المحاضرة الثامنة

التآكل الكيميائي للخرسانة

8-1 مقدمة:

يزداد تماسك الخرسانة ومقاومتها تدريجياً أثناء تفاعلات الإماهة وتصل المقاومة إلى حدها الأعلى بعد انتهاء التفاعلات ويستغرق ذلك وقتاً طويلاً يقارب السنة. يفترض أن تحافظ الخرسانة على تلك المقاومة إذا لم تؤثر عليها عوامل تضعف تماسك الخرسانة ومقاومتها. لكن الواقع يدل على أن الخرسانة تتأثر بالعديد من العوامل التي تؤدي إلى إضعافها مع الزمن وحتى الوصول إلى حد لايتمكن البناء من تحمل القوى المطبقة عليه فينهار. هذا الزمن قد يكون قصيراً أو طويلاً جداً بحسب شدة وتأثير العوامل التي تعمل على إضعافه.

تقسم هذه العوامل إلى عوامل ميكانيكية كالصدمات وقوى الاحتكاك والهزات الأرضية والزلازل، وعوامل فيزيائية بسبب التقلص والتمدد لاختلاف درجات الحرارة، وعوامل كيميائية سببها تفاعلات كيميائية بين مكونات الخرسانة والمواد الكيميائية المختلفة التي تستطيع الوصول إلى داخل الخرسانة وخاصة المياه بما تحمله من أملاح منحلة ومواد حمضية تؤدي إلى تآكل الخرسانة وضعف تماسكها. هذا النوع من التآكل يدعى بالتآكل الكيميائي للخرسانة وسندرس فيمايلي الجوانب المتعلقة بهذا النوع من التآكل.

8-1-1 التآكل بسبب رشح الماء العادي:

يرشح الماء من خلال جدران الخرسانة إما بسبب ضغط هيدروليكي على أحد جوانب الجدار فيمر الماء عبر الأقنية الشعرية والمسامات حتى يصل إلى السطح الآخر للجدار، أو بالخاصة الشعرية حيث يرتفع الماء في الأقنية الشعرية للخرسانة. عندما يلامس الماء مكونات الخرسانة خلال مروره ضمن الكتل الخرسانية فإنه يحل بعض هذه المكونات التي لها بعض القابلية للانحلال مثل بلورات ماءات الكالسيوم الناتجة عن إماهة C_3S و C_2S فتنحل ماءات الكالسيوم وتتحول إلى شوارد كالسيوم وشوارد ماءات تحملها المياه الراشحة حتى تصل إلى الوجه الآخر للجدار فتصبح في تماس مع الهواء الحاوي غاز CO_2 فيتفاعل CO_2 مع المحلول محولاً ماءات الكالسيوم إلى كربونات الكالسيوم الضعيفة الانحلال تترسب على سطح الجدار ويتبخر الماء مخلفاً مسحوقاً هشاً من كربونات الكالسيوم ذات اللون الأبيض، وأحياناً يكون مشوباً بمركبات ملونة صفراء أوخضراء من بعض الأكاسيد المعدنية، يكون التآكل بطيئاً في البداية لكن مع مرور السنين ينحل المزيد من المواد من داخل الخرسانة وتزداد مسامية الخرسانة ويزداد معدل مرور الماء خلالها فتزداد سرعة التآكل.

8-1-2 التآكل بسبب رشح الماء الحمضي:

الحموض هي العدو الأكبر للخرسانة بسبب الصفة القلوية للخرسانة والتي تتفاعل مع الحموض بسهولة وبسرعة، كما تتفاعل الحموض مع فولاذ التسليح أيضاً. لحسن الحظ فإن الحموض القوية مثل HCl، HNO_3، H_2SO_4 ليست منتشرة في الطبيعة ويقتصر وجودها على أماكن محدودة مثل مياه الصرف الصحي لبعض المعامل التي تستعمل هذه الحموض أو من بعض التسربات من أماكن تخزين أو استعمال هذه الحموض.

أما الحمض الأكثر انتشاراً في المياه هو حمض الكربون H_2CO_3 الذي يتشكل في المياه نتيجة انحلال غاز CO_2 في الماء ليعطي حمضاً ضعيفاً يتشرد على مرحلتين وفق المعادلات التالية:

$$CO_2 + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3$$

$$H_2CO_3 + H_2O \leftrightarrow H_3O^+ + HCO_3^-$$

$$HCO_3^- + H_2O \leftrightarrow H_3O^+ + CO_3^{-2}$$

عندما يمر هذا الماء الحمضي خلال الخرسانة فإنه يتفاعل مع أكثر من مكون من مكونات الخرسانة محولاً مواداً صلبةً إلى مواد أكثر انحلالاً، من هذه المواد بلورات ماءات الكالسيوم التي تتحول إلى ثنائي كربونات الكالسيوم الأكثر انحلالاً حسب المعادلة:

$$H_2CO_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow Ca(HCO_3)_2 + H_2O$$

كما يتفاعل الماء الحمضي مع الرمال والحصويات الكلسية ومكونها الأساسي هو كربونات الكالسيوم إذ يتحول أيضاً إلى ثنائي كربونات الكالسيوم حسب المعادلة:

$$H_2CO_3 + CaCO_3 \rightarrow Ca(HCO_3)_2$$

وهكذا تتحول بعض الأجسام الصلبة داخل الخرسانة إلى أجسام منحلة تُجرف مع الماء إلى خارج الخرسانة مخافةً وراءها بعض الفراغات.

3-1-8 التآكل الكبريتاتي:

يعد التآكل الكبريتاتي من أخطر أنواع التآكل الكيميائي على الخرسانة، يحدث هذا التآكل عندما تدخل شوارد الكبريتات SO_4^{-2} إلى داخل الخرسانة عن طريق الماء الذي يرشح خلالها حاملاً معه شوارد الكبريتات المنحلة، قد يكون مصدرها مياه جوفية غنية بالكبريتات أو تربة جصية ينحل جزء منها في الماء أو غير ذلك.

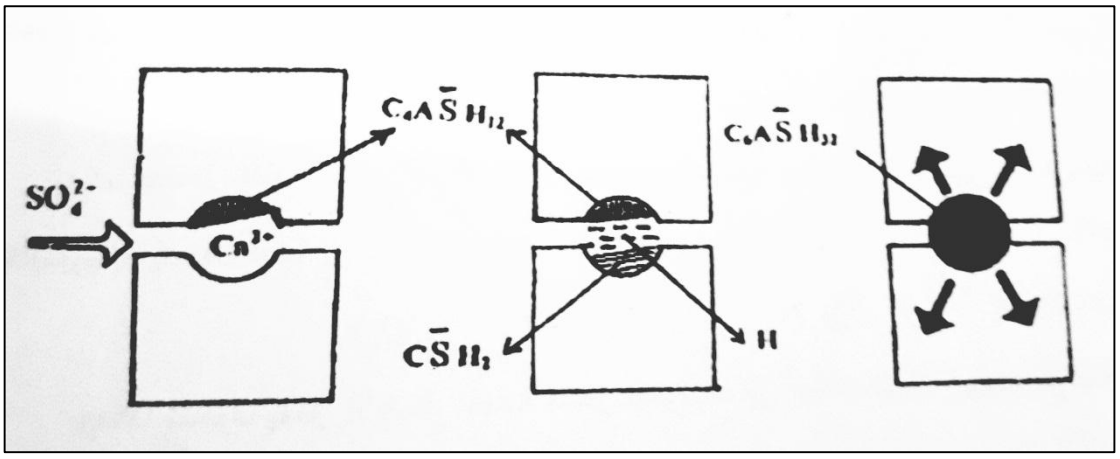
بعد وصول شوارد الكبريتات إلى داخل الخرسانة تصادف شوارد الكالسيوم المنحلة في مياه المسامات فتتفاعل معها مشكلةً الجص حسب المعادلة:

$$SO_4^{-2} + Ca^{+2} + 2H_2O \rightarrow CaSO_4.2H_2O$$

ثم يتفاعل الجص مع أحادي سلفو ألومينات $C_4A\bar{S}H_{12}$ وهو المركب الناتج عن إماهة C_3A ليشكل مادة الايترينايت ذات الحجم الكبير إذ تتبلور هذه المادة مع 32 جزيئة ماء حسب المعادلة:

$$2C\bar{S}H_2 + C_4A\bar{S}H_{12} + 16H \rightarrow C_6A\bar{S}_3H_{32}$$

إذا كانت كميات الجص وأحادي سلفو ألومينات وافرة سيتشكل كمية كبيرة من الايترينايت في معظم المسامات ويكون حجم الايترينايت في المسام أكبر من حجم المسام نفسه فتنشأ قوة ضاغطة داخل المسامات تؤدي إلى ظهور قوى إجهاد داخلي على جدران المسامات وبالتالي إلى إضعاف تماسك صفائح C – S – H مع بعضها وفي النهاية تبدأ الخرسانة في التفتت من الداخل والشكل (1-8) يوضح مراحل التآكل:



الشكل (1-8): مراحل التآكل الكبريتاتي

يُعبر عن تركيز شاردة الكبريتات في المحلول المائي بالميلي غرام في الليتر mg/L من $\bar{S}$ أي SO_3 وأحياناً يستعمل الـPPm للدلالة على التركيز كأجزاء بالمليون ويكون 1 PPm = 1 mg/L. إذا كان تركيز شوارد الكبريتات في المحلول المائي أقل من 1000 PPm فالتآكل الكبريتاتي يكون ضعيفاً، وإذا كان التركيز 2000 PPm – 1000 فالتآكل متوسط الشدة، وإذا كان التركيز أكبر من 2000 PPm فالتآكل يكون شديداً.

أما في التربة الجصية فالتآكل يكون ضعيفاً إذا كانت النسبة الوزنية المئوية للجص في التربة أقل من 0.2%، ويصبح التآكل متوسطاً إذا كانت النسبة 0.5% – 0.2، ويكون التآكل شديداً إذا زادت النسبة على 0.5%.

عندما يلامس جدار اسمنتي محلولاً مائياً غنياً بشوارد الكبريتات من أحد وجهيه فإنه يتعرض لتآكل أشد مما لو تعرض وجها الجدار إلى المحلول المائي، وسبب ذلك هو الضغط الهيدروليكي على أحد الجوانب الذي يدفع الماء إلى الجانب الآخر ويزيد من معدل رشح المياه الحاملة لشوارد الكبريتات، أما إذا تساوى الضغط الهيدروليكي على الجانبين فإن شوارد الكبريتات لا تُجبر على المرور ضمن الخرسانة. وقياساً على ذلك فإن تعاقب الجفاف والرطوبة على الجدار الإسمنتي

يؤدي إلى زيادة التآكل الكبريتاتي لأن الماء الحاوي شوارد الكبريتات يندفع بقوة أكبر نحو الطرف الجاف حاملاً معه شوارد الكبريتات إلى العمق.

لمنع التآكل الكبريتاتي إما أن تُمنع شوارد الكبريتات من الدخول إلى الخرسانة عن طريق إنقاص نفوذيتها للماء أو طليها بمواد عازلة للماء، لكن هذا لا يمكن ضمان تحقيقه دائماً، أو أن يُستعمل نوع من الإسمنت يقاوم التآكل الكبريتاتي وهو الصنف V حسب تصنيف ASTM ويتميز باحتوائه على نسبة منخفضة من C_3A ولذلك تكون كمية أحادي سلفو ألومينات الناتجة عن إماهة C_3A صغيرة ولا تؤدي بتفاعلها مع الجص إلى تشكل كميات كبيرة من الايترينايت.

يُشترط في صنف الإسمنت المقاوم للكبريتات أن تكون نسبة C_3A أقل من 5% وعليه فإن حجم الايترينايت المتشكل يمكن أن يملأ الجزء الأكبر من حجم المسام دون أن يؤثر بقوى إجهاد داخلي، وهذه النتيجة إيجابية جداً على الخرسانة إذ تقلل نفوذية الخرسانة للماء وتجعلها أكثر مقاومة للتآكل الكيميائي.

عند إجراء بعض الأبحاث لاختبار مدى تأثر نوع من الخرسانة بالتآكل الكبريتاتي يجب تسريع عملية التآكل لأنها عادة تستغرق وقتاً طويلاً. يمكن تسريع تفاعل التآكل الكبريتاتي بغمر العينة في محلول كبريتاتي بتركيز عالٍ ثم تجفيف العينة ثم إعادة غمرها وهكذا.... تُقاس مقاومة العينات بعد عدد من تعاقبات الجفاف والغمر لمعرفة مدى تأثر العينات بالتآكل الكبريتاتي.

يصبح التآكل الكبريتاتي أكثر خطورة إذا كان المحلول المائي يحوي كبريتات المغنيزيوم لأنها تتفاعل أيضاً مع المادة الرابطة في الخرسانة وهي C – S – H ويكفي غمر الخرسانة في محلول مشبع من كبريتات المغنيزيوم مدة سنتين أو ثلاث حتى تتخرب. تتفاعل كبريتات المغنيزيوم مع C – S – H حسب المعادلة:

$$C_3S_2H_3 + 3M\bar{S}H_n \rightarrow 3C\bar{S}H_2 + 3MH + 2SH_3$$

كما يتفاعل أحادي سلفو ألومينات مع كبريتات المغنيزيوم مشكلاً ماءات المغنيزيوم ضعيفة الانحلال وذات الحجم الكبير. وتتفاعل كبريتات المغنيزيوم أيضاً مع بلورات ماءات الكالسيوم لتحولها إلى ماءات المغنيزيوم حسب المعادلة:

$$CH + M\bar{S}H_n \rightarrow C\bar{S}H_2 + MH$$

4-1-8 التآكل القلوي السيليكاتي:

يحدث هذا النوع من التآكل الكيميائي للخرسانة عندما توجد في الإسمنت نسبة مرتفعة من الأكاسيد القلوية $K_2O + Na_2O$ تزيد عن 1% وعندما توجد مع الرمال والحصويات مواد سيليكاتية فعالة يمكن أن تتفاعل مع ماءات الصوديوم وماءات البوتاسيوم مشكلة سيليكات الصوديوم والبوتاسيوم كبيرة الحجم تكون بشكل هلامي تتمدد داخل الخرسانة وتؤدي إلى حصول تشققات. يتعلق التآكل القلوي السيليكاتي بنسبة القلويات القوية في الإسمنت ونوعية السيليكا وفعاليتها ونسبة الرطوبة ضمن الخرسانة.

8-2 المواد المسببة للتمدد والانتفاخ:

تتفاعل بعض المواد ببطء مع مكونات الخرسانة أو مع الماء ضمن الخرسانة مشكلة مواداً كبيرة الحجم. تتم هذه التفاعلات بعد أن تبدأ العجينة الإسمنتية بالتصلب لذلك يؤدي تشكلها إلى زيادة في حجم العجينة أو مايعرف باسم الانتفاخ وبالتالي إضعاف المقاومة وربما تفتت الخرسانة. من هذه المواد الكلس الحر وأكسيد المغنيزيوم والجص.

8-2-1 الكلس الحر CaO

يسبب الكلس الحر في الإسمنت انتفاخاً في العجينة الإسمنتية بسبب تفاعله البطيء مع الماء مشكلاً ماءات الكالسيوم ذات الحجم الكبير. إن مصدر الكلس الحر في الإسمنت هو الأحجار الكلسية المستعملة في صناعة الإسمنت إذا كانت موجودة بنسبة زائدة عن الكمية اللازمة للتفاعل مع الغضار، إذ تتفكك كربونات الكالسيوم عند التسخين إلى أكسيد الكالسيوم وغاز CO_2، وإذا تعرض CaO إلى حرارة عالية نحو $1400C^{\circ}$ في الفرن يتغير شكله البلوري ويصبح تفاعله مع الماء بطيئاً بحيث يحصل هذا التفاعل بعد أن تبدأ العجينة بالتصلب ويشكل ماءات الكالسيوم حجمها الكبير يؤدي إلى حصول الانتفاخ، لذلك تحدد المواصفات العالمية قيمة عظمى للكلس الحر لا يسمح بتجاوزها.

8-2-2 أكسيد المغنيزيوم MgO

إن تأثير أكسيد المغنيزيوم مشابه كثيراً لتأثير أكسيد الكالسيوم الحر، فهو من المواد المسببة للانتفاخ بسبب تفاعله مع الماء ببطء مشكلاً نواتج كبيرة الحجم من ماءات المغنيزيوم حسب المعادلة:

$$MgO + H_2O \rightarrow Mg(OH)_2$$

$$M + H \rightarrow MH$$ أو باستعمال الرموز الخاصة

لذلك تحدد المواصفات العالمية الحد الأعلى المسموح به من أكسيد المغنيزيوم بحيث لا يسبب تمدداً كبيراً يصل إلى مرحلة الضرر.

8-2-3 الجص

وهو كبريتات الكالسيوم المائية $CaSO_4.2H_2O$ ويضاف بنسبة 3-4% غلى الكلينكر أثناء طحنه بهدف ضبط تفاعل C_3A السريع وإذا أضيف إلى الإسمنت كميات إضافية من الجص فإنها تتفاعل مع نواتج تفاعل إماهة C_3A وتشكل مركبات مركبات كبيرة الحجم تؤدي إلى حصول انتفاخ وإضعاف مقاومة الخرسانة.