

PHÂN TÍCH NỨT VĨA THỦY LỰC TRONG GIẾNG KHOAN NHỜ ÁP DỤNG CÁC PHẦN TỬ SUY BIẾN BARSOU

Đỗ Quang Khánh và Lê Phước Hảo

Khoa Địa chất – Dầu khí, Trường Đại Học Kỹ Thuật.

(Bài nhận ngày 11/05/1998)

TÓM TẮT :

Bài báo phân tích cơ học rạn nứt của giếng khoan bằng phương pháp phần tử hữu hạn nhờ các phần tử suy biến BARSOU xung quanh đỉnh các vết nứt. Phép phân tích này cho phép tính toán hệ số cường độ ứng suất tại đỉnh các vết nứt xuất phát từ thành giếng khoan. Từ đó, xây dựng các đường cong cân bằng giới hạn của áp suất giếng cho phép hiểu rõ hơn quá trình nứt vỡ trong các thí nghiệm minifrac hay thử nghiệm độ tiếp nhận của vỉa (leak – off tests).

I. GIỚI THIỆU :

Nứt vỉa thủy lực đóng vai trò rất quan trọng trong công nghiệp dầu khí như là một kỹ thuật để kích thích vỉa nhằm cải thiện độ thấm tự nhiên của đá tầng chứa để nâng cao hệ số thu hồi dầu. Trong những năm gần đây, kỹ thuật này còn được xem như là một trong các công cụ hữu hiệu nhất để đo đạc các ứng suất tại chỗ trong lòng đất.

Lý thuyết nứt vỉa thủy lực được xây dựng trên cơ sở ứng xử rạn nứt của đất đá tại độ sâu cho trước. Do biến dạng của vết nứt thủy lực trên thành giếng là tương đối nhỏ nên có thể giả thiết rằng biến dạng của thành hệ nói chung theo luật đàn hồi tuyến tính. Ngoài ra, vì đất đá chủ yếu là vật liệu giòn nên hầu hết các cố gắng tìm hiểu mối quan hệ cân bằng và phát triển vết nứt đều dựa trên lý thuyết rạn nứt đàn hồi tuyến tính. Nhiều công trình nghiên cứu của Schmidt [4] cho thấy rằng cơ học rạn nứt đàn hồi tuyến tính rất thích hợp để nghiên cứu mối quan hệ rạn nứt của đất đá.

Việc mô hình hóa cơ chế nứt vỉa thủy lực của giếng khoan là một vấn đề rất phức tạp đòi hỏi phải sử dụng các kỹ thuật số. Ngày nay phương pháp phần tử hữu hạn đã là một trong các công cụ số mạnh mẽ để giải quyết các bài toán rạn nứt trong cơ học rạn nứt. Để áp dụng phương pháp này một cách hữu hiệu, người ta phải sử dụng các phần tử đặc biệt xung quanh đỉnh vết nứt khi tính toán hệ số cường độ ứng suất tại đỉnh vết nứt trong phép phân tích nứt vỉa thủy lực.

II. CÁC KHÁI NIỆM CƠ BẢN :

II.1. Hệ số cường độ ứng suất :

Trong cơ học rạn nứt đàn hồi tuyến tính, Irwin đã chứng minh rằng độ lớn của ứng suất xung quanh đỉnh vết nứt là suy biến theo mối quan hệ suy biến bậc $r^{-0.5}$:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \times f_{ij}(\theta) + \dots \quad (1)$$

trong đó : r là khoảng cách từ đỉnh vết nứt,

θ là góc cực đối với trục của vết nứt,

$f_{ij}(\theta)$ là hàm số của góc cực θ phụ thuộc vào dạng hình học và tải trọng,

K_I là hệ số cường độ ứng suất đối với biến dạng “mode mở” của đất đá.

Do vậy, hệ số cường độ ứng suất này đặc trưng cho độ lớn của ứng suất gần đỉnh vết nứt. Giá trị của hệ số này phụ thuộc vào dạng hình học của vết nứt, môi trường xung quanh và các tải trọng tác dụng.

Khi vết nứt phát triển, hệ số cường độ ứng suất K_I đạt tới giá trị tới hạn được gọi là hệ số cường độ ứng suất tới hạn hay là độ cứng nứt gãy K_{IC} . Tính chất này của vật liệu được đánh giá bằng thực nghiệm.

Độ cứng nứt gãy của đất đá là số đo sự cản trở của đất đá đối với sự phát triển vết nứt. Các giá trị đo được của K_{IC} tính bằng $\text{MPa.m}^{1/2}$ đối với một số loại đất đá như sau :

$1,04 < K_{IC} < 1,81$	đối với bột kết
$0,44 < K_{IC} < 1,76$	đối với cát kết
$0,44 < K_{IC} < 1,04$	đối với đá vôi
$0,33 < K_{IC} < 1,32$	đối với đá phiến

Các giá trị này thường được dùng trong việc mô phỏng quá trình nứt via thủy lực.

II.2. Đường cong cân bằng giới hạn :

Phép phân tích rạn nứt đàn hồi cũng xác định các điều kiện mà ở đó vết nứt ở trạng thái cân bằng tới hạn nếu hệ số cường độ ứng suất K_I bằng với độ cứng nứt gãy K_{IC} . Với $K_I = K_{IC}$, sự phát triển vết nứt có thể ổn định hoặc không ổn định, tùy thuộc vào mức độ giảm hay tăng hệ số cường độ ứng suất khi vết nứt bị mở rộng nhỏ dưới tải trọng ấn định trước.

Từ điều kiện cân bằng tới hạn đối với hệ số cường độ ứng suất $K_I = K_{IC}$, chúng ta có thể xác định được mối quan hệ giữa áp suất trong giếng và chiều dài vết nứt ở trạng thái cân bằng tới hạn dưới áp suất đó. Mối quan hệ này được gọi là đường cong cân bằng giới hạn, phụ thuộc vào chiều dài vết nứt và có thể được biểu diễn dưới dạng:

$$p_w = F(a) \quad (2)$$

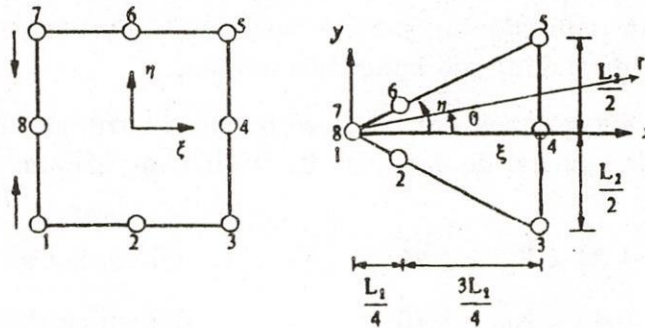
trong đó : a là chiều dài vết nứt,

p_w là áp suất trong giếng tương ứng với điều kiện cân bằng tới hạn
 $K_I = K_{IC}$.

II.3. Phần tử suy biến BARSOUM :

Đối với các bài toán rạn nứt, người ta nhận thấy rằng nếu sử dụng các phần tử đặc biệt xung quanh đỉnh vết nứt thì các kết quả đạt được sẽ chính xác hơn. Các phần tử đặc biệt này biểu diễn độ suy biến ở đỉnh vết nứt thích hợp với độ suy biến lý thuyết. Trong số các phần tử đặc biệt này, phần tử suy biến BARSOUM được sử dụng rộng rãi do tính đơn giản khi thực thi để đạt được độ suy biến mong muốn và mở rộng trong cơ học rạn nứt.

Phần tử suy biến BARSOUM được xây dựng dựa trên cơ sở phần tử đồng tham số 8 nút chuẩn của hầu hết các phương trình phần tử hữu hạn. Độ suy biến mong muốn bậc $\frac{1}{\sqrt{r}}$ có thể đạt được bằng cách thực hiện một quá trình đơn giản như sau (xem hình 1) :



Hình 1 : Phần tử suy biến BARSOUM

- * Chồng chất các nút 1, 7 và 8 của phần tử đồng tham số 8 nút chuẩn thành nút 1.
- * Di chuyển các nút giữa 2 và 6 về các điểm một phần tư lân cận nút đỉnh vết nứt đã được chồng chất 1.

Ngoài ra, phần tử này có thể được mở rộng trong cơ học rạn nứt để đánh giá hệ số cường độ ứng suất bằng cách cân bằng các hệ số $\frac{1}{\sqrt{r}}$ của lời giải giải tích và lời giải số của phần tử suy biến BARSOUM. Kết quả ta có thể đánh giá được hệ số cường độ ứng suất K_I đối với “mode mở” như sau :

$$K_I = \frac{E}{4(1-\nu^2)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} (4v_2 - v_3 - 3v_1) \quad (3)$$

trong đó : E là mô đun đàn hồi,

ν là hệ số Poisson,

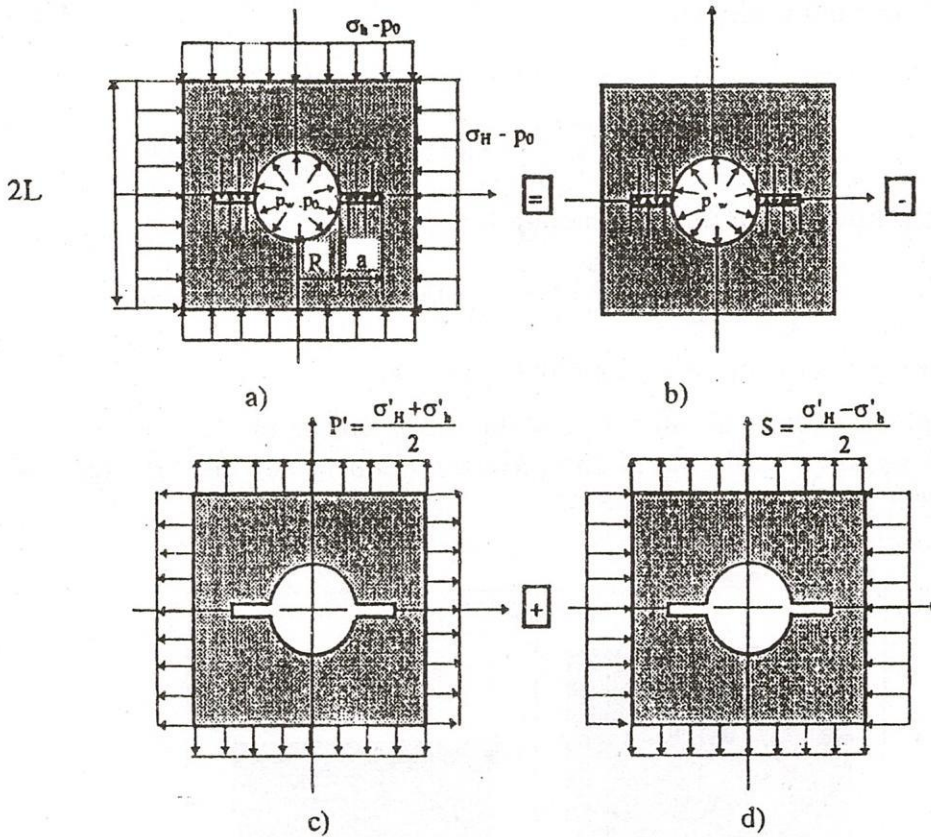
v_1, v_2, v_3 là các chuyển vị của các nút 1, 2, 3 trên cạnh phần tử suy biến BARSOUM.

III. KẾT QUẢ ÁP DỤNG SỐ :

Ở đây chỉ trình bày kết quả phân tích nứt via thủy lực của giếng khoan thẳng đứng có hai vết nứt hướng kính đối xứng làm ví dụ minh họa cho phương pháp.

Đối với các giếng khoan sâu thì ứng suất thẳng đứng lớn hơn các ứng suất ngang rất nhiều nên các nứt gãy thủy lực sinh ra sẽ có xu hướng theo phương thẳng đứng. Nứt gãy thẳng đứng xung quanh một giếng khoan thẳng đứng có thể được mô hình hóa bằng hai cánh khe nứt hướng kính đối xứng phát triển vuông góc với ứng suất chính nhỏ nhất.

Khảo sát mô hình giếng khoan thẳng đứng có hai vết nứt hướng kính đối xứng chịu các tải trọng tác dụng như hình 2.



Hình 2 : Mô hình giếng khoan thẳng đứng có hai vết nứt hướng kính đối xứng với các trường hợp :

- a) Tải trọng tổng quát
- b) Áp suất giếng hiệu dụng
- c) Ứng suất ngang trung bình hiệu dụng
- d) Ứng suất ngang lệch

Trong mô hình này, giếng khoan thẳng đứng được mô hình hóa bởi một lỗ tròn có bán kính giếng $R = 2,50 \times 10^{-2}m$ trong một tấm hình vuông. Tấm này biểu thị cho thành hệ đất đá xung quanh giếng khoan có các tính chất vật liệu như sau : mô đun đàn hồi $E = 2,50 \times 10^4$ MPa; hệ số Poisson $\nu = 0,25$ và độ cứng nứt gãy $K_{IC} = 1,00$ MPa.m^{1/2}. Kích thước của tấm vuông này được lấy là $2L = 20R = 50 \times 10^{-2}m$ để mô hình hóa một tấm vô hạn. Hai cánh nứt gãy được biểu diễn bằng hai vết nứt hướng kính đối xứng xuất phát từ lỗ tròn trong tấm vuông có chiều dài là a .

Các nghiên cứu về biến dạng đất đá của Hardin [2] cho thấy rằng các nứt gãy được điều khiển chỉ bởi các ứng suất hiệu dụng $\sigma' = \sigma - p_0$ với p_0 là áp suất lỗ

rõng của thành hệ. Do vậy, các tải trọng hiệu dụng tác dụng trong mô hình chỉ gồm có các ứng suất ngang hiệu dụng $\sigma'_h = \sigma_h - p_0$, $\sigma'_H = \sigma_H - p_0$ ($\sigma'_h \leq \sigma'_H$) và áp suất giếng hiệu dụng tác dụng lên bề mặt thành giếng và các vết nứt được giả thiết là đồng nhất $p'_w = p_w - p_0$, trong đó áp suất lỗ hổng của thành hệ là $p_0 = 25,00$ MPa.

Rõ ràng rằng mô hình này dưới điều kiện tải trọng tổng quát (hình 2a) có thể được chồng chất bởi ba điều kiện tải trọng đơn giản (hình 2b, c và d). Chúng tương ứng với các mô hình sau :

– Giếng khoan dưới ứng suất ngang trung bình hiệu dụng :

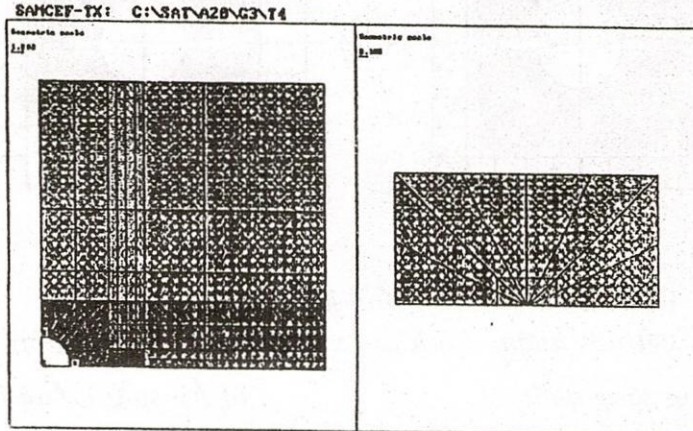
$$P' = P - p_0 = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} - p_0 = \frac{\sigma'_H + \sigma'_h}{2} = 5,00 \text{ MPa}$$

– Giếng khoan dưới ứng suất ngang lệch :

$$S = \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} = \frac{\sigma'_H - \sigma'_h}{2} = 4,00 \text{ MPa}$$

– Giếng khoan dưới áp suất giếng hiệu dụng p'_w .

Do tính đối xứng của hình học và tải trọng chúng ta chỉ cần khảo sát một phần tư tám vuông và lưới chia phần tử với các phần tử suy biến BARSOUM xung quanh đỉnh vết nứt như trên hình 3.



Hình 3 : Lưới chia phần tử của mô hình giếng khoan có hai vết nứt hướng kính đối xứng (76 phần tử với 8 phần tử BARSOUM xung quanh đỉnh vết nứt, 257 nút, 514 bậc tự do)

Do tải trọng tác dụng được biểu diễn là tổ hợp của các mode tải trọng tương ứng với áp suất giếng hiệu dụng p'_w , ứng suất ngang trung bình hiệu dụng P' và ứng suất ngang lệch S , hệ số cường độ ứng suất đối với các vết nứt hướng kính đối xứng có thể được viết lại là :

$$K_I = K_I(p'_w) - K_I(P') + K_I(S) \quad (4)$$

Từ điều kiện cân bằng tới hạn $K_I = K_{IC}$, ta có :

$$K_{IC} = K_I(p'_w) - K_I(P') + K_I(S) \quad (5)$$

Để thuận tiện nếu chọn một giá trị biểu kiến của áp suất giếng hiệu dụng là \bar{p}'_w , ta sẽ có :

$$K_I(p'_w) = \frac{K_I(\bar{p}'_w)}{\bar{p}'_w} \times p'_w \quad (6)$$

Từ (5) và (6), áp suất giếng hiệu dụng ở điều kiện cân bằng tới hạn sẽ là :

$$p'_w = [K_{IC} + K_I(P') - K_I(S)] \times \frac{\bar{p}'_w}{K_I(\bar{p}'_w)} \quad (7)$$

Do vậy đường cong cân bằng giới hạn của áp suất giếng sẽ được biểu diễn bởi phương trình :

$$p_w = p_0 + [K_{IC} + K_I(P') - K_I(S)] \times \frac{\bar{p}'_w}{K_I(\bar{p}'_w)} \quad (8)$$

Chúng ta sẽ xây dựng các đường cong cân bằng giới hạn tương ứng với hai trường hợp của giếng là :

- * Giếng khoan ở trạng thái ứng suất ngang đẳng hướng (isotropic far-field horizontal stress) : $S = 0,00$ MPa; $P' = 5,00$ MPa.
- * Giếng khoan ở trạng thái ứng suất ngang dị hướng (non-isotropic far-field horizontal stress) : $S = 4,00$ MPa; $P' = 5,00$ MPa.

Thực hiện tính toán trên phần mềm SAMCEF với lưới phần tử hữu hạn chứa các phần tử suy biến BARSOUM xung quanh đỉnh vết nứt như hình 3, ta tìm được các giá trị của hệ số cường độ ứng suất theo chiều dài vết nứt tương ứng với các mode tải trọng cơ bản như trong bảng 1

Bảng 1 :

a/R	0,25	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00
$K_I (= 3,00$ MPa)	0,391	0,545	0,949	1,191	1,366	1,547	1,740
$K_I (P' = 5,00$ MPa)	0,679	0,947	1,937	2,436	2,798	3,161	3,538
$K_I (S = 4,00$ MPa)	0,880	1,156	1,846	2,181	2,431	2,701	2,992

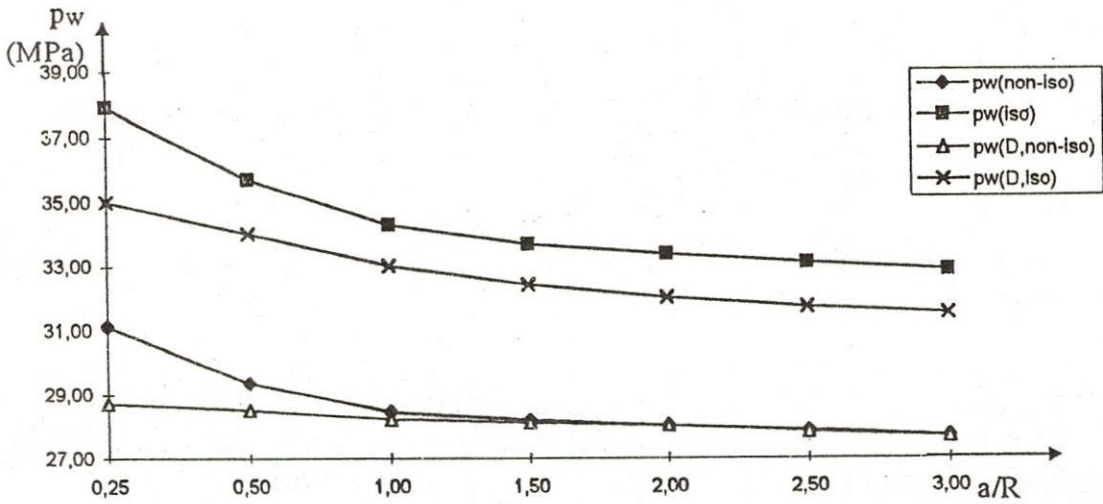
Chú ý rằng trong trường hợp của giếng ở trạng thái ứng suất ngang đẳng hướng thì $K_I (S = 0,00$ MPa) = $0,00$ MPa.m^{1/2}.

Bảng 2 biểu diễn các giá trị của áp suất giếng ở điều kiện cân bằng tới hạn được tính theo công thức (8) và so sánh với các giá trị của Detournay và Carbonell [1].

Bảng 2 :

a/R	0,25	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00
p_w (non-iso)	31,1265	29,3534	28,4487	28,1609	28,0027	27,8307	27,6652
p_w (iso)	37,8708	35,7138	34,2811	33,6534	33,3407	33,0685	32,8259
p_w (D,non-iso)	28,7000	28,5000	28,2000	28,1000	28,0000	27,8000	27,6500
p_w (D,iso)	35,0000	34,0000	33,0000	32,4000	32,0000	31,7000	31,5000

Từ đó cho phép ta xây dựng được các đường cong cân bằng giới hạn của áp suất giếng như trên hình 4.



Hình 4 : Các đường cong cân bằng giới hạn

Chúng ta nhận thấy rằng áp suất giếng trên các đường cong cân bằng giới hạn này giảm dần theo chiều dài vết nứt tiến dần về ứng suất ngang nhỏ nhất. Thực vậy, trên hình 4 áp suất giếng giảm dần về giá trị $\sigma_h = \sigma_H = 30$ MPa đối với giếng ở trạng thái ứng suất ngang đẳng hướng và giá trị $\sigma_h = 26$ MPa đối với giếng ở trạng thái ứng suất ngang dị hướng.

IV. KẾT LUẬN :

Từ nghiên cứu được tiến hành trên đây có thể rút ra một số kết luận sau đây:

a. Việc sử dụng các phần tử suy biến BARSOUM xung quanh đỉnh vết nứt cho phép cải thiện được các kết quả tính toán hệ số cường độ ứng suất tại đỉnh các vết nứt xuất phát từ thành giếng khoan tương ứng với các điều kiện tải trọng tác động khác nhau trong quá trình nứt via thủy lực.

b. Từ điều kiện cân bằng tới hạn, chúng ta có thể xây dựng các đường cong cân bằng giới hạn của áp suất giếng ở trạng thái cân bằng tới hạn.

c. Áp suất giếng cần thiết để phát triển các vết nứt giảm dần theo chiều dài vết nứt tiến về ứng suất ngang nhỏ nhất.

Tóm lại, có thể đạt được một sự hiểu biết sâu sắc hơn về quá trình nứt via thủy lực trong các thí nghiệm minifrac hay thử nghiệm độ tiếp nhận via nhờ khảo sát lại bài toán nứt via theo quan điểm cơ học rạn nứt đàn hồi tuyến tính. Điều này có thể dẫn đến một phương pháp luận thực tiễn hơn nhằm xác định các ứng suất ngang ở xa giếng từ các biểu đồ áp suất ghi được trong suốt quá trình tiến hành nứt via thủy lực.

Lời cảm ơn :

Tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đối với GS. Nguyễn Đăng Hưng – LTAS Université de Liège, Belgique đã tạo mọi điều kiện thuận lợi cho nghiên cứu này.

HYDRAULIC FRACTURE ANALYSIS IN THE WELL USING BARSOUM'S SINGULARITY ELEMENTS

ABSTRACT :

The paper analyses the fracture mechanics in the well by the finite element method with BARSOUM'S singularity elements around the crack tips. This analysis permits to calculate the stress intensity factor at the tip of cracks emanating from the wellbore. Then, the limit equilibrium curves of the wellbore pressure could be established to understand better the breakdown process in minifrac or leak-off tests.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Detournay E. and Carbonell R. : *"Fracture Mechanics Analysis of The Breakdown Process in Minifrac or Leak-off Tests"*, Rock mechanics in Petroleum Engineering, Balkema, Brookfield, 1994, p. 399 - 405.
2. Hardin J : *"Expermental Deformation of Sedimantary Rocks Under Cofining Pressure : Pore Pressure Tests"*, Bull. AAPG, 1963, Vol 47, No.5.
3. Khanh Do Quang : *"Application of The Finite Element Method to Study Fractures of The Wellbore"*, M.Sc Thesis, EMMC1 (Cao học Bỉ - Việt), 1997.
4. Schmidt R.A.: *"Fracture Toughness Testing of Limestone"*, Experimental Mech. (May 1976) 16, No.5, 161 - 67.
5. Van Eekelen H.A.M.: *"Hydraulic Fracture Geometry : Fracture Containment in Layered Formations"*, SPE 9261, 1980.