

竜巻飛来物の衝突を受けるリングネットを用いた 防護ネットシステムの衝撃解析

Dynamic impact simulation of net protection system with Ring nets against tornado missile

原田怜†, 秋岡民康*, 筒井喜平**, 鈴木利治***, 栗橋祐介****, 小室雅人****
Satoshi Harada, Tamiyasu Akioka, Kihei Tsutsui, Toshiharu Suzuki, Yusuke Kurihashi, Masato Komuro

†中部電力株式会社, 発電本部 土木建築部 (〒461-8680 愛知県名古屋市中区新町1)

*鹿島建設株式会社, 原子力部 (〒107-8348 東京都港区赤坂6-5-11)

**株式会社ランスモア, (〒144-0052 東京都大田区蒲田5-41-3)

***東亜グラウト工業株式会社, 斜面防災グループ技術開発室 (〒160-0004 東京都新宿区四谷2-10-3)

****室蘭工業大学, 大学院工学研究科(〒050-8585 北海道室蘭市水元町27-1)

Protection Nets have been clarified as one of the countermeasures to protect facilities of Nuclear Power Plants against Tornado Missile. The capturing performance of the Net Protection System with Ring Nets has been clarified by free-fall test. This research proved, that analytical evaluation is thought to be efficient for the net system by multiple case of reproducing simulation of the free-fall test using a general purpose structural analysis program/LS-DYNA, and comparing the dynamic response about the impacting force and deformation of components with the test results.

Key Words : tornado missile, protective net system, LS-DYNA, Ring net

キーワード: 竜巻飛来物, 防護ネットシステム, LS-DYNA, リングネット

1. はじめに

平成25年7月に施行された原子力規制委員会の新規規制基準では、竜巻により原子炉施設の安全性が損なわれないことを評価するための指標として「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」¹⁾(以下、ガイドという)が制定されている。原子力発電所では竜巻による飛来物に対して設備を防護するために種々の対策が実施されており、それらの中で有効な対策の一つとして防護ネットが採用されている。防護ネットはこれまで落石防護工としての性能試験が行われてきた。落石防護工としての防護ネットは比較的大きな運動エネルギーが大きな面積に低速で作用する衝突現象が対象であるが、竜巻飛来物は落石と比較して小さな運動エネルギーが小さな面積に高速で作用するため、特に局所貫通の観点からの改良が求められる。

これまで複数の種類のネットについて竜巻飛来物捕捉性能を確認するための試験や解析的な検討が行われてい

る^{2~5)}。これらで対象とする防護ネットは編み込みの向きによって荷重伝達に異方性のあるひし形金網を複数枚組合せて構成されている^{4,5)}。

一方、梅沢らはひし形金網とは異なり荷重伝達に異方性がなく、かつ高いエネルギー吸収能力を有するリングネットに着目し、プレーキリング等の緩衝装置を組合せた防護ネットシステムを提案し、その性能を実証試験および再現解析によって検証している⁶⁾。

しかしながら、この解析はガイド条件の運動エネルギーに満たない飛来物をネット中央部に一度だけ衝突させた条件下で検証されたものであり、ガイドに準拠したより大きな運動エネルギーやネット端部に飛来物が落下する場合についての妥当性は十分に検証がなされていない。

このような背景のもと、本論文では、リングネットを用いた防護ネットシステムの解析的評価の適用性を確認するために、既往の研究⁷⁾より入力エネルギーが大きく、かつガイドに基づき設定した飛来物をネット中央部および端部に衝突させた自由落下試験を対象に、その再現解析を実施し、得られた解析結果を試験結果と比較するこ

† 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: Harada.Satoshi@chuden.co.jp

とにより解析手法の検証を行った。なお、解析には構造用汎用プログラムである LS-DYNA⁷⁾を用いた。

2. 防護ネットシステムの部材構成

本解析の対象であるリングネットを用いた防護ネットシステムは、飛来物が衝突してリングネットが大きく変形することでその運動エネルギーを吸収し、飛来物を捕捉するものである。リングネットはフレームドロープを介して固定用ロープにより架構に接続される。

図-1 に防護ネットシステムの基本構造図を示す。また、本システムの主要部材の詳細について以下に示す。

2.1 リングネット

図-2 にリングネットの形状寸法図を示す。リングネットは、素線径 3 mm の硬鋼線（引張強さ 1770 N/mm²）を $\phi 300$ mm に巻き束ねたリングをネット状に編んだ構造で、本防護ネットシステムにおいては素線を 19 回巻き束ねたリングを用いている。また、ネット周辺部は端部補強のために 19 回巻きリングを二重にしている。

2.2 ワイヤロープ

(1) フレームドロープ

フレームドロープは、ネットの周辺部にシャックルを介して設置するワイヤロープ部材で 1 辺に 2 本用いており、飛来物捕捉時においてネット材に作用した力を固定用ロープに伝達させる働きを持つ。なお、フレームドロープ 1 本に 1 つのブレーキリングが装着されている。このフレームドロープは、 $\phi 20$ mm のワイヤロープを使用しており、破断荷重は 252 kN である。

(2) 固定用ロープ

固定用ロープは、フレームドロープ端部を固定するワイヤロープ部材で、フレームドロープから伝わる力を架構へ伝達させる。この固定用ロープは、 $\phi 22$ mm のワイヤロープを使用しており、破断荷重は 400 kN である。

2.3 ブレーキリング（エネルギー吸収装置）

図-3 にエネルギー吸収前後のブレーキリングの状態を示す。ブレーキリングは鋼管をリング状にした構造で、 $\phi 464$ mm の鋼管内をワイヤロープが挿通しており、ロープに張力が作用すると絞られるように変形してエネルギーを吸収する機構を有するものである。なお、ブレーキリングの限界作動量は 1000 mm である。

3. 自由落下試験の概要および結果

ここでは、解析的評価の妥当性を検証するために前述した防護ネットシステムを対象に実施した竜巻飛来物の自由落下試験について、その概要および結果を述べる。

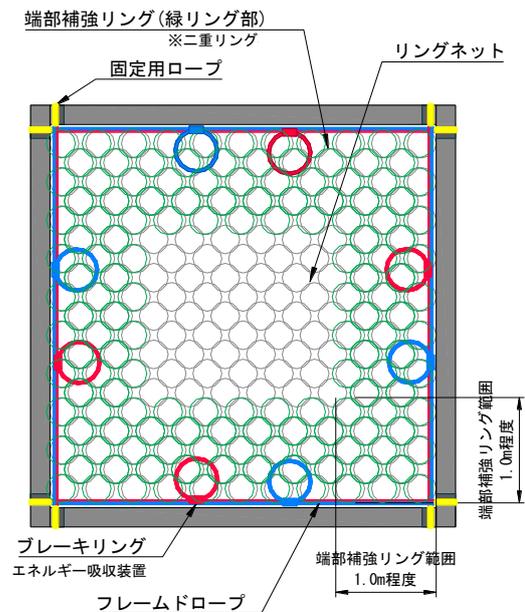


図-1 竜巻防護ネットシステム基本構造図

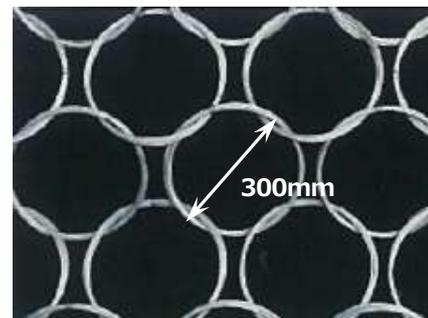


図-2 リングネット形状寸法



(a) エネルギー吸収前



(b) エネルギー吸収後

図-3 エネルギー吸収前後のブレーキリング (イメージ図)

表-1 想定飛来物および模擬飛来物諸元

飛来物種別	想定飛来物	模擬飛来物
	鋼製材	
飛来物質量 m (kg)	135	550~600 程度
飛来物速度 v (m/s)	59	30 程度
運動エネルギー E^* (kJ)	235	235 以上

※ $E = 0.5 \times m \times v^2$

表-2 各試験ケースと模擬飛来物の諸元

試験ケース	第一試験体	第二試験体
試験 No.	1-1E	2-1C
衝突位置	端部	中央部
飛来物種別	鋼製材	
飛来物質量 [*] m (kg)	608.0	557.0
落下高さ [*] H (m)	42.0	47.0
飛来物速度 [*] v (m/s)	28.4	30.1
運動エネルギー E (kJ)	245.2	252.3

※実測値

3.1 飛来物

ガイドに記載の飛来物のうち、本試験では質量 135 kg の鋼製材を想定飛来物として自由落下試験を実施した。想定飛来物の速度はガイドを参考に、設計上の余裕を含めて設定した。ただし、試験実施上、落下高さに制約があり飛来物速度が 31.3m/s 以下に制限されるため、想定飛来物 (235kJ) と運動エネルギーが等価以上となるように質量を増した模擬飛来物により試験を実施した。表-1 に想定飛来物および模擬飛来物の諸元を、図-4 に両飛来物の形状寸法を示す。なお、模擬飛来物の先端形状は、想定飛来物と同形状としている。

3.2 試験概要

図-1 に示した竜巻防護ネットシステムの試験体を 2 つ用意し (第一, 第二試験体), 第一試験体ではネット端部に、第二試験体ではネット中央部に模擬飛来物を自由落下により衝突させる試験を実施した。

(1) 試験体および模擬飛来物の諸元

ネット寸法 4 m × 4 m のリングネットを内法寸法 4.2 m × 4.2 m, 高さ 4.9 m の試験架構 (H-400 × 400) にフレームドロップを介して固定した。なお、第二試験体では、ネットの変形量が大きくなることを想定し、試験架構の柱下部に 1.5 m × 1.5 m × 1.5 m の嵩上げ用コンクリートブロックを設置した。表-2 に各試験ケースと試験で使用した模擬飛来物の諸元を示す。

(2) 模擬飛来物の衝突位置

図-5 に模擬飛来物の目標衝突位置を示す。模擬飛来物の衝突位置は、ネット中央部位置およびネット最端部より 0.5 m × 0.5 m 内側の位置とした。

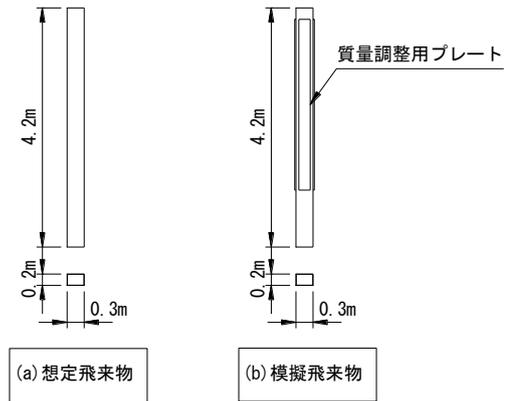


図-4 想定飛来物および模擬飛来物の形状寸法

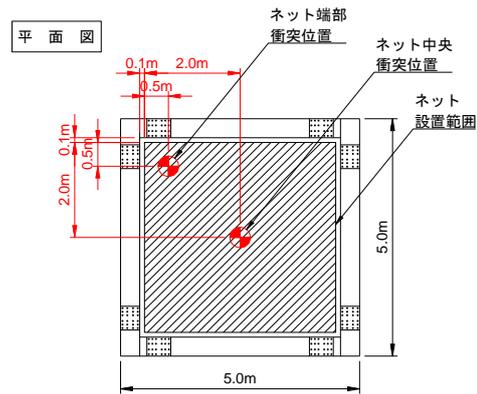


図-5 模擬飛来物の目標衝突位置

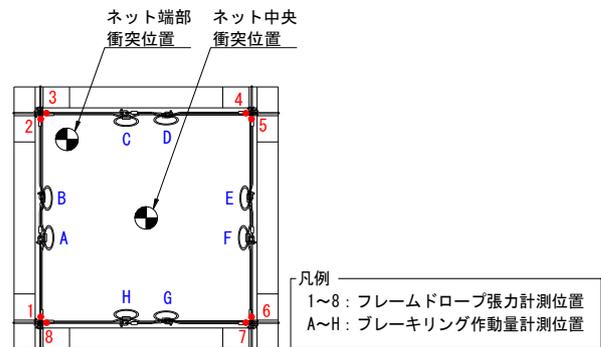


図-6 計測箇所位置図

(3) 計測

実証試験における計測項目としては、模擬飛来物の速度、ネット変形量、フレームドロップ張力、ブレーキリング作動量とした。図-6 にフレームドロップ張力・ブレーキリング作動量の計測位置を、図-7 にネット変形量の計測位置を示す。

3.3 試験結果

各試験ケースの運動エネルギーは、表-1 に示す想定飛来物の運動エネルギー 235 kJ を満足する結果となった。全ての試験ケースにおいてネットの破断およびすり抜けは生じずに模擬飛来物を捕捉した。

表-3 に各試験ケースのネット変形量、最大フレームドロップ張力および最大ブレーキリング作動量を示す。

表-3 試験結果一覧

試験体	第一試験体	第二試験体
試験 No.	1-1E	2-1C
衝突位置	端部	中央部
衝突部の初期たわみ量 (m)	0.93	1.07
ネット変形量 (m)	1.22	2.45
最大たわみ量 (m)	2.15	3.52
最大フレームドロップ張力 (kN)	欠測	148.0 (5)※
最大ブレーキリング作動量 (mm)	660 (C) ※	390 (A,E) ※

※ カッコ内は計測位置を示す。

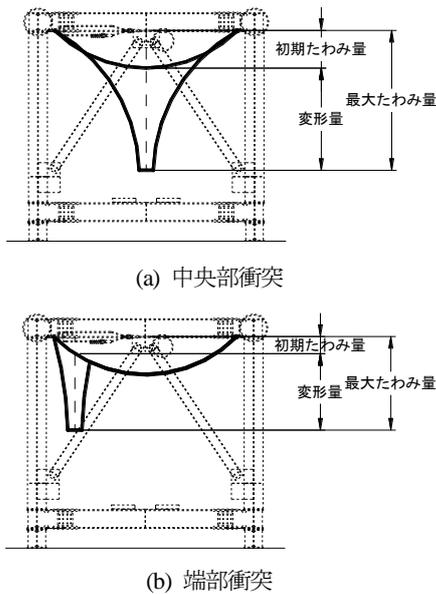


図-7 ネット変形量の計測位置図

4. 解析条件

4.1 解析モデル

表-4 に飛来物モデルの諸元および使用した要素タイプを示す。また、表-5 に防護ネットシステムの各部材の寸法と要素タイプについて示す。

リングネットや各種ロープ、シャックル等、ネットシステムを構成する主要な部材については、各部材の曲げ変形の精度が高く、また安定した計算を行うことが可能なビーム要素でモデル化している。リングネットは前述のとおり 1 リングあたり素線を 19 回巻き束ねたものであるが、解析上ではリングネット引張試験の再現解析を行った上で、剛性と強度が等価となる 1 本のビーム要素に置き換えている。このビーム要素はφ300mmの円周を72分割している。互いに隣接するリングネット間には摩擦を考慮した接触条件を定義しており、リング同士が接触・変形することにより張力が発生し力が伝達する。なお、リングネットモデルの破断ひずみは引張試験に合致するよう4.65%としている。

表-4 飛来物解析諸元

解析ケース No.	A-1E	B-1C
対応する試験ケース No.	1-1E	2-1C
衝突位置	端部	中央部
外形		
断面		
質量	608.0kg	557.0kg
衝突速度	28.4m/s	30.1m/s
エネルギー	245.2kJ	252.3kJ
解析条件 (要素タイプ)	飛来物本体：シェル要素 質量調整用プレート：ソリッド要素 ガイドロープ：ビーム要素	

表-5 ネットシステム各部材の寸法と要素タイプ

符号	部材	寸法			解析条件 要素タイプ
		断面寸法	板厚/外径	外形寸法	
A	架構柱	H形鋼 H400×400	t1=13mm t2=21mm	H=3699mm	シェル要素
B	架構梁	H形鋼 H400×400	t1=13mm t2=21mm	L=4200mm	シェル要素
C	架構ブレース	溝形鋼 [200×90]	t1=8mm t2=13.5mm	L=3410mm	シェル要素
D	架構平面ブレース	溝形鋼 [200×90]	t1=8mm t2=13.5mm	L=2430mm	シェル要素
E	架構リブプレート	—	t=13mm /t=9mm	—	シェル要素
F	固定用ロープ	—	φ22mm	—	ビーム要素
G	フレームドロップ	—	φ20mm	L=4200mm	ビーム要素
H	ブレーキリング	—	—	全体径 φ466mm 締結部幅 50mm	シェル要素 ソリッド要素
I	シャックル (リングネット取付用)	—	φ22mm	内径 76.4mm	ビーム要素
J	リングネット	素線径 3mm 巻き数 19 巻 リング径 D300mm	—	リング数 11 個×12 個	ビーム要素
K	ガイドロープ	—	φ20mm	—	ビーム要素
L	ターンバックル	—	φ32mm	L=932mm	ビーム要素
M	端部シャックル大	—	φ32mm	—	ビーム要素
N	端部シャックル小	—	φ22mm	—	ビーム要素
O	コンクリートブロック	—	—	1.5×1.5×1.5 (m)	ソリッド要素

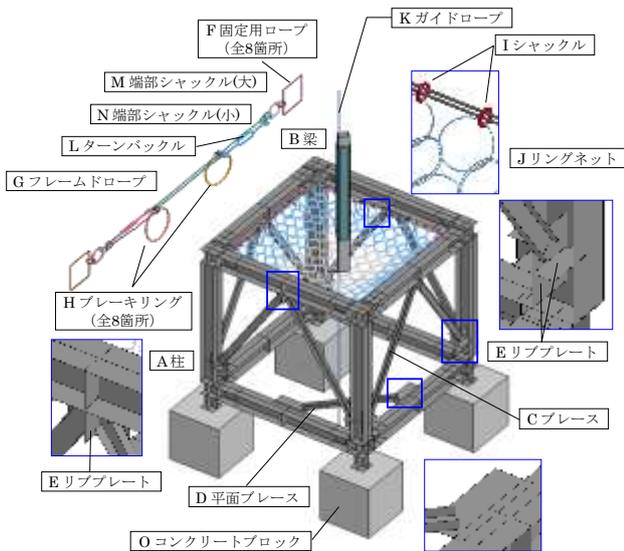


図-8 解析モデル全体詳細図
(※上図は解析 No.B-1C のものを示す.)

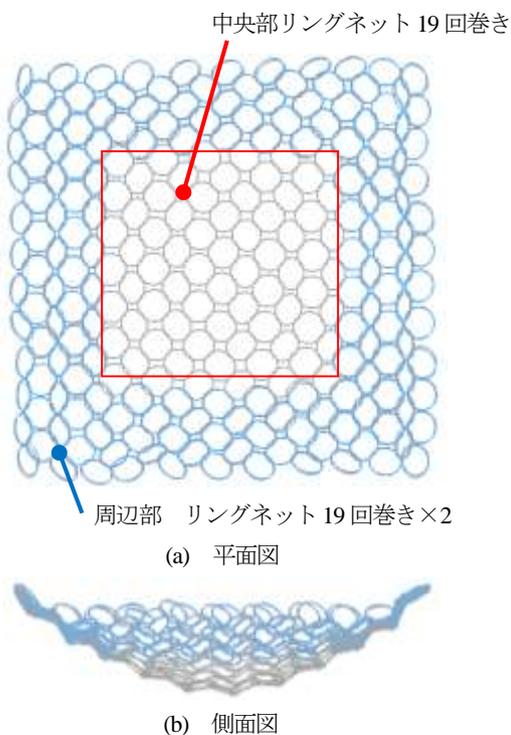


図-9 リングネットモデル図

表-6 各材料に使用した力学特性値

材料	質量密度 (kg/m ³)	ヤング率 (MPa)	ポアソン比	降伏点 (MPa)
飛来物	7850	205000	0.30	400
架構				320
リングネット		190000		732
フレームドロープ		59000		500
ブレーキリング		205000		0.28

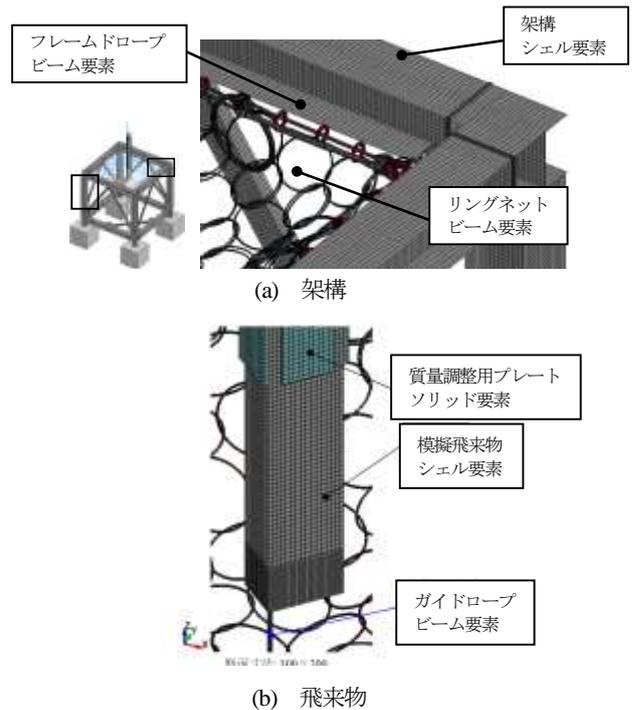


図-10 解析メッシュ図

固定用ロープのビーム要素は架構に剛体結合し、梁に直接荷重を伝える状態としてモデル化している。また、模擬飛来物の衝突位置およびネット接触断面は、自由落下試験結果と同条件とした。

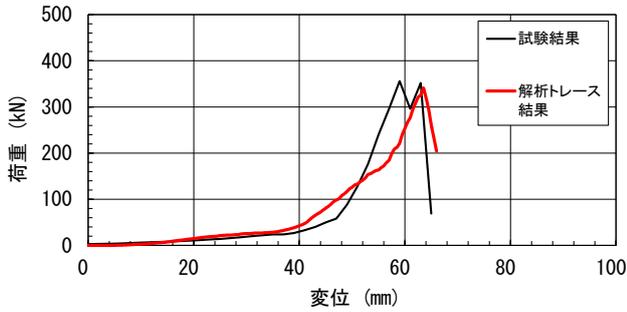
図-8に解析モデル全体の詳細図を、図-9にリングネットのモデル図を、図-10に解析メッシュ図を示す。

4.2 材料構成則

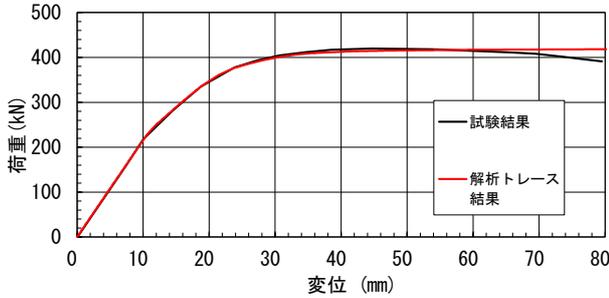
表-6に模擬飛来物、架構、リングネット、フレームドロープ、ブレーキリングモデルについて、解析に使用した力学特性値を示す。飛来物および架構は、塑性域の降伏応力がバイリニア型の弾塑性体構成則を用いてモデル化した。また、リングネット、フレームドロープ、ブレーキリングについては、塑性域の降伏応力がマルチリニア型の弾塑性体構成則を用いると共に、各部材の強度試験結果をトレース出来るよう設定した。図-11にリングネット、フレームドロープ、ブレーキリングの引張強度試験結果と強度試験トレース結果の比較を示す。また、図-12にブレーキリングの吸収エネルギー-変位関係を示す。

4.3 境界条件

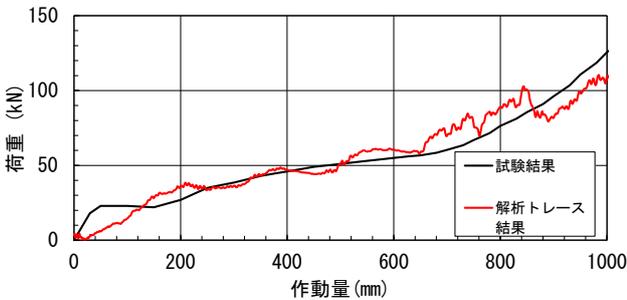
解析モデルにおける架構の柱脚基部は、実際の試験状況を考慮し完全拘束条件とした。また、本解析は飛来物やネットなど、多数の部材が複雑に接触し力を伝達する構造であることより、該当する部材間にはすべて接触条件を設定している。なお、各部材間の摩擦係数は文献⁸⁾を参考にして0.2とした。



(a) リングネット



(b) フレームドロップ



(c) ブレーキリング

図-11 単軸引張強度試験トレース結果

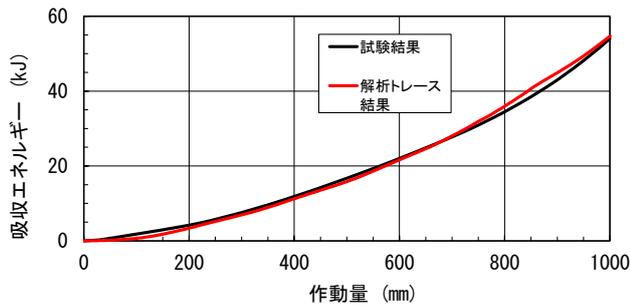
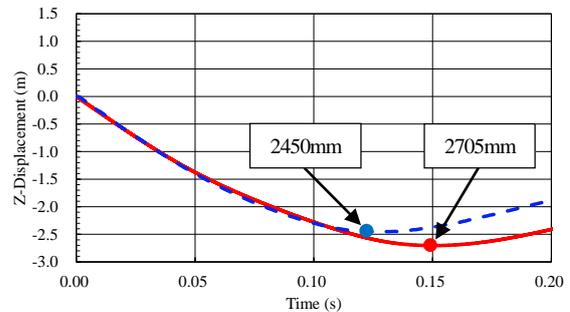


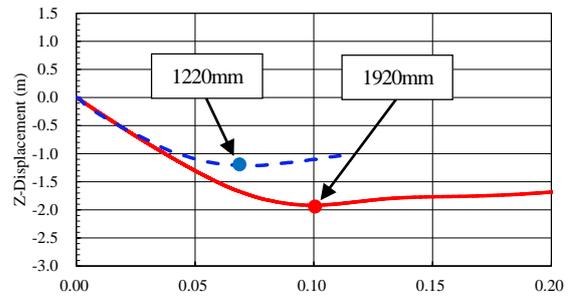
図-12 ブレーキリングの吸収エネルギー変位関係

5. 実証試験とシミュレーション解析の比較検証

ここでは、ネット変形量、フレームドロップ張力、ブレーキリング作動量および飛来物の運動履歴から求めた衝撃力について、解析結果と試験結果を比較検証した。なお、フレームドロップ張力については、試験時の欠測が少ない第二試験体で検証を行った。また、解析結果により飛来物衝突位置周辺のリングのひずみ量を確認した。



(a) 中央部衝突



(b) 端部衝突

図-13 ネット変形量時刻歴比較図

表-7 ネット最大変形量の比較

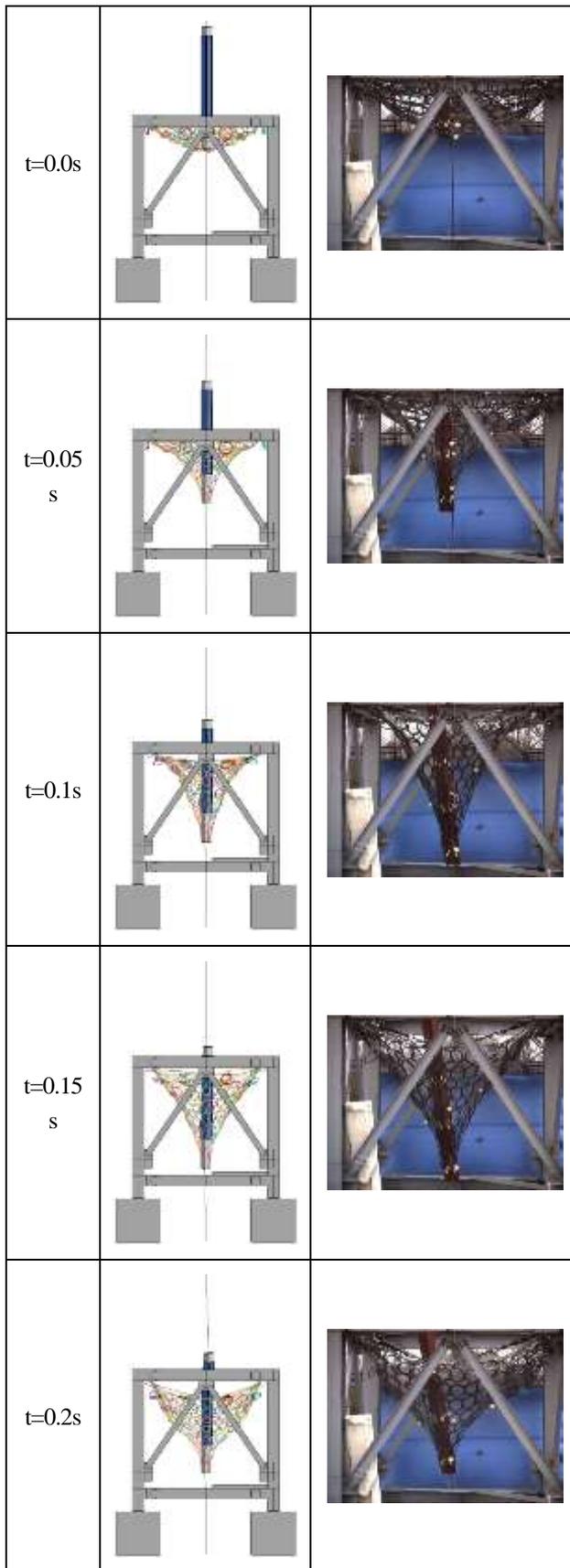
衝突位置	試験値(A) (m)	解析値(B) (m)	比率 B/A×100 (%)
中央	2.45	2.71	110.6
端部	1.22	1.92	157.4

5.1 ネット変形量

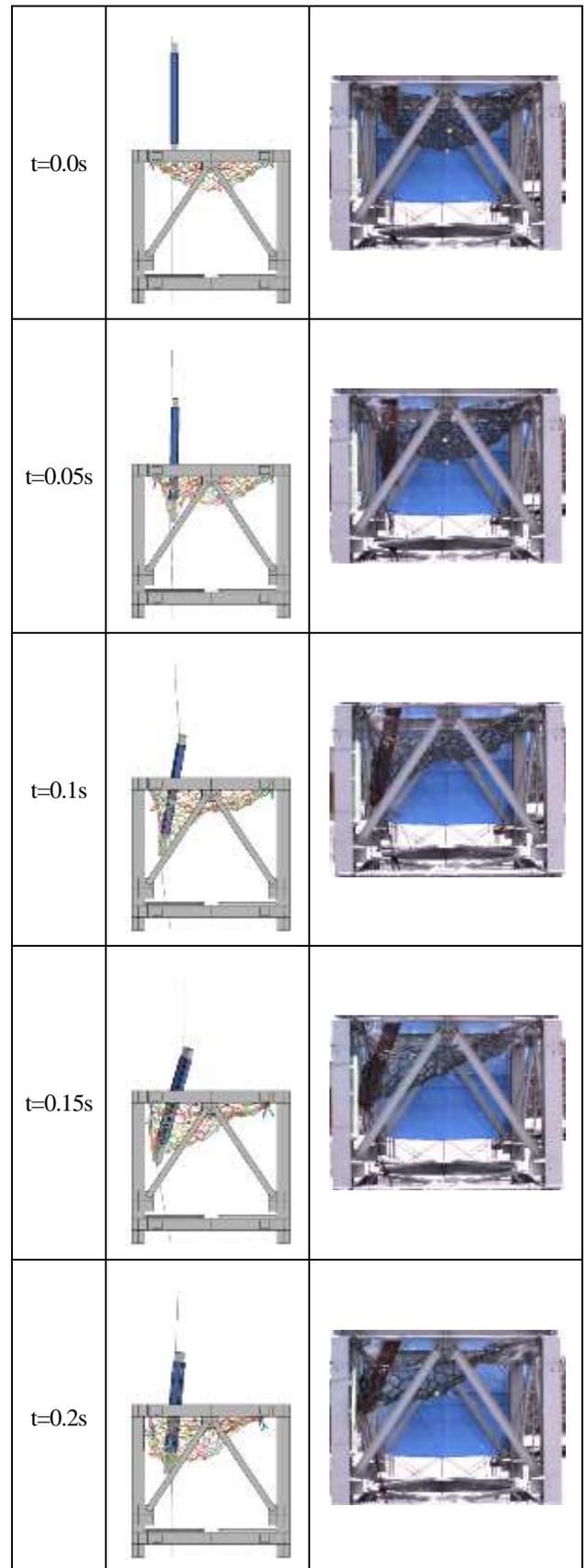
表-7および図-13に中央部衝突および端部衝突における模擬飛来物衝突時のネット変形量について、解析結果と試験結果を比較して示す。また、図-14にネット中央および端部への模擬飛来物衝突時の解析結果と試験結果の変形状態を対比した結果を示す。ここでは、模擬飛来物がネットに衝突した時刻を0sとしている。

試験結果のネット最大変形量に対する解析結果の比率は、中央衝突時で110.6%、端部衝突時で157.4%となった。図-13より、飛来物衝突後のネット変形量の経時変化は解析結果と試験結果でよく一致しているものの、最大変形量に到達するまでの時間は解析結果の方が長く、この両者の差が最大変形量に反映したものと考えられる。なお、ネット最大変形量について、試験結果と比較して解析結果が大きい理由としては、後述のブレーキリング作動量において、解析結果が試験結果よりも大きい値を示していることから、ロープ全長が長くなり、結果としてネットの変形量が大きくなったことが1つの要因と考えられる。また、解析結果と試験結果を比較してブレーキリング作動量の差が大きい端部衝突ケースの方が、中央衝突ケースよりネット最大変形量の差が大きい。

ネットの変形状態については、図-14に示すように解析結果は実証試験時のネット変形を概ね再現している。



(a) 中央部衝突 (左：解析, 右：試験)



(b) 端部衝突 (左：解析, 右：試験)

図-14 飛来物衝突状況の比較

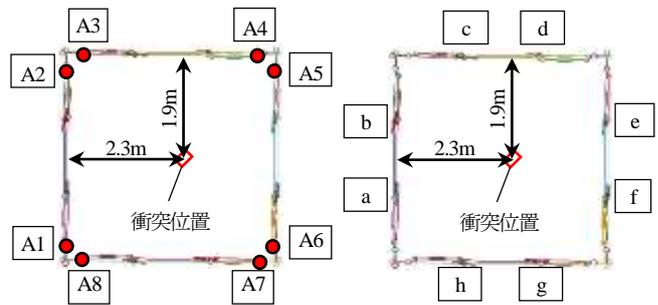
5.2 フレームドロップ張力・ブレーキリング作動量

ネット中央部衝突時におけるフレームドロップ張力およびブレーキリング作動量について、実証試験とシミュレーション解析の比較を行った。図-15に中央部衝突時の解析におけるフレームドロップ張力およびブレーキリング作動量の出力位置図を、表-8に解析により得られたフレームドロップ張力と試験結果との比較を、また図-16にフレームドロップ作用張力の時刻歴応答の比較を示す。なお、フレームドロップ最大張力の1辺あたりの荷重については、1辺に2本用いられているフレームドロップの張力を合計して記載している。

表-9, 10に中央部および端部衝突時において解析により得られたブレーキリング作動量と試験結果の比較を示す。また、表-11, 12にブレーキリングの吸収エネルギー量における比較を示す。

表-8より、中央衝突時のフレームドロップ最大張力に着目すると、解析結果は試験結果を全体的にやや下回っており、平均値では23 kN程度の差が生じている。また、図-16に示すフレームドロップ張力の時刻歴応答を見ると、解析結果と試験結果における張力の発生時刻に一定のずれが見られるものの、張力の増加傾向や継続時間、波形の全体的な形状は概ね一致していることが分かる。なお、張力が発生する時刻のずれは、(1)実現象ではリングネット間の緩みやフレームドロップのたるみ等が存在するものの、数値解析ではこれらの初期不整を考慮せず理想的な条件下で解析モデルを構築していること、(2)リングネットやブレーキリング等を単純化してモデル化したことによるものと推察される。例えば、リングネットはφ3 mmの素線を19回巻き束ねたものであるが、このモデルでは1本の線要素に置き換えており、実現象ではリングの素線が動くことでリングネットからフレームドロップへの荷重伝達は解析より時間を要する可能性がある。

フレームドロップ張力の時刻歴波形は、解析結果および試験結果のいずれにおいても、一定の張力でフラットになり、頭打ちの傾向を示す結果が多く見られる。これはブレーキリングが作動したことによる影響と考えられる。表-9に示すブレーキリング作動量から、図-11(c)に示すブレーキリングの荷重-変位関係を用いて算出される荷重と、対応するフレームドロップ張力の頭打ちしている荷重が概ね一致していることが確認できる。例えば、箇所A1のフレームドロップ張力は80~100 kN程度で頭打ちしているが、この1辺のフレームドロップ2本に設置されたブレーキリングa, bはいずれも350 mm程度作動している。図-11(c)のブレーキリングの荷重-変位関係を見ると、ブレーキリング1個につき40 kN程度の荷重が発生しており、この1辺のフレームドロップ2本を合計して80 kN程度の張力が発生していると考えられることから、フレームドロップ張力の頭打ち現象はブレーキリングの効果が発揮されたものと考えられる。



(a) フレームドロップ張力 (b) ブレーキリング作動量

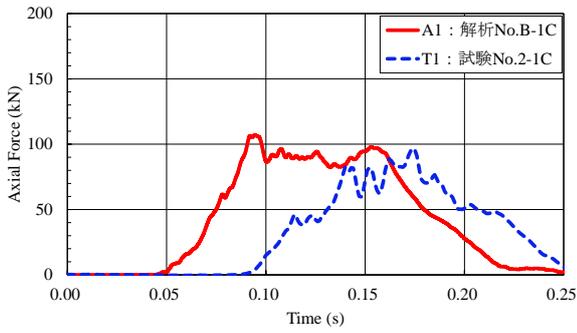
図-15 出力位置図

表-8 中央衝突時 フレームドロップ最大張力の比較

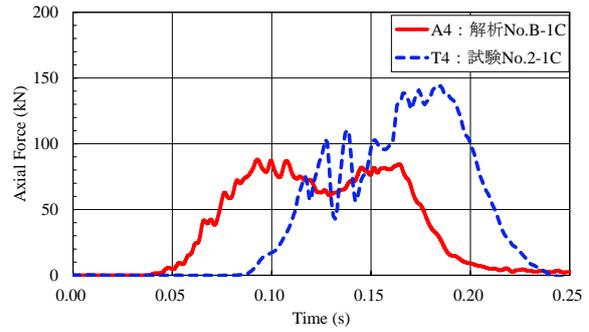
計測点	試験 No.2-1C	解析 No.B-1C		比率 B/A×100 (%)
	1辺あたり 荷重 (A) (kN)	出力点	1辺あたり 荷重 (B) (kN)	
T1	97.0	A1	107.0	110.3
T2	—	A2	103.8	—
T3	—	A3	91.5	—
T4	144.0	A4	88.0	61.1
T5	148.0	A5	98.4	66.5
T6	123.3	A6	97.2	78.8
T7	86.8	A7	69.5	80.1
T8	82.5	A8	71.0	86.1
平均	113.6	平均	90.8	79.9

表-9, 10を見ると、飛来物衝突位置のずれによるブレーキリングの作動量の傾向が解析結果と試験結果で概ね一致していることが分かる。また、解析結果は試験結果と比較してブレーキリングが作動し易い傾向が見られる。例えば、表-9における計測点Dとdはブレーキリング作動量が同程度であるが、表-8において対応するフレームドロップ張力を比較すると、解析結果である出力点A4の張力は試験結果である計測点A4の60%程度となっている。さらに、表-10において飛来物衝突位置から遠い箇所のブレーキリング(出力点e, f, g, h)については、試験時に作動していない箇所でも解析結果では作動している。このブレーキリングの作動し易さの差が、前述のように試験と解析のネット変形量の差の要因になっていると考えられる。

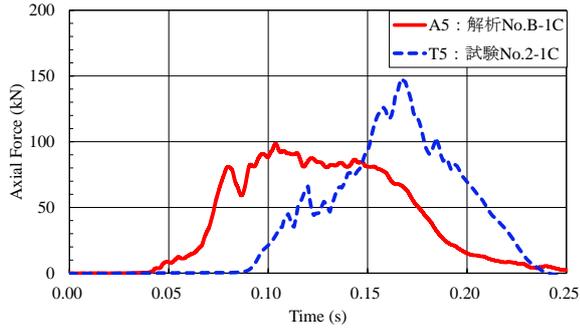
表-11, 12に示すブレーキリングの吸収エネルギー合計値は、中央衝突の場合、解析結果が試験結果よりも約4%大きく、端部衝突の場合、解析結果が試験結果よりも約11%大きい結果となっている。今後設計を行う場合には、解析結果では実際よりもブレーキリングの吸収エネルギー量が大きくなる傾向があることを踏まえた設計を行う必要がある。



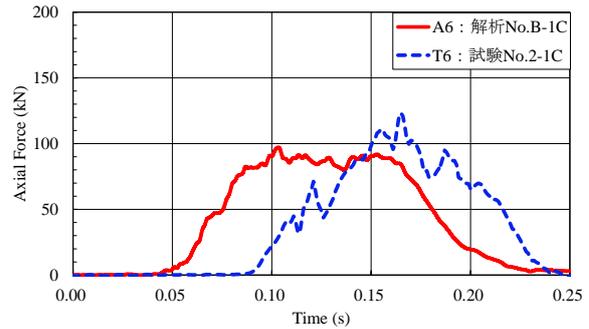
(a) 計測点(T1)と出力点(A1)の比較



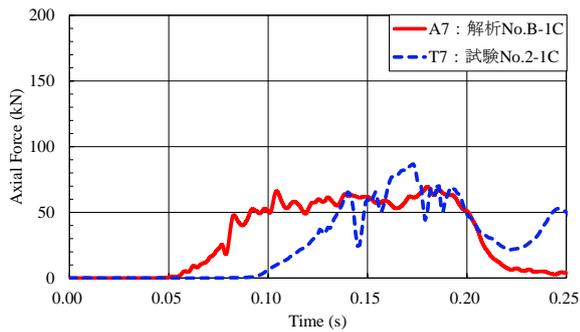
(b) 計測点(T4)と出力点(A4)の比較



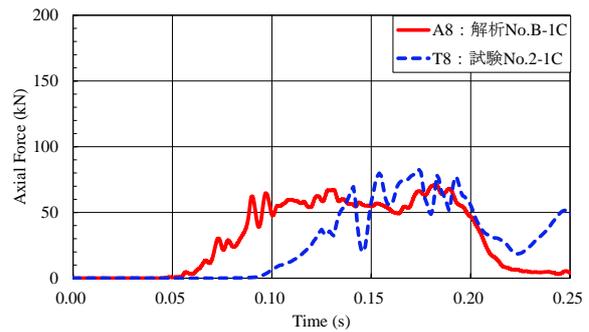
(c) 計測点(T5)と出力点(A5)の比較



(d) 計測点(T6)と出力点(A6)の比較



(e) 計測点(T7)と出力点(A7)の比較



(f) 計測点(T8)と出力点(A8)の比較

図-16 フレームドロープ張力の時刻歴波形の比較

表-9 ブレーキリング作動量の比較 (中央部衝突)

計測点	試験 No.2-1C		解析 No.B-1C		試験値に対する解析値の比率 B/A×100 (%)
	ブレーキリング作動量(A) (mm)	出力点	ブレーキリング作動量(B) (mm)		
A	390	a	352	90.3	
B	330	b	333	100.9	
C	260	c	239	91.9	
D	280	d	289	103.2	
E	390	e	333	85.4	
F	330	f	427	129.4	
G	120	g	233	194.2	
H	100	h	277	277.0	
平均	275.0	平均	310.4	112.9	

表-10 ブレーキリング作動量の比較 (端部衝突)

計測点	試験 No.1-1E		解析 No.A-1E		試験値に対する解析値の比率 B/A×100 (%)
	ブレーキリング作動量(A) (mm)	出力点	ブレーキリング作動量(B) (mm)		
A	325	a	421	129.5	
B	315	b	415	131.7	
C	660	c	566	85.8	
D	605	d	578	95.5	
E	0	e	157	—	
F	0	f	157	—	
G	0	g	157	—	
H	0	h	151	—	
平均	238.1	平均	325.3	136.6	

表-11 ブレーキリングの吸収エネルギー量の比較
(中央部衝突)

計測点	試験 No.2-1C		解析 No.B-1C		試験値に対する 解析値の比率 B/A×100 (%)
	吸収エネルギー量(A) (kJ)	出力点	出力点	吸収エネルギー量(B) (kJ)	
A	11.4	a	a	9.0	78.9
B	8.8	b	b	8.2	93.2
C	6.1	c	c	4.8	78.7
D	6.8	d	d	6.5	95.6
E	11.4	e	e	8.2	71.9
F	8.8	f	f	12.5	142.0
G	2.3	g	g	4.6	200.0
H	1.8	h	h	6.1	338.9
合計	57.4	合計	合計	59.9	104.4

表-12 ブレーキリングの吸収エネルギー量の比較
(端部衝突)

計測点	試験 No.1-1E		解析 No.A-1E		試験値に対する 解析値の比率 B/A×100 (%)
	吸収エネルギー量(A) (kJ)	出力点	出力点	吸収エネルギー量(B) (kJ)	
A	8.6	a	a	12.2	141.9
B	8.2	b	b	11.9	145.1
C	25.4	c	c	19.6	77.2
D	22.3	d	d	20.3	91.0
E	0	e	e	2.0	—
F	0	f	f	2.0	—
G	0	g	g	2.0	—
H	0	h	h	1.8	—
合計	64.5	合計	合計	71.8	111.3

5.3 防護ネットシステムに作用した衝撃力

図-17 に中央部衝突ケースにおける解析結果と試験結果の衝撃力の時刻歴応答波形を示す。なお、解析結果における衝撃力は飛来物の加速度-時間関係に基づき、試験結果における衝撃力は飛来物の加速度-時間関係に基づき算出したものである。解析結果は 3×10^7 秒刻みで計算し、 2×10^5 秒刻みで出力したデータにローパスフィルターを適用して処理をした。試験結果は、0.001秒刻みの変位計測結果から求めた加速度波形にノイズ処理のためのフィルターをかけたものである。

図-17 を見ると解析結果と試験結果は概ね一致しており、共に飛来物の衝突後0.05秒に至るまでに一度増大し、最大変形時付近で衝撃力がピークに達している。衝撃力の最大値は解析値が241kN、試験値が265kNである。

解析値と試験値の0.1秒付近の衝撃力の違いは、ブレーキリングの作動時刻および作動し易さの違いに起因すると考えられる。図-16を見ると、解析結果ではフレームドロップ張力が0.05秒から発生し0.1秒には頭打ちしていることから0.05秒~0.1秒の間にブレーキリングが作動し、衝撃力が低下したことが推察される。一方、試験結果ではその間に張力はほとんど発生していないことからブレーキリングは作動しておらず、衝撃力の低下が見られない結果になったと考えられる。

5.4 リングネットひずみ

リングネットのひずみについては、実証試験で計測することは困難であるため、図-18に示す飛来物衝突位置周辺の代表的な出力点のひずみ量を算出した。

解析結果により算出されたリングネットの最大ひずみは、中央部衝突ケースでは1.0%、端部衝突ケースでは3.1%となり、リングネットの破断ひずみ4.65%を下回っている。この解析結果は、実証試験においてリングネットの破断が生じていないことと整合している。

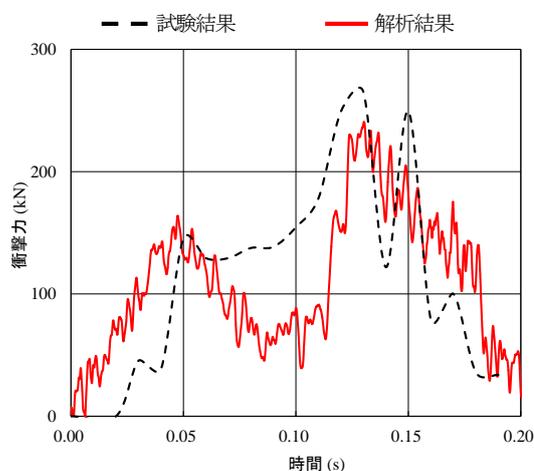
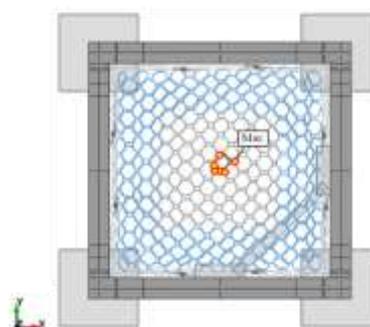


図-17 衝撃力の時刻歴応答波形



(a) 中央部衝突



(b) 端部衝突

図-18 ひずみ出力点位置図

6. まとめ

リングネットを用いた防護ネットシステムについて、LS-DYNAによる衝突解析の妥当性を検証するため、模擬飛来物の自由落下試験の再現解析を行った。本研究で得られた結果をまとめると以下のようである。

- 1) 衝突時のネットの変形状態については、ネット中央部衝突だけでなく端部衝突の場合でもその挙動を再現できることを確認した。
- 2) 一方、解析結果の最大変形量は試験結果と比較して中央部衝突で約1割程度過大に評価された。この要因は、解析結果では実証試験よりも少ない荷重でブレーキリングが作動するためと考えられる。
- 3) フレームドロップ張力については、張力の発生時刻に一定のずれが見られるものの、張力の増加傾向や継続時間、波形の全体的な形状は概ね一致する。
- 4) 飛来物の運動履歴から算出した衝撃力については、解析結果は試験結果と概ね整合し、その最大値は241kNとなった。
- 5) 解析結果よりリングネットに生じる最大ひずみは、リングネットの破断ひずみ以下であり、試験結果と整合していることが確認された。
- 6) 以上の結果より、本研究の解析手法ではブレーキリング作動量を大きく算出する傾向にあることに留意する必要があるものの、本防護ネットシステムの解析的な評価が可能であることが明らかになった。

謝辞

本報の取りまとめにあたり、独立行政法人 国立高等専門学校機構・釧路工業高等専門学校の岸学校長には貴重なご意見ならびにご指導を賜り、また国立研究開発法人 土木研究所・寒地土木研究所様には自由落下試験実施にあたり試験場のご提供ならびにご助言を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 原子力規制委員会：原子力発電所の竜巻評価ガイド、2013.6.
- 2) 南波宏介，白井孝治，坂本裕子：竜巻防護設備に用いる金網形状の異なる高強度金網に関する吸収エネルギー算定手法の適用性，構造工学論文集，Vol.61A, pp.958-969, 2015.3.
- 3) 白井孝治，南波宏介，坂本裕子：竜巻飛来物に対する硬鋼線製防護ネットの耐貫通性能に関する実験的評価 研究報告：N14009，一般財団法人 電力中央研究所，2015.2.
- 4) 南波宏介，白井孝治：竜巻飛来物に対する防護ネットの評価手法と対策工法の提案：N13014，一般財団法人 電力中央研究所，2014.3.
- 5) 白井孝治，南波宏介，坂本裕子：角型鋼管の先端形状を有する竜巻飛来物に対する二段積防護ネットの耐貫通性能に関する実験的評価：N14018，一般財団法人 電力中央研究所，2015.3.
- 6) 梅沢広幸，澤田梨沙，鈴木利治，筒井喜平：“高速飛来物バリアの開発”，土木学会第11回 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，2014.10.
- 7) Livermore Software Technology Corporation, LS-DYNA, Ver. R7.1.2, 2015.
- 8) 原子力安全基盤機構：平成18年度 貯蔵建屋内金属キャスク落下衝撃解析手法の整備に関する報告書，2006.

(2015年9月25日受付)

(2016年2月1日受理)