

GISSMO 模型在柔性防护系统环形网片破坏预测中的应用

郭立平, 余志祥*, 柳春, 刘宇鹏, 赵世春

(1. 西南交通大学土木工程学院, 成都 610031)

摘要: 柔性防护系统多用于艰险山区落石防护, 实际中拦截网片易遭受重复冲击加剧了破坏发生。为研究重复冲击荷载下柔性网中环形网片的损伤累积及破坏行为, 设计了相同速度二十六面体落石重复冲击长宽均为 4.15m 环形网片的动力试验, 采用高速摄像机、加速度传感器、运动分析系统对落石运动轨迹、加速度时程进行了记录分析。采用 LS-DYNA 开展了重复冲击下环形网片的数值模拟, 采用广义增量应力状态相关损伤模型(GISSMO)用于模拟钢丝环链及环形网片的损伤累积及破坏行为, 通过 LS-DYNA 显式分析计算单根钢丝拉伸测试了 GISSMO 参数的准确性, 并将其用于网片冲击破坏分析, 与试验结果对比验证数值模型的可靠性。研究表明, GISSMO 损伤模型能够对柔性网中的环形网片失效行为进行有效预测; 重复冲击下环形网片损伤累积明显, 性能加速退化, 随着冲击能级增大, 环形网片损伤累积加剧从而加速破坏。

关键词: 柔性防护系统; 环形网片; 冲击破坏; GISSMO

柔性防护系统在落石、崩塌、滑坡、泥石流等灾害防治领域得到了广泛应用, 目前常见的柔性防护结构形式有主动防护网、被动防护网、帘式网、柔性棚洞等。柔性防护结构的组成部件一般由刚性支撑结构、柔性拦截结构、耗能缓冲部件、滑移连接部件(钢丝绳、卸扣)组成, 通过合理的部件配置, 可有效实现对不同能级落石的有效拦截。

环形网片是柔性防护系统中重要的拦截部件, 其承载、变形及耗能性能直接影响防护系统的安全使用^[1]。环形网一般由高强钢丝制成的单环套结而成, 其变形过程伴随着明显的几何非线性、材料非线性、接触非线性特征。目前针对环形网片的计算分析多借助于有限元方法, Cristina^[2]将不同规格的单环简化为桁架单元, 忽略了网环的弯曲、环与环之间的接触滑移, 无法对环网细部的应力、应变特征进行描述。Nicot, F.^[3]采用离散元模拟环形网片, 園田佳巨^[4]采用 SPH 模拟环形网片, Sasiharan 等^[5]采用三维膜单元模拟网片进行防护网设计, 用以提高计算效率, 这些方法通过间接等效的方法获得网片的受力、变形特征, 并不能准确模拟环网的失效, Escallón JP^[6]将环形网片等效为多段铁摩辛柯梁单元, 考虑了环网的接触滑移及损伤特征, 但为了考虑抗弯刚度等效而对网环的截面面积进行了折减, 使得环形网片的总质量减少可达一半, 对于动力分析过程, 这样的折减方式显然存在不足, Xu Hu 等^[7]通过与试验结果的试错对比, 在保持截面面积、网环质量一致的情况下对实际钢丝的弹性模量进行了折减(减小为 E/5), 在模拟失效时, 该方法通过脆性断裂来考虑钢丝网环的失效, 忽略了钢丝材料的损伤累积与软化特征。

LS-DYNA 程序是功能齐全的几何非线性(大位移、大转动和大应变)、材料非线性(140 多种材料动态模型)和接触非线性(50 多种)通用结构分析有限元程序^[8], 能够高效地对非线性结构动力分析进行显式求解。GISSMO 断裂准则模型基于 Johnson-Cook 断裂模型发展起来, 模型中考虑了材料从受损、非线性损伤累积到材料断裂失效的过程, 能预测材料在不同受力情况下裂纹的产生和扩展情况, GISSMO 断裂准则模型非常适用于分析金属材料的损伤和失效问题。本文选用 GISSMO 断裂准则模型来研究环形网的损伤和失效问题, 通过与试验对比, 验证了计算模型的可靠性。

1 环形网片冲击试验

1.1 试验设计

为了得到环形网片在累积冲击条件下的破坏规律与极限耗能能力，开展了环形网片动力冲击试验。试验过程参考欧洲规范 ETAG-27，采用二十六面体落石，其最大尺寸不超过环形网片 $1/3$ 边长。试验选用落石质量为 $0.75T$ ，提升高度为 $5m$ ，冲击能量为 $36.787kJ$ ，忽略转动效应，竖直起吊落石至预定高度后进行自由落体冲击，冲击位置处于网面中心，重复冲击直至网片发生破坏。环形网片规格为 $R7/300/3.0$ ，表示环形网片由 $3.0mm$ 直径钢丝盘结 7 圈形成内径为 $300mm$ 内径的单环套接而成。环形网片边界采用卸扣与冲击试验架连接，卸扣规格为 $12.5T$ 。

1.2 试验装置与测试方法

试验过程中设定冲击试验架钢梁中面作为落石初始高度标定的基准面，由激光测距仪标定基准面与落石形心位置间的距离为起吊高度。环形网片边缘通过卸扣与钢梁中面的连接头相连，初始时刻在自重作用下网片将产生一定下挠，需采用塔尺测量初始挠度。高速摄像机正面拍摄，记录冲击全过程，采样频率取 $500Hz$ ，结合运动分析软件 Pro-Analysis 获得落石下落过程中的竖向位移、速度时程；加速度传感器嵌入落石内部，伴随落石同时运动，离线采集加速度实时数据。

1.3 试验结果

选取冲击过程中关键时刻照片，主要包括：落石触网、反弹/网片破坏，如图 1 所示。冲击过程分两次进行：第一次试验，环形网片安装完成，将 $0.75T$ 二十六面体落石自基准面提升 $5.0m$ ，自由释放，触网速度为 $9.094m/s$ 。第一次冲击完成后，环形网发生明显塑性变形，但未发生破坏，落石与网片发生碰撞-反弹-碰撞多次作用后与网片处于相对静止状态，测试此时稳定状态的网片下挠度，回收传感器加速度，捕捉落石位移时程信息。

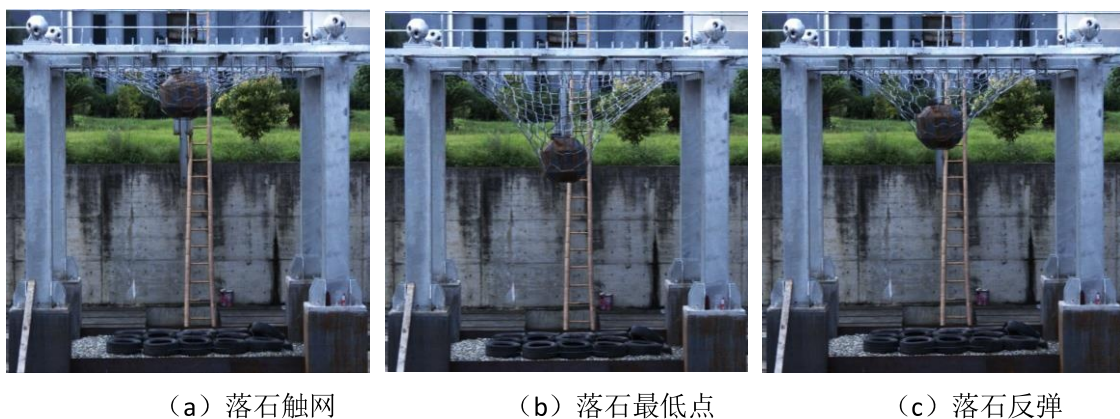


图 1 第一次冲击过程

第一次冲击完成后，不对环形网片进行修复，重新起吊 $0.75T$ 落石至基准面 $5.0m$ 自由释放，进行第二次冲击，由于第一次落石冲击使得环形网片产生不可恢复的变形，落石与网面的接触时刻延迟，触网速度略有增加（约为 $10.85m/s$ ），同样选取冲击过程典型时刻照片如图 2 所示。第二次冲击使得环形网发生面外刺穿破坏，落石与网片发生碰撞的瞬间加速度急速变化，记录环形网片破坏位置的破坏形式及特征、豁口尺寸，同样进行传感器加速度数据回收及位移时程捕捉。



(a) 落石触网

(b) 落石最低点

(c) 落石冲破网片

图 2 第二次冲击过程

2 数值模型

2.1 GISSMO 损伤模型

材料的损伤与破坏与应力三轴度密切相关，应力三轴度为材料一点应力状态的平均应力与等效应力的比值

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} = -\frac{p}{\sigma_{eq}} = \frac{\sqrt{2}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3\sqrt{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]}} \quad (1)$$

其中 p 为静水压力其中， σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为第一、第二、第三主应力。试验证明金属断裂行为与应力状态具有很强的相关性，在 η - ε^p 空间内可以定义出失效曲线，借鉴 Johnson and Cook，定义损伤变量 D

$$D = \left(\frac{\varepsilon^p}{\varepsilon_f(\eta)} \right)^n \quad (2)$$

ε^p 为累积塑性应变增量， $\varepsilon_f(\eta)$ 为断裂塑性应变，为当前三轴度的函数， n 为损伤指数，GISSMO 模型通过设置不同的损伤指数，可以模拟材料非线性损伤累积过程^[9]，这一特点是与 Johnson Cook 方程的主要区别与改进。对损伤变量关于时间求导数，可得损伤变量增量的表达式

$$\dot{D} = \frac{n}{\varepsilon_f(\eta)} D^{(1-1/n)} \dot{\varepsilon}^p \quad (3)$$

其中 D 为损伤变量， $\dot{D}$ 为损伤速率， n 为损伤指数， $\varepsilon_f(\eta)$ 为失效曲线， η 为应力三轴度， $\dot{\varepsilon}$ 为等效塑性应变增量。式中显式地包含了 D ，表明当 D 增大时（接近 1）损伤发展加剧，当 $D=1$ 时，失效发生，单元删除。

2.2 材料参数及验证

根据罗祥等的试验^[10]，高强钢丝材料具有一定的延伸率，极限应变可达 0.06~0.07，无明显屈服点，钢丝轴向拉伸试验应力应变曲线如图 3（a）所示。GISSMO 模型同时能够考虑网格相关性，图 3（b）即为 6 类不同网格尺寸的钢丝模型。

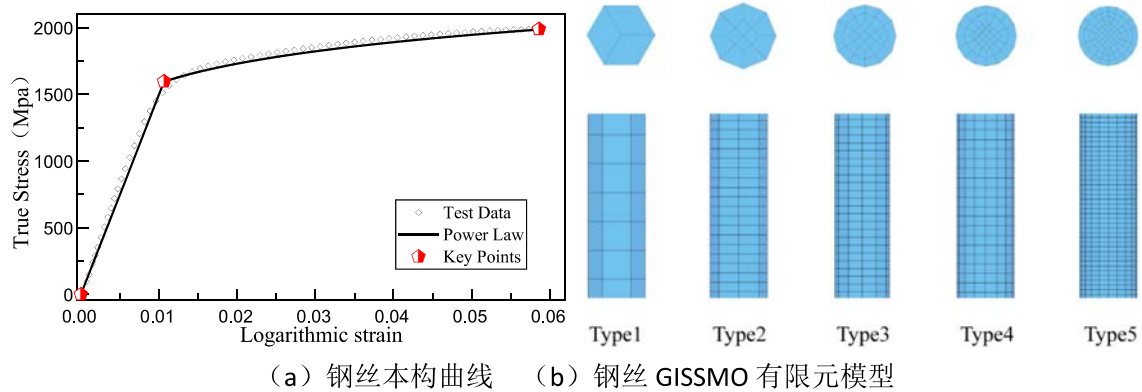


图 3 钢丝材料及有限元模型

高强钢丝材料的本构曲线可以看出，随着应变的发展强度有所提高，曲线形式符合弹塑性幂律等向强化模型，文中对钢丝材料本构曲线即选用了 MAT_18-POWER_LAW_PLASTICITY 模型，幂律强化材料的一般表达式如式 (1)

$$\sigma_y = k \varepsilon^n = k (\varepsilon_{yp} + \bar{\varepsilon}^p)^n \quad (4)$$

其中， ε_{yp} 为弹性应变， $\bar{\varepsilon}^p$ 为有效塑形应变（对数应变）， k 为强化因子， n 为硬化指数，通过与试验拟合取 $k=2858\text{MPa}$ ， $n=0.1283$ 。由于工程中柔性防护系统遭受冲击作用，与落石碰撞接触过程中材料应变变化速率较大，将对钢材的硬化行为产生较大影响，文中选用了考虑应变率效应的 Cowper and Symonds 模型，表述如式(5)

$$\sigma_{\text{dyn}} = \sigma_{\text{st}} \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/p} \right] \quad (5)$$

其中， σ_{dyn} 为动力条件下的应力、 σ_{st} 为拟静力加载条件下的应力， $\dot{\varepsilon}$ 为应变率， C 、 P 为应变率参数。

卸扣选用极限工作荷载为 12.5T 的弓形卸扣^[11]，由于试验中卸扣仅起到连接作用，材料模型考虑为弹性体，杨氏模量为 210GPa，泊松比 0.3，密度 7850kg/m³；冲击试验架支撑钢柱、钢梁及加劲板均采用 Q345 钢材制成，根据陈俊岭等的试验研究^[12]，高应变率下 Q345 钢材相对于静力加载具有明显的应变率强化效应。计算中采用 Norman Jones^[13]试验得出的 $C=40.4\text{s}^{-1}$ ， $P=0.5$ ；环形网由高强钢丝盘结不同圈数制成、Sato 等^[14]人的试验表明，高强钢材的强度对应变率并不敏感，应变率效应基本可以忽略，本文取 $C=0\text{s}^{-1}$ ， $P=0$ ，

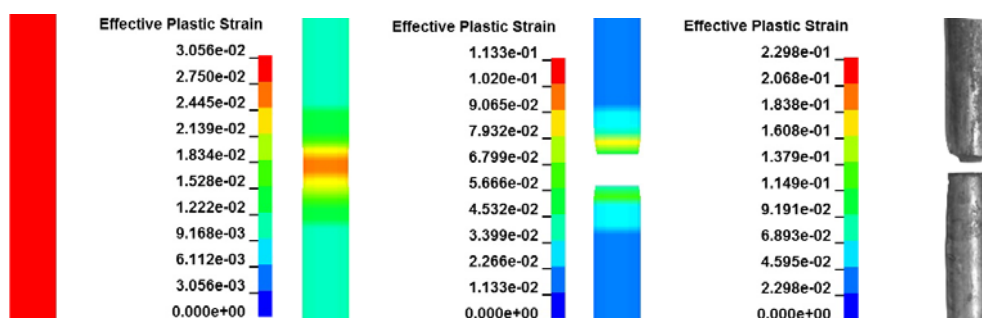


图 4 GISSMO 材料模拟钢丝拉断过程

图 4 为 GISSMO 模型用于模拟钢丝拉伸损伤断裂过程，与文献^[15]的试验结果对比，发现钢丝断口处有明显的呈杯锥状的颈缩，GISSMO 模型能很好再现这一现象，说明 GISSMO 材料模型用于模拟钢丝断裂时的可靠性。

2.3 边界条件与接触关系

仿真计算中石块与网片初始设置为临界接触，通过修正石块的初始速度，满足接触时的冲击能量。钢柱柱脚为双向铰接，其余钢丝绳端点固结。落石与网片的接触采用梁与面的自动接触，网片自身网环采用自动接触，有限元单元及模型的建立过程详见赵世春等^{[16][17][18]}研究。

3 结果与分析

同试验结果一致，第一次冲击完成后环形网成功拦截落石，但产生了不可恢复的变形，第二次相同冲击能量、速度、尺寸的落石冲击时，落石击穿网片。图 5 为第二次冲击过程的有限元模拟，图 5 (a) 为落石与网片接触前，环形网片在第一次冲击前已经产生了不可恢复变形，图 5 (b) 为环形网片变形达到最大，图 5 (c) 为 0.75t 落石 5.0m 高度第二次冲击时，环形网片发生破坏，破坏位置位于环形网片与落石接触位置边缘，形成明显的破断豁口。

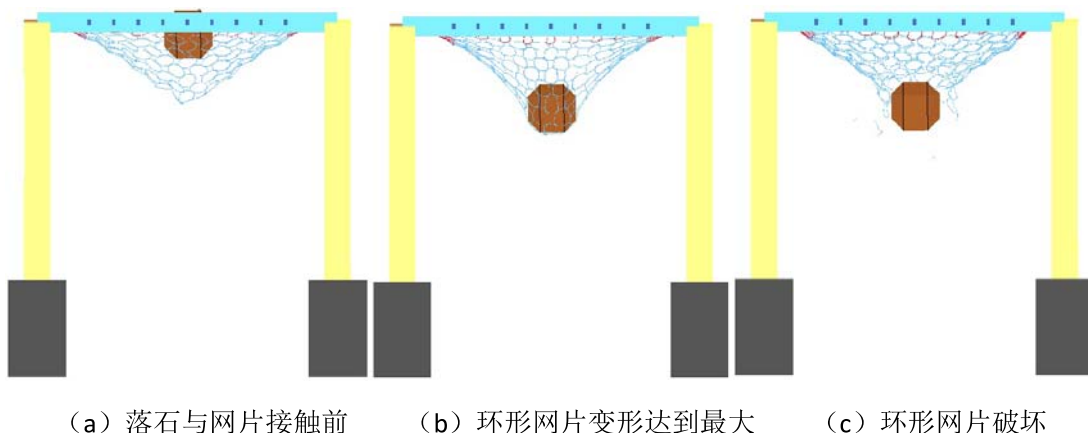


图 5 GISSMO 模型验证环形网片的损伤累积与破坏

图 6 为第二次冲击过程落石的位移、速度、加速度时程曲线。如图所示，破坏时环形网片产生最大位移为 1.43m。冲击过程中，落石在环形网片的作用下速度明显减小，但并未变为 0 值，速度降为 2.54m/s 时，落石冲破环形网片继续加速下降。加速度峰值出现在约 0.1s 位置，约为 384m/s²，说明相应的落石冲击力此刻达到峰值，网片承受最大荷载，发生面外破坏。

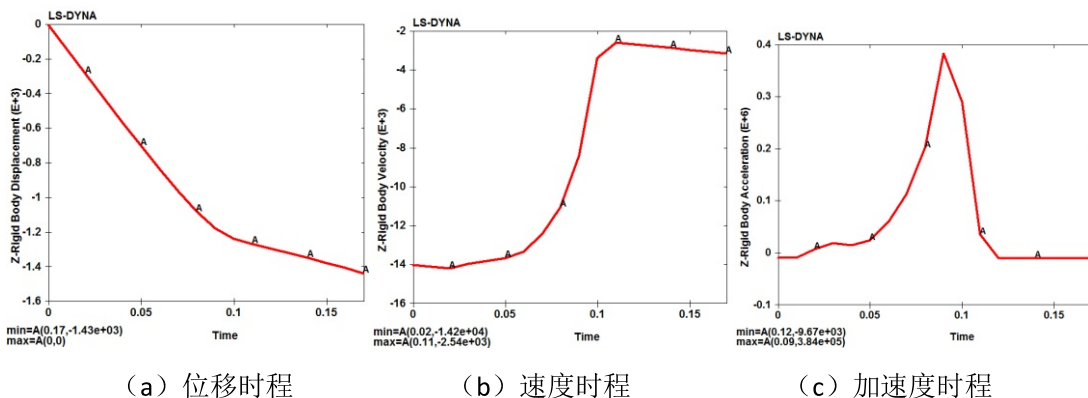


图 6 冲击过程落石的运动特征

结论

累加冲击作用下，柔性网片发生破坏说明，单次冲击造成结构不可恢复的变形大大降低了防护结构二次抵抗冲击的能力；

GISSMO 损伤模型能够有效预测环形网片的累积破坏特征，可以用于精细化的柔性防护系统有限元分

析。

参考文献

- [1] Volkwein A, Schellenberg K, Labiouse V, 等. Rockfall characterisation and structural protection - a review[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2011, 11: 2617–2651.
- [2] Gentilini C, Govoni L, de Miranda S, 等. Three-dimensional numerical modelling of falling rock protection barriers[J]. Computers and Geotechnics, 2012, 44: 58–72.
- [3] Nicot F, Cambou B, Mazzoleni G. Design of Rockfall Restraining Nets from a Discrete Element Modelling[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2001, 34(2): 99–118.
- [4] 園田佳巨, 畑芳宏, 福永一基. SPH 法を改良したワイヤリング防護柵の衝撃応答解析[J]. 構造工学論文集 A, 2011, 57: 1155–1162.
- [5] Sasiharan N, Muhunthan B, Badger T C, 等. Numerical analysis of the performance of wire mesh and cable net rockfall protection systems[J]. Engineering Geology, 2006, 88(1): 121–132.
- [6] Escallón J P, Wendeler C, Chatzi E, 等. Parameter identification of rockfall protection barrier components through an inverse formulation[J]. Engineering Structures, 2014, 77: 1–16.
- [7] Xu H, Gentilini C, Yu Z, 等. An energy allocation based design approach for flexible rockfall protection barriers[J]. Engineering Structures, 2018, 173: 831–852.
- [8] Home | Livermore Software Technology Corp.[EB/OL]. 2019/2019-08-13. <http://www.lstc.com/>.
- [9] Andrade F X C, Feucht M, Haufe A, 等. An incremental stress state dependent damage model for ductile failure prediction[J]. International Journal of Fracture, 2016, 200(1): 127–150.
- [10] 罗祥, 石少卿, 汪敏. 边坡柔性防护网中 RECCO 圆环力学性能研究[J]. 路基工程, 2010(6): 45–47.
- [11] 一般起重 D 形和弓形锻造卸扣[S]. GB/T 25854-2010: 1–15.
- [12] 陈俊岭, 李哲旭, 舒文雅, 等. 不同应变率下 Q345 钢材力学性能试验研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2015, 45(6): 1145–1150.
- [13] Jones N. Structural Impact[M]. 第 2 版. Liverpool, United Kingdom: Cambridge University Press, 2012.
- [14] Sato K, Yu Q, Hiramoto J, 等. A method to investigate strain rate effects on necking and fracture behaviors of advanced high-strength steels using digital imaging strain analysis[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 75: 11–26.
- [15] 潘晓宇, 谢旭. 锈蚀高强度钢丝的力学性能与评级方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(11): 1917–1924.
- [16] 赵世春, 余志祥, 赵雷, 等. 被动防护网系统强冲击作用下的传力破坏机制[J]. 工程力学, 2016, 33(10): 24–34.
- [17] 赵世春, 余志祥, 韦韬, 等. 被动柔性防护网受力机理试验研究与数值计算[J]. 土木工程学报, 2013, 46(5): 122–128.
- [18] 齐欣, 余志祥, 许浒, 等. 被动柔性防护网结构的累计抗冲击性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(11): 2788–2797.

Application of GISSMO for failure behavior of the steel ring net panel in flexible barrier system

Liping Guo, Zhixiang Yu*, Chun Liu, Yupeng Liu, Shichun Zhao

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Cheng Du, 610031)

Abstract

Flexible barriers are used as protection structures widely against rockfall hazards, especially in mountainous areas. In the field conditions, the barriers are prone to be impacted repeatedly by falling rocks. The ring net panel, as a key component of flexible barriers, takes most risk of repeated impact loading. To study the failure behaviors of the flexible ring net panel in response to repeated impact loading, Generalized Incremental Stress State Dependent Damage Model (GISSMO), providing a framework within LS-DYNA where the user can define failure parameters, is used for accurate predicting the material damage and failure. In order to guarantee the efficiency and accuracy of calculation, Hughes-Liu beam element model was introduced for ring net panel analysis. In addition, both quasi-static tests for single steel wire in uniaxial tension and dynamic tests for ring net panel under repeated impact loading were carried out. The trajectory and acceleration response of falling stone over whole impact process were recorded by high-speed camera and acceleration sensor respectively. Experimental evidence shows that GISSMO model is able to reproduce the damage initiation and evolution of ring net panel accurately. Damage accumulation of ring net panel under repeated out-of-plane impact is significant. As the impact energy level increases, the performance degradation of ring net panel is distinct.