دراسة مقاومة امتداد الشقوق في البيتون وتأثرها بتغير خصائصه المادية

د.م. ميادة الأحمد الكوسا*

الملخص

يتطلب تصميم السلوك اللاخطي للمنشآت البيتونية معرفة مقاومة المادة لظهور الشقوق وانتشارها، إذْ من الممكن توصيف متانة المادة ضد التشقق باستخدام معامل تركيز الإجهادات وفتح الشق الحرج الموافق للحمولة الأعظمية، ويتطلب حساب هذه الحمولات بشكل أساسي معرفة طول الشق الموافق للحمولة الأعظمية.

هدفَ هذا البحث بشكل أساسي إلى استنتاج العلاقات التي تربط بين معامل تركيز الإجهادات وفتح الشق الحرج الموافق للحمولة الأعظمية، وخصائص البيتون كالقطر الأعظمي للحصويات وحجم الروبة الإسمنتية في الخلطة ومقاومة المادة على الضغط.من أجل تحقيق هدف الدراسة. استُخْدمتْ نتائج تجارب الانعطاف لمجموعة جوائز ذات أبعاد مختلفة ومحضرة من مجموعة خلطات بمقاومات مختلفة. حسبتْ أطوال الشقوق الحرجة باستخدام نموذج Olesen التحليلي الذي يعتمد على قانون تليين ثنائي الخط، وحددتْ معاملاته باستخدام طريقة التحليل العكسي.

أظهرت نتائج الدراسة أن معاملات انهيار أي معامل تركيز إجهادات وفتح الشق الحرج الموافق للحمولة الأعظمية، ترتبط بشكل أساسي بحجم الروبة الإسمنتية في كل خلطة وتزداد بازدياد مقاومة المادة على الضغط، في حين تبدو هذه المعاملات مستقلة عن حجم الحصويات المستخدمة.

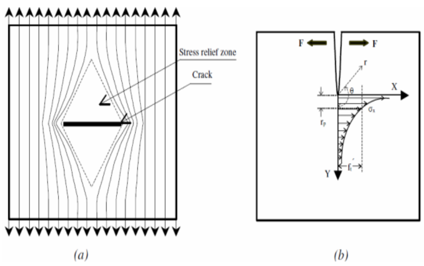
الكلمات المفتاحية: بيتون – معامل تركيز الإجهادات – فتح الشق الحرج – منحنى تليين ثنائي الخط.

* أستاذ مساعد في كلية الهندسة المدنية – قسم الهندسة الإنشائية – جامعة دمشق

1- المقدمة:

تنشا الشقوق في البيتون حتى قبل تحميـل العناصـر الإنشائية نتيجة لعدة عوامل، مثل انكماش المادة فـي مرحلة التصلب وضعف التماسك بين المونة الإسمنتية والحصويات. في مرحلة التحميل تتطور هذه الشقوق وتصبح في بعض الأحيان واضحة للعيان وتؤثر تأثيراً سلبياً في مقاومة المنشأ وديمومته.

يهتم ميكانيك التصدع بدراسة كيفية تطور الشقوق في العناصر الإنشائية، وكان Griffith أول مـن طـوره لعمل على وصف سلوك تصدع المواد الهشة اعتماداً على نظرية المرونة. بحسب Griffith فإن الإجهاد الشد المطبق على مقطع عينة فيها شـق يـسبب اقتـراب الإجهادات في رأس الشق من اللانهاية أي يتجه إلـى حده الأقصى (الـشكل (1))، وقـد اسـتنتج أنـه إذا استُخْدِمتْ المرونة الخطية فإن شروط الانهيار لا يمكن تحديدها اعتماداً على معيار المقاومة بل على معيـار الطاقة.



الشكل (1) a: **تغير مسار الإجهاد الأساسي في عينة متشققة،** b: **توزع الإجهاد قرب قمة الشق**

عندما يتوسع الشق تنساب الطاقة إلى قمـة الـشق حيث تُبدد عبر تطور التصدع. بنـاء علـى هـذه الملاحظة وجد Griffith ولاحقـاً Irwin أنـه مـن الممكن التعبير عن انتشار الشق بمعادلة توازن بين الطاقة اللازمة لإحداث سطح جديد والطاقة الكامنة للعينة.

بحسب نظرية Griffith يعطى الإجهـاد الحـرج بالعلاقة:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{E\,G_C}{\pi a}} = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi a}} \qquad (1)$$

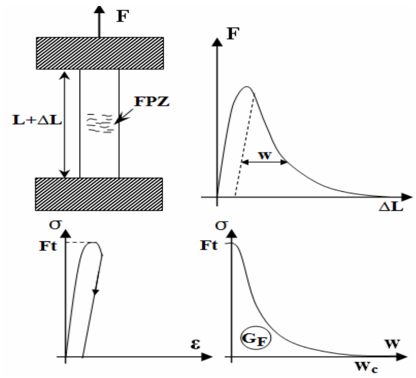
إذْ σ_c: الإجهاد الحرج، a: طول الشق G_c: معدل تحرير الطاقـة الحرجـة، Kic: معامـل تركيـز الإجهادات، وتعد Kic خاصية ثابتـة للمـواد شـبه الهشة أي إنها لا تتغير بتغير حجم العينة، فإذا كانت المادة خاضعة للإجهاد $\sigma < \sigma_c$ فإنها قادرة علـى تحمل هذا الإجهاد دون نمو للشق الموجود مسبقاً.

عند محاولة تطبيق العلاقات السابقة علـى المـواد الإسمنتية كالبيتون نلاحظ أن النتائج تتعلـق بحجـم العينات وشكلها يعود ذلك إلى حجم منطقة الـضرر الكبيرة نسبياً في البيتون التي يكون سـلوك المـادة فيها لاخطياً، لذلك دعت الحاجة لتطـوير ميكانيـك الانهيار اللاخطي NLFM لوصف سلوك المواد شبه الهشة كالبيتون [6][6].

يعد نموذج الشق الوهمي الـذي طـوره الباحـث Hillerborg عام 1976[6] نموذجاً فعالاً في وصف سلوك البيتون في منطقة الضرر، إذْ يكون سـلوك المادة خطياً مرناً حتى وصول الإجهاد فيهـا إلـى مقاومة المادة على الـشد ليبـدأ بعـدها الإجهـاد بالتناقص مع ازدياد فتح الشق، ويدعى هذا السلوك بالتليين ويعبر عنه بمنحنى إجهـاد – فـتح الـشق $\sigma - w$ المبين بالشكل (2الشكل (3).

بحسب توصيف السلوك اللاخطي في منطقة الضرر وبحسب نموذج Shah & Jenk فإن البيتـون ينهـار عندما يصل معامل تركيز الإجهادات (Kic) وفـتح الشق (COD) إلى قيمهـا الحديـة. مـع سـهولة التعريف السابق إلا أن صعوبته تكمن فـي تحديـد طول الشق الموافق للحمولة الحرجة بشكل دقيـق. يمكن حساب طول الشق بحسب RILEM (الاتحـاد العالمي للتجارب المخبرية ومواد البنـاء) بـإجراء تجربة تحميل وإزالة الحمولة عند وصـولها إلـى قيمتها الأعظمية، إلا أن هذه الطريقة صعبة وتحتاج إلى معدات خاصة للتحكم بالحمولة فضلاً عـن أن إمكانية الخطأ في هذه الطريقة كبير نسبياً.

في المقابل يمكن تقدير طول الشق بطرائق عديدة؛ وذلك إما باستخدام طريقة العناصر المحدودة أو الطرائق التحليلية وفي كلتا الحالتين يجب معرفة شكل منحنى التليين $\sigma - w$. تعتمد دقة النتائج على دقة اختيار معاملات منحنى التليين $\sigma - w$إذْ إنها ترتبط بحجم العينة وشكلها. في هذا البحث حلتْ مشكلة ارتباط بارامترات منحنى التليين بشكل العينة باستخدام التحليل العكسي الذي يستخدم للحصول على بارامترات مستقلة عن الحجم. وفق هذه الطريقة تُحسب معاملات منحنى التليين بحيث يكون الفرق بين منحنى حمولة – فتح شق النظري المحسوب من النموذج التحليلي، ومنحنى حمولة – فتح الشق التجريبي أصغر ما يمكن. بعد حساب بارامترات منحنى التليين المستقلة عن حجم العينة وشكلها يحسب طول الشق الذي يستخدم لحساب معامل تركيز الإجهادات الحرج (Kic) وفتح الشق الحرج (CODc).



الشكل (2) منحنيات الشد البسيط

2- هدف البحث:

هدفَ البحث إلى حساب مقاومة المادة لامتداد الشقوق فيها؛ وذلك بحساب معامل تركيز الإجهادات (Kic) وفتح الشق الحرج تحت الحمولة الأعظمية (CODc)، بالاعتماد على طول الشق المحسوب من التحليل العكسي باستخدام النموذج التحليلي للباحث Olesen الذي يعتمد على منحنى تليين ثنائي الخط [88].

كما هدفَ البحث إلى إيجاد العلاقة بين (Kic) و(CODc) والخصائص المادية للبيتون كحجم الرويبة الإسمنتية (حجم المواد التي يقل قطرها عن 63 ميكروناً، أي اسمنت وماء وإضافات معدنية) والقطر الأعظمي للحصويات ومقاومة المادة على الضغط.

3- النموذج التحليلي لحساب منحنى قوة- فتح الشق باستخدام منحنى تليين ثنائي الخط:

يفترض نموذج Ulfkjaer [1414] التحليلي وجود مفصل لدن في منتصف الجائز الموضح بالمنطقة المظللة في الشكل (4)، افترض Ulfkjaer منحنى تليين خطياً. عرض المفصل اللدن هو h ويساوي نسبة من ارتفاع المقطع $h = k * d$، وعدتْ هذه النسبة $k = 0.5$ إذْ أبدت هذه النسبة توافقاً بين المنحنى التجريبي والنظري.

وضع العالم Olesen نموذجاً تحليلياً لدراسة انتشار الشقوق الناتجة عن الانعطاف بالاعتماد على نموذج أولفكجاير إلا أنه افترض منحنى إجهاد – فتح الشق ثنائي الخط. يفترض النموذج ما يأتي:

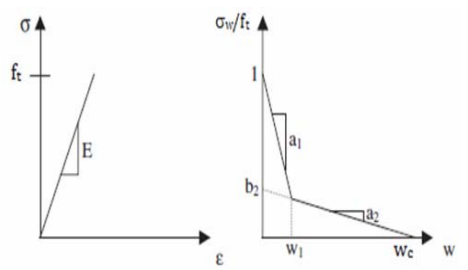
1- يكون سلوك المادة مرناً خارج منطقة تطور التصدع FPZ (Fracture Process Zone).

2- يتشكل الشق الوهمي عند وصول الإجهاد إلى القيمة F_t وذلك في الاتجاه المعامد للإجهاد.

3- بعد تشكل الشق الوهمي يكون فتح الشق تابعاً للإجهاد وفق علاقة $\sigma - w$.

4- عندما يصل فتح الشق w إلى قيمة عرض الشق الأعظمي w_c يصبح الإجهاد المنقول بين طرفي الشق الوهمي مساوياً للصفر ويبدأ الشق الحقيقي بالتشكل.

5- يكون سلوك الضغط مرناً خطياً.



الشكل (3) علاقة إجهاد-تشوه في الطور المرن وبعد ظهور التشققات (منحنى التليين)

تعطى معادلة الإجهاد بالعلاقات الآتية:

$$\sigma = F_t(b_i - a_i w) = \begin{cases} i = 1 & 0 \le w < w_1 \\ i = 2 & w_1 \le w < w_2 \end{cases} \quad (2)$$

$$w_1 = \frac{1-b_2}{a_1 - a_2}, \quad w_2 = \frac{b_2}{a_2} \quad (3)$$

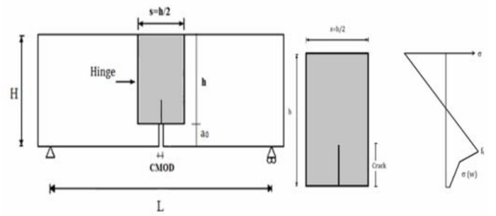
نعرف ثوابت منحنى التليين ثنائي الخط:

$$\beta_1 = \frac{f_t a_1 s}{E}, \quad \beta_2 = \frac{f_t a_2 s}{E},$$

$$c = \frac{(1-b_2)(1-\beta_1)}{\beta_2 - \beta_1} \quad (4)$$

نعرف العزم اللابعدي وزاوية الدوران اللابعدي:

$$\mu = \frac{6M}{f_t b h^2}, \quad \theta = \frac{hE\varphi}{s f_t}, \quad \alpha = \frac{d}{h} \quad (5)$$



الشكل (4) المفصل اللدن في جائز مزود بثلم وكيفية توزع الإجهادات

(1)

تعطى الزاوية اللابعدية والعزم اللابعدي في الطور المرن بالعلاقة الآتية:

$$0 < \theta \le 1, \quad \mu = \theta \quad (6)$$

تعطى الزاوية اللابعدية والعزم اللابعدي في الطور الأول بالعلاقة الآتية:

$$1 < \theta \le \theta_{I-II},$$

$$\alpha = 1 - \beta_1 - \sqrt{(1-\beta_1)\left(\frac{1}{\theta} - \beta_1\right)} \quad (7)$$

$$\mu = 4\left(1 - 3\alpha + 3\alpha^2 - \frac{\alpha^3}{1-\beta_1}\right)$$

$$\theta_{I-II} = 0.5\left(1 - c + \sqrt{(1-c)^2 + \frac{c^2}{\beta_1 - 1}}\right) \quad (8)$$

تعطى الزاوية اللابعدية والعزم اللابعدي في الطور الثاني بالعلاقة الآتية:

$$\theta_{I-II} < \theta \le \theta_{II-III} \quad (9)$$

$$\alpha = 1 - \beta_2 - \frac{1-b_2}{4\theta}(2-\beta_2) - \sqrt{(1-\beta_2)\frac{(2-\beta_2)(1-b_2)^2}{(4\theta)^2(1-\beta_2)} - \beta_2 + \frac{(1-b_2)\beta_2}{2\theta} + \frac{b_2}{\theta}} \quad (10)$$

$$\mu = 4\left(1 - 3\alpha + 3\alpha^2 - \frac{\alpha^3}{1-\beta_2}\right)\theta + (6\alpha - 3) - \frac{(1-b_2)(3-\beta_2)\alpha^2}{1-\beta_2} \quad (11)$$

$$\theta_{II-III} = 0.5\left(\frac{b_2}{\beta_2} + \sqrt{\frac{\beta_2}{4}(1-b_2)^2 + \frac{1}{2}(1-b_2^2) + \frac{b_2^2}{\beta_2}}\right) \quad (12)$$

تعطى الزاوية اللابعدية والعزم اللابعدي في الطور الثالث بالعلاقة الآتية:

$$\theta > \theta_{II-III},$$

$$\alpha = 1 - \frac{1}{2\theta}\left(1 + \sqrt{1 - b_2 + \frac{b_2^2}{\beta_2}}\right) \quad (13)$$

$$\mu = 4(1 - 3\alpha + 3\alpha\alpha - \alpha^3)\theta + (6\alpha - 3) - 3\alpha\alpha + \frac{b_2}{4\theta\theta}\left(1 - \frac{b_2}{\beta_2}\right)^2 - \frac{b_2(1-\alpha)}{2\theta}\left(1 - \frac{b_2}{\beta_2}\right) \quad (14)$$

يحسب العزم والقوة من العلاقات:

$$M = \frac{PL}{4} + \frac{m_b.g.L}{8},$$

$$P = \frac{2\mu f_t h^2 b}{3L} - \frac{1}{2} m_b.g \quad (15)$$

يعطى فتح الشق النظري والموافق للقيمة التجريبية المقيسة بالعلاقة:

$$CMOD = COD + COD_g + COD_e \quad (16)$$

$$COD = \frac{s f_t}{E}\frac{1 - b_i + 2\alpha\theta}{1 - \beta_i}$$

إذ

$$(b_i, \beta_i) = \begin{cases} (1, \beta_1) & Phase \quad II \\ (b_2, \beta_2) & Phase \quad III \\ (0,0) & Phase \quad IV \end{cases} \quad (17)$$

$$COD_g = \frac{s f_t 2(a_0 + d)}{hE}(\theta - 1)$$

$$COD = \frac{6PLa_0}{EbH^2} V1 \quad (2)$$

إذْ تحسب v1 من العلاقة الآتية:

V1=(V1(Stang)+V1(Karihaloo)) (3)[7[13]

$$V1(Stang) = \left(\frac{a_0 + d}{a_0}\right) \cdot \left(0.76 - 2.28.y + 3.87.y^2 - 2.04.y^3 + \frac{0.66}{(1-y)^2}\right) \quad (20)$$

$$V1(Karihaloo) = 0.76 - 2.28.y_1 + 3.87.y_1^2 - 2.04.y_1^3 + 0.66/(1-y_1)^2 \quad (41)$$

$$y=\frac{a_0}{H}, y1=(a_0+H)/(H+d_0) \quad (22)$$

4- الدراسة التجريبية:

4-1- الخلطات البيتونية:

اختيرت معطيات متجانسة تجريبية من بحوث سابقة اختُيِرتْ بالآلية نفسها، وهي: 13 جائزاً مـن سـبع خلطات للباحث [9] Zhao، ستة جوائز من خلطـة واحدة للباحث [10] Roesler، ثلاثة جوائز من ثلاث خلطات للباحث [12] Casuccio، و16 جـائزاً مـن ثماني خلطات للباحث [13] Zhang. يراوح القطـر الأعظمي للحصويات المستخدمة بـين [mm] 10-80 وذلك من أجل دراسة تأثير قطر الحـصويات فـي بارامترات التصدع.6 جوائز منخلطة واحدة للباحث Danhash et al [5].يوضح الجدول (1) المكونـات الأساسية للخلطات البيتونية المـستخدمة للتجـارب جميعها.

4-2 العينات:

اختيرت جوائز بارتفاعات مختلفة كما أُخذَتْ نـسب مختلفة لارتفاع الثلم a_0 إلى ارتفـاع الجـائز H، إذْ راوحت نسبة a_0/H من 0.1 إلى 0.5 وذلك من أجل تحديد أثر ذلك في بارامترات التصدع. يبين الجدول (2) أبعاد العينات البيتونيـة ووزن الجـائز الـذي تستخدم كمعطيات في التحليل العكسي، (معطيـات الإدخال هي وزن الجائز وابعاده، ومنحنى حمولـة فتح الشق التجريبي، وFt, E

الجدول (1) أبعاد الجوائز البيتونية ومواصفاتها

Concrete	Beam	Height H [mm]	Width B [mm]	Span S [mm]	Notch /height a0/H	Mass [kg]
C1 Danhash et al.	B1	150	80	600	0.33	16.5
	B2	150	70	600	0.37	15.7
	B3	150	68	600	0.37	14.5
	B4	150	80	600	0.30	15.3
	B5	100	80	600	0.53	15.3
	B6	150	80	600	0.53	15.9
Roseler	B1→3	150	80	600	0.33	17.3
	B4→6	250	80	1000	0.33	48
C40, C80 Zhang	All	100	100	400	0.1	9.2
Casuccio	all	105	75	400	0.5	7.5
Zhao SG3-6	all	300	120	1200	0.4	10
WG1 Zhao	B1	250	120	1000	0.40	73
	B2	300	120	1200	0.40	105
	B3	400	120	1600	0.40	188
LG1 Zhao	B1	400	240	1600	0.40	376
	B2	450	240	1800	0.40	476
	B3	500	240	2000	0.40	588
	B4	550	240	2200	0.40	711
SG1 Zhao	B1	300	120	1200	0.4	102
	B2	400	120	1600	0.4	182
Einsfeld	B1	76.2	38.1	400	0.50	7.4
	B2	152.4	38.1	400	0.50	7.5
	B3	304	38.1	400	0.50	7.6

الجدول (2) نسب المواد المستخدمة في الخلطات البيتونية

Mix	Cement Kg/m³	Gravel Kg/m³	D_{max} [mm]	Sand Kg/m³	Water Kg/m³	W.R [Kg/m³]	Fly ash	W/C	A.E %
C1Danhash et al.	400	1081	20	777	160	-	-	0.4	-
SG1 Zhao	196	1090	10	869	140	1.68	84	0.5	1.96
SG3 Zhao	240	1154	20	814	135	1.80	60	0.45	1.95
SG4 Zhao	309	1145	20	744	135	2.32	77	0.35	2.51
SG5 Zhao	420	1121	20	698	140	2.80	47	0.3	2.80
SG6 Zhao	168	1287	40	769	120	1.44	72	0.6	1.68
LG1 Zhao	159	1496	80	625	102	1.36	68	0.45	1.59
WG1 Zhao	159	1065	40	625	102	1.36	68	0.45	1.59
Roesler	290	1107	19	718	160	1.68W.R+ 1.65F[1]	88	0.55	0.24
Einsfield	420	992	9.5	860	149	11.5	S.P[2] 11.5	0.31	-
Casuccio G18	263	1080	30	835	184	-	-	0.7	1.5
Casuccio G37	431	1060	30	765	149	4.2	-	0.35	2.5
Casuccio G48	452	960	30	875	155	4.8	-	0.34	3.5
Zhang C40	397	1065	10,16, 20,25	532	205	-	70	0.52	-
Zhang C80	450	1144	10,16, 20,25	572	150	-	SF[3](50)	0.33	-

AE: Air entraining agent. **1: F** is high range water reducer. **2: S.P** is super plasticizer. **3: SF** is silica fume.

5- التحليل العكسي:

يهدف التحليل العكسي إلى حساب بارامترات التصدع (طاقة التصدع G_F وفتح الشق الحرج Wc) المستقلة عن حجم العينة انطلاقاً من منحنى حمولة – فتح الشق التجريبي؛ وذلك من خلال مطابقة المنحنى النظري مع المنحنى التجريبي[15],[9].

يتكون التحليل العكسي من ثلاث مراحل الأولى: هي إدخال المعطيات وهي الخواص المادية للبيتون وأبعاد الجائز ومنحنى حمولة – فتح الشق التجريبي، الثانية: وهي افتراض بارامترات التصدع إذْ تُفْتَرض قيم مبدئية لثوابت منحنى التليين ثنائي الخط a1, a2 ,b2، ثم يبدأ البحث عن القيم التي تحقق توافقاً بين منحنى حمولة فتح الشق التجريبي والنظري وحساب المنحنى النظري والثالثة: مقارنة منحنى حمولة - فتح الشق النظري بمنحنى حمولة- فتح الشق التجريبي، فإذا كان الخطأ أصغر من 1% تعد القيم نهائية.

يحسب برنامج التحليل العكسي الذي وضع باستخدام لغة MATLAB كلا من:

1- منحنى حمولة– فتح الشق النظري.

2- طاقة التصدع G_F.

3- طول الشق af.

4- ثوابت منحنى التليين a1,a2,b2.

5- فتح الشق الأعظمي W_c.

6- طول الشق.

7- معامل تركيز الإجهاد Kic.

8- فتح الشق الحرج الموافق للحمولة الأعظمية CODc.

حللت المعطيات باستخدام برنامج التحليل العكسي، ومن ثم حسب طول الشق اللازم لحساب مقاومة المادة على امتداد الشقوق Kic وفتح الشق الحرج الموافق للحمولة الأعظمية CODc. يوضح الجدول (3) نتائج التحليل العكسي.

وضحنا فيما يأتي العلاقات المستخدمة لحساب معامل تركيز الإجهادات وفتح الشق الحرج الموافق للحمولة الأعظمية.

6- حساب مقاومة امتداد الشقوق في البيتون:

وضع الباحث tRienhard **[11]** معادلة لحساب مقاومة امتداد الشقوق اعتماداً على قيمة الشق، بشرط أن يكون المجاز أربعة أضعاف ارتفاع الجائز (S/D=4)، وتعطى هذه المعادلة بالعلاقة الآتية:

$$K(P,a)=\frac{3PS\sqrt{a}}{2D^{2}B}F_{3}\left(\frac{a}{D}\right) \quad (23)$$

إذْ F3 هو تابع لنسبة طول الشق إلى الارتفاع ويعطـى بالعلاقة الآتية:

$$F_{3}\left(\frac{a}{D}\right)=\frac{1.99-a/D(1-\frac{a}{D})[2.15-3.93\left(\frac{a}{D}\right)+2.7\left(\frac{a}{D}\right)}{\left(1+\frac{2a}{D}\right)(1-\frac{a}{D})^{3/2}} \quad (24)$$

حسب كل من Kic وCODcg اعتماداً على طول الشق المحسوب من التحليل العكسي، ويوضح الجدول (4) النتائج المحسوبة فضلاً عن حجم الروبة الإسمنتية التي ستُدرس العلاقة بينها وبين Kic وCODcg.

الجدول (3) نتائج التحليل العكسي

Mix	Beam	الخواص المادية			d_{max} [mm]	P.V	بارامترات التحليل العكسي			
		F'c [Mpa]	E [Gpa]	Ft [Mpa]			af [mm]	W [mm]	Wc [mm]	G_F N/mm
SG1	B1	43.8	31.4	3.73	20	0.24	60.190	0.038	0.510	0.332
	B2				20	0.24	68.460	0.036	0.518	0.329
SG3	B1	50.9	35.7	3.45	20	0.24	79.610	0.059	0.330	0.269
SG4	B1	56.4	35.9	3.67	20	0.27	75.110	0.056	0.299	0.258
SG5	B1	50.2	41	3.42	20	0.30	76.460	0.048	0.250	0.237
SG6	B1	50.8	38.9	3.45	40	0.21	68.800	0.030	0.370	0.262
WG1	B1	40	33.6	3.51	40	0.18	56.100	0.033	0.277	0.287
	B2				40	0.18	71.040	0.053	0.482	0.315
	B3				40	0.18	61.740	0.029	0.546	0.331
LG1	B1	40	33	3.51	80	0.18	54.640	0.021	0.669	0.376
	B2				80	0.18	55.480	0.028	0.635	0.387
	B3				80	0.18	77.210	0.034	0.686	0.431
	B4				80	0.18	58.360	0.031	0.645	0.395
C1	B1	33.7	35	3.70	20	0.28	50.540	0.069	0.220	0.211
	B2				20	0.28	48.600	0.065	0.216	0.208
	B3				20	0.28	44.660	0.041	0.191	0.185
	B4				20	0.28	48.580	0.040	0.178	0.204
	B5				20	0.28	35.180	0.046	0.232	0.188
	B6				20	0.28	36.210	0.045	0.250	0.198
Roesler	B1	58.3	32	3.74	20	0.29	38.560	0.027	0.280	0.195
	B2				20	0.29	39.530	0.033	0.301	0.214
	B3				20	0.29	37.100	0.020	0.201	0.186
	B4				20	0.29	49.480	0.034	0.375	0.242
	B5				20	0.29	47.820	0.024	0.200	0.163
	B6				20	0.29	43.800	0.023	0.172	0.155
Casuccio	B1	18.1	27.1	3.40	30	0.27	18.670	0.014	0.194	0.106
	B2	37.5	33.1	4.10	30	0.29	19.560	0.015	0.175	0.132
	B3	48.4	39.9	5.30	30	0.30	15.370	0.010	0.171	0.136
Zhang C40	D10 B1	39.55	30	3.208	10	0.36	38.740	0.010	0.156	0.145
	D10 B2				10	0.36	31.020	0.015	0.106	0.135
	D16 B1	40.05	30	4.555	16	0.36	29.400	0.024	0.225	0.193
	D16 B2				16	0.36	20.570	0.014	0.227	0.177
	D20 B1	39.23	30	6.190	20	0.36	9.030	0.031	0.437	0.239
	D20 B2				20	0.36	16.060	0.019	0.374	0.219
	D25 B1	40.07	30	2.87	25	0.36	43.910	0.037	0.397	0.223
	D25 B2				25	0.36	46.870	0.055	0.433	0.217
Zhang C80	D10 B1	85.2	35	5.793	10	0.32	24.810	0.019	0.141	0.176
	D10 B2				10	0.32	29.160	0.026	0.168	0.199
	D16 B1	85.42	35	5.335	16	0.32	34.550	0.031	0.153	0.212
	D16 B2				16	0.32	29.180	0.025	0.155	0.172
	D20 B1	82.29	35	5.458	20	0.32	33.820	0.031	0.172	0.235
	D20 B2				20	0.32	33.820	0.031	0.172	0.235
	D25 B1	82.28	35	3.844	25	0.32	42.120	0.041	0.345	0.270
	D25 B2				25	0.32	41.660	0.042	0.293	0.232

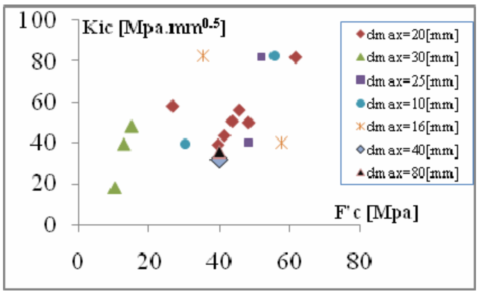
الجدول (4) قيم مقاومة امتداد الشقوق Kic وفتح الشق تحت الحمولة الأعظمية CODc

concrete	F'c[Mpa]	Ft[Mpa]	d_{max}[mm]	Kic[Mpa.mm$^{0.5}$]	CODc[mm]	P.V[m^{3}/m^{3}]
Zhao SG1	43.8	3.73	20	41.595	0.019	0.241
Zhao SG3	50.9	3.45	20	43.841	0.025	0.240
Zhao SG4	56.4	3.67	20	45.806	0.024	0.270
Zhao SG5	50.2	3.42	20	43.481	0.021	0.297
Zhao SG6	50.8	3.45	40	39.036	0.016	0.207
Zhao WG1	40	3.51	40	31.970	0.018	0.184
Zhao LG1	40	3.51	80	77.294	0.017	0.184
Danhash et al. C1	33.7	3.7	20	21.067	0.019	0.277
Roseler	58.3	3.74	20	26.944	0.014	0.193
Cassucio1	18.1	3.4	30	10.395	0.006	0.106
Cassucio2	39.55	4.1	30	12.912	0.007	0.132
Cassucio3	48.4	5.3	30	14.996	0.005	0.136
Zhang C4010	39.55	3.208	10	37.337	0.011	0.155
Zhang C4016	40.05	4.555	16	41.670	0.010	0.185
Zhang C4020	39.23	6.19	20	39.770	0.008	0.229
Zhang C4025	40.07	2.87	25	48.479	0.021	0.270
Zhang C8010	85.2	5.793	10	55.577	0.011	0.188
Zhang C8016	82.42	5.335	16	57.772	0.013	0.192
Zhang C8020	82.29	5.458	20	61.845	0.015	0.235
Zhang C8025	82.28	3.844	25	52.170	0.016	0.251

7- المناقشة:

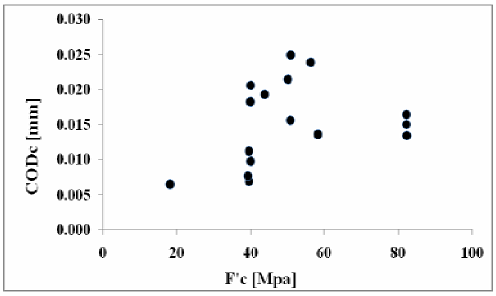
رسمت العلاقة بين مقاومة المادة على ظهور التشققات Kic مع مقاومة المادة على الضغط F'c كما هو موضح بالشكل (5).

نلاحظ أن Kic تزداد بازدياد F'c، أي إن مقاومة المادة على امتداد التشققات فيها تزداد بزيادة مقاومة المادة على الضغط.



الشكل (5) العلاقة بين مقاومة امتداد الشقوق Kic ومقاومة الضغط F'c

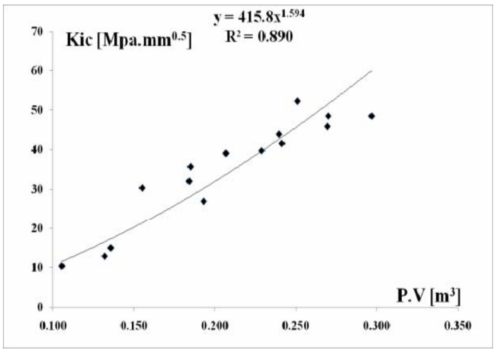
يوضح الشكل (5) العلاقة بين فتح الشق الحرج (CODc) ومقاومة البيتون على الضغط، إذْ يمكن القول بشكل عام: إن فتح الشق الحرج يزداد بازدياد مقاومة الضغط، إلا أن معامل الترابط في الأشكال 4 و5 يبقى صغيراً نسبياً، ومن ثَم القيم المستنتجة بالاعتماد على مقاومة الضغط وحدها فقط تبقى غير موثوق بها، مما يعني أنه لا يمكن وضع علاقة تجريبية لـ (CODc) تعتمد على مقاومة المادة على الضغط وحدها فقط.



الشكل (6) العلاقة بين فتح الشق الحرج عند الحمولة الأعظمية CODc وF'c

يوضح الشكل (7) العلاقة بين مقاومة امتداد الشقوق Kic مع حجم الروبة الإسمنتية P.V. يبـين الـشكل وجود علاقة بين مقاومة امتداد الشقوق في المـادة Kic وحجم الروبة الإسمنتية P.V وتعطى بالعلاقة:

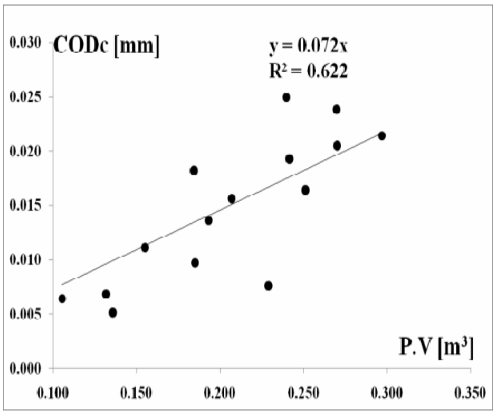
$$Kic=415.8.(P.V)^{-1.594} \quad (25)$$



الشكل (7) العلاقة بين مقاومة امتداد الشقوق Kic وحجم الروبة الإسمنتيةP.V

يبين الشكل (8) العلاقة بين فتح الشق الحرج عنـد الحمولة الأعظمية (CODc) وحجم الروبة الإسمنتية (P.V). يبين الشكل وجود علاقة بين حجم الروبـة الإسمنتية (P.V) وفتح الشق الحرج تحت الحمولـة الأعظمية (CODc)، وتعطى هذه العلاقة بالمعادلـة الآتية:

$$CODc=0.072.P.V \quad (5)$$



الشكل (8) العلاقة بين فتح الشق الحرج عند الحمولة الأعظمية CODc **وحجم الروبة الإسمنتية**P.V

8- النتيجة:

1- حسبتْ مقاومة المادة على امتـداد التـشققات؛ وذلك من خلال حساب طول الشق باستخدام التحليل العكسي لنموذج تحليلي يعتمد على منحنـى تليـين ثنائي الخط.

2- بينت الدراسة أن مقاومة المادة علـى ظهـور التشققات K_{ic} تزداد بزيادة F'c

3- ترتبط كل من (Kic) و(CODc) بحجم الروبـة الإسمنتية بشكل مباشـر إذْ تـم إيجـاد علاقتـين تجريبيتين بدقة مقبولة لحساب مقاومة امتداد الشقوق في البيتون (Kic) وعرض الـشق الحـرج تحـت الحمولة الأعظمية (CODc) باستخدام حجم الروبة.

جدول الرموز المستخدمة في البحث			
A_{lig}	مساحة المقطع الصافي دون الثلم	h	عرض المفصل اللدن
a_0	ارتفاع الثلم في منتصف الجائز	k	نسبة عرض المفصل اللدن إلى الارتفاع
a	طول الشق الحقيقي	L	مجال الجائز
B	عامل الهشاشة	M	العزم
b	عرض الجائز	μ	العزم اللابعدي
c	ارتفاع المقطع المشدود المرن	D	ارتفاع الجائز
d	ارتفاع المقطع دون الثلم	m	كتلة الجائز
E	معامل المرونة	P.V	حجم الروبة الاسمنتية
F_t	مقاومة البيتون على الشد	S	الطول الكلي للجائز
F_c'	مقاومة البيتون على الضغط	θ	الزاوية اللابعدية
δ_0	الانحراف الأعظمي في تجربة الانعطاف ثلاثية النقاط	θ_c	الزاوية اللابعدية الحرجة للطور
G_f	طاقة التصدع	w	فتح الشق
$G_{f(exp)}$	طاقة التصدع المحسوبة من تجربة الانعطاف وفق RILEM	w_c	عرض الشق الأعظمي (الحرج) الذي يتوقف نقل الإجهادات بعده
φ	زاوية دوران المقطع	W_0	المساحة أسفل شكل منحنى انحراف الناتج من تجربة الانعطاف الثلاثية
g	تسارع الجاذبية الأرضية	z	بعد النقطة المدروسة في منطقة الضرر عن المقطع المرن
H_0	ارتفاع المقطع الكلي	a1, a2 ,b2	ثوابت منحنى التليين ثنائي الخط،

References *

[1] Béton, C.E.-I.d., CEB-FIP Model Code 1990. Thomas Telford: London, UK. p. 437.

[2] Casuccio, M., et al., 2008- Failure mechanism of recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials, 2008. 22(7): p. 1500-1506.

[3] Einsfeld, R.A. and M.S.L. Velasco, 2006- Fracture parameters for high-performance concrete. Cement and Concrete Research, 2006. 36(3): p. 576-583.

[4] Elices, E. and Planas, J. 1996_ Fracture mechanics parameters of concrete: an overview, Advanced Cement Based Materials, 4, 116-127.

[5] G.Danhash, M.Kousa, G.Wardeh. 2012_" Investigating the size independent Fracture Energy of concrete using Inverse Analysis" The journal of Damascus university.

[6] Hillerborg, A., M. Modéer, and P.-E. Petersson, 1976 -Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. Cement and Concrete Research,. 6(6): p. 773-781.

[7] Karihaloo, B.L. and P. Nallathambi, 1991- Notched beams test: model I fracture toughness, in Fracture Mechanics Test Method for concrete, S. Shah and A. Carpiteri, Editors., Chapmann& Hall. p. chapter 1, pages 1-86.

[8] Olesen, J.F. 2001_ Fictitious Crack Propagation in Fiber-Reinforced Concrete Beams. Journal of Engineering Mechanics. 127(3): p. 272-280.

[9] Ostergaard, L., 2003- Early-Age Fracture Mechanics And Cracking of Concrete. Experiments and Modeling, in Department of Civil Engineering., Technical University of Denmark. p. 299.

[10] RILEM 50-FMCDraft Recommendation, 1985- Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams. Materialsand Structures/Matéiaux et Constructions,. 18(4): p. 287-290.

[11] Hans W.Reinhardt , Shilang Xu. 1999_ "Crack resistance based on the cohesive force in concrete". Engineering Fracture Mechanics 64 ,563-587.

[12] Roesler, J., et al., 2007- Concrete fracture prediction using bilinear softening. Cement and Concrete Composites,. 29(4): p. 300-312.

[13] Stang, H., 2000- Analysis of 3 points bending test , Technical Report EU Contract - BRPR - CT98 - 813 , Report from Test and Design Methods for Steel Fiber Reinforced concrete.. p. 7 pages.

[14] Ulfkjaer, J.P., S. Krenk, and R. Brincker, 1995- Analytical Model for Fictitious Crack Propagation in Concrete Beams. Journal of Engineering Mechanics,. 121(1): p. 7-15.

[15] Wittmann, F., et al., 1988- Fracture energy and strain softening of concrete as determined by means of compact tension specimens, in Materials and Structures., Springer Netherlands. p. 21-32.

[16] Zhao, Z., S.H. Kwon, and S.P. Shah, 2008- Effect of specimen size on fracture energy and softening curve of concrete: Part I. Experiments and fracture energy. Cement and Concrete Research,. 38(8-9): p. 1049-1060.

[17] Zhang, J., C. Leung, and S. Xu, 2010- Evaluation of fracture parameters of concrete from bending test using inverse analysis approach, in Materials and Structures. 2010, Springer Netherlands. p. 857-874.

* تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق 2014/5/11