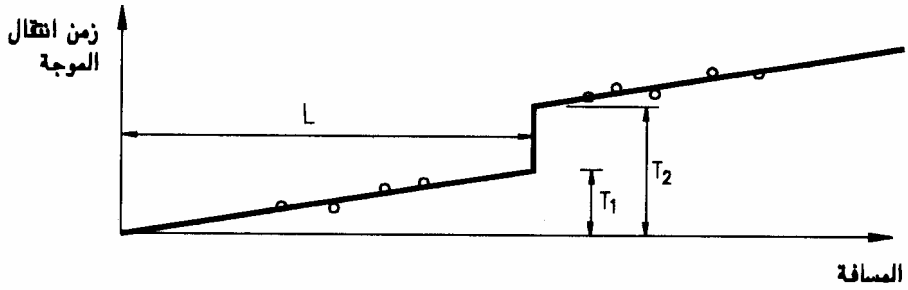
شكل (٩-١٢) تأثير حديد التسليح العمودى على إتجاه الموجات.



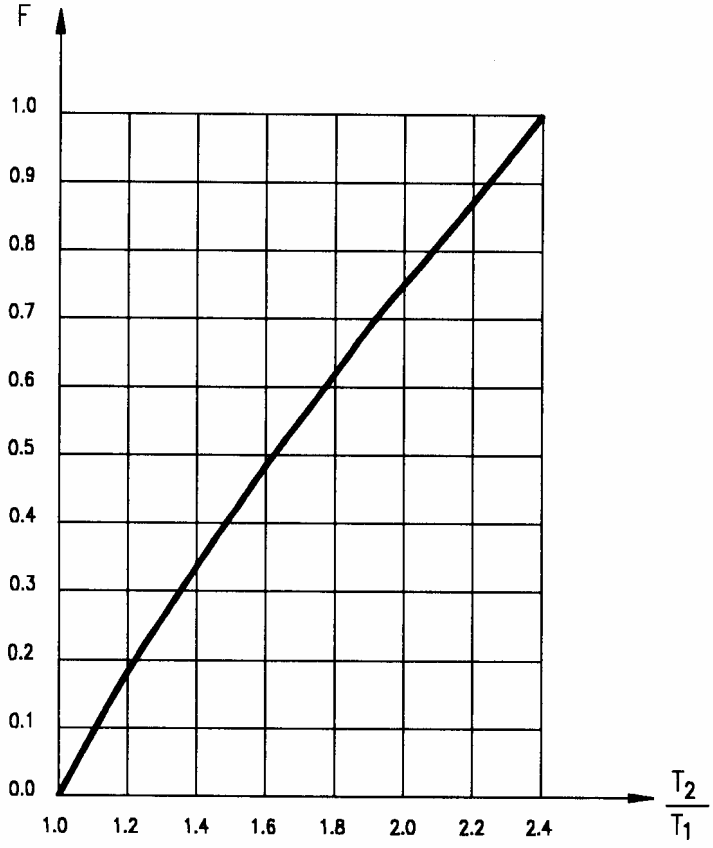


شكل (٩-١٣) تأثير حديد التسليح الموازى لإتجاه الموجات.



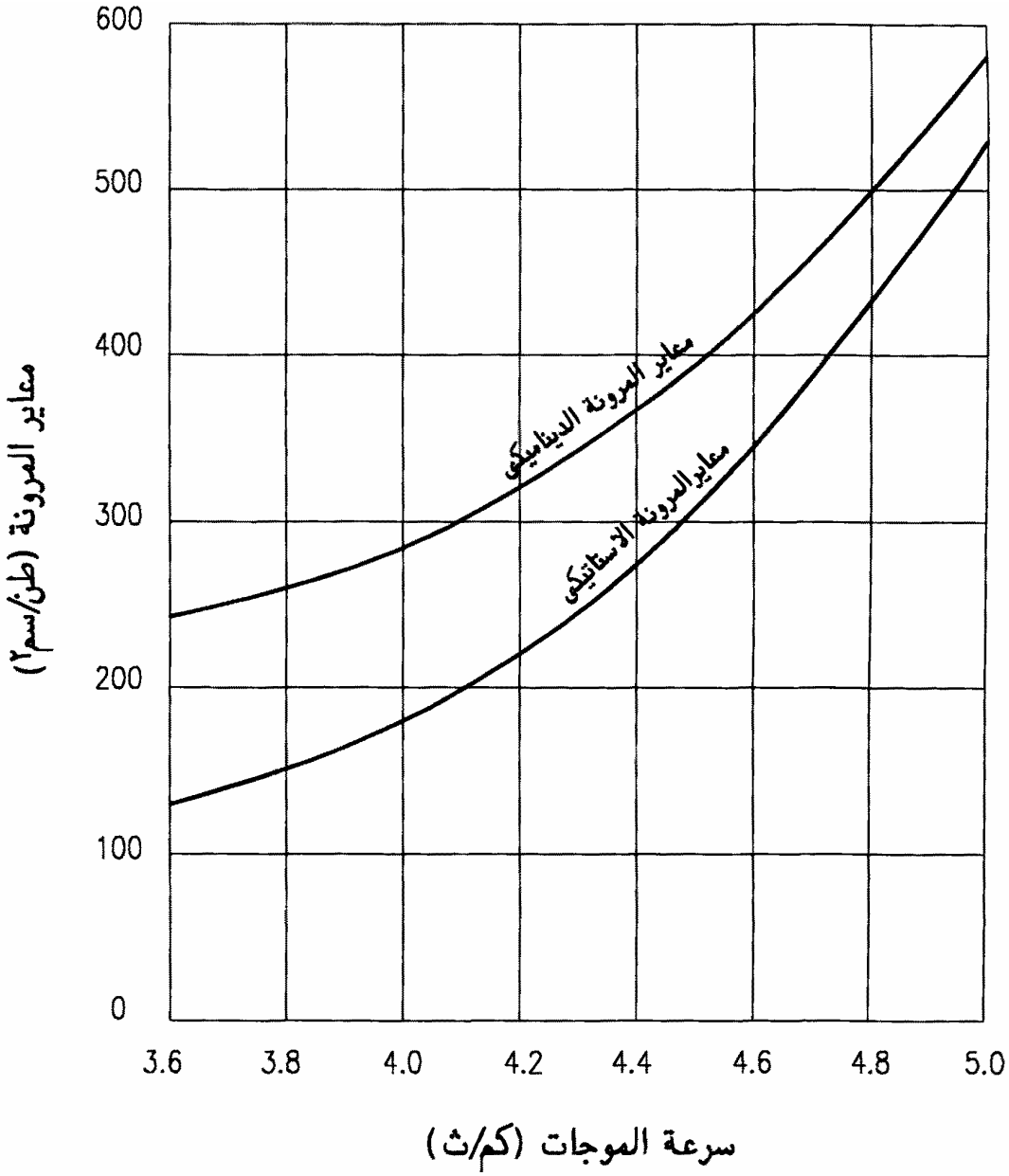


$$h = \frac{L}{2}\left(\frac{T_2}{T_1} - \frac{T_1}{T_2}\right) = F.L$$



$\frac{T_2}{T_1}$	F
1.0	0.0
1.1	0.095
1.2	0.183
1.3	0.265
1.4	0.343
1.5	0.417
1.6	0.488
1.7	0.556
1.8	0.622
1.9	0.687
2.0	0.750
2.2	0.873
2.4	0.992

شكل (٩-١٤) تحديد عمق الشرخ بإستخدام الموجات فوق الصوتية.

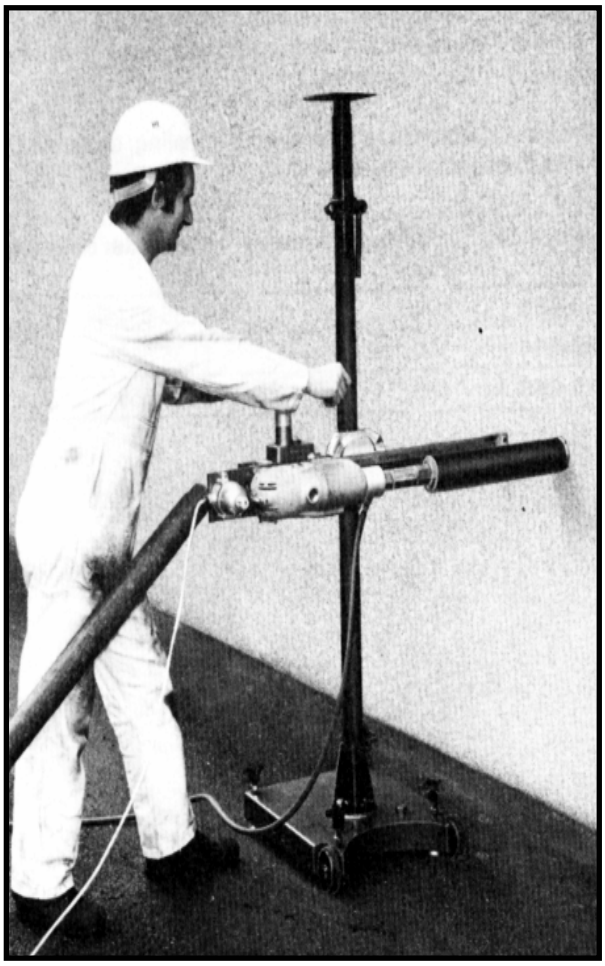


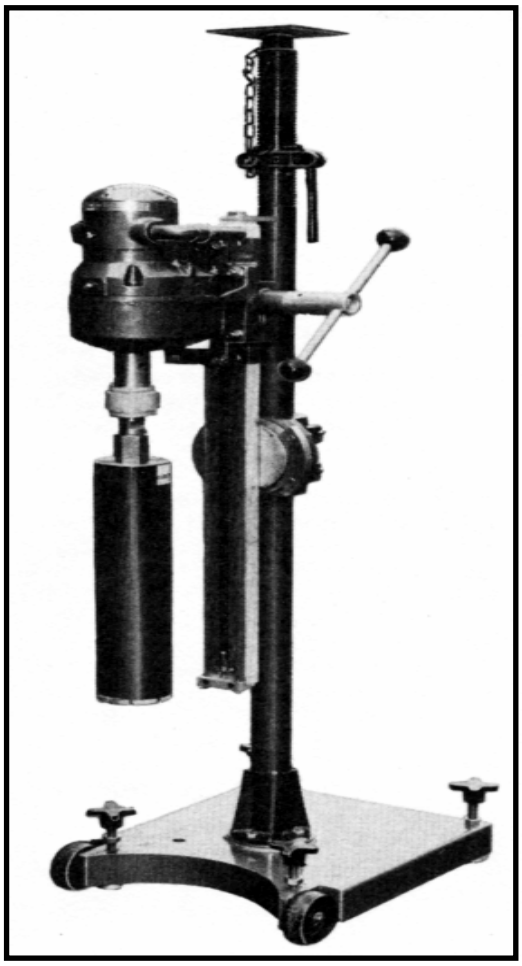
شكل (٩-١٥) قياس معاير مرونة الخرسانة بإستخدام الموجات فوق الصوتية.

٩-٤ إختبار القلب الخرسانى Core Test

يعتبر هذا الإختبار إختباراً نصف متلف ويستخدم لتعيين مقاومة الضغط للخرسانة بصورة حقيقية وواقعية ويكون ذلك بواسطة إختبار عينة منتزعة (القلب الخرسانى) من بعض الأعضاء الإنشائية الأساسية (عادة الأعمدة - الكمرات).

الجهاز عبارة عن مثقاب به آلة ثقب إسطوانية هى عبارة عن إسطوانات بأقطار مختلفة مزودة بفدية من سبيكة خاصة مخلوطة ببرادة الماس (ألماظة) ولها خاصية القطع فى الخرسانة اثناء دوران الإسطوانة بواسطة الجهاز الذى يعمل بالضغط الهيدروليكى (شكل٩-١٦).





شكل (٩-١٦) جهاز القلب الخرسانى و أخذ عينة أفقية من حائط.

حجم العينة Size of Core: يعتبر قطر العينة ١٥٠ مم هو القياسى إذا كانت الخرسانة من القوة بحيث لا تتأثر بالكسر أثناء إنتزاع العينة من الخرسانة. وقطر ١٠٠ مم هو الشائع الإستخدام. ولايقل قطر العينة عن ثلاثة أضعاف أكبر مقاس للركام بها. وتكون نسبة طول العينة إلى قطرها فى المدى من ١ إلى ٢ والنسبة المفضلة تكون من ١ إلى ١,٢ وعموماً فإن طول العينة يلزم أن لا يقل عن قطرها.

إستخراج العينة Drilling: يجب أن تستخرج العينة عمودية على السطح الموجود فيه ويدون رقم العينة ومكانها وإتجاه أخذها مباشرة. ويجب أن يملء مكان العينات المأخوذة وفقاً للأسس الفنية بمونة غير قابلة للإنكماش وذات مقاومة عالية لتجنب حدوث أى ضعف للعنصر تحت الإختبار. شكل (٩-١٧) يبين شكل مجموعة من القلوب الخرسانية المستخرجة قبل إعدادها للاختبار.

فحص العينة Examination: تفحص العينات لتحديد الآتى :

- درجة دمك الخرسانة .... وتصنف جيد / متوسط / ضعيف.
- حجم الفراغات والتعشيش وأماكن وجودها وإتجاهها وتحديد أسبابها وهل نقص فى المونة أو نقص فى الدمك أو أنفصال حبيبى. ويتم توصيف حجم الفراغات كالآتى:
صغيرة من ٠,٥ إلى ٣ مم ، متوسطة من ٣ إلى ٦ مم ، كبيرة إذا كان أكبر من ٦ مم.

- وصف الركام بالعينة (الحجم و النوع و حالة السطح و الشكل).
- توزيع الحبيبات الخرسانية.
- تركيز الركام بالنسبة للمونة.

قياس العينة Measurement:

- القطر المتوسط: يؤخذ القطر عبارة عن متوسط لعدد ٦ قراءات كل قرائتين عند مستوى واحد ومتعامدتين. إحدى القرائتين فى المنتصف وواحدة عند ١/٤ الإرتفاع من الناحيتين. وعموماً لاتختبر العينة التى يزيد التفاوت فى القطر لها عن ٣% أو التى يقل طولها عن قطرها.

- الطول: يقاس أكبر وأقل طول للعينه بعد إستخراجها و يقاس الطول بعد وضع الغطاء Cap على نهايتى العينه إلى أقرب ٥ مم. وفى العينات التى يزيد طولها عن ضعف قطرها فتقطع الزيادة فى الطول عمودياً على محور العينة قبل إختبارها وقبل تجهيز نهايتيها.

- التسليح Reinforcement: يقاس موضع أى حديد تسليح موجود بالعينة وذلك بقياس المسافة من محور السيخ حتى النهاية القريبة للعينه حتى أقرب ٢مم. وإذا وجد أكثر من سيخ فتحدد المسافات بين أسياخ حديد التسليح.

تجهيز سطح العينة (نهايتى القلب) End Preparation

- يتم تجهيز السطح حتى يكون مستوياً تماماً وأفقياً لإستخدامه فى ماكينة الإختبار ويتم ذلك أما بنشر نهايتى العينة أو تجليخهما أو بعمل غطاء Cap بسمك قليل لايزيد عن ١٠مم كما بشكل (٩-١٨) (يلاحظ أن لا ينكسر قبل إنهيار العينه عند إختبارها للضغط) بإحدى المون الآتية:

١- مونة الأسمنت والرمل بنسبة ٣ إلى ١

تتكون هذه المونة من ثلاثة أجزاء من الأسمنت الألومينى أو الأسمنت فائق النعومة مع جزء واحد من الرمل الناعم الذى يمر من منخل ٠,٣ مم. تصب هذه المونة بوضع حلقة مستوية وأفقية حول العينة ثم تصب المونة ويسوى سطحها ويوضع فوقها قطعة مسطحة من الزجاج المستوى (سمك ٨مم) أو من الحديد بعد دهانها بالزيت وفى اليوم الثانى تكرر العملية للطرف الآخر من العينة.

٢- مونة الكبريت والرمل بنسبة ١ إلى ١

تتكون هذه المونة من جزئين متساويين بالوزن من الكبريت والرمل الناعم الذى يمر من منخل ٠,٣ مم و يحجز على منخل ٠,١٥ مم وذلك مع نسبة من الكربون الأسود مقدارها ١ : ٢ %. يسخن الخليط لدرجة حرارة ١٣٠ - ١٥٠ مº ثم تترك لتبرد ببطء مع التقليب المستمر. يصب الخليط على مستوى أفقى من الحديد الأملس المدهون سطحه بزيت البرافين. توضع العينة فوق المونة رأسيا تماما بعد عدة ثوان يزال الجزء الزائد حول العينة من المونة ثم ترفع العينة وتكرر العملية بسرعة للطرف الآخر.

شكل (٩-١٧) مجموعة من القلوب الخرسانية المستخرجة.

شكل (٩-١٨) عمل غطاء لأطراف القلب الخرسانى.

إجراء الإختبار

- يتم إجراء الإختبار مباشرة بعد إستخراج العينات من الماء (أى بعد وضعها فى الماء لمدة لا تقل عن ٤٨ ساعة) وهى مبللة.
- ينظف مكان العينة بالماكينة وأسطح العينة من أى أتربة أو عوالق.
- توضع العينة رأسياً تماماً فى محور الماكينة.
- لا توضع أى قطع مساعدة أعلى العينة.
- يؤثر الحمل على العينة بمعدل منتظم يتراوح بين ٢ : ٤ كج/سم^{٢}/ثانية ويستمر حتى حدوث الكسر.
- يتم عمل وصف لحالة الإنهيار.

حساب النتائج

يتم حساب مقاومة الضغط لعينات القلب الخرسانى و تقديرها لنتائج مكعبات الموقع كما جاء بالمواصفات القياسية المصرية رقم ١٦٥٨-١٩٩٥ كما يلى:

أولاً: تحسب مقاومة الضغط لكل عينة بقسمة أقصى حمل تتحمله العينة على مساحة مقطع العينة وتقرب النتيجة إلى أقرب ٥ كج/سم٢.

$$f_c = P / A$$

حيث A هى المساحه المحسوبة من القطر المتوسط ، P هى حمل الكسر.

ثانياً: يتم حساب الإجهاد المقدر لنتائج مكعبات الموقع وذلك بعمل التصحيح الخاص بالتأثيرات الآتية:

- تأثير نسبة (الإرتفاع/القطر).
- تأثير إتجاه أخذ العينة بالنسبة لإتجاه الصب.
- تأثير وجود حديد تسليح بالعينة.

حيث نحصل على الإجهاد المقدر لنتائج مكعبات الموقع وذلك بضرب قيمة f_c المحسوبة سابقاً فى معاملى التصحيح (أ) ، (ب) أو أحدهما حسب ما تتطلبه حالة القلب الخرسانى المختبر كما سيتم توضيحه فيما بعد.

تأثير كل من نسبة (الإرتفاع/القطر) ، وإتجاه أخذ العينة

$$\text{عامل التصحيح (أ)} = \frac{\text{د}}{\text{١,٥ +(ق/ع)}}$$

حيث (د) مقدار ثابت

= ٢,٥٠ للعينات التى تقطع ويكون محورها عمودى على إتجاه الصب مثل الأعمدة والحوائط.

= ٢,٣٠ للعينات التى تقطع ويكون محورها فى إتجاه الصب مثل البلاطات والأرضيات.

(ق/ع) هى النسبة بين قطر العينة و إرتفاعها.

والجدول الآتى يوضح بعض القيم لعامل التصحيح (أ).

نسبة إرتفاع العينة على قطرها	عامل التصحيح (أ)	
١/ (ق/ع)	أعمدة وحوائط	بلاطات وأرضيات
١	١,٠	٠,٩٢
١,٢	١,٠٧١	٠,٩٨
١,٤	١,١٢٩	١,٠٤
١,٦	١,١٧٦	١,٠٨
١,٨	١,٢١٦	١,١٢
٢	١,٢٥٠	١,١٥

تأثير وجود حديد تسليح عمودى على محور العينة

١ـ حالة وجود سيخ واحد:

$$\text{عامل التصحيح (ب)} = ١,٠ + ١,٥ \frac{\text{ق ح} \times \text{س}}{\text{ق} \times \text{ع}}$$

حيث:

ق ح هى قطر سيخ الحديد.
س المسافة بين محور سيخ الحديد والنهاية القريبة للعينة.
ق قطر عينة القلب الخرسانى.
ع إرتفاع عينة القلب الخرسانى بعد إعداد النهايات.

٢ـ حالة وجود سيخين متقاربين:

العينات التى تحتوى على سيخين لا تزيد المسافة بينهما على قطر السيخ الأكبر فتطبق المعادلة السابقة لحساب عامل التصحيح (ب) مع الأخذ فى الإعتبار أكبر قيمة (ق ح × س) لأيهما.

٣ـ حالة وجود سيخين متباعدين:

العينات التى تحتوى على سيخين تزيد المسافة بينهما على قطر السيخ الأكبر فيكون التأثير المجمع لهما كالآتى:

$$\text{عامل التصحيح (ب)} = ١,٠ + ١,٥ \frac{\text{مجـ (ق ح} \times \text{س)}}{\text{ق} \times \text{ع}}$$

والجدول الآتى يوضح بعض القيم لعامل التصحيح (ب) فى حالة وجود سيخ واحد بعينة قلب قطرها ١٠٠ مم وإرتفاعها ١٢٠ مم.

قطر السيخ (مم)	المسافة بين محور السيخ والنهاية القريبة للعينة (مم)				
	٢٠	٤٠	٦٠	٨٠	١٠٠
١٢	١,٠٣٠	١,٠٦٠	١,٠٩٠	١,١٢٠	١,١٥٠
١٦	١,٠٤٠	١,٠٨٠	١,١٢٠	١,١٦٠	١,٢٠٠
١٩	١,٠٤٨	١,٠٩٥	١,١٤٣	١,١٩٠	١,٢٣٨
٢٢	١,٠٥٥	١,١١٠	١,١٦٥	١,٢٢٠	١,٢٧٥
٢٥	١,٠٦٣	١,١٢٥	١,١٨٨	١,٢٥٠	١,٣١٣

تقرير الإختبار

يجب أن يشتمل التقرير الخاص بنتائج القلب الخرسانى على الآتى:

- تاريخ أخذ العينة.
- القطر المتوسط للعينة.
- الطول بعد عمل الغطاء.
- مقاومة الضغط المقاسة.
- مقاومة الضغط المقدرة للمكعب.
- وصف نوع الركام.
- درجة دمك الخرسانة.
- حجم ومقاس حديد التسليح وموضعه إن وجد.
- عمر الخرسانة (إذا أمكن).
- أكبر وأقل طول للعينة المستخرجة.
- طريقة عمل الغطاء.
- معامل التصحيح للعينات الإسطوانية.
- شكل الخرسانة وشكل الكسر الناتج.
- توزيع المواد بالخلطه الخرسانية.
- صورة أو صور للعينات ترفق مع التقرير.

القبـــول

- أولاً يتم عمل ثلاث عينات للخرسانة المراد إختبارها.
- تعتبر الخرسانة مقبولة إذا كان متوسط المقاومة المحسوبة لثلاثة قلوب لا يقل عن ٧٥٪ من المقاومة المطلوبة.
- ويشترط أيضاً أن لا تقل المقاومة المحسوبة لأية عينة عن ٦٥٪ من المقاومة المطلوبة.
- إذا لم يتحقق ذلك يجرى إختبار تحميل.

٩-٥ إختبار التحميل Loading Test

الغرض من الإختبار هو إختبار كفاءة العنصر الإنشائى فى تحمل الأحمال التصميمية التى صُمم من أجلها. ويجرى الإختبار على الكمرات أو البلاطات أو الأسقف أو المنشأ ككل. أما العناصر الغير معرضه لعزوم إنحناء مثل الأعمدة أو القواعد يتم تقييم أمانها عن طريق التحليل الإنشائى ولا يجوزعمل إختبارات تحميل لها.

❐ متى يتم إجراء هذا الإختبار ؟

- إذا كان هناك شك فى كفاءة المنشأ.
- إذا كانت هناك أسباب تدعو إلى ذلك مثل وجود هبوط غير منتظم فى أجزاء من المنشأ.
- إذا فشلت نتائج القلب الخرسانى.
- إذا نُص على ذلك فى المواصفات والإشتراطات الخاصة بالمشروع.

ولا يتم إجراء الإختبار قبل مرور ستة أسابيع من إبتداء تصلد الخرسانة.

❐ القياسات المطلوبة:

- يقاس سهم الإنحناء قبل إجراء الإختبار.
- يقاس سهم الإنحناء أثناء التحميل التدريجى
- يقاس سهم الإنحناء بعد إجراء التحميل ومرور ٢٤ ساعة.
- يقاس عرض الشروخ بعد التحميل.
- يقاس سهم الإنحناء بعد ٢٤ ساعة من رفع الأحمال.

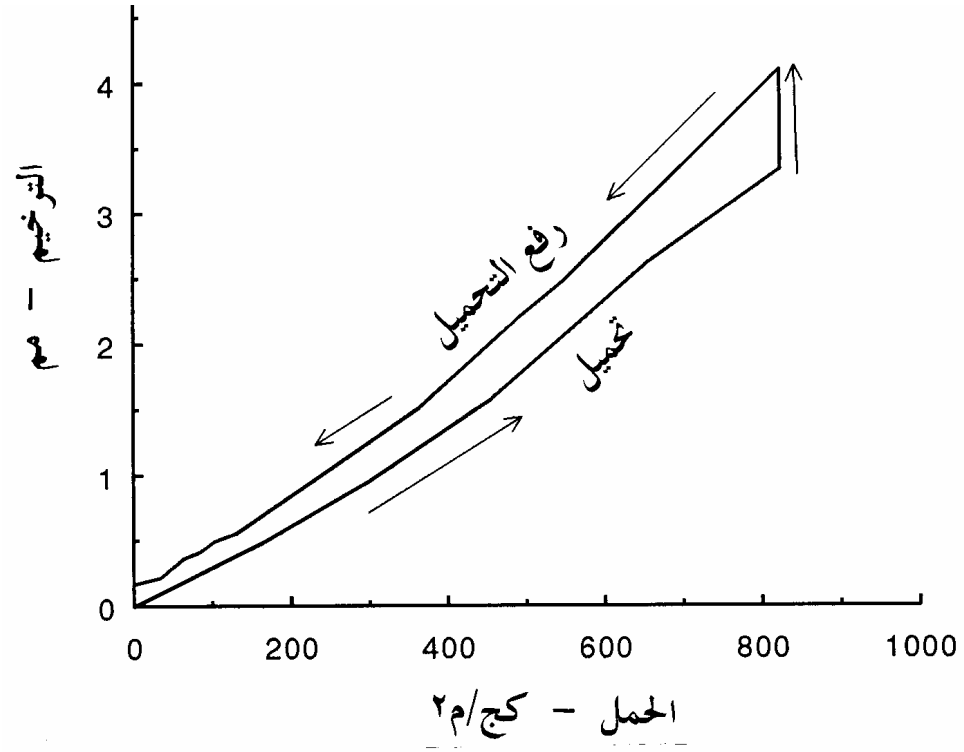
ويمكن رسم العلاقات بين الحمل وسهم الإنحناء وكذلك العلاقة بين الزمن وسهم الإنحناء كما بشكل (٩-١٩)

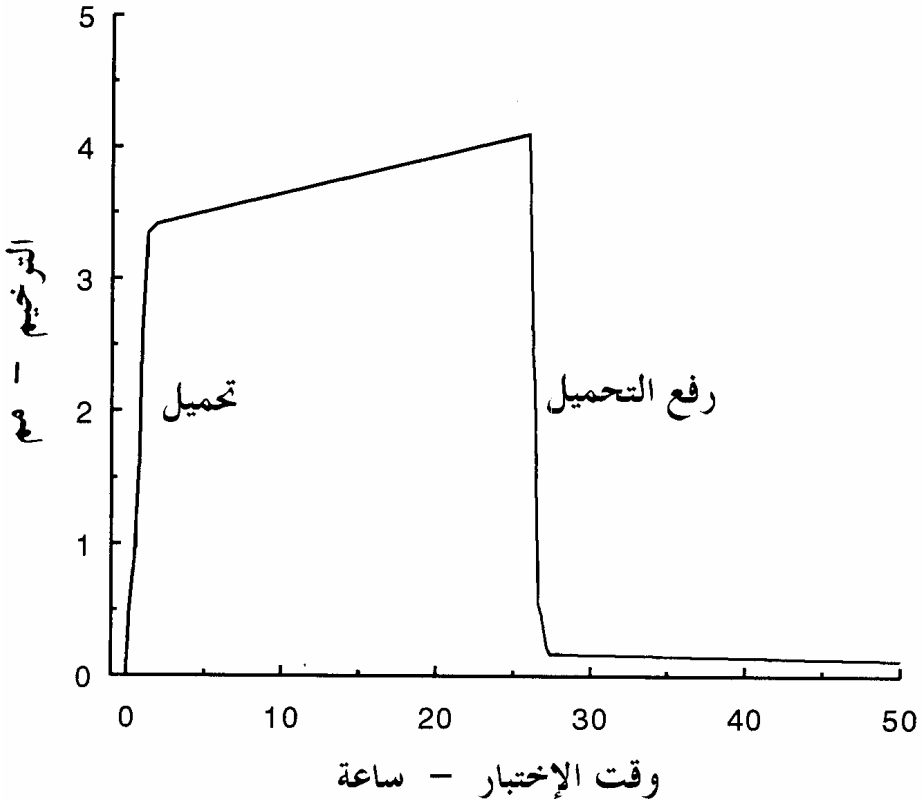
❐ الأحمـــال:

يعرض جزء المنشأ المراد إختباره لحمل مقداره:

$$٠,٨٥ \left[١,٤ \text{ (الأحمال الدائمة)} + ١,٦ \text{ (الأحمال الحية)} \right]$$

مع مراعاة إجراء التحميل على أربعة مراحل متساوية تقريباً بدون إحداث أى صدمات أثناء التحميل. وتشمل الأحمال الدائمة وزن الأرضيات و القواطيع والبياض .. إلخ ، ولاتشمل الأحمال الموجودة فعلاً وقت إجراء الإختبار مثل الوزن الذاتى للبلاطة أو ما شابه. ويتم تحميل العنصر الإنشائى المطلوب إختباره والعناصر المجاورة له بحيث نحصل على أحرج وضع لتحميل هذا العنصر Critical Load.





شكل (٩-١٩) العلاقة بين الحمل - سهم الإنحناء - الزمن لإختبار التحميل.

❐ الإحتياطـات أثناء التحميل:

توضع قوائم مثبتة تحت الأجزاء المحملة بشرط ترك مسافة تسمح بالإنحناء للجزء موضوع الإختبار وأن تكون بالعدد الكافى لتتحمل الحمل بأكمله.

❐ شروط القبـول:

يعتبر المنشأ قد إستوفى شروط الأمان إذا تحقق ما يلى :

١- إذا كانت أكبر قيمة لسهم الإنحناء δ_{max} فى العنصر المختبر أقل من أو تساوى:

$$\delta_{max} \leq L_t^2 / 20000\ t \quad \text{..... mm}$$

حيث L_t = البحر مقاس بالمليمتر ، t سمك العنصر بالمليمتر.

* تؤخذ L_t فى حالة الكوابيل بضعف المسافه لبحر الكابولى.

* تؤخذ L_t هى طول الإتجاه الأصغر فى حالة البلاطات اللاكمرية أو ذات الإتجاهين.

٢- إذا زاد سهم الإنحناء الأقصى عن القيمة المحسوبة بالمعادلة السابقة فيجب أن يكون الجزء المسترجع من سهم الإنحناء الأقصى بعد ٢٤ ساعة من رفع الحمل لا يقل عن ٧٥% من قيمة سهم الإنحناء الأقصى - وعرض الشروخ فى حدود المسموح به.

- إذا لم يختف ٧٥% من سهم الإنحناء الأقصى فيجب إعادة الإختبار بنفس الطريقة السابقة بعد مدة لا تقل عن ٧٢ ساعة على رفع وإزالة أحمال التجربة الأولى.

- إذا لم يختف ٧٥% من سهم الإنحناء الأقصى الذى ظهر أثناء الإختبار الثانى أو أن تكون الشروخ أكبر من المسموح به يعتبر المنشأ غير مقبول.

إذا ظهر على أى جزء من المنشأ أثناء الإختبار أو بعد رفع الحمل أى شىء من الآتى:

١- علامة من علامات الضعف.
٢- سهم إنحناء غير منتظر.
٣- خطأ فى طريقة الإنشاء.
٤- إتساع أكبر غير منتظر للشروخ.

فيتبع المصمم الحلول التالية

١- وضع ركائز إضافية إن أمكن.
٢- عمل تخفيض فى الأحمال الحية.
٣- تحسين توزيع الأحمال.
٤- عمل التخفيض الممكن فى الأحمال الميتة.
٥- عمل تقويات للعناصر الأساسية إن أمكن.

❐ رفض الأعمال

يعتبرالمنشأ غير صالح للإستعمال للغرض الذى أنشئ من أجله إذا كانت جميع هذه الإجراءات غير كافيه.

٩-٦ عدم تحقيق الخرسانة لمتطلبات التصميم

فى حالة عدم تحقيق مقاومة الخرسانة لمتطلبات المشروع سواء للعينات المأخوذة من الخرسانة أثناء التنفيذ مثل المكعبات أو للإختبارات غير المتلفة فإنه يتم الرجوع إلى مصمم المشروع أو الإستشارى لعمل التحليل والمراجعة الإنشائية على ضوء المقاومة الفعلية للخرسانة المنفذة بالمنشأ مع الأخذ فى الإعتبار الآتى:

١- إذا تحقق من خلال التحليل الإنشائى أن المنشأ بجميع عناصره يمكنه تحمل الأحمال المصمم عليها وأن أدائيته وسلوك عناصره تحت هذه الأحمال وبحالة خرسانته الراهنة مطابقة للحدود المنصوص عليها بكود الممارسة المعتمد فإنه يمكن إعداد تقرير أمان وسلام للمنشأ. هذا ويمكن إضافة بنود خاصه بحماية الخرسانة ومتانتها قد يراها الإستشارى للحفاظ على المنشأ مع الزمن مع تحميل المقاول تكاليف هذه الأعمال المستجدة وكذلك التعويض المالى المناسب لعدم تحقيقه متطلبات العقد.

٢- إذا لم يتحقق للمنشأ من خلال التحليل الإنشائى الكامل وعلى ضوء حالة الخرسانات المنفذة تحمله للأحمال المصمم عليها نظراً لضعف مقاومة الخرسانة فإنه يمكن للإستشارى دراسة الحلول الآتية:

أ- وضع ركائز إضافية إن أمكن بحيث لا تؤثر تأثيراً غير مقبول على الناحية المعمارية أو الجمالية أو الوظيفية للمنشأ.

ب- عمل التخفيض الممكن فى الأحمال الميته وغيرها وتحسين توزيع الأحمال وتعديل ترتيب الأحمال المركزة.

ويعتبر المنشأ غير صالح للإستعمال للغرض المصمم من أجله إذا كانت جميع هذه الإجراءات لا تزال غير كافية.

٩-٧ تقارير سلامة وأمان المنشآت

تتحقق سلامة وأمان المنشأ بالدراسة والإختبارات للتربة المقام عليها وبالتصميم الجيد آخذين فى الإعتبار عناصر الحماية طبقاً للظروف المحيطة وظروف الإستخدام وبإستخدام مواد مطابقة للمواصفات القياسية وبالتنفيذ السليم فى جميع مراحله من تشوين ومعايرة وخلط ونقل وصب ودمك ومعالجة ومن شدات قوية وسليمة تحقق الأبعاد للعناصر المختلفة من توزيع للتسليح بالأقطار والأطوال والأشكال المصمم عليها المنشأ كما تتحقق السلامة من عدم تغيير الإستخدام المصمم له المنشأ أو عمل تعديلات وتعليات غير مدروسة أو من عدم غياب الصيانة أو قصورها وكذلك إذا اخذت الكوارث الطبيعية فى الإعتبار.

أسباب طلب التقريـر

عادة يطلب تقرير عن سلامة وأمان منشأ من جهة إستشارية فى حالات أكثرها شيوعاً الآتى:

١- تسليم منشأ قائم من جهة قامت بالتنفيذ الى جهة لم تشرف على التنفيذ.

٢- عند الرغبة فى أعمال التعليات.

٣- فى حالة حدوث عيوب تشير إلى عدم الأمان الإنشائى للمبنى سواء على هيئة ميل للمبنى أو هبوط أو تزحلق أو إلتواء أو شروخ بالعناصر الإنشائية أو الحوائط لها دلالات تشير إلى عدم أمان المنشأ.

٤- فى حالة حدوث كوارث غير متوقعة كالزلازل يواكبها ظهور عيوب بالمنشأ.

هذا وتجدر الإشارة إلى أنه فى حالة إشراف جهة معتمدة على تنفيذ مبنى فى جميع مراحلة من جسات وأساسات وشدات وتسليح وإشراف على الصب ولكن عنصر القصور يكون فقط فى عدم وجود نتائج لمقاومة الخرسانة أو عند عدم تحقيق نتائج الخرسانة لمتطلبات المصمم فإن المطلوب هو عمل الإختبارات غير المتلفة لتحديد مقاومة الخرسانة إستعواضاً للمقاومات غير المتوفرة للخرسانة وتصبح هذه النتائج ضمن المستندات المتكاملة للإشراف على تنفيذ المنشأ والتى يمكن للقائمين على الإشراف الكامل تقديم تقرير لسلامة وأمان المنشأ على ضوئها .

محتويات التقريـــر

عند طلب إعداد تقرير عن سلامة وأمان منشأ قائم للإستخدام المصمم عليه وللظروف المحيطة من جهة إستشارية فيجب أن يشتمل التقرير على الآتى:

١- توصيف المبنى توصيفاً كاملاً معمارياً وإنشائياً وكذلك المنطقة المحيطة.

٢- تحديد مجال إستخدام المنشأ.

٣- المستندات التى تم الرجوع اليها (لوحات و تقارير تربة - تقارير سابقة - مستندات تنفيذ).

٤- حصيلة المناقشات مع الجهة الطالبة والمستخدمين وغيرهم.

٥- رفع وتسجيل دقيق مدعم بكروكيات وصور إن أمكن للعيوب الظاهرة بالمبنى ككل وكذلك بجميع وحداته وعناصره على كامل إرتفاعه شاملة الأساسات.

٦- مطابقة ماتم تنفيذه مع اللوحات الإنشائية والمعمارية وغيرها ، وفى حالة عدم توفر هذه اللوحات تتم عملية رفع دقيق للمبنى إنشائياً ومعمارياً.

٧- المراجعة الإنشائية للتصميم من واقع اللوحات كمرحلة أولى يليها المراجعة الإنشائية على ضوء ماتسفر عنه الإختبارات.

٨- إختبارات غير متلفة للخرسانة لتحديد مقاومتها للضغط وذلك بأجهزة الإختبارات غير المتلفة بعد عمل المعايرات اللازمة لها وبناءاً على مواصفاتها القياسية وأن يتم ذلك بواسطة متخصصين ذوى خبرة وتفهم لطبيعة إستخدام هذه الأجهزة والعوامل المؤثرة علىنتائجها وكيفية تحليل هذه النتائج.

٩- يمكن أخذ عينات من الخرسانة وتحليلها كيميائياً لتحديد نسب الأملاح الضارة بها ومطابقتها بالحدود المسموح بها بالكودات وهذه الإختبارات الكيميائية تمثل أهمية كبيرة فى متانة المنشآت.

١٠- الكشف عن صلب التسليح لتحديد مدى مطابقته للوحات من حيث وضعه وأقطاره وأنواعه وحالة الصدأ به إذا وجدت والغطاء الخرسانى.

١١- عمل جسات للتربة لتحديد حالتها وقت المعاينة وخواصها وتحملها وكذلك دراسة تربة الإحلال إن وجدت.

١٢- قد يتم عمليات تحميل لبعض عناصر المنشأ مثل البلاطات والكمرات والكوابيل إذا رأى الإستشارى ذلك.

****

الباب العاشر

الإنكماش و الزحف

Shrinkage & Creep

١٠-١ الإنكماش Shrinkage

تعريف

الانكماش هو خاصية من خواص الخرسانة التى تتصلد فى الهواء. ولايسبب الإنكماش مشاكل إلا إذا كان هناك قيداً على الحركة حيث يسبب إجهادات شد داخل الخرسانة مما يؤدى إلى تشرخها ويمكن التقليل من الآثار الضارة للإنكماش عن طريق:

أ - المعالجة الصحيحة والمبكرة للخرسانة Effective Curing

ب- عمل وصلات حركة Movement Joints

ج- وضع أسياخ تسليح لمقاومة الإنكماش Shrinkage Reinforcements

أسباب حدوث الانكماش

يحدث الانكماش فى الخرسانة نتيجة:

أ- هبوط الأجزاء الصلبة فى الخلطة وفقد الماء الحر من الخرسانة الطازجة مما يسبب ما يعرف بإسم الإنكماش اللدن.

ب- الإتحاد الكيميائى بين الأسمنت والماء يؤدى إلى حدوث الإنكماش الذاتى.

ج - جفاف الخرسانة نتيجة فقد الماء يسبب حدوث إنكماش الجفاف.

أنواع الانكماش

يوجد ثلاثة أنواع من الإنكماش هى:

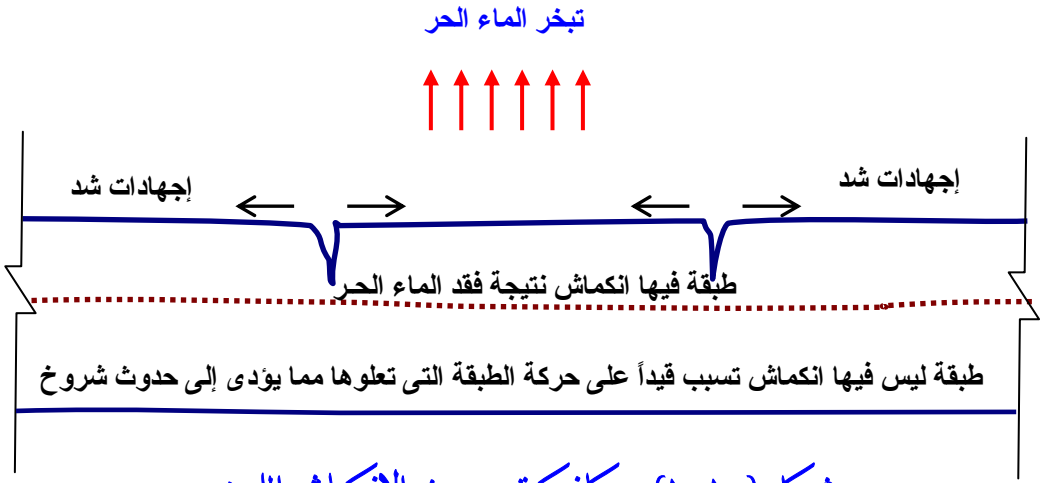
أ- الانكماش اللدن Plastic Shrinkage

ب- الإنكماش الذاتى Autogenous Shrinkage

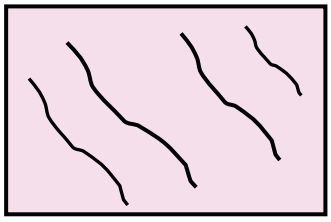
ج- الإنكماش بالجفاف Drying Shrinkage

أولاً: الإنكماش اللدن Plastic Shrinkage

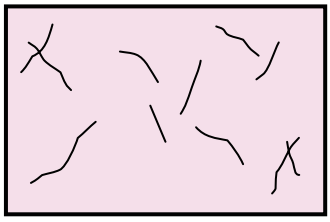
يحدث الانكماش اللدن قبل تصلد الخرسانة خلال بضعة ساعات من صب الخرسانة وسببه هو فقد الماء الحر من الخلطة وهبوط الأجزاء الصلبة (الركام) إلى أسفل مما يؤدى إلى صعود الماء إلى أعلى وتبخره. فعندما يكون معدل تبخر الماء من سطح الخرسانة أسرع من معدل الإدماء (نزوح الماء إلى سطح الخرسانة) يحدث الإنكماش اللدن (شكل ١٠-١). ولذلك فإن الإنكماش اللدن يُلاحظ أكثر فى البلاطات والأعضاء ذات المساحه السطحية الكبيرة المعرضة للجو الحار أو الرياح. ويؤدى هذا النوع من الإنكماش إلى حدوث شروخ سطحية بالخرسانة. ويمكن منع شروخ الإنكماش اللدن بتقليل الفاقد من الماء السطحى عن طريق المعالجة المبكرة والفعالة. وتشرخ الخرسانة اللدنة عادة يأخذ إحدى صور ثلاث كما فى شكل (١٠-٢).



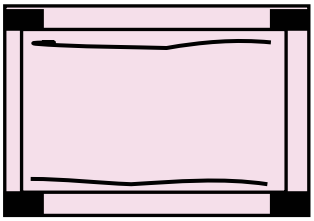
شكل (١٠-١) ميكانيكية حدوث الانكماش اللدن.



شروخ قطرية مائلة بالنسبة لحروف البلاطة وتكون المسافة بين هذه الشروخ من ٢٠ إلى ٢٠٠ سم.



شروخ موزعة توزيعاً غير منتظم ولا تصل إلى الحروف الحرة للبلاطة.



شروخ تتبع شكل توزيع حديد لتسليح أو التغير فى عمق القطاع الخرسانى.

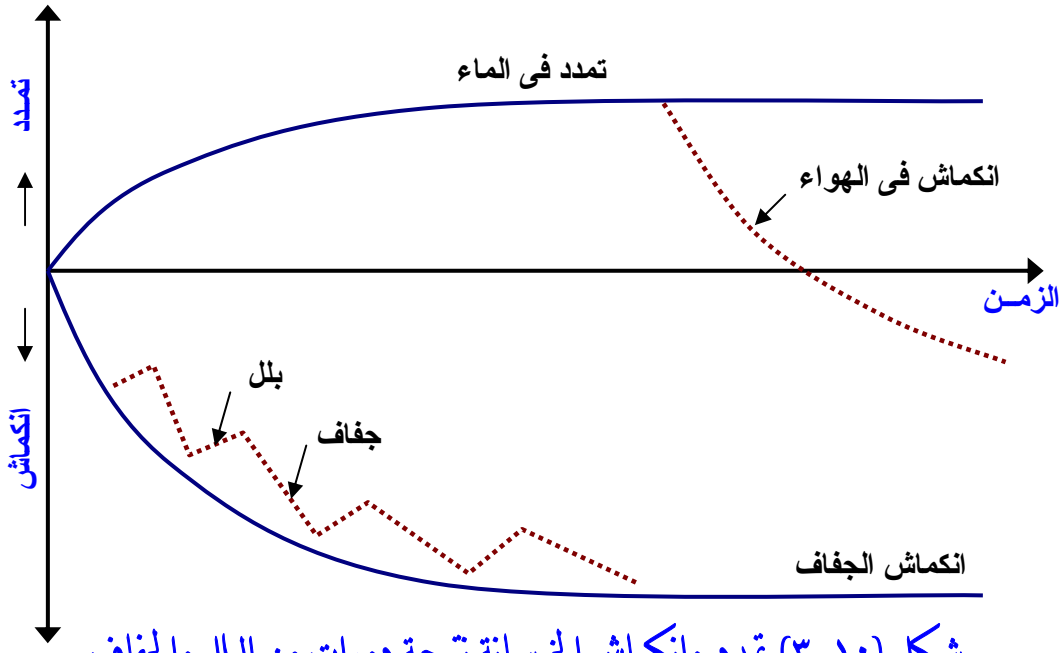
شكل (١٠-٢) أشكال الإنكماش اللدن.

ثانياً: الإنكماش الذاتي Autogenous Shrinkage

عندما تبدأ عملية الإماهة Hydration بين الأسمنت والماء يحدث نقص فى حجم المونة لأن المونة المتصلدة حجمها أقل من مجموع حجمى الماء والأسمنت فى الخلطة مما يؤدى إلى إنكماش الخرسانة الداخلية وهو ما يعرف بالإنكماش الذاتى لأنه يحدث ذاتياً نتيجة الإتحاد الكيميائى بين الأسمنت والماء. أما إذا تمت معالجة الخرسانة تحت الماء فإن الماء الداخل فى التفاعل يتم إستعاضته من الماء الخارجى وتمتص العجينة الأسمنتية ماءً زائداً مما يؤدى إلى زيادة طفيفة فى حجم الخرسانة وليس إنكماشاً كما فى شكل (١٠-٣). أما الخرسانة التى تعالج فى الهواء أو تترك بدون معالجة فلايتم إستعاضة الماء الداخل فى التفاعل ولكن على العكس يُسحب الماء من العجينة المتصلدة ويحدث إنكماشاً إضافياً هو إنكماش الجفاف. والإنكماش الذاتى يتأثر بعدة عوامل منها : التركيب الكيميائى للأسمنت - كمية الماء فى الخلطة ودرجة الحرارة وقد تصل قيمة الإنكماش الذاتى إلى ١٠٠×١٠^{-٦} (٠,١مم لكل متر) ويحدث ٧٥ % منه فى الشهور الثلاثة الأولى من عمر الخرسانة.

ثالثا: إنكماش الجفاف Drying Shrinkage

عندما تتعرض الخرسانة المتصلدة - المعالجة فى الماء - للجفاف فإنها تفقد أولاً الماء الموجود فى الفجوات والشقوق الشعرية الداخلية ولا تبدأ فى الإنكماش إلا إذا إستمر الجفاف بحيث تفقد الماء الموجود بالعجينة المتصلدة ذاتها وهو ما يعرف بالإنكماش نتيجة الجفاف وقد تصل قيمة هذا الإنكماش إلى ١٥٠٠×١٠^{-٦} ومن أهم وظائف الركام فى الخلطة تقليل إنكماش مونة الأسمنت. والإنكماش بالجفاف يبدأ بمعدلات عالية ويستمر لمدة طويلة ولكن بمعدل يتناقص بإستمرار. ويمكن إفتراض أن نصف الانكماش الكلى نتيجة الجفاف يحدث فى السنة الأولى.



شكل (١٠-٣) تمدد وإنكماش الخرسانة نتيجة دورات من البلل والجفاف.

العوامل التى تؤثر على إنكماش الجفاف

١- مكونات الخلطة

بصفة عامة فإن الإنكماش يتناسب طردياً مع كمية الماء بالخلطة ويتناسب عكسياً مع كمية الركام بها كما بشكل (١٠-٤).

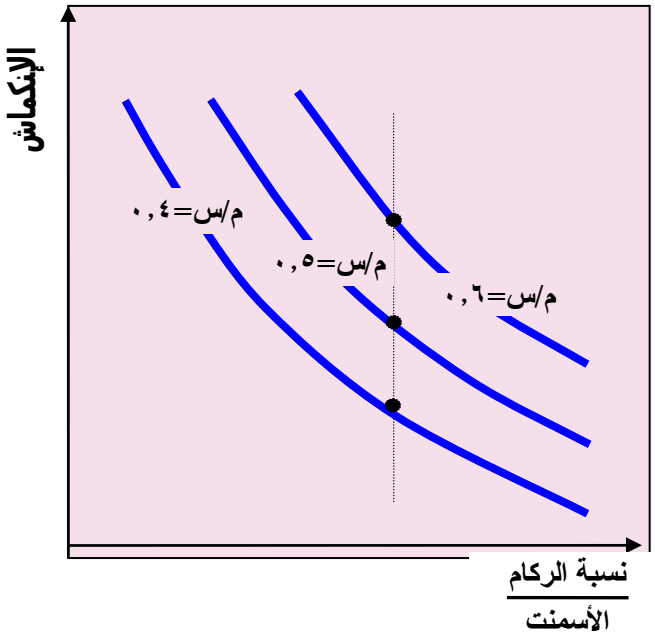
المـــاء: يحدث الإنكماش نتيجة فقد الماء إلى الجو المحيط. فكلما كان هناك ماء أكثر متاح للتبخر كلما زادت إمكانية الإنكماش أثناء الجفاف.

الأسمنت: أهمية الأسمنت بالنسبة للإنكماش ترجع فقط إلى أن كميته ونعومته تؤثر على كمية الماء فى الخلطة.

الركام: كلما زادت كمية الركام كلما زاد تأثير الركام على تقليل الإنكماش لمونة الأسمنت. كذلك فإن إستعمال الركام ذى مساحة سطحية أقل ما يمكن يساعد على تقليل محتوى الماء فى الخلطة وبالتالى يعمل على تقليل الإنكماش.

٢- معالجة الخرسانة

تعمل معالجة الخرسانة على تقليل الفاقد الحرارى وبالتالى تقليل فروق الحرارة فى الأعضاء الضخمة كما أنها فى نفس الوقت تقلل الفاقد من ماء الخرسانة وبالتالى تبطئ من معدل الإنكماش فى فترة المعالجة مما يقلل من إحتمالات التشرخ.



شكل (١٠-٤) تأثير الماء والركام على الإنكماش.

٣- حجم وشكل العضو الخرسانى

حيث أن الجفاف (فقد الرطوبة) يكون من سطح العينة فإن ذلك يعنى أنه كلما زادت المساحة السطحية لكل وحدة كتلة كلما زاد معدل إنكماش العضو. فالعضو الضخم السميك يستطيع الإحتفاظ بكمية من الماء أكبر من تلك التى تستطيع بلاطة رفيعة الإحتفاظ بها. وبالتالى يكون تأثير الإنكماش كبيراً وخطيراً فى حالة البلاطات وخاصة الرقيقة منها. ويمكن التعبير عن حجم العضو الخرسانى ومساحته السطحية بما يسمى بالبعد الإعتبارى للقطاع B الذى يقدر كما يلى:

$$B = 2Ac / Pc$$

حيث:

B = البعد الإعتبارى للقطاع - مم

Ac = مساحة المقطع الخرسانى - مم٢.

Pc = محيط المقطع الخرسانى المعرض للجفاف - مم

جدول (١٠-١) يوضح بعض القيم الإسترشادية لإنفعال إنكماش الجفاف وذلك فى حدود درجة رطوبة نسبية بين ٤٠ و ٨٥%.

جدول (١٠-١) قيم إسترشادية لإنفعال إنكماش الجفاف (مليمتر/ متر).

حـــالة الجـــو	جو جاف (الرطوبة حوالى ٥٥%)			جو رطب (الرطوبة حوالى ٧٥%)		
العمر المعتبر عنده الإنكماش	البعد الإعتبارى للقطاع B - مم			البعد الإعتبارى للقطاع B - مم		
	B ≥ 600	600>B>200	B ≤ 200	B ≥ 600	600>B>200	B ≤ 200
٣ - ٧ أيام	٠,٣١	٠,٣٨	٠,٤٣	٠,٢١	٠,٢٣	٠,٢٦
٧ - ٦٠ يوم	٠,٣٠	٠,٣١	٠,٣٢	٠,٢١	٠,٢٢	٠,٢٣
أكثر من ٦٠ يوم	٠,٢٨	٠,٢٥	٠,١٩	٠,٢٠	٠,١٩	٠,١٦

٤- درجة الحرارة والرطوبة

كلما قلت نسبة الرطوبة كلما زاد معدل وكمية الفاقد من الماء إلى سطح الخرسانة مما يؤدى إلى زيادة الإنكماش ونفس التأثير يحدث عند زيادة درجة حرارة الجو.

٥- التسليح

تنكمش الخرسانة المسلحة بدرجة أقل من إنكماش الخرسانة العادية نظراً لأن صلب التسليح يسبب قيداً على الحركة. وعلى ذلك فوظيفة أسياخ الإنكماش ليست فقط مقاومة إجهادات الشد الناتجة من الإنكماش وإنما تقليل الإنكماش نفسه كذلك.

اختبار التغير الحجمى للخرسانة بالجفاف والرطوبة
Drying Shrinkage & Moisture Movement Tests

يجرى هذا الاختبار لتعيين قيمة التغير فى طول العينة الخرسانية نتيجة تعرضها للزيادة فى الحجم بتأثير الرطوبة أو للنقص فى الحجم بتأثير الإنكماش بالجفاف.

عينات الإختبار: تستخدم عينات منشورية بطول يتراوح من ١٥ إلى ٣٠ سم ومقطع مستعرض حوالى٥×٥ سم أو ٧,٥ ×٧,٥ سم ويثبت فى منتصف المقطع عند كل من النهايتين على محور العينة كرة من الصلب لإمكان إجراء عملية قياس الطول بدقة بين سطحى الكرتين.

أولاً: إختبار الإنكماش بالجفاف Drying Shrinkage

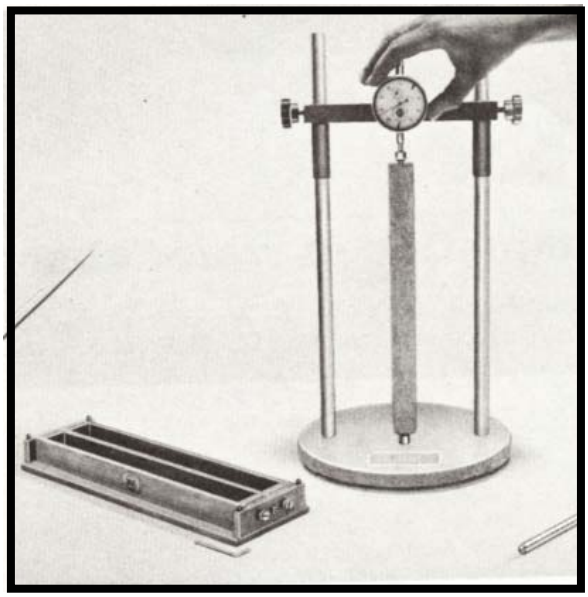
- طريقة إجراء هذا الإختبار هى أنه بعد رفع العينة من الماء (سواء كانت تعالج فى الماء بعد صبها أو كانت موضوعة فى الماء للتشبع بعد قطعها من الخرسانة ناضجة التصلد) يقاس طولها مباشرة بين الكرتين الصلب المثبتتين فى نهايتى العينة وذلك بتركيب العينة فى الجهاز المبين بشكل (١٠-٥) حيث يبين الميكرومتر أو مقياس التشكل قيمة التغير فى الطول المقاس عن طريق طول قياس معلوم لقضيب انفار Invar rod له طول مساو تقريبا لطول العينة وتكون دقة القياس لغاية ٠,٠٠٢٥ مم ثم يعين ذلك الطول الأولى الرطب للعينة L_1.
- تجفف العينة فى فرن درجة حرارته حوالى ٥٠ درجة مئوية وتكرر دورات التجفيف والتبريد وقياس الطول حتى تحصل على طول ثابت لا يتغير وتسجل القراءة النهائية L_2.
- يحسب انكماش الجفاف الأولى أو إنكماش الجفاف كنسبة مئوية كما يلى:

$$\text{Shrinkage } \% = \frac{L_1 - L_2}{L_1} \times 100$$

ثانياً: إختبار التمدد بالرطوبة Moisture Movement

تجفف العينة الخرسانية بنفس طريقة إختبار الإنكماش السابق ذكرها ويعين طولها الجاف الثابت وليكن L_3. تغمر العينة فى ماء درجة حرارته من ١٥ - ٢٠ م° بشرط أن يكون أحد الأوجه الكبيرة للعينة ظاهر تماما فوق سطح الماء. تترك العينة مغمورة لمدة ٤ أيام وبعدها ترفع من الماء ويقاس الطول النهائى الرطب للعينة وليكن L_4 يحسب قيمة التحرك بالرطوبة كنسبة مئوية كما يلى:

$$\text{Moisture Movement } \% = \frac{L_4 - L_3}{L_3} \times 100$$



شكل (١٠-٥) جهاز قياس التمدد والإنكماش.

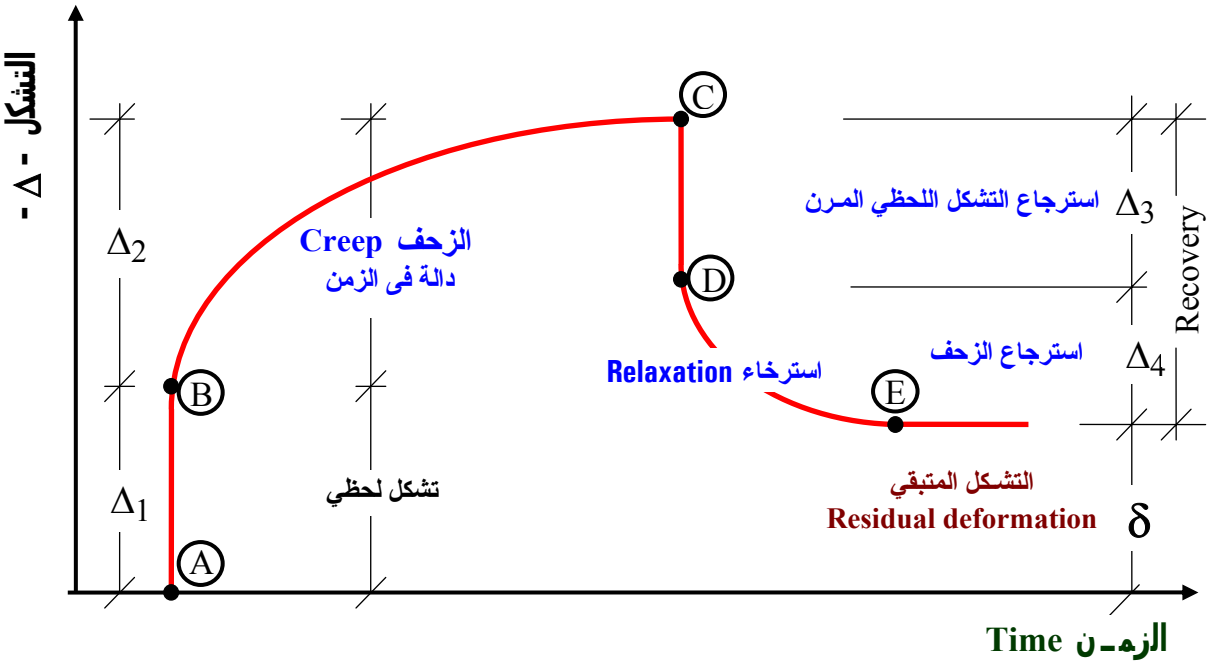
١٠-٢ الزحف Creep

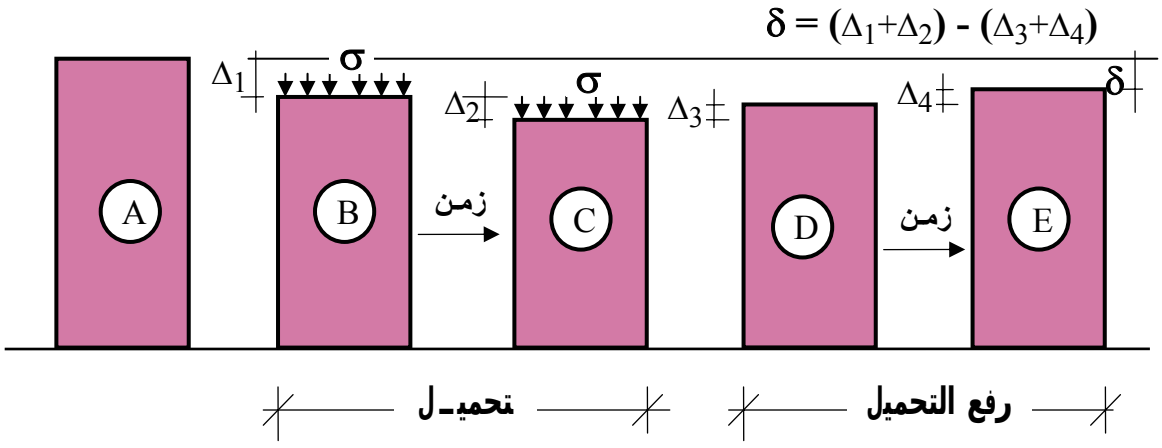
تعريف الزحف

هو الإنفعال غير المرن الذى يحدث مع مرور الزمن تحت تأثير إجهاد ثابت. أى أن الزحف يعتمد على الزمن Time-dependent وقد تصل قيمته إلى عدة أضعاف قيمة الإنفعالات اللحظية التى تحدث نتيجة أحمال التشغيل. الشكل (١٠-٦) يبين ميكانيكية حدوث الزحف.

- وقيمة الإنفعال الناتج من الزحف للخرسانة تتراوح من ٥ ×١٠-٦ إلى ٢٠ ×١٠-٦ وذلك لكل ١ كج/سم٢ إجهاد. ويمكن أخذ قيمة متوسطة للزحف الكلى للخرسانة على أساس ٠,٠١ مم *لكل متر لكل واحد كج/سم٢ إجهاد*. وبالتالى فإن إجهاداً للضغط مقداره ٣٠٠ كج/سم٢ يسبب زحفا مقداره ٠,٠٠٣ (أى أن عضواً طوله ١ متر إذا تعرض لإجهاد ثابت مقداره ٣٠٠ كج/سم٢ فإنه يحدث له تشكل مقداره ٣ مم نتيجة الزحف). ومن العوامل التى تؤثر على قيمة الزحف نوع الأسمنت المستخدم ومقاومة الخرسانة ونسبة الماء إلى الأسمنت فى الخلطة وكذلك الوقت الذى تم فيه أول تحميل للخرسانة وخواص المقطع الخرسانى وقيمة الرطوبة النسبية للجو المحيط بالمنشأ. وبصفة عامة فإن قيمة الزحف تقل كلما زادت مقاومة الخرسانة ، وقد وجد أن قيمة الزحف لخرسانة ذات مقاومة للضغط ٢٠٠كج/سم٢ يقدر بحوالى ١٨×١٠-٦ لكل ١كج/سم٢ إجهاد ، فى حين كانت قيمة الزحف المناظرة لخرسانة ذات مقاومة ٦٠٠ كج/سم٢ هى ٥×١٠-٦ فقط.

- يستمر الزحف مع الوقت فى الأعضاء المعرضة لأحمال ثابتة لسنوات عديدة ولكن معدل زيادة إنفعالات الزحف يقل حتى يصبح ضئيلا يمكن إهماله. وبالتقريب فإننا يمكننا أن نقول أن ربع قيمة الزحف الكلية تحدث فى أول شهر وأن نصف قيمة الزحف الكلية تحدث فى أول سنة. وأن قيمة الزحف بعد حوالى سبعة سنوات يزيد عن قيمة الزحف بعد عام بحوالى ٣٠% فقط. وتجدر الإشارة أن قيمة الزحف النهائى فى الشد تساوى تقريباً القيمة فى الضغط إلا أن معدل حدوث الزحف فى الشد يكون أسرع نسبياً من معدل حدوثه فى الضغط.





شكل (١٠-٦) ميكانيكية حدوث الزحف.

حساب قيمة الزحف

يمكن حساب القيمة الكلية للإنفعال الناتج عن أقصى زحف والإنفعال اللحظى المرن من المعادلة الآتية:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_o (1 + \varphi) = f_o (1 + \varphi) / E_c$$

حيث:

- ε_o = **الإنفعال اللحظى المرن الناتج عن التحميل الأولى ويساوى** f_o / E_c .
- ε_t = **الإنفعال الكلى عند زمن t.**
- φ = **معامل الزحف.**
- $\varphi\ \varepsilon_o$ = **إنفعال الزحف.**
- f_o = **إجهاد الخرسانة الإبتدائى عند التحميل.**
- E_c = **معاير مرونة الخرسانة عند عمر التحميل.**

وتؤخذ قيم معامل الزحف φ الإسترشادية من جدول (١٠-٢) وذلك بمعلومية الرطوبة النسبية للجو والبعد الإعتبارى للقطاع والعمر عند بدء التحميل.

جدول (١٠-٢) قيم إسترشادية لمعامل الزحف φ.

حـــالة الجـــو	جو جاف (الرطوبة حوالى ٥٥%)			جو رطب (الرطوبة حوالى ٧٥%)		
العمر المعتبر عنده التحميل	البعد الإعتبارى للقطاع B - مم			البعد الإعتبارى للقطاع B - مم		
	B ≥ 600	600>B>200	B ≤ 200	B ≥ 600	600>B>200	B ≤ 200
٣ - ٧ أيام	٢,٩٠	٣,٢٠	٣,٨٠	٢,١٠	٢,٤٠	٢,٧٠
٧ - ٦٠ يوم	٢,٥٠	٢,٨٠	٣,٠٠	١,٩٠	٢,٠٠	٢,٢٠
أكثر من ٦٠ يوم	٢,٠٠	١,٩٠	١,٧٠	١,٧٠	١,٦٠	١,٤٠

تأثـير الزحـف

لظاهرة الزحف فى الخرسانة تأثيرات ضارة وتأثيرات أخرى نافعة نوجزها فيما يلى:

التأثير الضار:

١- يزيد من قيمة الترخيم (Deflection) فى بعض الحالات.
٢- يعمل على توسيع الشروخ التى تنشأ من عوامل أخرى.
٣- زيادة الإنفعالات نتيجة الزحف قد يؤدى إلى تشريخ الخرسانة.

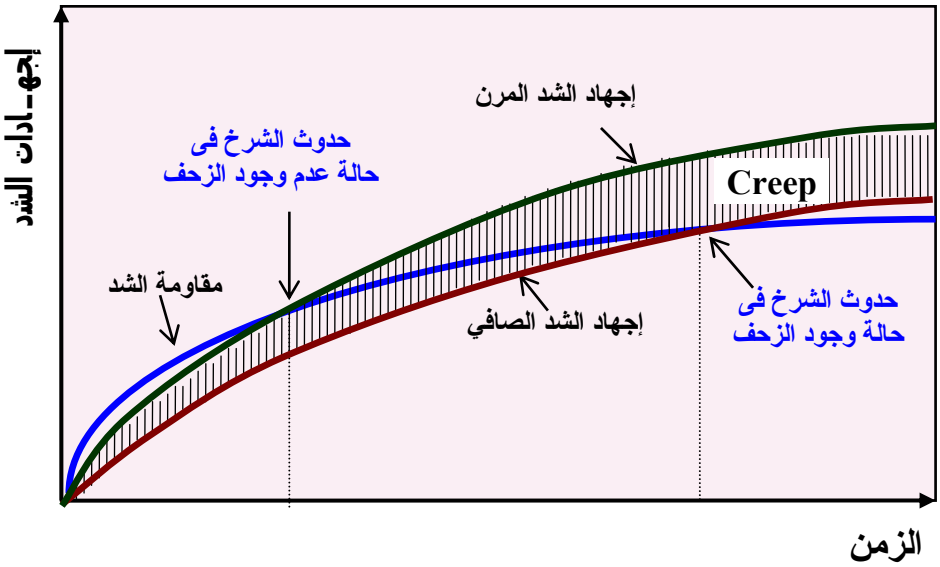
ولكن بصفة عامة فإنه لا توجد حالات إنهيار نتيجة الزحف بمفرده ولكنه عامل مساعد على تصدع الخرسانة فى بعض الحالات.

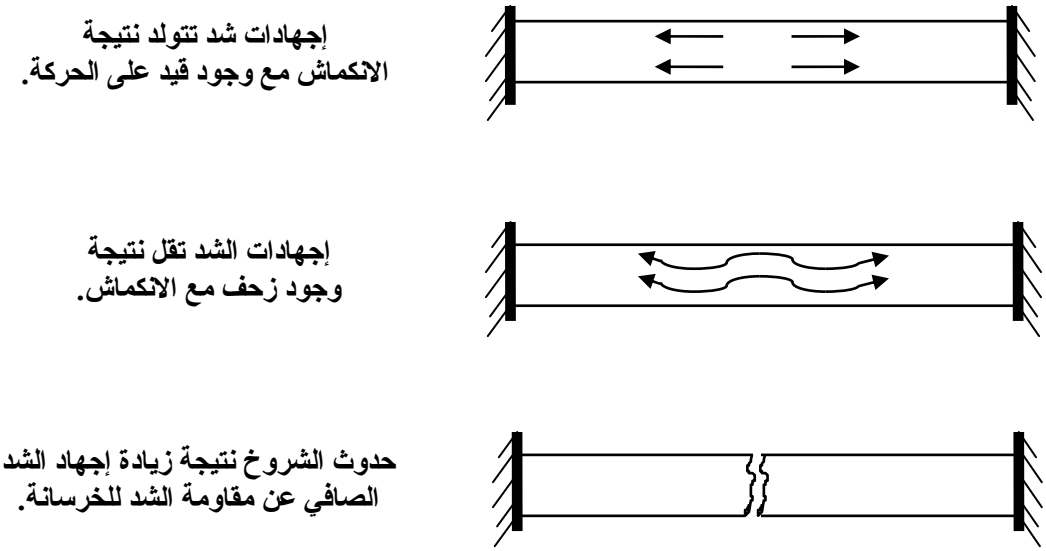
التأثير النافـع:

يؤدى الزحف إلى تقليل الإجهادات التى يسببها إنفعال شد ثابت مع الوقت (مثل الإنكماش) وبالتالى يتولد عندنا إجهاد شد صافى هو الفرق بين الإجهاد الأصلى وتأثير الزحف. وهذه الظاهرة تعرف بالإسترخاء Relaxation. ومما هو معروف أن الشروخ لا تتكون إلا إذا زاد إجهاد الشد الصافى عن مقاومة الخرسانة للشد ، كما هو موضح بشكل (١٠-٧).

تدريب:

- **خذ أستك بطول معين ثم شد الأستك بين دبوسين وأتركه لمدة يوم أو يومين ولاحظ التغيرات التى تحدث له.**
- **أنفخ بالونة وأتركها عدة أيام منفوخة ثم لاحظ التغيرات التى حدثت على سطحها. هل سطحها مازال مشدوداً بنفس القوة مثل وقت أن نفختها ؟! وهل تتوقع أن هناك قيمة من الإنفعالات حدثت لها حتى بعد أن تفرغ منها الهواء ؟! هل هذا هو التشكل المتبقى Residual deformation ؟!**
- **هل هذه المواد صافية المرونة Pure elastic أو أنها مرنة- لدنة Elasto-plastic ؟!**





شكل (١٠-٧) التأثير النافع للزحف.

الباب الحادى عشر

متانة الخرسانة (المُعَمِرية أو الديمومة)

Concrete Durability

١١-١ تعريف

المتانة هى تحمل الخرسانة للظروف التى صُممت من أجلها وتعمل فى محيطها فترة طويلة من الزمن (العمر الإفتراضى) دون حدوث تلف أو تفتت بها.

وبمعنى آخر فإن المتانة هى مقاومة الخرسانة للتدهور Deterioration سواءاً التدهور الناتج من عوامل خارجية أو من عوامل داخلية. العوامل الداخلية تشمل حدوث تفاعلات ضارة بين مواد الخرسانة وحدوث تغيرات حجمية بها وكذلك نفاذ السوائل فيها. أما العوامل الخارجية فتشمل ظروف التشغيل والتحميل وتأثير الجو المحيط بالمنشأ.

١١-٢ أسباب تلف الخرسانة

يوجد أسباب عديدة تؤدى إلى تلف الخرسانة Deterioration يمكن تصنيفها إلى المجموعات الآتية:

أ- أسباب داخلية

وهى المتعلقة بمكونات الخرسانة أو وجود مواد ملوثة بها مثل الطين أو الطفلة أو السيليكا النشطة (فى بعض أنواع الركام) أو وجود أملاح ضارة بهذه المكونات. كل ذلك يؤدى الى تفاعلات ضارة تعمل على تلف الخرسانة. والمكونات الرئيسية للخرسانة هى:

١- الأسمنت
٢- الركام
٣- ماء الخلط
٤- حديد التسليح
٥- الإضافات المعدنية والكيميائية

ب- أسباب خارجية وهى الناتجة من الوسط المحيط بالخرسانة

١- مهاجمة الكيماويات مثل الكبريتات والكلوريدات للخرسانة
٢- ماء البحر
٣- ماء المجارى
٤- المخلفات الصناعية

ج- أسباب أخرى تؤثر على معدل تلف الخرسانة

١ـ حركة المياه الجوفية
٢ـ درجة حرارة المياه الجوفية
٣ـ تذبذب منسوب المياه الجوفية (دورات بلل وجفاف)
٤ـ البخر خلال سطح الخرسانة
٥ـ التأكسد والكربنة
٦ـ أسباب بيولوجية

١١-٣ مقاومة الخرسانة للتلف

يمكن تصنيف أهم المقاومات التى توصف الخرسانة بأنها تتحمل مع الزمن كما يلى:

١ـ المقاومة للنفاذية والإمتصاص.
٢ـ المقاومة لصدأ الحديد.
٣ـ المقاومة لتأثير الكيماويات.
٤ـ المقاومة لماء البحر.
٥ـ المقاومة للعوامل الجوية.
٦ـ المقاومة للحريق.
٧ـ المقاومة لماء المجارى.
٨ـ المقاومة للتآكل.

١١-٤ المسامية و النفاذية و الإمتصاص

ينبغى عدم الخلط بين الإمتصاص Absorption والنفاذية Permeability والمسامية Porosity فالإمتصاص هو قدرة الخرسانة على سحب الماء داخل فجواتها وهو غير مرتبط بالنفاذية ويؤدى الإمتصاص إلى انتفاخ الخرسانة كما يؤدى إلى تفتتها عند تعرضها لدورات التجمد والذوبان وهى مشبعة بالماء.

أما النفاذية فهى الخاصية التى بواسطتها يمكن تسرب أى سائل خلال الخرسانة. وهذه السوائل تقلل من عمر الخرسانة لأن وصول الرطوبة إلى صلب التسليح يؤدى إلى الصدأ ودخول الأحماض والأملاح يؤدى إلى تدهور الخرسانة. كما أن نفاذية الخرسانة قد تعنى فى بعض الأحوال عدم أداء المنشأ لوظيفته كما فى حالة الخزانات المحتوية على سوائل أو حوائط البدرومات والمنشآت تحت الأرض ففى مثل هذه المنشآت تصبح عدم نفاذية الخرسانة خاصية مطلوبة وهامة كمقاومتها للأحمال وأكثر.

بينما نجد أن المسامية هى وجود مسام أو فجوات داخل المادة الصلبة وقد تكون هذه المسام متصلة عن طريق أنابيب دقيقة أو مسارات شعرية أو قد تكون هذه المسام منفصلة عن بعضها. إن التركيب الداخلى لعجينة الأسمنت يحتوى على مسام دقيقة نتيجة التفاعلات الكيميائية التى

تصاحب إماهة الأسمنت والماء. إذن فالخرسانة بطبيعتها مادة مسامية ولكى تصبح الخرسانة منفذة للسوائل أو الهواء فلابد من إتصال هذه المسام على هيئة أنابيب دقيقة متقاطعة. وعلى ذلك فالمسام المحدودة العدد المعزولة عن بعضها البعض لن تؤدى إلى نفاذ الماء أو الهواء كما هو موضح فى شكل (١١-١).

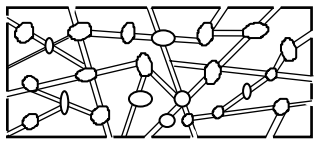
أنــواع المسـام الداخليـة

يوجد ثلاثة أنواع من المسام يمكن تمييزها كما يلى:

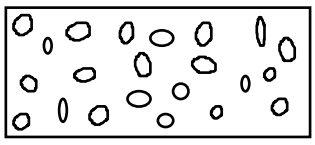
أ - المسام الهوائية ومنها الصغير جداً وهو عادة ما يتم تكوينه صناعياً داخل الخرسانة عن طريق إضافات الهواء المحبوس لزيادة القابلية للتشغيل وتحسين المقاومة للصقيع ومنها المسام الهوائية الكبيرة غير المنتظمة وهى تنشأ عادة عن عيوب الصب والدمك للخلطة الخرسانية والمسام الهوائية يتراوح قطرها من ٠,٠١ إلى ٠,٢ مم.

ب - المسام الجيلاتينية Gel Pores وهى أدق وأصغر أنواع المسام على الإطلاق حيث يبلغ قطرها من ٠,٥×١٠-٦ مم إلى ١٠×١٠-٦ مم وتتكون بعد عملية الإماهة حيث تتصلد العجينة الأسمنتية مكونة جسماً صلباً متجانساً. هذا الجسم الصلب به نسبة عالية من الفراغات الداخلية (مسام جيلاتينية).

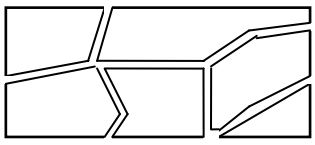
ج - المسام الشعرية Capillary Pores بعد خلط الأسمنت مع الماء مباشرة يحدث تكتل لحبيبات الأسمنت والماء ويسمى الماء الموجود فى الفراغات داخل هذا التكتل بالماء الشعرى Capillary Water حتى يحدث له تفاعل كامل مع الأسمنت ويترك مكانه خالياً مكوناً المسام الشعرية التى تعتبر أكثر أنواع المسام والتى تحدد درجة المسامية الكلية للخرسانة. والمسام الشعرية ذات قطر يتراوح من ١٠×١٠-٦ مم إلى ١٠×١٠-٣ مم (أى أنها وسط بين المسام الجيلاتينية والمسام الهوائية).



مسامية عالية ونفاذية عالية



مادة مسامية ولكن غير منفذة



نفاذية عالية ومسامية منخفضة

شكل (١١-١) حالات المسام المختلفة.

وعموماً فإن الخرسانة بطبيعتها تعتبر مادة مسامية وإتصال الفجوات الداخلية هو الذى يؤدى إلى زيادة النفاذية. ولزيادة تحمل الخرسانة مع الزمن لابد من تقليل النفاذية. وتقليل النفاذية ممكن عن طريق تخفيض نسبة الماء الى الأسمنت وإستخدام أسمنتات ناعمة وركام صلد غير منفذ ، كما أن تفادى الإنفصال الحبيبى عند الصب وكذلك الدمك الجيد والمعالجة المناسبة تقلل من نفاذية الخرسانة. وكما هومعلوم فإن إستخدام مواد بوزولانية مثل غبار السليكا يقلل من نفاذية الخرسانة كما سبق شرحة.

تأثير المنفذية على الخرسانة

١- إن سريان الماء والهواء داخل الخرسانة يؤدى إلى صدأ حديد التسليح وتآكله.

٢- فى الأجواء الباردة يتجمد الماء داخل الفراغات مسبباً تمدد ينشأ عنه إجهادات تؤثر على متانة الخرسانة.

٣- قد يحمل الماء بعض الأملاح معه داخل جسم الخرسانة فتتفاعل كيميائياً أو تتحول إلى بلورات مما يسبب إجهادات داخلية تضعف الخرسانة.

٤- قد يحمل الماء عند خروجه من الخرسانة بعض الأملاح أو المركبات المكونة للخرسانة مما يسبب زيادة الفراغات. كما أن هذا الماء يتبخر تاركاً الأملاح على السطح الخارجى للخرسانة مما يضر بشكل المنشأ.

العوامل المؤثرة على المنفذية والمسامية

١- نسبة الماء إلى الأسمنت (م/س) - حيث تزداد المنفذية بزيادة نسبة م/س (شكل ١١-٢) فزيادة كمية الماء تؤدى إلى وجود فراغات بالخرسانة عند جفافها. كذلك فى حالة زيادة الماء فإن القوام يصير مبتلاً مما يسمح بهبوط حبيبات الركام الثقيلة إلى أسفل ثم يخرج الماء إلى السطح خلال ممرات شعرية تظل موجودة بعد جفاف الخرسانة.

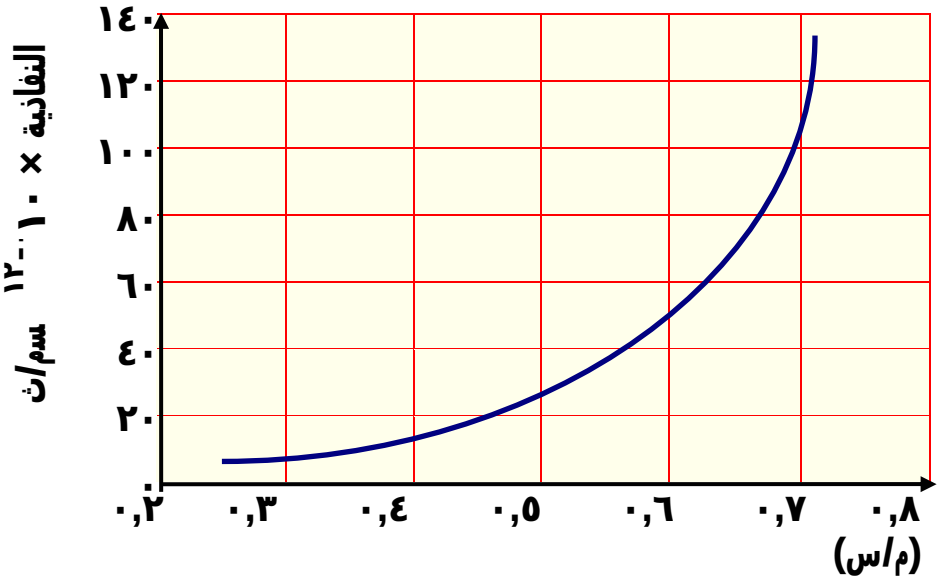
٢- الركام - يجب أن يكون الركام من النوع المصمت السليم غير المسامى كما يجب أن يكون متدرجا ويجب أن يكون من النوع الذى لا يتفاعل قلوياً مع الأسمنت حتى تتلافى وجود الفراغات الناتجة من هذا التفاعل.

٣- الإضافات - يمكن تحسين مقاومة نفاذ الماء من الخرسانة بإستخدام الإضافات للأغراض الآتية:

أ - لتقليل نسبة م/س بحيث تقل كمية الماء فى الخلطة.

ب- لتكوين طبقة سدودة تقوم بسد المسام فى الخرسانة.

ج- لتعديل تكون بللورات هيدرات سيليكات الكالسيوم CSH أثناء عملية الإماهة وبالتالى تعديل التكوين الداخلى للمسام الجيلاتينية.



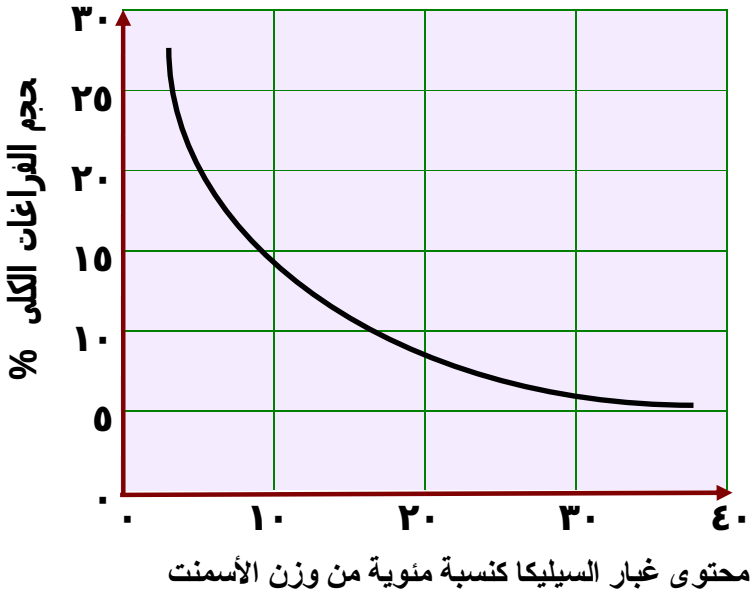
شكل (١١-٢) تأثير نسبة (م/س) على النفاذية.

٤- الخلط والدمك - إنتظام ودقة عمليتى الخلط والدمك تحسن من منفذية الخرسانة للماء.

٥- معالجة الخرسانة - إن المعالجة السيئة للخرسانة تؤدى إلى زيادة البخر وبالتالى زيادة المسام الشعرية والهوائية التى يتبخر منها الماء كما قد تؤدى إالى حدوث شروخ الإنكماش اللدن التى تزيد المسامية والنفاذية.

٦- إستعمال مواد بوزولانية Pozzolanic Materials - وهى المواد التى تتفاعل مع هيدروكسيد الكالسيوم الحر الناتج عن تفاعل الأسمنت مع الماء مكونة مركبات غير قابلة للذوبان مثل سيليكات وألومنيات الكالسيوم والتى تعمل على سد الفجوات الداخلية والمسام الشعرية. ومن أمثلة المواد البوزولانية مادة غبار السليكا Silica Fume وهى تتكون من حبيبات دقيقة جداً مساحتها السطحية حوالى أربعة أمثال المساحة السطحية للأسمنت (٢٠,٠٠٠ سم٢/جم) وهى ناتج ثانوى Byproduet فى صناعة سبائك السيليكون والفيروسيليكون وتتفاعل مادة غبار السليكا مع هيدروكسيد الكالسيوم مكونة سيليكات الكالسيوم المماهة والتى لا تذوب فتؤدى إلى تقليل الفجوات الداخلية والمسام الشعرية كما هو موضح بشكل (٢-٦) وكذلك شكل (١١-٣). ومن المواد الأخرى مسحوق الرماد المتطاير Fly Ash وكذلك خبث الأفران المطحون Blast Furnace Slag.

٧- حرارة الإماهة - قد تؤدى الحرارة المصاحبة لعملية الإماهة إلى حدوث شروخ ميكروسكوبية فى عجينة الأسمنت مما يؤدى إلى اتصال الفجوات الداخلية وزيادة النفاذية.



شكل (١١-٣) دور غبار السيليكا فى تقليل مسام العجينة الأسمنتية و تحسين المنفذية.

الإحتياطات والتوصيات لإنتاج خرسانة غير منفذة

١-يجب أن لا تكون الخلطة فقيرة الأسمنت.

٢-يجب أن تكون الخلطة لدنة بالدرجة الكافية لملء الشدة والفرم.

٣-إستعمال نسبة قليلة من م/س بقدر الإمكان وتعويض النقص فى القابلية للتشغيل بإستخدام إضافات مناسبة مثل Superplasticizer

٤-يجب أن يكون الركام جيد التدرج حتى نحصل على أقل نسبة فراغات ممكنة.

٥-إستخدام مواد بوزولانية إذا أمكن ذلك.

٦-يجب العناية بعمليتى الصب والدمك لتجنب تكون جيوب هوائية ولإخراج فقاعات الهواء مع مراعاة عدم حدوث إنفصال حبيبى.

٧-إستعمال مواد سدودة للماء بعد صب الخرسانة وفك الفرم.

طـرق حمـاية الأسـطح الخرسـانيـة لجعلهـا غـير منفـذة

تنقسم هذه الطرق إلى قسمين رئيسين :

أ- إضافة مادة مانعة لنفاذ الماء إلى مكونات الخرسانة أثناء إعداد الخلطة وقد تكون هذه المادة مسحوقا ناعما يقوم بملء الفراغات الموجودة فى الخرسانة أو مادة تعمل على سرعة تكوين الجيلاتين لتتصلب الخرسانة سريعاً أو مركباً طارداً للماء للعمل على عدم سريان الماء بواسطة الخاصة الشعرية.

ب- المعاملة السطحية للخرسانة والتى يمكن أن تأخذ إحدى الصور الآتية:

١ - تشريب السطح بمواد طاردة للماء وملء الفجوات بطبقات حماية سطحية.

٢- عمل طبقات حماية سطحية مثل:

- **البياض بمواد ذات سمك ٠,٥ مم إلى ٥ مم.**
- **التغطية بالمواد المطاطة.**
- **الأغشية البوليمرية الجاهزة تثبت بالخرسانة.**
- **إستخدام ألواح من الصلب الذى لا يصدأ أو ألواح من البلاستيك.**
- **التبليط ببلاطات مقاومة للمواد الضارة بالخرسانة مثل السيراميك أو القيشانى.**

١١-٥ صدأ الحديد Steel Corrosion

إن صدأ حديد التسليح هو أكثر مشاكل المنشآت انتشاراً فى منطقتنا العربية ويرجع معظم التصدع فى المنشآت الخرسانية ونقص عمرها الإفتراضى لصدأ الحديد. وتعتبر الخرسانة المسلحة من المواد التى تتحمل مع الزمن وتعيش طويلاً ويفضلها المصممون عن كثير من أنواع المنشآت ولايقلل من عمرها وتحملها إلا صدأ الحديد. وقد يكون الصدأ بسيطاً ويظهر فى صورة تنميل خفيف ـشروخ رفيعةـ عند أسياخ التسليح أو بقع صدأ وقد يزيد فيؤدى إلى تساقط الخرسانة المكونة للغطاء الخرسانى Spalling وقد يصل الصدأ إلى حدوث إنهيار للعضو الخرسانى بأكمله.

وخطورة صدأ الحديد أنه يبدأ ويستمر لمدة طويلة بدون ظهور أعراض وذلك لأن التدهور المصاحب لصدأ الحديد بطئ وقد يستمر سنين وخطورته أيضا أنه طالما بدأ فسيستمر حتى ولو أزيل مصدر الرطوبة ما لم يزال الحديد الصدئ والخرسانة المعيبة وتستبدل بخرسانة سليمة. وأى إجراء يتبع لإصلاح الوضع المتدهور لخرسانة أصابها الصدأ يعتمد كلية على الفهم السليم لأسباب حدوث الصدأ ووسائل السيطرة عليه ومنعه من الإستمرار. والحقيقة أن الرطوبة والأكسجين هما وقود عملية الصدأ الذى يبدأ حينما تفقد الحماية التى توفرها الخرسانة للأسياخ نتيجة أسباب عديدة مثل زيادة نسبة الكلوريدات بالخلطة أو التحول الكربونى للخرسانة الخارجية أو حدوث شروخ نتيجة أسباب أخرى غير الصدأ مما يسهل وصول الرطوبة إلى الأسياخ ويبدأ الصدأ.

كيف تحمى الخرسانة الأسياخ من الصدأ ؟

الحماية التى توفرها الخرسانة للأسياخ ضد الصدأ ذات شقين:

أ- تكون طبقة حماية سلبية (Passive Protection Layer) على سطح الأسياخ

وترجع هذه الحماية إلى أن الخرسانة المحيطة بالأسياخ قاعدية ذات أس هيدروجينى (pH) يتراوح من ١٢ إلى١٤ وعند هذه القيمة للأس الهيدروجينى فإن التفاعلات الكيميائية التى تحدث على سطح أسياخ التسليح تؤدى إلى ظروف تصبح فيها التفاعلات الكهروكيميائية المؤدية إلى الصدأ غير ممكنة - كما تؤدى هذه التفاعلات إلى تكوين طبقة رقيقة جداً من نواتج الصدأ - مثل أكسيد الحديد Fe_2O_3 - فتلتصق بسطح السيخ وتمنع حدوث صدأ الحديد - وبذلك تصبح قاعدية الخرسانة المحيطة بأسياخ التسليح هى سبب حماية هذه الأسياخ ، وعملياً فإن هذه الحماية فعالة لمدة طويلة إلا إذا فقدت هذه القاعدية نتيجة أملاح أو أحماض تتغلغل فى الخرسانة أو نتيجة للتحول الكربونى للخرسانة السطحية.

ب- عمل حاجز يمنع وصول الرطوبة والأملاح فى الجو المحيط إلى الأسياخ وهذا الحاجز هو الغطاء الخرسانى للأسياخ Cover.

أسباب حدوث صدأ الحديد

عندما يقل الغطاء الخرسانى عن حد معين يصبح السيخ معرضاً للعوامل الجوية ويمكن أن يبدأ الصدأ فى وجود الرطوبة والأكسجين. وحتى مع وجود غطاء خرسانى كاف فإن الصدأ يمكن أن يبدأ عندما تقل قاعدية الخرسانة المحيطة بالأسياخ إلى الحد الذى ينخفض فيه الأس الهيدروجينى إلى ١٠ أو أقل ، ففى هذه الحالة تصبح الطبقة الحامية السلبية غير متزنة وتنكسر مما يجعل التيار الكهربائى يسرى فىالسيخ ومن ثَمَ يبدأ الصدأ. وفقد القاعدية يحدث نتيجة لعامل أو أكثر من العوامل الآتية:

١- التحول الكربونى للخرسانة فى الغطاء الخرسانى Carbonation.
٢- أبخرة أو محاليل حامضية يتعرض لها العضو.
٣- تغلغل الكلوريدات فى الخرسانة من المياه المحيطة أو وجودها فى الخلطة الخرسانية أصلاً.
٤- وجود شروخ سطحية -لأسباب أخرى غير الصدأ- بعمق يصل إلى أسياخ الحديد وخاصة إذا كانت الشروخ موازية لصلب التسليح.

أولاً: التحول الكربونى للخرسانة Carbonation

تفقد خرسانة الغطاء الخارجى قاعديتها نتيجة عملية تسمى التحول الكربونى للخرسانة وهى تفاعل ثانى أكسيد الكربون الموجود بالجو مع المواد القاعدية الموجودة بالخرسانة - هيدروكسيد الكالسيوم - محولاً إياها إلى كربونات فى وجود الرطوبة :

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \xrightarrow{water} CaCO_3 + H_2O$$

وكنتيجة لذلك تقل قاعدية الخرسانة إلى أقل من المستوى المطلوب لتوفير الحماية السلبية للأسياخ (أقل من ١٠). ونظراً لأن التحول الكربونى ينتج عن التفاعل مع ثانى أكسيد الكربون الموجود بالهواء فهو يبدأ من السطح ويمتد إلى الداخل. والخرسانة الجيدة غير المنفذة للماء لا يحدث لها تحول كربونى إلا فى حدود طبقة سطحية جداً (عدة ملليمترات) حتى عندما يصبح المبنى قديماً ولكن الخرسانة الرديئة المنفذة للماء يحدث لها تحول كربوني بعمق يصل إلى عشرة أضعاف عمق التحول فى الخرسانة الجيدة.

وتحدث عملية متشابهة للتحول الكربونى فى وجود ثانى أكسيد الكبريت فى الجو المحيط بالأعضاء الخرسانية وتسمى عملية التحول الكبريتى ، وتسبب أيضا نقص قاعدية الخرسانة المحيطة باسياخ التسليح ، وإذا حدث تحول كربونى وكبريتى معاً فإن ذلك سيؤدى إلى زيادة وإن كانت بسيطة فى سرعة فقد الخرسانة لقاعديتها. ولهذا يوصى بزيادة الغطاء الخرسانى لصلب التسليح فى الأجواء الملوثة بالكبريتات.

ثانياً: الخرسانة أو محاليل حامضية يتعرض لها العضو

يفقد حديد التسلح الحماية القاعدية للخرسانة نتيجة تغلغل الأبخرة الحامضية الموجودة بالهواء - غالباً ثانى أكسيد الكربون وفى المناطق الصناعية ثانى أكسيد الكبريت- داخل الخرسانة ويعتمد هذا التغلغل على نفاذية الخرسانة Permeability بدرجة كبيرة. والخرسانة الرديئة غالباً ما تكون منفذة أما الخرسانة الجيدة فهى غير منفذة. كما يعتمد هذا التغلغل على سمك الغطاء الخرسانى. إن نفاذية الخرسانة وسمك الغطاء الخرسانى هما المسئولان عن حماية الأسياخ ضد المؤثرات الخارجية وتغيرهما الكبير من منشأ لآخر هو الذى يفسر التغير الكبير فى وقت بداية الصدأ فى المنشآت المختلفة المعرضة لنفس الظروف الجوية.

ثالثاً: الكلوريدات Chlorides

تعتبر أيونات الكلوريدات Chloride Ions من أكثر المواد التى تدمر الحماية السلبية لصلب التسليح داخل الخرسانة. وهذه الكلوريدات من الممكن أن تكون موجودة فى الخرسانة من لحظة خلطها (مصادرها الركام أو ماء الخلط أو الإضافات المحتوية على كلوريد الكالسيوم) أو تصل إلى الخرسانة بعد إستعمال المنشأ (مصادرها مياه البحر أو المياه الجوفية). ووجود الكلوريدات -أيا كان مصدرها- فى الخرسانة يؤدى إلى تنشيط عملية الصدأ ولو كانت قاعدية الخرسانة ما زالت مرتفعة.

وصدأ الحديد نتيجة وجود كلوريدات داخل خلطة الخرسانة أخطر وأصعب فى إصلاحه من الصدأ نتيجة التحول الكربونى لأنه بينما يمكن منع حدوث مزيد من التدهور فى الأعضاء التى تحولت خرسانتها السطحية كربونيا فلا توجد وسيلة فعالة لمنع التدهور فى حالة وجود تركيز عال من الكلوريدات داخل خلطة الخرسانة إلا إزالة الخرسانة المعيبة تماماً من حول أسياخ التسليح.

وتقوم أيونات الكلوريدات الحرة - الموجودة فى الماء داخل فراغات الخرسانة - بمهاجمة صلب التسليح وتسبب له الصدأ. وميكانيكية التفاعلات الكيميائية فى هذه الحالة معقدة إلى حد كبير ولكن يمكن القول ببساطة أن أيونات الكلوريدات قادرة على تعطيل التفاعلات الحادثة على سطح حديد التسليح والتى توفر له الحماية السلبية حتى وإن كانت قاعدية الخرسانة مازالت عالية ولم يحدث لها تحول كربونى أما فى حالة حدوث تحول كربونىفإن قيماً أقل من الكلوريدات ستدمر الحماية السلبية للحديد وسيصبح معدل الصدأ أسرع.

والملاحظ أنه فىالفترة الأخيرة تم تقليل القيم المسموح بها فىالمواصفات العالمية والخاصة بنسبة تركيز الكلوريدات فى الخرسانة وذلك فى ضوء التجارب والخبرة المتاحة بحيث أصبحت القيم المسموح بها الآن أقل بكثير من القيم التى كان يسمح بها سابقا. ومنع الكلوريدات من التغلغل فى الخرسانة يعتمد أساساً على عدم نفاذية هذه الخرسانة كما يعتمد على سمك الغطاء الخرسانى.

رابعاً: وجود شروخ بالخرسانة

تعتبر الشروخ منفذاً سهلاً للأكسجين والرطوبة والكلوريدات ولذا فإن الشروخ السطحية الموازية للأسياخ يمكن أن تسهل عملية الصدأ والتى ستؤدى بدورها إلى حدوث شروخ جديدة. وقد يكون سبب هذه الشروخ الإنكماش اللدن أو الهبوط اللدن وهى شروخ تحدث على أسطح البلاطات. وفى الحالات التى تكون فيها هذه الأسطح معرضة للأملاح تصبح هذه الشروخ مخزناً للتلوث قريباً من الحديد العلوى. والأخطر من ذلك الفجوات التى تحدث تحت أسياخ التسليح عندما يحدث إدماء للخرسانة ويحدث لها هبوط لدن. هذه الفجوات يصعب جداً العثور عليها كلها وتشكل مصدراً دائماً للرطوبة وسبباً قوياً للصدأ لأن حماية أسياخ التسليح تعتمد على تغطية الخرسانة لسطح السيخ بأكمله. والحل الأمثل فى مثل هذه الحالات هو تجنب حدوث هذه الفجوات أصلاً بالتأكد من أن خواص الخرسانة مناسبة لطريقة صبها ومعالجتها. وهذا الأمر هام جداً لمنع حدوث الصدأ.

ميكانيكية حدوث الصدأ

صدأ الحديد هو عملية كهروكيميائية تحدث عند السطح الفاصل بين صلب التسليح والخرسانة وتحتاج إلى عامل مؤكسد (الأكسجين) ورطوبة وتيار من الإلكترونات يسرى من قطب موجب إلى قطب سالب فى المعدن ويجب توفر الوسط الذى ينقل التيار الكهربى من القطب الموجب إلى السالب وهو عادة ماء أو محلول مائى به أملاح ذائبة. وتحدث فى هذه العملية مجموعة من التفاعلات الكيمائية على النحو التالى - أنظر شكل (١١-٤).

١- يتحلل الحديد من القطب الموجب على هيئة أيونات الحديدوز $^{++}(Fe)$ حسب التفاعل:

$$2Fe \longrightarrow 2Fe^{++} + 4e^{-}$$

٢- تنتقل الألكترونيات المتولدة من التفاعل السابق (4e-) فى سيخ الحديد إلى منطقة القطب السالب حيث تتفاعل مع الأكسجين والماء مكونة أيونات الهيدروكسيل (OH) حسب التفاعل:

$$2H_2O + O_2 + 4e^{-} \longrightarrow 4(OH)^{-}$$

٣- عند تقابل نواتج التفاعلين -أيونات الحديدوز مع أيونات الهيدروكسيل- يترسب هيدروكسيد الحديدوز وفقاً للتفاعل:

$$2Fe^{++} + 4(OH)^{-} \longrightarrow 2Fe(OH)_2$$

٤- يتأكسد هيدروكسيد الحديدوز الناتج بفعل الأكسجين والماء إلى أيدروكسيد الحديدك - تفاعل ثانوى- الذى يتحلل مكوناً صدأ الحديد (أكسيد الحديد) طبقاً للتفاعل:

$$2Fe(OH)_2 \xrightarrow{O_2 + H_2O} 2Fe(OH)_3 \longrightarrow Fe_2O_3.H_2O$$

ويعتبر أكسيد الحديد الناتج شديد الإمتصاص للماء وضعيف الإلتصاق بالحديد ، وبذلك يسهل إزالته بالذوبان البطئ تاركاً سطح الحديد ليسمح بتكون صدأ جديد ويمكن عن طريق قياس التيار الكهربائى فى أسياخ الحديد الصدأة معرفة الصدأ فى الأسياخ التى يصعب الكشف عليها ، وهذا يساعد على تحديد درجة خطورة المنشآت الخرسانية المعرضة للصدأ. وهيدروكسيد الحديد الناتج يزيد حجمه عن حجم السيخ الأصلى زيادة كبيرة مما يؤدى إلى تولد إجهادات انفصالية عالية حول أسياخ التسليح تؤدى إلى شروخ طولية موازية للأسياخ وعند زيادة الصدأ عن ذلك تبدأ الخرسانة السطحية فى التساقط.

❐ الخلاصـــة

يمكن تلخيص تدهور الخرسانة نتيجة صدأ الحديد بالمراحل الآتية :-

١- عند تصلد الخرسانة تتكون طبقة حماية سلبية حول أسياخ الحديد نتيجة قاعدية الخرسانة (الأس الهيدروجينى من ١٢ إلى ١٤).

٢- عندما تقل قاعدية الخرسانة (أقل من ١٠) تُفقد هذه الطبقة الحامية ويصبح السيخ معرضاً للصدأ. وقاعدية الخرسانة تقل إما لوجود أبخرة حامضية أو حدوث تحول كربونى للخرسانة السطحية أو وجود الكلوريدات أو وجود شروخ سطحية بالخرسانة.

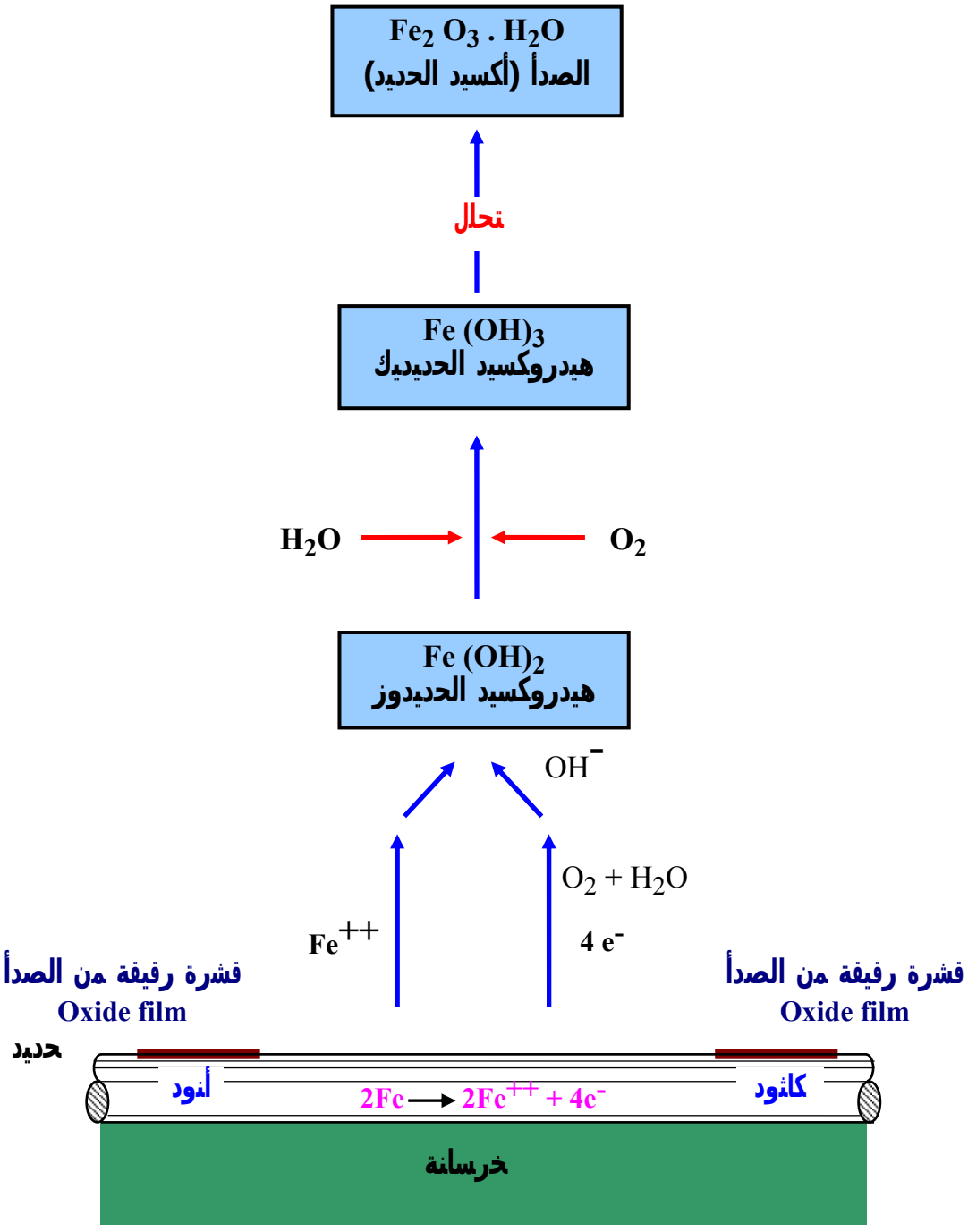
٣- التحول الكربونى يكون بطيئاً جداً فى الخرسانة الجيدة ولكن عدم جودة الخرسانة ونفاذيتها وقلة سمك الغطاء الخرسانى ووجود الشروخ السطحية ووجود رطوبة من ٥٠ - ٧٥% تسرع بمعدله.

٤- الكلوريدات تأثيرها على صدأ الحديد يبدأ إذا زاد تركيزها فى الخلطة الخرسانية عن ٠,٣% من وزن الأسمنت ويكون تأثيرها أخطر إذا كانت من مصدر خارجى.

٥- يبدأ الصدأ عند توفر الأكسجين والرطوبة وتظهر بقع الصدأ ثم تظهر شروخ شعرية طولية موازية للحديد الرئيسى وفوقه مباشرة.

٦- إستمرار عملية الصدأ يؤدى إلى تشريخ الغطاء الخرسانى لأن أكسيد الحديد الناتج من الصدأ حجمه أكبر كثيراً من حجم الحديد الأصلى.

٧- كلما إزداد الصدأ كلما زادت الشروخ فى الطول والعرض ثم تبدأ الخرسانة الخارجية فى التساقط وتظهر الأسياخ الصدأة بوضوح.



شكل (١١-٤) ميكانيكية حدوث الصدأ فى حديد التسليح.

١١-٦ المقاومة لتأثير الكيماويات Chemical Attack

يتعرض جزء صغير من المنشآت الخرسانية فى بعض الأحيان إلى تأثير الكيماويات ويجب الإبتعاد ما أمكن عن هذه التأثيرات لأن مقاومة الخرسانة للكيماويات غالباً أقل من مقاومتها للمؤثرات الأخرى. ومن التأثيرات الشائعة للكيماويات تأثير أملاح الكبريتات وماء البحر والمياه الحامضية الطبيعية وتتوقف مقاومة الخرسانة للكيماويات على نوع الأسمنت المستخدم فى صنعها. كما أن كثافة الخرسانة وعدم منفذيتها للماء تؤثرعلى تحمل الخرسانة بدرجة قد تفوق تأثير إختلاف نوع الأسمنت. وفيما يلى توضيح موجز عن تأثير أهم الكيماويات الشائعة على الخرسانة:

١- أملاح الكبريتات Sulphates

تشتمل أملاح الكبريتات الموجودة فى التربة والمياه الجوفية والتى قد تسبب أضراراً للخرسانة على كبريتات الكالسيوم وكبريتات الصوديوم وكبريتات المغنسيوم وكبريتات البوتاسيوم وهذه الكبريتات بإستثناء كبريتات الكالسيوم تتفاعل مع هيدروكسيد الكالسيوم $Ca(OH)_2$ (الجير الحر) الموجود داخل الخرسانة المتصلبة وينتج من هذا التفاعل كبريتات الكالسيوم (الجبس) وفقاً للمعادلة التالية:

$$Ca\,SO_4 . 2H_2O + 2\,Na\,OH . 8H_2O \rightarrow Ca\,(OH)_2 + Na_2\,SO_4 . 1OH_2O$$

فكبريتات الكالسيوم المتكونة تتفاعل بدورها مع ألومينات الكالسيوم لتشكل ألومينات الكالسيوم الكبريتية المائية أى Calcium Sulphoaluminate ويشار إليها عادة بإسم الإترنجايت Etringite:

$$4CaO . Al_2O_3 . 19H_2O + 3(CaSO_4 . 2H_2O) + 16H_2O \rightarrow$$

$$3\,CaO . A1_2O_3 . 3CaSO_4 . 32H_2O \text{ (الإترنجايت)} + Ca(OH)_2$$

وتسبب بلورات الإترنجايت ضغطاً داخلياً يؤدى الى تشرخ الخرسانة وتلفها. ويتم وقاية الخرسانة فى التربة الغنية بالكبريتات وذلك بعمل طبقة من الأسفلت أو دهانها بالبيتومين أو غيرها من الطبقات العازلة على أن تكون ملتصقة تماما بسطح الخرسانة حتى لا تنفصل عنها ويمكن إستعمال الخرسانة الجيدة المخلوطة بالأسمنت البورتلاندى فى التربة المحتوية على نسبة قليلة من الكبريتات. وفى حالة التربة المحتوية على نسبة كبيرة من الكبريتات فإنه من الضرورى الإهتمام بتصميم الخلطة الخرسانية وإستعمال الأسمنت البورتلاندى المقاوم للكبريتات.

٢- الأحماض Acids

إذا تواجد ثانى أكسيد الكربون أو ثانى أكسيد الكبريت فى ظروف جوية رطبة أو أية أبخرة حامضية أخرى فإنها تهاجم الخرسانة فتذيب وتزيل جزءاً من الأسمنت وتكون طبقة لينة (Soft) تسهل إزالتها من سطح الخرسانة. ويحدث مثل هذا التأثير فى المداخن وفى الخرسانة الموجودة فى الأجواء الصناعية مثل مسابك الحديد ووحدات إنتاج الغاز. وعموماً فإن الأحماض غير العضوية تؤثر تأثيراً شديداً - أكثر من غيرها - على الخرسانة حيث تتفاعل مع الجير الحر مكونة كلوريدات وكبريتات ونترات. وتتوقف شدة التأثير على مدى ذوبان تلك المركبات فى الماء وعلى تركيز تلك الأحماض وعلى سرعة التفاعل التى تزداد إذا كانت الأحماض ساخنة.

٣- أملاح الكلوريدات Chlorides

تتحد معظم أملاح الكلوريدات مع الجير الحر الموجود فى الأسمنت البورتلاندى لتكون كلوريد الكالسيوم القابل للذوبان وبالتالى يتسرب إلى خارج الخرسانة مكوناً مترسبات بيضاء على السطح مع حدوث فراغات بالخرسانة. وتكون كلوريد الكالسيوم بدرجة تركيز عالية يؤدى إلى التلف الشديد لسطح الخرسانة.

٤- الزيوت الدسمه Fats

تحتوى الزيوت الدسمة الحيوانية والنباتية على أحماض تهاجم الخرسانة فتتفاعل مع أملاح الكالسيوم والجير الحر بالأسمنت البورتلاندى لتكون سليكات الكالسيوم فتجعل الخرسانة لينة وتزداد قيمة ذلك التأثير إذا كانت الزيوت دافئة أو إذا أمكنها التغلغل داخل الخرسانة.

٥- الرصاص Lead

إذا وجدت الرطوبة فإن الجيرالحر بالأسمنت البورتلاندى يتفاعل مع الرصاص فيحدث التلف الخرسانى وكذلك يحدث تلف أكبر للرصاص. وتحدث هذه الحالة للمواسير الموجودة داخل الخرسانة حيث تتلف تلك المواسير تلفاً كاملاً لتكون أكاسيد الرصاص نتيجة للتفاعل السالف الذكر. لذلك يجب المحافظة على مواضع الرصاص داخل الخرسانة بتغطيتها وعزل سطحها عن الخرسانة.

٦- السكريات وعصير الفواكه Sugar

تؤثر المواد السكرية كالعسل والجلوكوز والسكر وكذلك الأحماض الموجودة بالفاكهة تأثيراً بسيطا بطيئاً على الخرسانة.

١١-٧ الخواص الحرارية للخرسانة Thermal Properties

تعتبر الخواص الحرارية للخرسانة ذات أهمية كبرى فى حالة الخرسانة الكتلية حيث يجب تقدير الزيادة فى درجة الحرارة وكيفية توزيع الحرارة بالخرسانة وذلك لإمكان تصميم طريقة التبريد المناسبة لخرسانة المنشأ حتى لا تتسبب الزيادة فى الحرارة فى تشريخها وتفتتها.كما أن الخواص الحرارية ذات أهمية كبرى أيضا فى تقدير الإجهادات الناشئة بين الخرسانة وطبقات الحماية لأسطح الخرسانة حيث تتعرض الخرسانة لفارق فى درجات الحرارة بين الجو الخارجى والخرسانة المغطاة مما يؤدى إلى وجود قوى عمودية تعمل على إنفصال طبقات الحماية عن الخرسانة. ومن أهم الخواص الحرارية الرئيسية للخرسانة:

١- التمدد الحرارى Thermal Expansion

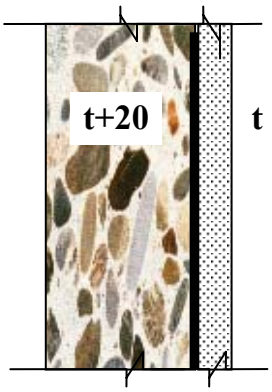
يسبب التمدد الحرارى إجهادات داخلية فى الخرسانة سيما إن كانت مقيدة الحركة وهذه الإجهادات قد تسبب شروخاً وتفتتاً فى الخرسانة إذا لم تؤخذ فى الإعتبار. ويعتمد معامل التمدد الحرارى للخرسانة بدرجة كبيرة على نوع الركام المستخدم وتدرجه. وقيمة معامل التمدد الحرارى للخرسانة = ١×١٠-٥ لكل درجة مئوية (س°). كما أن معامل التمدد الحرارى لحديد التسليح = ١,٢×١٠-٥ لكل درجة مئوية. ولأغراض التصميم فإنه لكل من الخرسانة العادية والخرسانة المسلحة يؤخذ معامل التمدد الحرارى مساوياً ١×١٠-٥ لكل درجة مئوية.

$$\alpha = 1 \times 10^{-5} \text{ cm / cm . c}^{o}$$

والإجهادات الحرارية (σ) يمكن حسابها من المعادلة:

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot (\Delta T)$$

حيث E معاير المرونة ، α معامل التمدد الحرارى ، (ΔT) فرق الحرارة.



مثال: إذا كان فرق درجات الحرارة المتوقع بين الجو الخارجى والخرسانة المغطاة بطبقة حماية هو عشرون درجة مئوية فإحسب إجهادات القص المتولدة بين الخرسانة وطبقة الحماية إذا كان معاير المرونة للخرسانة هو ٢٠٠ طن/سم٢.

الحـــــل

$$\sigma = E \alpha \ (\Delta T)$$

$$= 200 \ (10)^3 \times 1 \times 10^{-5} \times 20$$

$$= 40 \ \text{kg / cm}^2$$

٢- الموصلية الحرارية Thermal Conductivity (k)

وتعرف بأنها كمية الحرارة التى تمر عمودياً على السطح فى وحدة الزمن خلال مقطع متجانس من المادة مساحته الوحدة وتخانته الوحدة عندما يوجد فرق فى درجات الحرارة بين سطحى المادة مقداره الوحده. وتختلف هذه الخاصية بإختلاف درجات الحرارة وإختلاف كثافة المادة ودرجة تشبعها بالرطوبة ، وتقدر بوحدات وات/ م س° ، حيث س° ترمز إلى وحدة درجات الحرارة المئوية.

وقيمة الموصلية الحرارية لمواد البناء الأساسية مثل الطوب بأنواعه والخرسانة والمواد الجبسية تتراوح من ٠,٢٠ إلى ٢,٠ وات/ م س ° ، أما المواد العازلة المستخدمة فى المبانى مثل البوليسترين والفيرموكليت والخرسانة الخفيفة الخلوية فتكون لها موصلية حرارية منخفضة تتراوح بين ٠,٠٢ إلى ٠,٢ وات/ م س°.

٣- المواصلة الحرارية Thermal Conductance (C)

وتعرف بأنها كمية الحرارة التى تمر عمودياً على السطح فى وحدة الزمن خلال مقطع متجانس من المادة مساحته الوحدة عندما يوجد فرق فى درجات الحرارة بين سطحى المادة مقداره الوحده. ويمكن حساب المواصلة الحرارية بقسمة الموصلية الحرارية على تخانة المادة (C = k/L) وتقدر بوحدات وات/ م٢ س°.

٤- المقاومة الحرارية Thermal Resistance (R)

هى مقياس لقدرة المادة على تقليل سريان الحرارة خلال وحدة المساحات لتخانة العينة المختبرة ، ويمكن حساب مقاومة المادة للحرارة وذلك بقسمة تخانة العينة (L) على الموصلية الحرارية (K). وهى مقلوب قيمة المواصلة الحرارية (C) ، وتقدر بوحدات م٢ س° / وات.

٥- الحرارة النوعية للمادة Specific Heat (C_p)

هى كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة واحد كج من المادة درجة واحدة مئوية. ويقدر بوحدات جول/ كج س° أو بوحدات وات . ثانية / كج س°.

٦- السعة الحرارية لوحدة الحجوم Volumetric Heat Capacity (C_V)

هى كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة وحدة الحجوم من المادة درجة واحدة مئوية ، وتقاس السعة الحرارية بوحدات جول/ م٣ س°. ويمكن تعيين قيمة السعة الحرارية حسابياً بحاصل ضرب الكثافة (ρ) فى الحرارة النوعية للمادة (C_p).

$$(C_V) = \rho \times (C_p)$$

٧- الإنتشارية الحرارية Thermal Diffusivity (γ)

الإنتشارية الحرارية تمثل سرعة إنتشار الحرارة خلال المادة أو بين سطحى المادة وهى عبارة عن خارج قسمة الموصلية الحرارية على السعة الحرارية لوحدة الحجوم. وتقدر بوحدات م٢/ثانية.

$$\gamma = k / C_V$$

وتعتبر الموصلية الحرارية (k) من أهم الخصائص الحرارية للمواد الإنشائية يلى ذلك خصائص أخرى مثل الحرارة النوعية للمادة والإنتشارية الحرارية وتفيد دراسة هذه الخصائص فى الأحوال الآتية:

أ - معرفة كمية الحرارة المنبعثة من الخرسانة الكتلية.

ب- معرفة خواص الحوائط الخرسانية من وجهة مدى الإحتفاظ بالحرارة.

ج- معرفة مدى تكثف الرطوبة أو الرشح على سطح الخرسانة.

جدول (١١-١) يوضح بعض الخواص الحرارية لبعض مواد البناء ومواد العزل الحرارى الشائعة الإستخدام فى مجال الإنشاءات طبقاً لما جاء فى المواصفات الخاصة ببنود أعمال العزل الحرارى لسنة ١٩٩٨. علماً بأن الأرقام الواردة بالجدول تعتبر قيم إسترشادية فقط وغير ملزمة بالتحديد.

جدول (١١-١) بعض الخواص الحرارية لمواد البناء ومواد العزل الحرارى الشائعة الإستخدام.

المـــــادة	الموصلية الحرارية وات/ م س ه	الحرارة النوعية جول/ كج س ه	الكثافة كج/م٣
أولاً مواد الإنشاء العامة			
خرسانة عادية	١,٤٤	٨٦٠	٢٤٠٠
حديد صلب	٤٥,٣	٥٠٠	٧٨٥٠
بياض أسمنتى	١,٠ - ٠,٩		١٥٧٠
رخام	٢,٦	٨٨٠	٢٦٠٠
زجاج عادى	١,٠	٧٥٠	٢٤٧٠
طوب خرسانى مصمت	١,٤	٨٤٠	٢٠٠٠
طوب أسمنتى مصمت	١,٢٥	٨٨٠	١٨٠٠
طوب أسمنتى مفرغ	١,٦	٨٨٠	١١٤٠
طوب طفلى مصمت	١,٠	٨٣٠	١٩٥٠
طوب طفلى مفرغ	٠,٦	٨٤٠	١٧٩٠
طوب ليكا مفرغ	٠,٣٩	١٠٠٠	١٢٠٠
طوب فوم مصمت	٠,٢٥		٨٠٠
طوب فوم مفرغ	٠,٢		٥٣٠
طوب خفاف أبيض	٠,٣٣	٨٥٠	٩٨٥
طوب رملى وردى مصمت	١,٥٩	٨٣٥	١٨٠٠
طوب رملى مفرغ	١,٣٩	٨١٠	١٥٠٠
ثانياً مواد العزل الحرارى			
منتجات البوليسترين فوم	٠,٠٤٥ - ٠,٠٢٧		٤٠ - ١٥
منتجات الصوف الزجاجى	٠,٠٥٠ - ٠,٠٤٣		١٣٠ - ٣٠
منتجات الصوف الصخرى	٠,٠٥٥ - ٠,٠٤٣		٣٥٠ - ٧٠
مونة الأسمنت الرغوى	٠,٢٥ - ٠,١		٨٨٠ - ٤٠٠
مونة حبيبات الفوم	٠,١٩ - ٠,١١		١٠٠٠ - ٦٠٠
مونة فيرموكليت	٠,٣٠٠ - ٠,١٣٥		٩٦٠ - ٤٨٠
فيرموكليت سائب	٠,٠٦٥		١٠٠

١١-٨ المقاومة للحريق Fire Resistance

مقاومة عنصر خرسانى ما للحريق هى الفترة الزمنية التى يتحمل خلالها هذا العنصر الحريق ويقاوم نفاذ اللهب والغازات الساخنة من خلاله و تتوقف مقاومة الخرسانة للحريق على العوامل الآتية:

١- سمك المنشأ الخرسانى : تزيد المقاومة كلما كبر سمك المنشأ وتعتبر الخرسانة الكتلية أكثر الأنواع مقاومة للحريق. ولذلك يراعى فى بعض المنشأت الخرسانية ذات السمك الصغير وكذلك فى الخرسانة سابقة الإجهاد Pre-Stressed أن يكون الغطاء بطبقة من الخرسانة أولاً يليها طبقة من المصيص.

٢- نوع المنشأ (مصمت أو مفرغ): تقل مقاومة الخرسانة المصمتة للحريق عن المفرغة وينبغى مراعاة أن تحتفظ الخرسانة بمقاومتها للأحمال بعد تعرضها لحرارة الحريق. وغالباً فإنه إذا استمر الحريق أكثر من ساعة أو إثنين فإن ذلك يجعل الخرسانة تصل لدرجة حوالى ألف درجة مئوية مما يجعلها لا تصلح بعد ذلك كمادة إنشائية نظراً لتشريخها الشديد مع تكسرها بتمدد حديد التسليح وتفتتها فى مواضع مختلفة. وتؤثر حرارة الحريق تأثيراً سيئاً على حديد التسليح من الصلب الطرى فتقل مقاومته وبالتالى إجهاد الخضوع مما يضعف تحمل الخرسانة المسلحة.

٣- نوع الركام : يوجد بعض أنواع الركام ذات مقاومة عالية للحريق مثل الركام الخفيف الوزن (خبث الأفران - الفورموكليت - كسر الطوب ... إلخ) يليها كسر الحجر الجيرى ثم يأتى بعد ذلك ركام الرمل والزلط.

٤- نوع الأسمنت وكميته : إذا تعرض الأسمنت بالخرسانة (أى الذى شك وتصلد) إلى الحرارة العالية فإنه - نظراً لإحتوائه على الماء- ينكمش ثم يتمدد بعد ذلك مما يسبب تفتت للخرسانة نتيجة لتوصيلها الردئ للحرارة مما يؤدى إلى فرق كبير فى الحرارة بين خارج الخرسانة وداخلها مما يولد إجهادات تسبب شروخ وتفتت للخرسانة.

وتؤثر الحرارة العالية تأثيرا سيئاً فى حالة الأسمنت البورتلاندى نظراً لوجود الجير الحر الذى يتكلس ويعاود الإتحاد مع الماء مما يسبب الزيادة فى الحجم وبالتالى تشريخ الخرسانة فكلما قل الجير الحر بالأسمنت كلما تحسنت مقاومته للحريق. فالأسمنت الحديدى أو الإسمنت العادى المخلوط بالمواد البوزولانية أفضل من الأسمنت البورتلاندى العادى. أما الأسمنت الألومينى فيعتبر أحسنها من هذه الوجهة نظراً لعدم احتوائه على الجير الحر. وتعتبر أكثر أنواع الخرسانة مقاومة للحريق هى تلك المصنوعة من أسمنت ألومينى و ركام خفيف أو ركام من كسر الطوب الحرارى.

وعلى اى حال فإنه يمكن إستخدام الأسمنت البورتلاندى العادى فى عمل الخرسانة المقاومة للحرارة حتى درجة ١٥٠ درجة مئوية بشرط أن تُعمل الإحتياطات لتسخين الخرسانة تدريجياً ويكون التغير فى درجة الحرارة بطيئا. أما إذا تعرضت الخرسانة لحوالى ١٠٠٠ درجة مئوية كما فى بعض المنشآت مثل أساسات الأفران والمراجل فإننا نستخدم الخرسانة المكونة من الأسمنت الألومينى و ركام كسر الطوب الحرارى.

١١-٩ تأمين تحمل الخرسانة مع الزمن Guaranty & Insurance

نص الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية المسلحة لسنة ٢٠٠١ على بعض الإعتبارات و التوصيات التى تكفل وتضمن تحمل الخرسانة مع الزمن. فعلى الرغم من إستفاء الخلطة الخرسانية للمقاومة فإنه يلزم تأمين مقاومتها مع الزمن بأخذ مجموعة من العوامل المتداخلة فى الإعتبار على النحو التالى:

١- الحد الأقصى لمحتوى الأملاح والمواد الضارة فى ماء الخلط:

يشترط فى ماء خلط الخرسانة أن لايزيد محتوى الأملاح عن الحدود الموضحة فى جدول (١١-٢).

جدول (١١-٢) الحد الأقصى لمحتوى الأملاح والمواد الضارة فى ماء الخلط.

نوع الملح	الحد الأقصى جرام فى اللتر
الأملاح الكلية الذائبة (T.D.S.)	٢,٠
أملاح الكلوريدات على هيئة Cl^-	٠,٥
أملاح الكبريتات على هيئة So_3	٠,٣
أملاح الكربونات والبيكربونات	١,٠
كبريتيد الصوديوم	٠,١
المواد العضوية	٠,٢
المواد غير العضوية وهى الطين والمواد المعلقة غير الرسوبية التى تعكر ماء الخلط	٢,٠

٢- الحد الأقصى لمحتوى أيونات الكلوريدات فى الخرسانة

للوقاية من الصدأ يجب ألا يزيد التركيز الكلى لأيونات الكلوريدات الذائبة فى الخرسانة المتصلدة (والناتج من الماء والركام والأسمنت والإضافات) عند عمر ٢٨ يوما عن الحدود الواردة فى جدول (١١-٣).

جدول (١١-٣) المحتوى الأقصى لأيونات الكلوريدات الذائبة اللازمة للوقاية من الصدأ.

الحد الأقصى لأيونات الكلوريدات الذائبة فى الخرسانة المسلحة كنسبة مئوية من وزن الأسمنت	الظروف حول الخرسانة
٠,١٥	الخرسانة المسلحة معرضة للكلوريدات.
٠,٣٠	الخرسانة المسلحة غير المعرضة للكلوريدات.

٣- الحد الأقصى لمحتوى الكبريتات فى الخرسانة

يجب ألا يزيد المحتوى الكلى للكبريتات فى الخرسانة على هيئة كب أ٣ على ٤% من وزن الأسمنت.

٤- الحد الأقصى لمحتوى الأسمنت

يجب ألا يزيد محتوى الأسمنت فى خلطة الخرسانة عن ٤٥٠ كج/م٣ ما لم تكن هناك إعتبارات خاصة قد أخذت فى التصميم لتفادى التشريخ الناتج عن أنكماش الجفاف فى قطاعات الخرسانة الرقيقة أو الإجهادات الحرارية فى القطاعات السميكة.

٥- الحد الأدنى لمحتوى الأسمنت & الحد الأدنى للمقاومة المميزة & الحد الأقصى لنسبة م/س

عندما تكون الخرسانة معرضه لظروف معينة مع إستخدام الأسمنت البورتلاندى العادى فإنه يمكن الإسترشاد بالجدول رقم (١١-٤) لتحديد الحد الأدنى لمحتوى الأسمنت فى الخلطات.

جدول (١١-٤) الحد الأدنى لمحتوى الأسمنت وللمقاومة المميزة فى خلطات الخرسانة المسلحة.

الظروف التى يتعرض لها المبنى بعد الإنشاء	الحد الأدنى لمحتوى الأسمنت كج/م٣ * المقاس الإعتبارى الأكبر للركام (مم)				الحد الأقصى لنسبة الماء/ الأسمنت	الحد الأدنى للمقاومة المميزة كج/سم٢
	٤٠	٣٠	٢٠	١٠		
عادية: الخرسانة محمية تماماً من الظروف الجوية والظروف المحيطة الضارة.	٣٠٠	٣٥٠	٣٥٠	٣٥٠	٠,٥٠	٢٥٠
متوسطة:الخرسانة غير المعرضة أو المعرضة للظروف المحيطة الضارة ولكنها مدفونة دائماً تحت الماء.	٣٠٠	٣٥٠	٣٥٠	٤٠٠	٠,٤٥	٣٠٠
قاسية:الخرسانة معرضة لظروف محيطة ضارة أو لماء البحر أو لدورات من البلل والجفاف أو الغازات... إلخ.	٣٥٠	٣٥٠	٤٠٠	٤٥٠	٠,٤٠	٤٠٠

* الحدود الواردة بالجدول لخلطات الخرسانة المسلحة المستخدمة ويمكن تخفيض أى محتوى أسمنت بمقدار ٥٠ كج/م٣ فى حالة أستعمالها لخلطات الخرسانة العادية (غير المسلحة).

** إذا كان المقاس الإعتبارى الأكبر للركام يقع بين قيمتين مذكورتين فى الجدول فيؤخذ محتوى الأسمنت المناظر للمقاس الإعتبارى الأقل.

*** يمكن إستخدام إضافات الملدنات أو الملدنات الفائقة لتقليل نسبة ماء الخلط والحفاظ على القوام المطلوب.

٦- الخرسانة فى الظروف الكبريتية

عندما تكون الخرسانة معرضة لأملاح الكبريتات فى التربة أو المياه الجوفية (كبريتات الصوديوم أو البوتاسيوم أو الكالسيوم) فإنه يجب العناية بنوع الأسمنت ومحتواه ونوع الركام والمقاس الإعتبارى الأكبر للركام ونسبة الماء إلى الأسمنت ويمكن الإسترشاد بالقيم الواردة بجدول (١١-٥) لتحديد هذه البنود.

جدول (١١-٥) متطلبات الخرسانة المعرضة للمهاجمة بالكبريتات.

تركيز الكبريتات فى صورة ثالث أكسيد الكبريت (كب أ٣)		نـوع الأسمنت	الحد الأدنى لمحتوى الأسمنت - كج/م٣				الحد الأقصى لنسبة م/س	الحد الأدنى للمقاومة المميزة كج/سم٢
فى التربـة	فى الماء الأرضى		المقاس الإعتبارى الأكبر للركام (مم)					
كب أ٣ الكلى %	كب أ٣ فى مزيج من الماء والتربة بنسبة ٢:١ جم/لتر	جزء فى المليون	٤٠	٣٠	٢٠	١٠		
< ٠,٢	< ١,٠	< ٣٠٠	بورتلاندى عادى	٣٥٠	٣٥٠	٤٠٠	٤٠٠	٠,٥٢	-
٠,٢ إلى ٠,٣٥	١,٠ إلى ١,٥	٣٠٠ إلى ٧٠٠	بورتلاندى عادى	٣٥٠	٣٥٠	٤٠٠	٤٠٠	٠,٤٨	٢٥٠
			مقاوم للكبريتات	٣٠٠	٣٠٠	٣٥٠	٣٥٠	٠,٥٣	٢٥٠
٠,٣٥ إلى ٠,٥٠	١,٥ إلى ١,٩	٧٠٠ إلى ١٢٠٠	مقاوم للكبريتات	٣٥٠	٣٥٠	٤٠٠	٤٠٠	٠,٥٠	٣٠٠
٠,٥٠ إلى ١,٠	١,٩ إلى ٣,١	١٢٠٠ إلى ٢٥٠٠	مقاوم للكبريتات	٤٠٠	٤٠٠	٤٥٠	٤٥٠	٠,٤٥	٣٥٠
١,٠ إلى ٢,٠	٣,١ إلى ٥,٦	٢٥٠٠ إلى ٥٠٠٠	مقاوم للكبريتات مع تغطيات واقية مناسبة	٤٠٠	٤٠٠	٤٥٠	٤٥٠	٠,٤٣	٤٠٠

ويجب ملاحظة الآتى:

* الحدود الواردة بالجدول تطبق على الخرسانة بركام طبيعى (م.ق.م ١٩٧١/١١/٩) كما يطبق على الخرسانة قرب المياه الأرضية بأس هيدروجينى من ٦ إلى ٩ ومحتوية على كبريتات طبيعية وليست مترسبة كأملاح.
** إذا كان المقاس الإعتبارى الأكبر للركام يقع بين قيمتين مذكورتين فى الجدول فيؤخذ محتوى الأسمنت المناظر للمقاس الإعتبارى الأقل.
*** فى الظروف القاسية مثل القطاعات الصغيرة تحت ضغط مائى من جانب واحد أو مغمورة جزئيا يلزم أن يؤخذ فى الإعتبار تقليل نسبة الماء للأسمنت و/ أو زيادة محتوى الأسمنت عن الحدود الواردة بالجدول لتحقيق أقل منفذية ممكنة للخرسانة.

٧- الخرسانة فى المعرضة للمهاجمة المزدوجة بالكبريتات والكلوريدات

قد تتعرض الخرسانة المسلحة لظروف المهاجمة بتركيزات عالية من الكبريتات والكلوريدات معاً ويكون ذلك إما فى ماء البحر أو الماء الجوفى أو تربة السبخة أو غير ذلك. وفى مثل هذه الظروف يلزم إتخاذ إحتياطات أخرى بالإضافة لتلك الإحتياطات الخاصة بالحد الأقصى لنسبة الماء إلى الأسمنت والحد الأدنى لمحتوى الأسمنت كما هو وارد بجدول (١١-٤). من الإحتياطات الإضافية زيادة الغطاء الخرسانى بحيث لايقل ٧ سم للخرسانة المعرضة للبلل والجفاف ولايقل عن ٥ سم للخرسانة المغمورة. كما يجب أن يستخدم نوع أسمنت تتراوح نسبة ألومينات ثلاثى الكالسيوم به بين ٦% و ١٠% ويمكن إستخدام الأسمنت البورتلاندى العادى الذى يفى بهذه النسب أو إستخدام الأسمنت عالى الخبث. كما يجب التأكد من أن الركام المستخدم خامل ولا يتفاعل مع قلويات الأسمنت.

٨- الخرسانة فى الظروف الحمضية

يجب الإهتمام بمكونات وصناعة الخرسانة فى حالة التعرض لظروف حمضية ذات أس هيدروجينى أقل من ٧ . يلزم لذلك زيادة الغطاء الخرسانى وإستخدام دهانات أو تغطيات مناسبة واقية من الأحماض ، كما يجب زيادة محتوى الأسمنت وتقليل نسبة الماء إلى الأسمنت وعمل دمك كامل للخرسانة. ويكون ذلك فى حالتى إستخدام أسمنت بورتلاندى عادى أو مقاوم للكبريتات. أما فى حالة وصول قيمة الأس هيدروجينى ٥,٥ أو أقل فتتخذ إحتياطات أكثر فى الحماية كما يفضل إستخدام أسمنت عالى الخبث.

٩- التفاعل القلوى للركام Alkali - Aggregate Reaction

يوجد نوعان من التفاعل القلوى للركام هما التفاعل القلوى مع السليكا و التفاعل القلوى مع الكربونات والنوع الأول أكثر إنتشاراً. ومشكلة التفاعل القلوى للركام أنه قد لايظهر إلا بعد زمن طويل ، كما أنه لا يوجد حتى الآن إختبار سريع ودقيق يمكن من خلاله معرفة إذا كان خلط ركام معين مع أسمنت معين بنسبة معينة سيؤدى إلى ظهور هذه المشكلة أم لا ، ونفس الوقت لاتوجد طريقة محددة للعلاج الدائم لهذه الظاهرة. وعلى أى حال فإن الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية (٢٠٠١) قد تعرض لهذه الظاهرة وذكر بعض الإحتياطات الخاصة فى هذا الصدد:

أ- التفاعل القلوى مع السليكا Alkali - Silica Reaction

حيث تحتوى بعض أنواع الركام على أنواع مختلفة من السليكا النشطة مثل الأوبال والكرستوباليت التى قد تتفاعل كيميائياً مع القلويات الموجودة أصلاً فى الأسمنت وغيره مثل أكسيد الصوديوم (Na_2O) وأكسيد البوتاسيوم (K_2O). وقد ينتج عن هذه التفاعلات مواد جيلاتنية تنتفش عند إمتصاصها للماء مما يؤدى إلى حدوث إجهادات داخلية فى الخرسانة قد تسبب تشققها أو تفتتها. وللحد من خطر التفاعل القلوى مع السليكا يمكن إتباع ما يلى:

١- إستعمال أسمنت بورتلاندى يحتوى على نسبة منخفضة من القلويات لا تتجاوز ٠,٦% محسوبة على هيئة أكسيد صوديوم (Na_2O).

٢- تحديد محتوى القلويات المكافىء لأكسيد الصوديوم (Na_2O) فى الخلطة الخرسانية بما لايزيد على ٣,٠ كج/م٣.

٣- إحلال جزء من الأسمنت فى الخلطة الخرسانية بمواد بوزولانية وذلك بعد الرجوع إلى مصادر متخصصة لتحديد كمية البوزولانا و مدى فاعليتها.

٤- العمل على تقليل نفاذ الماء إلى الخرسانة بإستخدام أغشية أو دهانات غير منفذة للماء.

ب- التفاعل القلوى مع الكربونات Alkali - Carbonate Reaction

قد تتفاعل بعض أنواع الركام من الحجر الجيرى الدولوميتى (Dolomitic limestone) مع القلويات فى الأسمنت منتجة مركبات تؤدى -مع مرور الوقت- إلى حدوث تمدد يؤدى بدوره إلى ظهور شروخ بالخرسانة تؤثر على تحملها مع الزمن. ويجب عند إكتشاف هذه الظاهرة فى الركام إستبعاده من الإستخدام أو إستخدامه مع أسمنت لاتزيد نسبة القلويات فيه على ٠,٤%. ونظراً لأن هذه الظاهرة تتأثر بالتركيب المعدنى للركام ونسبة الكالسيت إلى الدولوميت فإنه يجب الرجوع إلى جهات متخصصة لتعيين مدى تأثير هذه الظاهرة.

****

****