

LS-DYNA®中應用於脆性材料破裂動力分析的 3 維鍵型近場動力學模型

Bo Ren, C. T Wu

Livermore Software Technology Corporation

1. 簡介

近場動力學理論為模擬三維固體材料中的破壞行為提供了一種新的思路。一般來說，近場動力學計算域被離散為一系列材料點，然後通過結點積分來實現近場動力學控制方程中的非局部積分項[1]。在 LS-DYNA®中，近場動力學模型採用有限元法框架，通過有限元形函數插值構建單元內連續的位移場[2, 3]。該方法繼承了有限元法的固有優點，如直接的位移邊界條件施加和非均勻網格計算中的穩定性。為了模擬近場動力學計算域中的非連續性（材料破壞行為），這裡的有限元網格是非連續性網格，即相鄰的單元不共用節點編號。該非連續性網格被應用於非連續伽遼金虛功方程中[3]。

本文介紹的顯式積分鍵型近場動力學模型基於有限元理論並採用非連續伽遼金虛功方程。在第二章中將介紹 LS-DYNA®中用到的近場動力學關鍵字。隨後在第三章中將提供應用鍵型近場動力學模型的幾個數值分析算例。最後在第四章中將進行簡單的總結。

2. LS-DYNA®中的近場動力學模型關鍵字

LS-DYNA®近場動力學是一種有限元法，本質上應用了一種新的單元方程，因此首先介紹一個新的 SECTION 關鍵字：

*SECTION_SOLID_PERI (要求版本號：R10., 支持 MPP, SMP)

該關鍵字擁有兩個參數卡：

Card 1

| Variable | SECID | ELFORM |
|----------|-------|--------|
| Type | I | I |
| Default | | |

SECID : Section ID

ELFORM : 單元公式. 等於 48. 近場動力學 section 支援四節點，六結點和八結點固體單元. 與傳統的有限元網格相比，近場動力學模型使用的網格為非連續網格，也就是說，相鄰的單元間不共用結點，每個單元都有自己的結點編號如圖 1. 該非連續性網格在初始時互相無縫重疊，如同傳統的有限元網格。

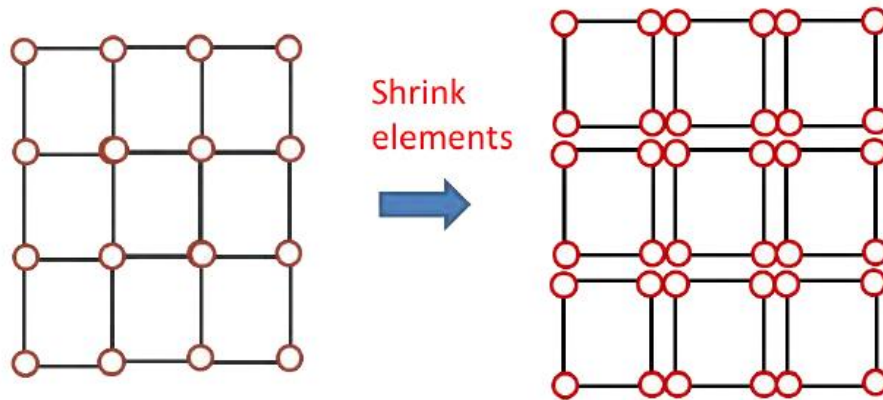


圖 1. 近場動力學模型中的非連續網格

Card 2

| Variable | DR PTYPE | DR PTYPE |
|----------|-------------|----------|
| Type | I | I |
| Default | 1.01 | 1 |

DR : 歸一化的鄰域大小。推薦使用 1.0

PTYPE : 1: 鍵型近場動力學模型

DR 為用戶定義的材料點鄰域大小，DR 為鄰域實際大小與單元最長對角線長的比值。如果用戶網格為極端不規則網格，LS-DYNA®將自動調整 DR 大小使每個材料點的相鄰材料點數為 $10 \leq n_g \leq 136$ 。

*MAT_ELASTIC_PERI (要求版本號：R10., 支持 MPP, SMP)

該關鍵字定義近場動力學材料模型。在近場動力學 SECTION 關鍵字中只能使用本材料模型，其為彈性材料，有一個參數卡：

Card 1

| Variable | MID | RO | E | GT | GS |
|----------|-----|----|---|--------|--------|
| Type | I | I | F | F | F |
| Default | | | | 1.0E20 | 1.0E20 |

RO：品質密度

E：楊氏模量

GT：斷裂能量釋放率

GS：在壓縮狀態下的斷裂能量釋放率

這裡GT是斷裂力學中的針對脆性材料(玻璃，水泥，硬塑膠等)的材料參數：能量釋放率 G。Gs是針對主要是以材料壓縮為主問題的材料破壞參數。該參數為人為定義的數值，對大多數以壓縮為主問題 $G_s=2.0*GT$ ，對於其它問題，直接使用缺省值。

3. 數值算例

3.1 三點彎曲問題中的複合型裂紋擴展模擬

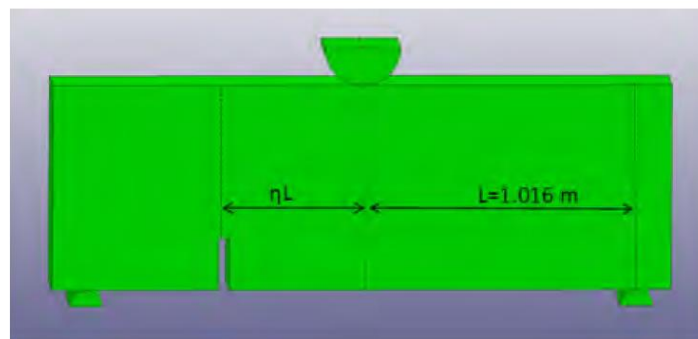


圖 2. 三點彎曲實驗設置

本算例研究具有預製裂紋的水泥梁在三點彎曲條件下的混合型裂紋擴展問題。實驗條件和預製裂紋位置如圖 2 所示。試件尺寸為: $228.6\text{mm}\times 76.2\text{mm}\times 25.4\text{mm}$ 。該試件由兩個固定的圓柱支撐（半徑: 6mm ）。另一圓柱以 0.05m/s 的速度撞擊試件頂部。基於預製裂紋位置的不同（裂紋高度: 19.05mm ），一共測試了三種裂紋擴展情況: I 型裂紋（圖 2 中 $\eta=0$ ）；混合型裂紋($\eta=0.5$ 和 $\eta=0.7$)。水泥梁的材料參數為: $E=29\text{Gpa}$, $\rho=2400\text{kg/m}^3$ 和斷裂能量釋放率 $G=31.1\text{ J/m}^2$ [4]。三個圓柱形部件被視為剛體。試件被劃分為 27800 個八節點單元。根據不同的預製裂紋位置，實驗結果顯示不同的裂紋傾斜角度，如圖 3 所示。當 $\eta=0$ 時，為垂直裂紋， $\theta=00$ ；當 $\eta=0.5$ 和 $\eta=0.7$ 時，裂紋傾斜角度為 $\theta=220$ 和 $\theta=300$ 。數值模擬結果如圖 4 所示: 當 $\eta=0$ 時， $\theta=00$ ；當 $\eta=0.5$ 時， $\theta=210$ ；當 $\eta=0.7$ 時， $\theta=290$ 。本算例表明 LS-DYNA® 中的近場動力學模型能夠類比 I 型和混合型裂紋擴展問題。

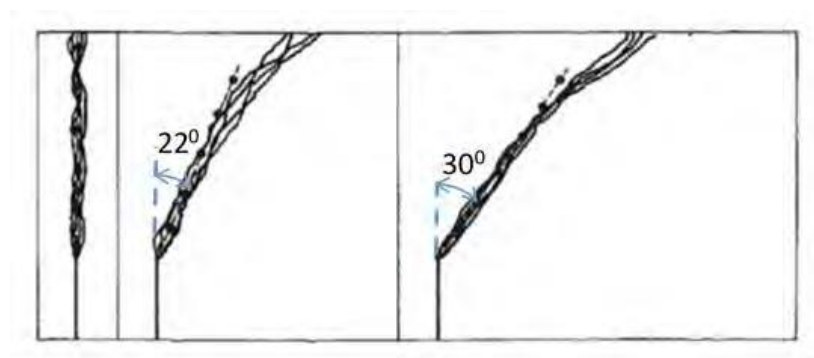
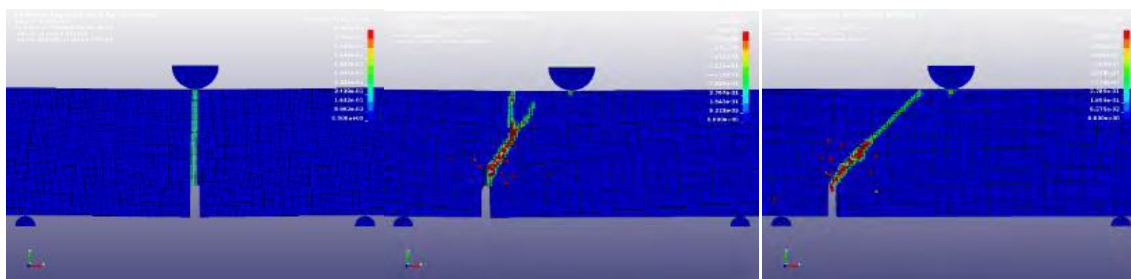


圖 3. 實驗中的裂紋路徑 [4]



(a) $\eta=0$

(b) $\eta=0.5$

(c) $\eta=0.7$

圖 4. 數值類比中的裂紋路徑

3.2 玻璃-高分子-玻璃結構中的衝擊裂紋擴展類比

鍵型近場動力學模型的主要應用之一就是模擬玻璃材料如汽車擋風玻璃等結構的衝擊破壞過程。汽車擋風玻璃具有三層結構：玻璃-高分子-玻璃，如圖 5 所示。這裡玻璃為鈉鈣玻璃，其材料參數為： $\rho=2.44E3 \text{ kg/m}^3, E=72\text{Gpa}, G=8.0 \text{ J/m}^2$ 。衝擊球體為剛體，其材料參數為： $\rho=3.73E3 \text{ kg/m}^3, E=210\text{Gpa}, \nu=0.3$ [5]。基於該密度，衝擊球體體的總品質為 0.692 g 。衝擊圓柱體位於試件正上方，且具有初始速度： $V_z=-31.0\text{m/s}$ 。因為在試驗中未觀測到高分子材料層的破裂[5]，該層被類比為線彈性材料，材料參數為： $\rho=1.2E3 \text{ kg/m}^3, E=2.0\text{Gpa}, \nu=0.25$ 。兩層玻璃材料被劃分為：100,000 八結點單元，高分子材料層被劃分為 2500 八結點單元。衝擊球體被離散為一層共 1014 八節點單元，如圖 5 所示

試件的破壞模式如圖 6 所示。在圖中可以觀測到實驗中表現出來的所有玻璃破壞模式：彎曲裂紋，圖中橢圓部分；裂紋分叉，圖中圓形部分；沿厚度方向的傾斜裂紋，圖中的鑽石形部分；邊界裂紋，圖中三角形部分。在上層玻璃中的主要破壞模式為圓形的破壞域以及網狀分佈的裂紋，如圖 7 (a)，在下層玻璃中存在一個主要的圓形破壞域，同時徑向裂紋從該區域向邊界擴展，如圖 7 (b)。這種破壞模式分佈可以在很多汽車擋風模擬衝擊試驗中見到。

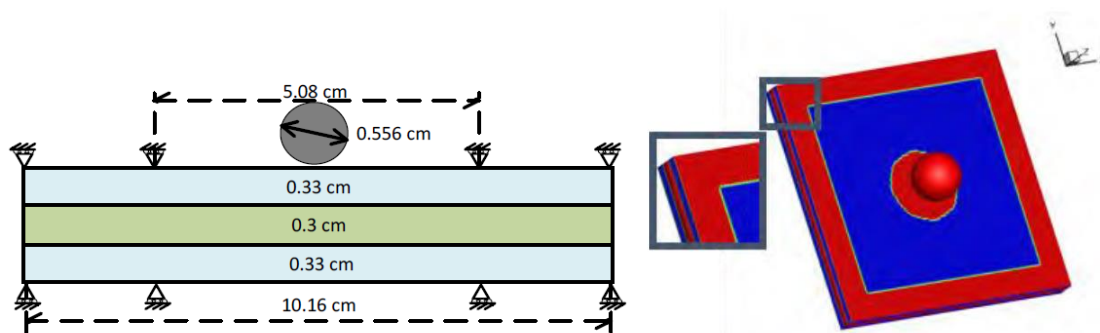


圖 5. 玻璃-高分子-玻璃結構及計算模型

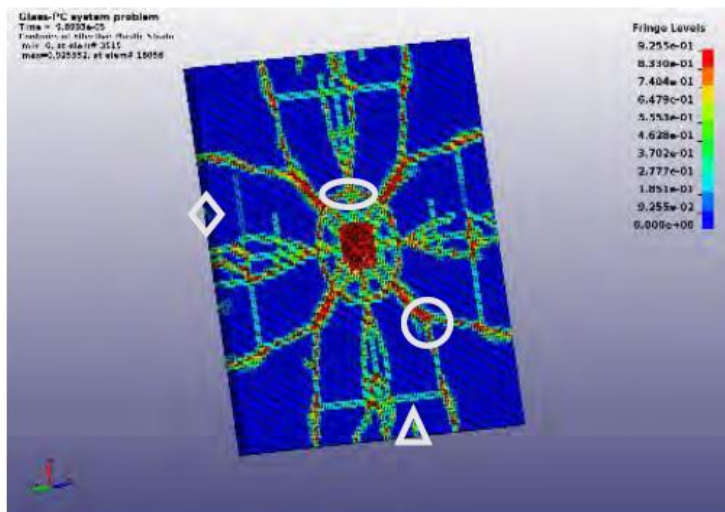
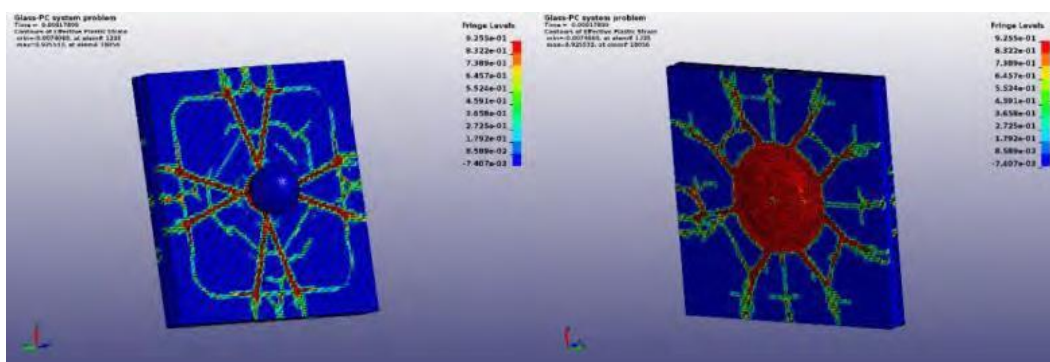


圖 6. 結構中的破壞模式



(a)

(b)

圖 7. 衝擊破壞模式, (a) 上層玻璃; (b) 下層玻璃

4. 結論

本文討論了 LS-DYNA®中的近場動力學模型及其用法。數值分析結果表明該模型能夠類比脆性材料中的複雜斷裂行為如混合型裂紋擴展，多裂紋擴展及相互影響，材料碎片形成等。

5. 參考資料

- [1] Silling SA, Askari E. A meshfree method based on the peridynamic model of solid mechanics. *Computers and Structures* 2005;83:1526–1535.
- [2] Macek RW, Silling SA. Peridynamics via finite element analysis. *Finite Elements in Analysis and Design* 2007;43:1169-1178.
- [3] Chen X, Gunzburger M. Continuous and discontinuous finite element methods for a peridynamics model of mechanics. *Comput Methods Appl Mech Engrg* 2011;200:1237-1250.
- [4] Reji J, Surendra PS. Mixed-mode fracture of concrete subjected to impact loading. *J Struct Eng* 1990;116(3):585-602.
- [5] Hu W, Wang Y, Yu J, Yen CF, Bobaru F. Impact damage on a thin glass plate with a thin polycarbonate backing. *International Journal of Impact Engineering* 2013;62:152-165.

作者簡介

*任波/Bo Ren：博士，從事彈性、塑性材料損傷及裂紋擴展先進數值計算方法開發和工程問題的應用。

*吳政唐/ Dr.C.T.Wu 博士從 2001 年開始擔任 LSTC 的高級研發工程師，在計算多尺度力學和應用數學方面有相當豐富的理論和實踐經驗，主持開發了 LS-DYNA 中多種面向固體材料和結構問題的擴展有限元及無網格方法。吳博士畢業于美國愛荷華大學機械工程系，主修計算力學。從 1999 年開始，他成為美國計算力學學會和世界計算力學學會會員。他同時也長期擔任一些相關領域國際期刊的編委。

本文資料來源：<http://www.feainformation.com.cn/>