

1. まえがき

簡易型高性能防護柵(以後、本防護柵という。)は、図 1 および図 2 に示すように、支柱下端がコンクリート基礎に埋め込まれ、支柱間に水平にロープ(以後、横ロープという)を張り渡し、1つのスパンの両側は上縁ワイヤロープとその下側の横ロープの間を斜めに結び、同様に下縁のワイヤロープとその上側の横ロープの間を斜めに結ばれている。これらの上縁ワイヤロープとその下側および両側の斜めワイヤロープ、下縁ワイヤロープとその上側および両側の斜めワイヤロープは、それぞれ、ループを形成しており、スパン中央部分では横ロープと重なって2本になっている。このループ状のワイヤロープは、支柱の最上縁および最下縁で滑車を介した状態で吊るされている。

ワイヤロープは、その張力が一定値を超えると滑ってそれ以上張力が増加しないように緩衝金具をワイヤロープの途中の適切な位置に配置する。

また、中間の横ロープは端支柱には固定されるが、中間支柱には直接固定されていない。

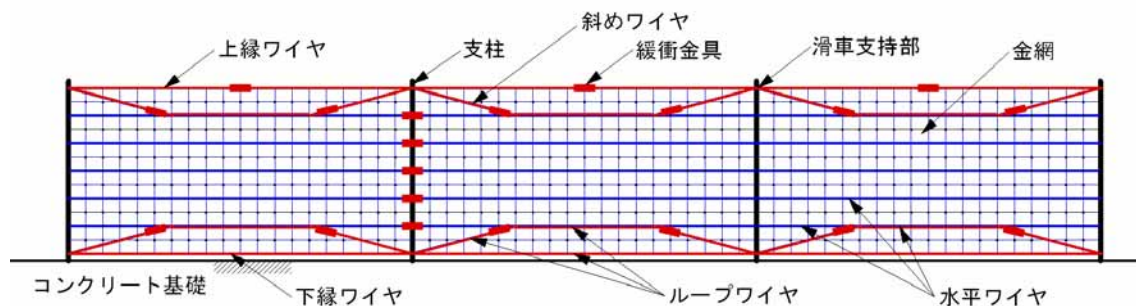


図 1 本防護柵の構造概要 (その 1)

ワイヤロープはすべて支柱の谷側(道路側)に配置されるが、さらにその谷側に高強度で極めて伸縮性の大きい金網が配置され、横ロープと金網は細いワイヤロープを用いて強固に連結される。横ロープ間を結ぶ間隔保持材は使用されない。今後、横ロープと金網で形成される面を防護柵の阻止面と呼ぶことにする。

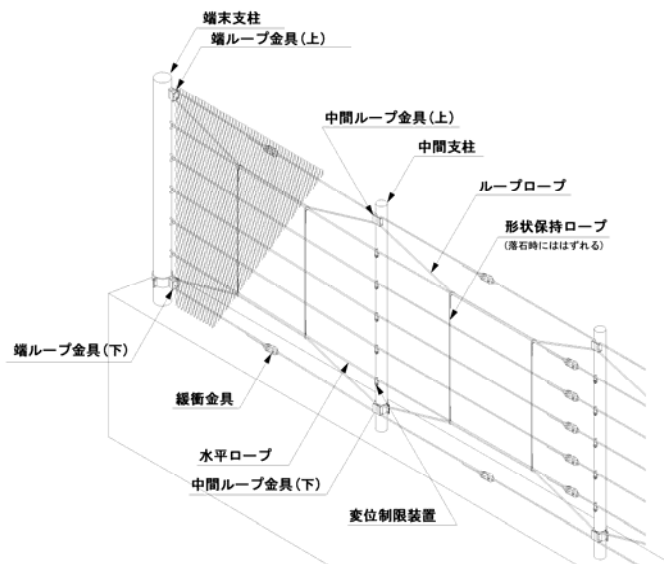


図 2 本防護柵の構造概要 (その 2)

防護柵をこのような構造にすることにより、以下のような特徴を得ることが期待できる。

- ワイヤロープの途中の適切な位置に緩衝金具を配置することにより、ワイヤロープに過大な張力の発生を抑止でき、ワイヤロープの破断を防止できる。

- b) 中間横ロープが支柱に固定されておらず、中間支柱の谷側に配置されているので伸縮性に富み、広い範囲でのエネルギー吸収効果が期待できる。
- 伸縮性の大きい高強度の金網を使用し、横ロープの間隔保持材を使用していないので、落石衝突時に横ロープ間隔が広がるが、破断することはない。横ロープ間隔が広がるので、防護柵の有効高さの減少が抑制される。すなわち、既往の防護柵では、落石時に上側が下方に引き下げられて有効高さが減少し、下側が持ち上げられて隙間が生じるが、本防護柵では、その大きさを小さく抑えることができる。これを防護柵の**有効高さ低減抑止効果**と呼ぶことにする（図 3 参照）。
- c) 最上縁および最下縁のワイヤロープがループを形成しているので、落石が衝突したスパンの両側の支柱が内側に傾いても、最上縁の下側のワイヤロープまたは最下縁の上側のワイヤロープの滑車効果により、最上縁または最下縁のワイヤロープの張力が増大し、金網を上方に引き上げまたは下方に引き下げる効果が発生する。これをワイヤロープの**ループ効果**と呼ぶことにする。これにより、有効高さ低減抑止効果が増大する。すなわち、落石が防護柵に有効高さの範囲内に衝突すれば、落石が飛び越えたり、潜り抜けたりすることはない。
- d) 中間横ロープが支柱に直接固定されておらず、中間支柱の谷側に配置されているので、中間支柱の近傍に落石が衝突しても、衝撃力はスパン中央に衝突した場合とほとんど変わらない。すなわち、落石の衝突位置の相違による防護柵の耐衝撃性能は、ほとんど変化しない。
- e) 金網が横ロープの谷側に配置されているので、金網が横ロープと落石の間に挟まれて切断することがない。
- f) 中間横ロープが直接支柱に固定されておらず、中間支柱の谷側に配置されているので、落石による防護柵の張出し量は、わずかに増大する。

2. 金網の選定

落石対策用には、一般に菱形金網が使用されているが、本防護柵の開発では、菱形金網（4×50）、亀甲金網（4×100）および今回特に開発したワイヤ菱形金網（3×2.3 100型）の3種類の金網について、面内引張試験、面外静的載荷試験および面外衝撃試験を行った。

面内引張試験には、写真 1 に示すように、100cm×100cmの範囲を支持点として、6本の鋼棒で対向する2辺を固定して横方向変位を拘束し、他の対向する2辺を7本の鋼棒で一様に引張荷重を作用させることができる装置を用い、いずれかの素線が破断するまで載荷した。



写真 1 金網の引張試験

面外静的載荷試験においては、面内引張試験と同様の装置を用いたが、横方向は幅100cmで鋼管を用いて鉛直変位を拘束した（写真 2 左参照）。直径40cm、質量156kgの鋼製の半球を金網上に載せ、下方より鋼棒を用いて引張り、荷重によるたわみを計測した（写真 2）。



写真 2 金網の面外静的載荷試験

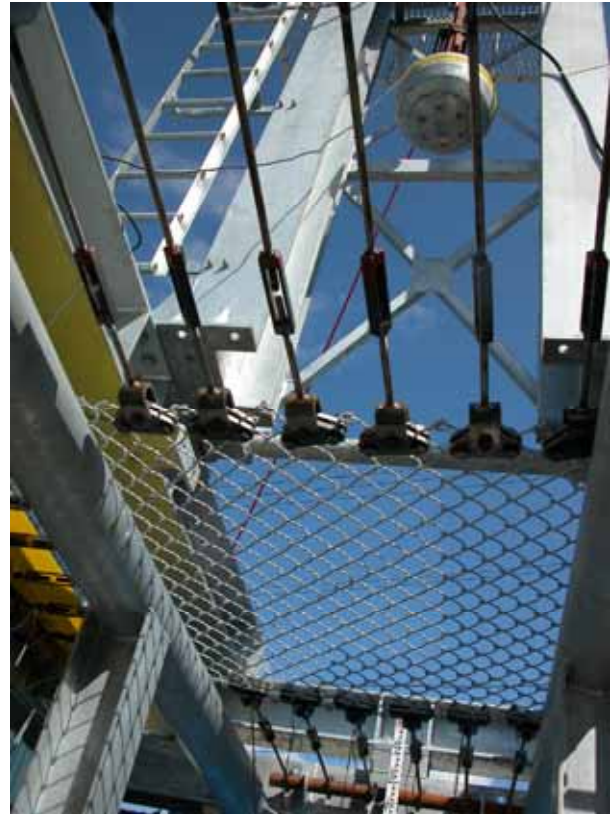


写真 3 金網の面外衝撃試験

面外衝撃試験においては、面外静的載荷試験と同様の装置と直径40cm、質量245kgの鋼球を用い、鋼球の高さを50cmずつ増加させて、その都度、新しい金網に交換し、金網が破断するまで落下高さを増大して衝撃落下試験を繰り返した（写真 3）。

図 - 4 には、3種の金網の面内引張試験結果が示されている。また、表 1～表 3 には、面内引張試験、面外静的載荷試験および面外衝撃試験結果が示されている。

これらの結果より、ワイヤ菱形金網が強度および変形性能とも優っており、本防護柵に使用することにした。

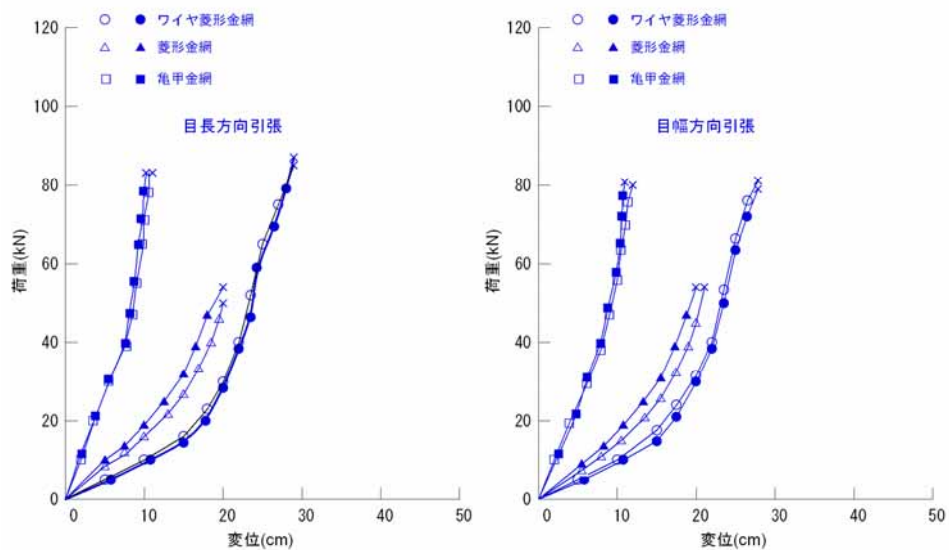


図 4 金網の面内引張結果

表 1 金網の面内引張試験結果

種類	方向	NO.1	荷重(kN)	伸び(cm)
ワイヤロープ	目長	1	83.2	30.1
		2	81.8	29.8
	目幅	1	80.2	28.1
		2	78.8	28.3
菱型	目長	1	48.5	20.8
		2	52.2	19.7
	目幅	1	52.5	19.9
		2	52.7	20.1
亀甲	目長	1	82.7	12.2
		2	82.5	11.0
	目幅	1	80.1	11.5
		2	81.3	10.8

表 2 金網の面外載荷試験結果

種類	方向	NO.1	荷重(kN)	たわみ(cm)
ワイヤロープ	目長	1	66.8	30.6
		2	67.6	40.9
	目幅	1	76.4	38.0
		2	62.4	32.9
菱型	目長	1	41.5	25.4
		2	36.8	24.6
	目幅	1	38.9	22.8
		2	42.7	27.4
亀甲	目長	1	72.4	12.8
		2	68.8	18.6
	目幅	1	66.9	15.7
		2	62.8	14.5

表 3 金網の面外衝撃試験結果

種類	NO.1	落下高さ(m)	たわみ(cm)
ワイヤロープ	1	1.5	33.8
	2	2.0	34.5
	3	2.5	36.8
	4	3.0	貫通
菱型	1	1.0	31.6
	2	1.5	33.9
	3	2.0	34.8
	4	2.5	貫通
亀甲	1	1.5	28.6
	2	2.0	30.2
	1	2.5	32.2
	2	3.0	貫通

3. 高性能緩衝金具の開発

設定滑り張力に対する現場での管理が不要であり、設定滑り張力の設定が容易で、経済性および一定の張力に達したときにワイヤロープが滑った際の損傷が大きくなるような緩衝金具の開発を念頭に、構造および製作工程を吟味し、繰返し試作を行い検討した。その結果、想定していた性能が期待できる緩衝金具の開発に成功した（写真 4）。



写真 4 開発した高性能緩衝金具

衝撃試験機を用いた重錘落下による性能試験には、10組の緩衝金具を用い、質量1,050kgの重錘を高さ3.0mから落下させ、緩衝金具の滑り量を測定した。重錘の運動エネルギー（30.89kJ）を滑り量で除すことにより、平均滑り張力を求めることができる。

今回は2種の緩衝金具、A型2個およびB型8個を用いて緩衝金具の衝撃性能試験を行った。その結果、表 4 に示すように、A型では平均約80 kNの滑り張力をB型では約40kNの滑り張力が得られた。

表 4 緩衝金具の衝撃試験結果

型	NO.	滑り量(m)	滑り張力(kN)	平均(kN)
A	1	0.40	77.2	79.3
	2	0.38	81.3	
B	1	0.81	38.1	40.3
	2	0.78	39.6	
	3	0.75	41.2	
	4	0.77	40.1	
	5	0.73	42.3	
	6	0.76	40.6	
	7	0.79	39.1	
	8	0.75	41.2	

4. 予備解析および設計

本防護柵におけるワイヤロープの配置、緩衝金具の取付け位置および想定される性能が得られるかどうかなどを検討するために、予備解析を行った。解析に用いた部材の材料特性は、6. 解析方法で詳述する。

解析は、衝撃応答解析で世界的に有名な LS-DYNA による大変形非弾性動的解析法によった。解析に用いる防護柵は、実験で使用するものと同じの3スパン、有効高さ 2.5m とし、支柱間隔は 5.0m とする。阻止面の下端には 0.1m の隙間をあげ、支柱の高さは 2.6m とする(図 5)。

緩衝金具の取付け位置は、図 5 に示す 12 箇所であり、滑り張力は 80kN とする。

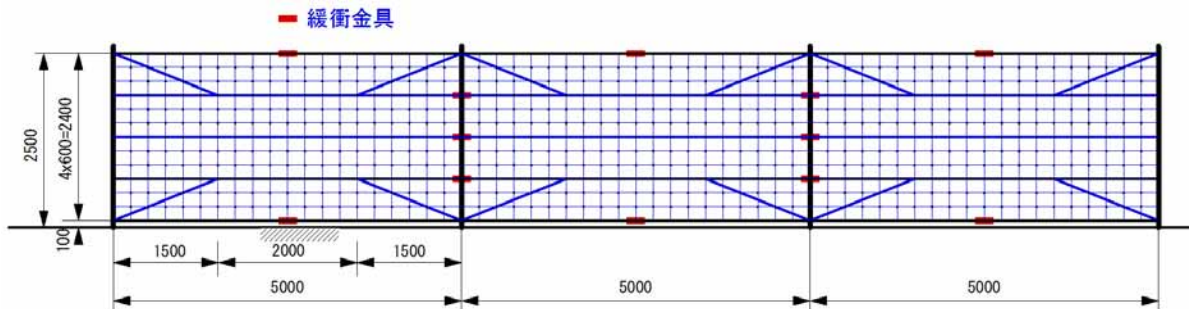


図 - 5 防護柵の主要構造寸法および緩衝金具位置

重錘は、図 - 6 に示す 5 箇所、直径 80cm の球体を、運動エネルギーが 200kJ となる速度で水平に衝突させた。重錘の単位体積質量は 2.6 g/cm³ とした。

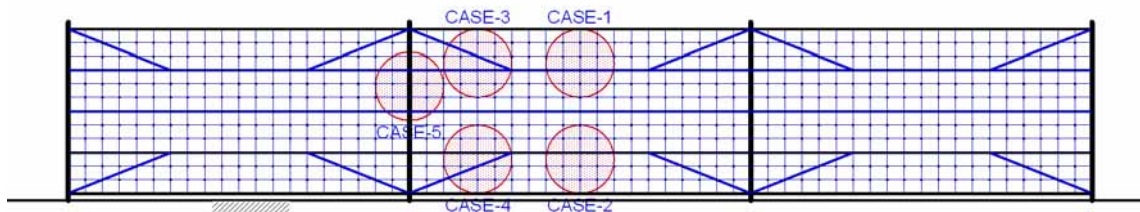


図 - 6 重錘の衝突位置

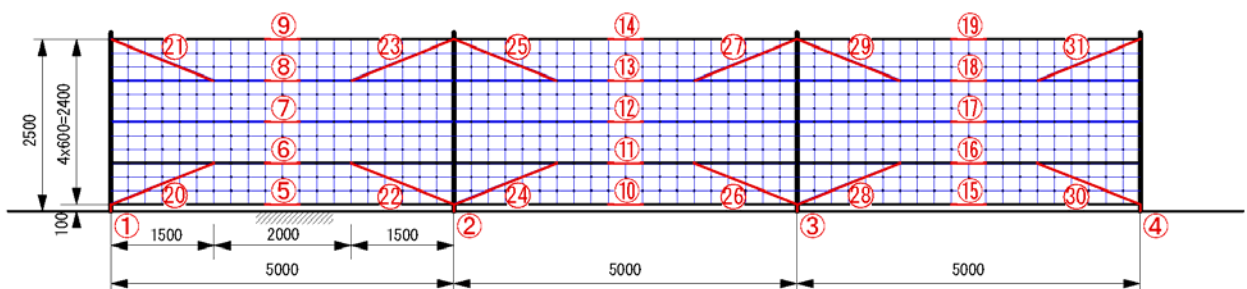


図 7 主要部材の部材番号

解析では、ケースごとに図 7 に示す 31 の主要部材に発生する最大張力と各支柱の最大曲げモーメントを求めた。

解析結果より、以下の事項が明らかとなった。

- a) 重錘が衝突したときに発生する衝撃力は、衝突位置によって異なり、スパン中央の上縁に衝突した場合が最も小さく、約 198.2kN であるのに対し、スパン中央の下縁に衝突した場合には約 364.3kN である。上下縁の支柱近傍に衝突した場合には、スパン中央の値よりわずかに

増加している。

- b) 重錘の阻止面直角方向の最大変位は、重錘がスパン中央の上縁に衝突した場合は約 220cm である。重錘が支柱に衝突した場合には、重錘は衝突位置で跳ね上がったが、落石は一般に水平から下方に向かって衝突することから、実際には停止させることが可能である。
- c) 中間支柱頭部の防護柵面内の最大変位は約 27cm である。最大面外変位は、重錘がスパンの中央に衝突した場合、約 68cm であり、支柱のたわみ角は 15.8° である。支柱近傍に衝突した場合には、約 110cm であるが、重錘を停止させることができる。
- d) 中間支柱の曲げモーメントは、重錘が支柱に直接衝突した場合を除いて、中間支柱が 2 本とも全塑性モーメントに到達する。端支柱は 2 本とも弾性範囲内にある。
- e) 支柱下端での軸力および主要部材の張力の最大値を表 5 に示す。

表 5 支柱下端での最大軸力および主要ワイヤロープの張力

単位:kN

部材NO.	要素NO.	CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5
1	1	20.41	17.41	19.61	-17.54	-23.00
2	14	51.01	-53.04	102.68	-78.96	-128.54
3	27	52.30	-52.63	36.04	-36.68	-19.92
4	40	20.20	14.41	7.42	9.53	7.43
5	1011	11.86	11.38	15.70	17.08	14.56
6	1031	17.05	40.41	25.09	53.89	16.93
7	1051	16.24	44.75	22.43	41.43	9.44
8	1071	60.04	46.83	80.64	46.89	61.27
9	1091	57.62	50.51	51.80	40.56	50.56
10	1111	47.89	68.64	63.88	68.64	18.29
11	1131	76.46	165.22	65.99	140.80	18.32
12	1151	9.86	32.54	14.26	32.02	7.78
13	1171	77.78	71.74	79.93	61.39	46.34
14	1191	60.10	34.76	46.17	36.05	59.42
15	1211	11.36	15.26	16.79	16.94	6.02
16	1231	16.55	44.32	18.26	33.45	9.75
17	1251	16.14	48.31	22.66	42.95	10.28
18	1271	60.93	45.61	48.07	38.85	29.16
19	1291	60.70	48.08	37.82	29.02	28.88
20	2001	13.15	17.53	17.17	19.90	13.15
21	2002	12.90	15.88	23.98	21.09	27.87
22	2003	12.48	12.07	19.59	22.82	17.46
23	2004	52.07	38.62	44.41	47.74	52.96
24	2005	82.89	166.52	71.22	144.39	18.18
25	2006	73.16	79.36	89.47	71.55	38.00
26	2007	83.41	163.84	66.76	130.37	19.95
27	2008	73.02	77.38	69.90	62.27	36.09
28	2009	12.60	10.96	10.27	7.63	7.30
29	2010	51.13	35.98	28.05	25.53	16.84
30	2011	12.49	17.64	12.23	13.28	7.20
31	2012	13.07	16.93	12.11	14.42	9.10

2本のワイヤロープが重複している部材番号 6, 8, 11, 13, 16 および 18 の部材力の最大値は 165.2kN であるが、ワイヤロープが重複していない水平部材では、約 80kN 以下である。しかし、ワイヤロープが重複していない斜め部材では、最大 166.5kN に達するものもあり、これらの部材については緩衝金具の取付けを検討する必要がある。

- f) 緩衝金具内で滑るワイヤロープは、CASE-2 および CASE-4 の場合に、スパン中央下端のワイヤロープであり、その他では、滑りはみられない。しかし、滑り張力に近い部材も多数存在することから、緩衝金具を適切に配置することが望ましい。

5. 防護柵の実物実験

(1) 実験方法

本防護柵に落石を衝突させる方法の一つとして、防護柵を水平の設置し、重錘を所定の高さまでクレーンで吊り上げ、重錘を自由落下させる方法がある。本実験ではこの方法を採用し、防護柵用の架台を作成した(写真 5)。



写真 5 実物実験用架台

ワイヤ金網試験の結果より、横ロープ間隔が60cmである図 5 に示す本防護柵の予備解析のモデルでは、ワイヤロープ金網の強度が不足することが明らかとなった。そこで、実物実験では横ロープ間隔を60cm間隔から40cm間隔に減少させた。また、緩衝金具の配置および滑り張力は、実験ケースごとに变化させた。図 8 は、実物実験に使用する防護柵の主要寸法を示している。

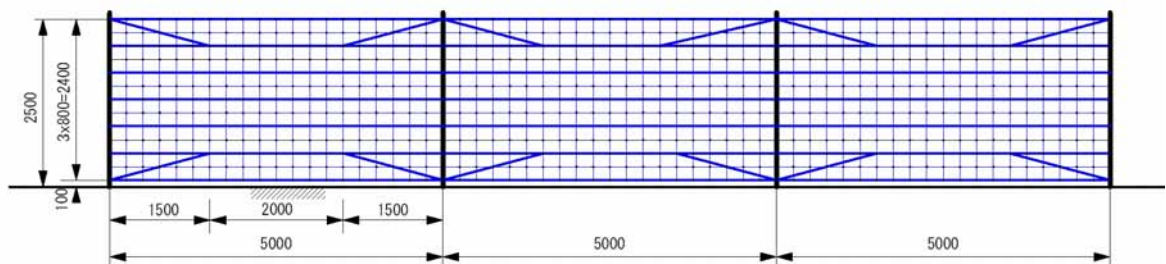


図 8 実物実験用防護柵の主要寸法



写真 6 実物実験用防護柵



写真 7 緩衝金具の取付け

実物実験は、本防護柵実物実験用基礎に実物の防護柵を水平に設置し、重錘をクレーンで吊り上げて、所定の高さから自由落下させた。写真 6 および写真 7 は、実物実験用防護柵の架設状態を示している。また、図 9 は、実験方法の模試図である。

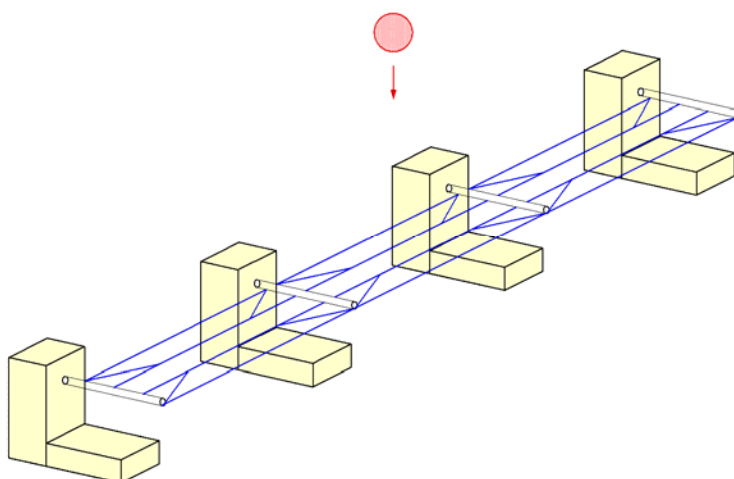


図 - 9 実験方法

用いた重錘は鋼殻にコンクリートを充填したもので、その形状を写真 8 に示す。等価直径 80cm、質量 780kg と等価直径 100cm、質量 1,460kg の 2 種である。この形状は、ヨーロッパにおける落石防護柵実験基準（案）に準拠したものである。

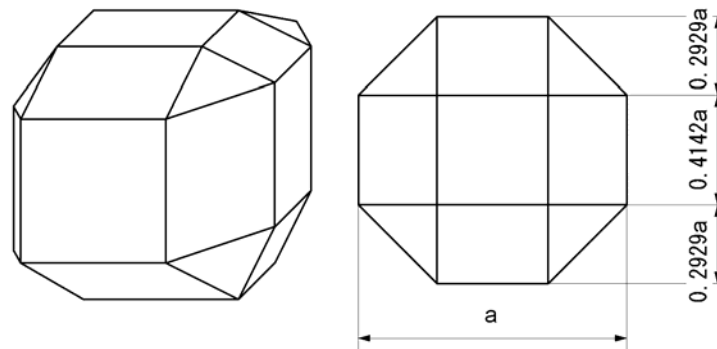


写真 8 用いた重錘

(2) 実験の種類

実験は合計 10 回行った。実験の主な条件を表 - 6 に示す。

表 - 6 主な実験条件

NO.	月日	重錘質量(kg)	落下高さ	X(cm)	Z(cm)	緩衝金具	金網
CASE-1	12月19日	1,460	11.0	0	170	A	1重
CASE-2	12月22日	1,460	15.0	0	180	A	1重
CASE-3	12月24日	1,460	8.0	0	130	B	1重
CASE-4	12月25日	1,460	15.0	0	170	B	1重
CASE-5	12月27日	1,460	15.0	0	170	B	2重
CASE-6	2月1日	780	10.0	0	130	B	2重
CASE-7	2月1日	780	10.0	0	130	B	2重
CASE-8	2月2日	780	26.0	0	130	B	2重
CASE-9	2月3日	1,460	15.0	100	130	B	2重
CASE-10	2月3日	1,460	7.5	250	167	B	2重

ここに、重錘の落下位置 X および Y は、3 スパンの実験用防護柵の中央スパン中央からの延長方向の距離およびコンクリート基礎からの高さ方向の距離である。また、緩衝金具の A 型は滑り張力が約 80kN であり、B 型は約 40kN のものである。金網は当初、ワイヤ金網を 1 重で用いていたが、強度不足が明らかとなり、CASE-5 以降は 2 重に変更した。

CASE-7 および CASE-10 を除いて、CASE ごとに重錘を落下させたスパンのワイヤロープ、金網およびすべての緩衝金具を更新した。また、実験結果を検討の上、緩衝金具の取付け位置を変更した。なお CASE-10 は、CASE-9 の実験終了後に補修することなく支柱に重錘を直撃させたものであり、その位置は支柱基礎から防護柵の有効高さの 3 分の 2 の位置 (167cm) である。各ケースの緩衝金具の取付け位置およびワイヤロープのひずみ測定位置は、図 10 ~ 図 17 に示す。

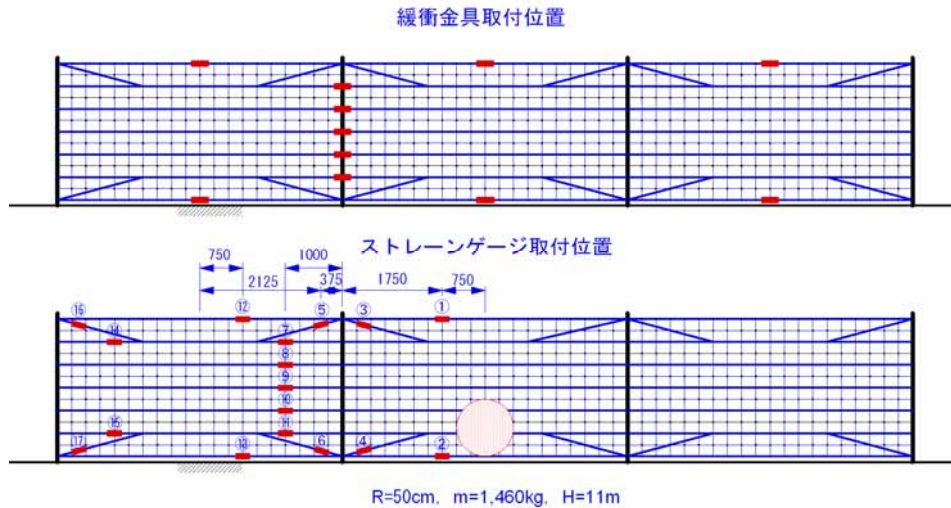


図 - 10 緩衝金具およびひずみ測定位置 (CASE-1)

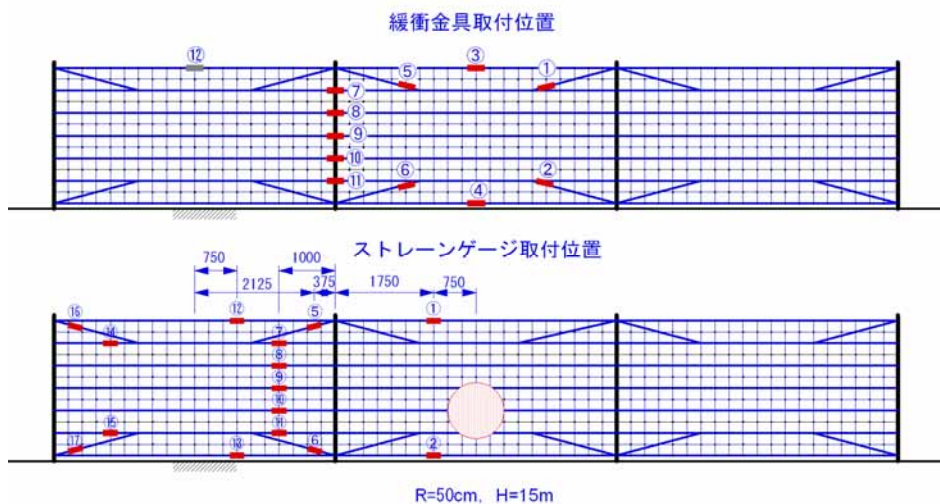


図 - 11 緩衝金具およびひずみ測定位置 (CASE-2)

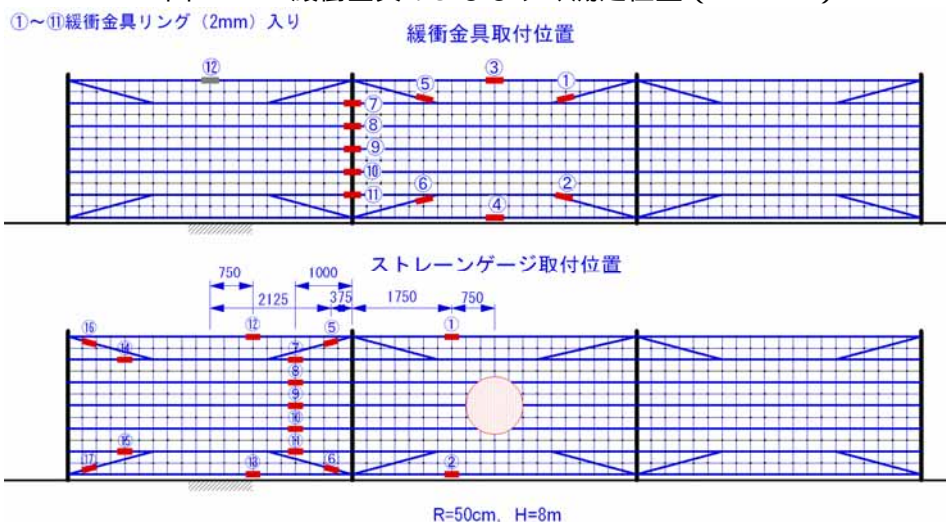


図 - 12 緩衝金具およびひずみ測定位置 (CASE-3)

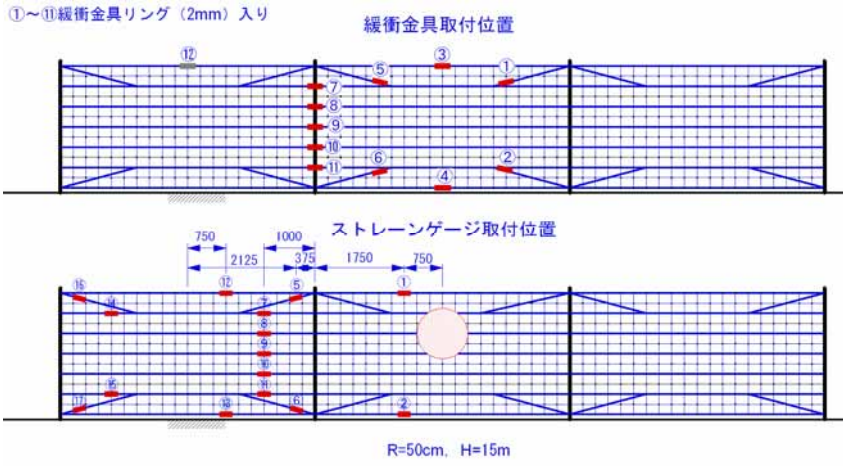


図 - 13 緩衝金具およびひずみ測定位置 (CASE-4)

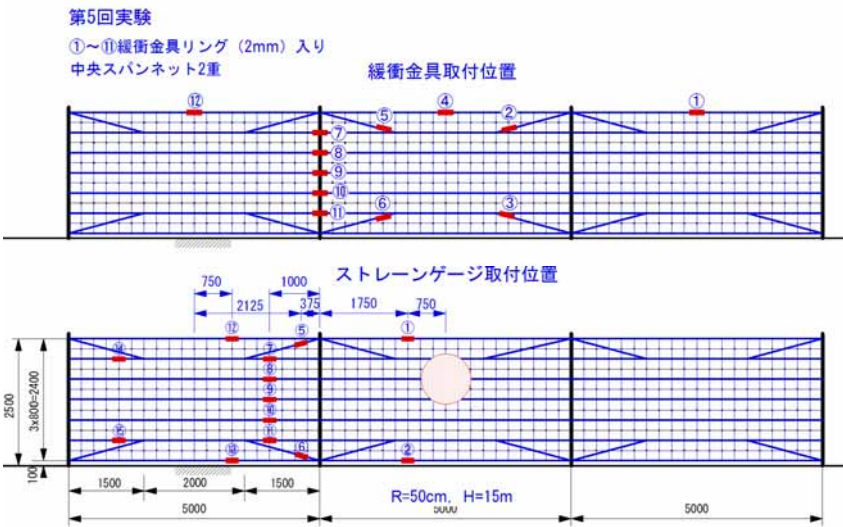


図 - 14 緩衝金具およびひずみ測定位置 (CASE-5)

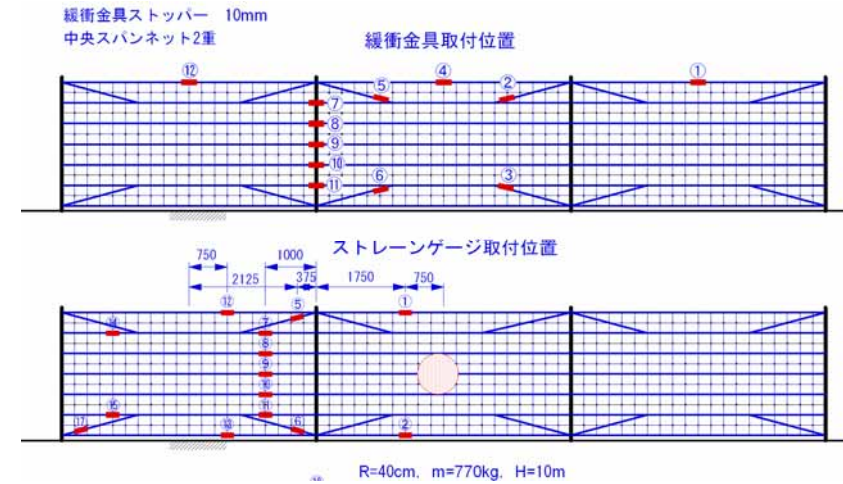


図 - 15 緩衝金具およびひずみ測定位置 (CASE-6,7)

第8回実験

緩衝金具ストッパー 10mm
中央スパンネット2重

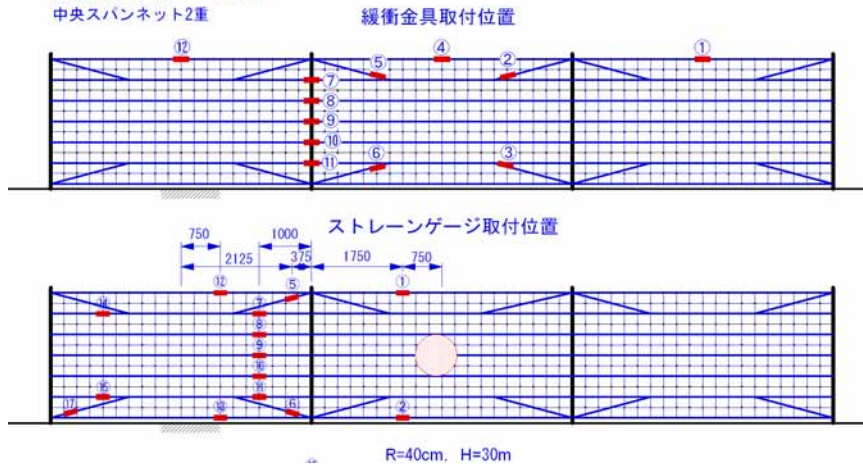


図 16 緩衝金具およびひずみ測定位置 (CASE-8)

第9回実験

緩衝金具ストッパー 10mm
中央スパンネット2重

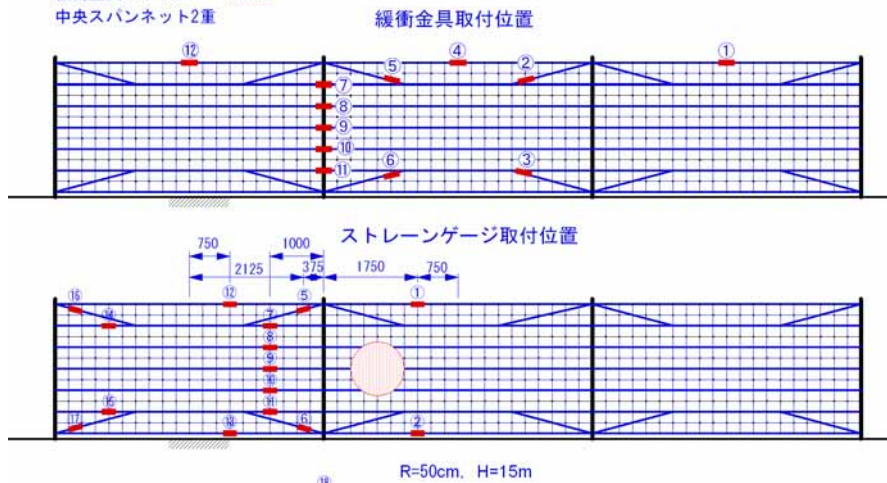


図 - 17 緩衝金具およびひずみ測定位置 (CASE-9)

(3) 測定項目

ワイヤロープの張力 ワイヤロープの測定箇所にアルミニウム管を通し、両端を圧着することによりワイヤロープに密着させ、そのアルミニウム管の表面のひずみを測定することによって張力を推定した。あらかじめキャリブレーション用の供試体を作成し、静的引張試験を行うことによりワイヤロープとひずみの関係をプロットした。その結果、図 18 に示すように2本の直線で表されるものとした。



写真 9 ワイヤロープ張力測定用ストレインゲージの貼付状態

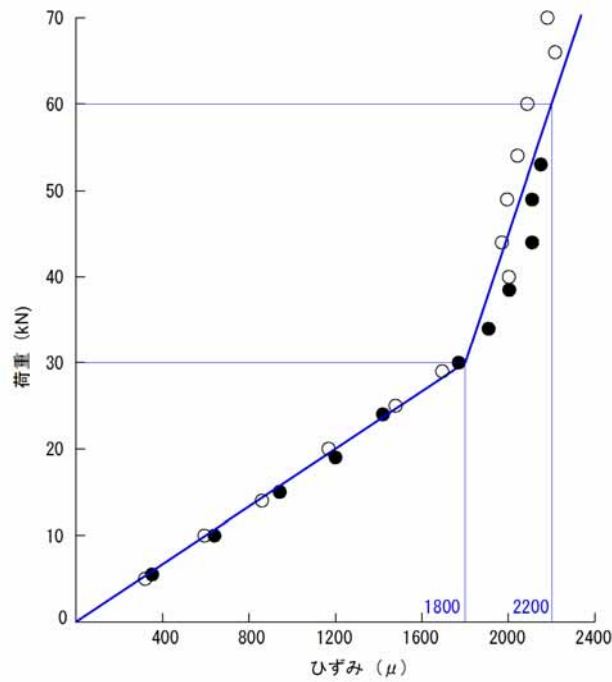


図 18 荷重 測定ひずみの関係

重錘加速度 重錘の重心近くに加速度計を固定し、重錘落下時の加速度を測定した。この加速度に重錘の質量を乗じることにより、重錘が衝突したときの衝撃力を求めることができる。また、加速度を2回積分することにより、重錘が防護柵に衝突してからの変位を求めることが可能である。

防護柵の変位 高速ビデオカメラで、防護柵に重錘が落下するスパンの全体的な挙動を観察し、記録した。加速度を2回積分して得られた重錘変位は、高速度ビデオの記録と比較することが可能である。

(4) 実験結果

実験の状況および落下後の状態を写真 10 ~ 写真 19 に示す。



写真 10 実験状況



写真 11 CASE-1



写真 15 CASE-5



写真 12 CASE-2



写真 16 CASE-6



写真 13 CASE-3



写真 17 CASE-7



写真 14 CASE-4



写真 18 CASE-8



写真 19 CASE-9

実験結果の概要を表 7 に示す。

表 - 7 実験結果の概要

CASE	落下エネルギー	実験結果の概要
1	158kJ	緩衝金具の滑り張力は 80kN とした。重錘は一旦停止したが、リバウンドで柵外に落下した。下方の斜めワイヤロープが破断した。緩衝金具の配置に問題があったものと判断した。
2	215kJ	緩衝金具の配置を変更した。重錘は完全に貫通した。何れのワイヤロープも破断しなかったが、金網が破れた。緩衝金具の滑り量が少なく、緩衝金具によるエネルギー吸収量が小さかったものと判断した。
3	115kJ	緩衝金具の滑り張力を 40kN に変更した。重錘は停止したが、金網に損傷が見られた。
4	215kJ	金網が破損して重錘は完全に貫通した。金網の強度不足が原因と断定した。
5	215kJ	緩衝金具の配置を変更した。中央スパンのみワイヤロープを上下から金網で挟んで2重とし、ワイヤロープと金網を細いワイヤロープで編込んだ。重錘は完全に停止した。緩衝金具も有効に機能した。
6	75kJ	CASE-5 と同一の構造条件である。重錘は停止し、損傷は見られなかった。なお、凍結により測定は失敗した。
7	75kJ	CASE-6 の実験後の状態を保ったまま、重錘を落下させた。損傷は見られなかった。
8	201kJ	CASE-5 と同一の構造条件である。重錘は停止し、支柱上下端付近の金網を除いて損傷は見られなかった。緩衝金具も有効に機能した。
9	215kJ	CASE-5 と同一の構造条件である。重錘を中央スパン中央から 100cm 隔てて落下させた。重錘は停止し、支柱上下端付近の金網を除いて損傷は見られなかった。緩衝金具も有効に機能した。
10	107kJ	CASE-9 の実験後の状態を保ったまま、支柱へ直接、重錘を衝突させた。支柱は曲がり、重錘は柵外に飛び出した。なお、測定は行わなかった。

なお、次節において、実験と同条件で解析を行っているので、両者の比較を次節で行い、考察する。

6. 実験防護柵の解析

(1) 解析方法

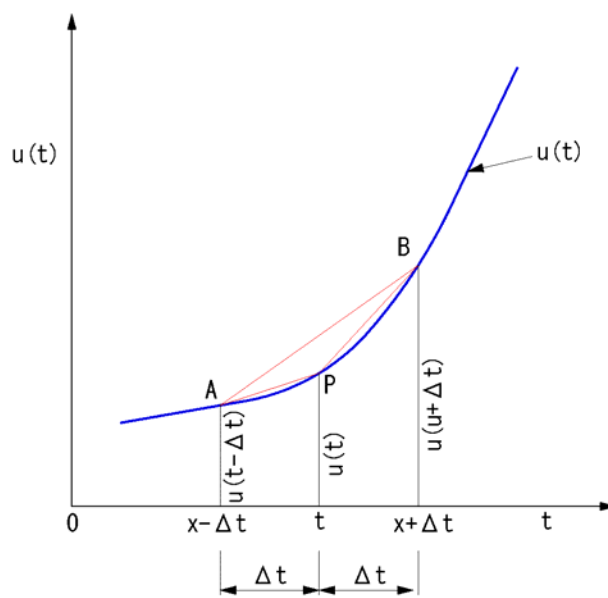


図 19 点 P の接線の傾き

解析は、LS-DYNA による大変形非弾性解析法によるものとする。その概要を以下に示す。
解析法は時間差分による陽解法であり、積分時間間隔は最も固有周期の小さい部材に依存し、LS-DYNA 内で決定される。

ワイヤロープは引張りのみに抵抗し、圧縮力には抵抗しないものと仮定する。

運動中の有限要素系に対する平衡方程式は次のように示される。

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = R \quad (1)$$

ここに、 M 、 C および K は、それぞれ、質量、減衰および剛性のマトリックスであり、 R は外力ベクトル、 U 、 \dot{U} 、 \ddot{U} はそれぞれ有限要素集合体の変位、速度および加速度のベクトルである。

差分法は式 (1) で示す 2 階の非線形微分方程式の一解法である直接積分法に含まれる。ここでは解析手法の原理についてのみ簡単に解説する。

図 - 19 に示す 1 変数の関数 $u(t)$ の点 t におけるテイラー展開は式 (2) および式 (3) のようになる。

$$u(t + \Delta t) = u(t) + \Delta t u'(t) + \frac{1}{2}(\Delta t)^2 u''(t) + \frac{1}{6}(\Delta t)^3 u'''(t) + \dots \quad (2)$$

$$u(t - \Delta t) = u(t) - \Delta t u'(t) + \frac{1}{2}(\Delta t)^2 u''(t) - \frac{1}{6}(\Delta t)^3 u'''(t) + \dots \quad (3)$$

式 (2) と式 (3) の差をとり $O((\Delta t)^3)$ の微小部分を無視すれば、 $u'(t)$ は次のようになる。

$$u'(t) = \frac{1}{2\Delta t} (u(t + \Delta t) - u(t - \Delta t)) \quad (4)$$

ここで誤差は $O((\Delta t)^2)$ である。式 (4) は図 - 19 の点 P における u の接線の傾きを弦 AB の傾きで近似することを意味し、中央差分近似と呼ばれている。

また、式 (2) と式 (3) の和をとり、 $O((\Delta t)^4)$ を無視すれば $u''(t)$ は次のようになる。

$$u''(t) = \frac{1}{(\Delta t)^2} (u(t + \Delta t) - 2u(t) + u(t - \Delta t)) \quad (5)$$

ここで誤差は $O((\Delta t)^2)$ であり、式 (5) は 2 階の中央差分近似となる。

式(4)および式(5)をベクトル表示して式(6)および式(7)に示す。

$$\dot{U}_t = \frac{1}{2\Delta t} \{-U_{t-\Delta t} + U_{t+\Delta t}\} \quad (6)$$

$$\ddot{U}_t = \frac{1}{\Delta t^2} \{U_{t-\Delta t} - 2U_t + U_{t+\Delta t}\} \quad (7)$$

$t + \Delta t$ での変位解を求めるために式(1)を t で表現する。

$$M \ddot{U}_t + C \dot{U}_t + K U_t = R_t \quad (8)$$

式(6)および式(7)を式(8)に代入して次の結果を得る。

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2} M + \frac{1}{2\Delta t} C \right) U_{t+\Delta t} = R_t - \left(K - \frac{2}{\Delta t^2} M \right) U_t - \left(\frac{1}{\Delta t^2} M - \frac{1}{2\Delta t} C \right) U_{t-\Delta t} \quad (9)$$

式(9)から $U_{t+\Delta t}$ は U_t での釣合条件に基づき求めることができる。このように、初期状態 U_0 を与えることにより、ステップ・バイ・ステップで解析を進めることになる。これが有限差分法であり、陽的解法の一つである。このような陽的解法は、大変形非弾性解析法に適した解法の一つとして用いられている。

(2) モデル化

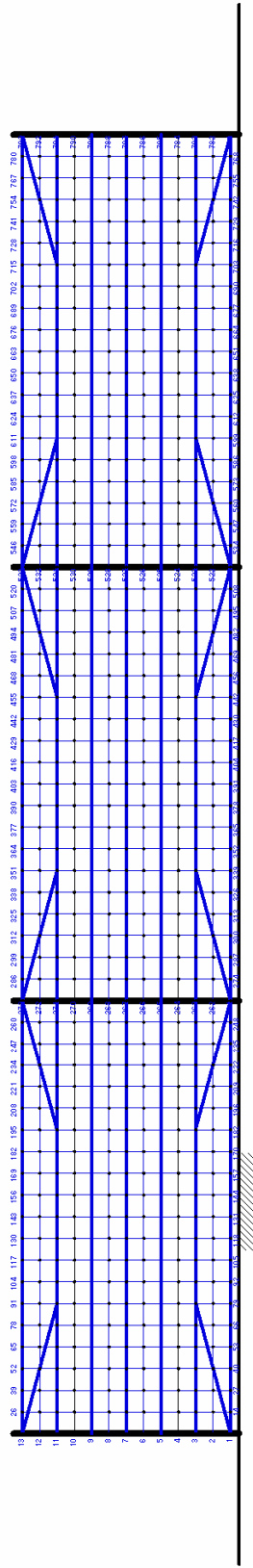
防護柵の構造および重錘の衝突位置、落下高さは実物実験と同一とする。支柱は基部より13分割する。横ロープは25cm間隔で分割した。金網は水平方向に25cm、鉛直方向に20cm間隔で分割し、SHELL要素とする。

斜めワイヤロープと最上縁ワイヤロープまたは最下縁ワイヤロープとは連続し、支柱に滑車構造で支持されているので、これらの部材はシートベルト要素でモデル化した。モデル化した構造の節点番号および要素番号を図-20および図-21に示す。

支柱の総節点数は56、ワイヤロープおよび金網の節点は共通で、総節点数793、支柱、ワイヤロープおよび金網の総要素数は、それぞれ、26、420および720である。落石は、実験で用いた重錘と等価な直径80cmおよび直径100cmの球体にモデル化し、それぞれの質量を780kgおよび1,460kgとした。この球体を節点数772、要素数384のソリッド要素に分割した。

ワイヤロープ節点番号アセット : 1000
 ネット節点番号アセット : 2000

SHELL・ワイヤ節点番号



支柱節点番号

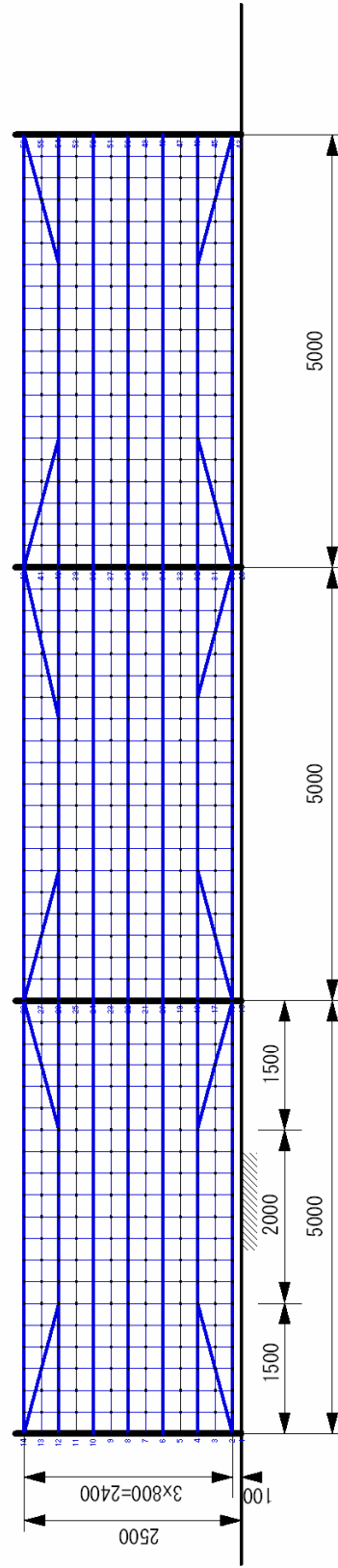


図 - 20 実験モデルの節点番号

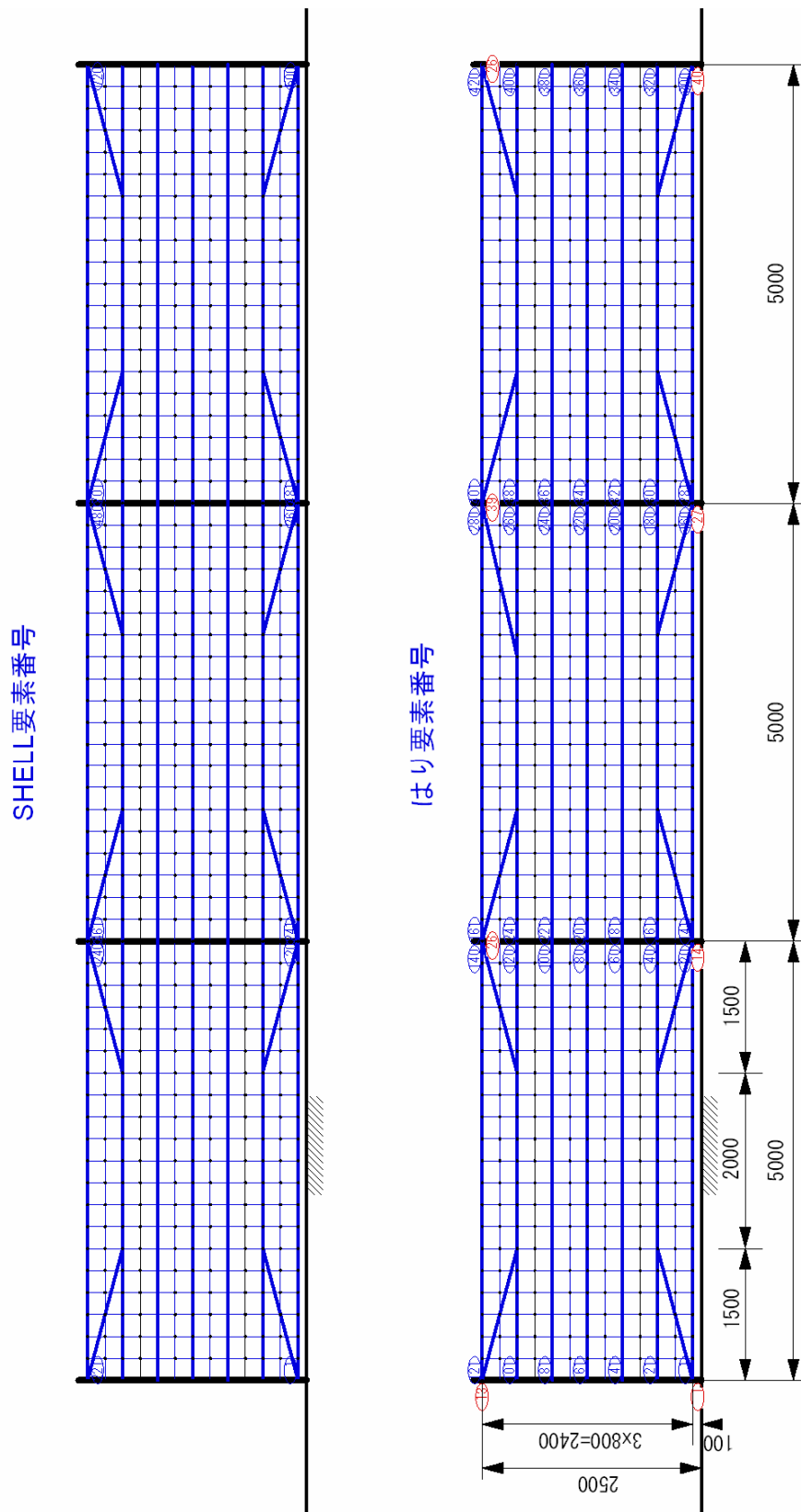


図 - 2 1 実験モデルの要素番号

(3) 部材および材料の特性

部材および材料の特性は以下のとおりとした。

- 1) 支柱 中間支柱・・・外径 216.3mm、厚さ 12.7mm、材質 STK490
降伏応力度 300N/mm²
- 2) 支柱 端支柱・・・外径 267.4mm、厚さ 12.7mm、材質 STK490
降伏応力度 300N/mm²

鉄筋で補強したコンクリート充填鋼管とし、曲げ耐力が等価な、
 外径 267.4mm、等価厚さ 22.1mm の中空鋼管と仮定した。

3) ワイヤロープ 18mm、6×24 構造用ストランドである。荷重 伸び関係は図 22
 に示される非線形の曲線で近似した。

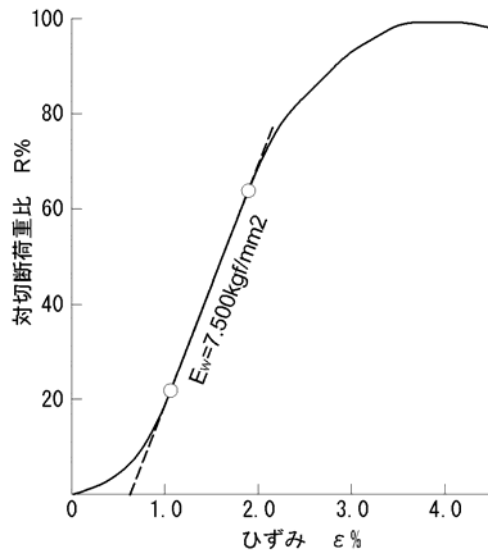


図 - 2 2 ワイヤロープの荷重 伸び曲線

4) 金網 菱形ワイヤ金網とし、SHELL と仮定したときの材料特性は以下のとおりである。
 金網の静的引張試験より得られた荷重 伸び関係より、図 22 のような 2 本の直線で表さ
 れるような応力 ひずみ関係を用いた。なお、図 2 よりわかるように、金網の目幅方向と目
 長方向の荷重 伸び曲線がほぼ同じであるので、解析においても延長方向と高さ方向の応力
 ひずみ関係を同一とした。SHELL の厚さは、金網の単位面積の体積と等価な厚さとした。

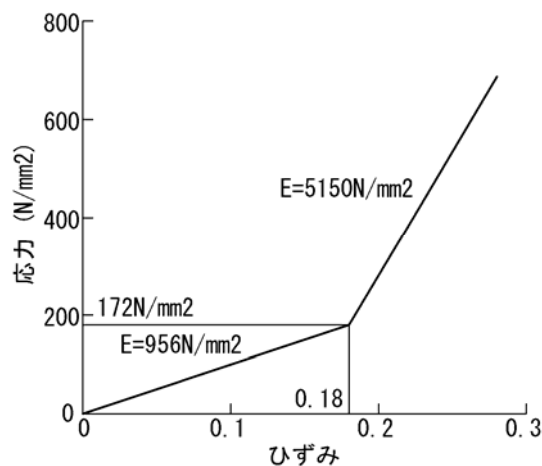


図 2 2 SHELL 要素に用いた応力 ひずみ関係

5) 緩衝金具 滑り張力・・・CASE-1 および CASE-2、80kN
 CASE-3 ~ CASE-10、40kN

(4) 結果および考察

表 8 に、実験より得られた重錘衝撃力と解析より得られた重錘衝撃力、および重錘の加速
 度を 2 回積分して得られた重錘変位、解析より得られた重錘変位および高速度カメラより得ら
 れた重錘変位の比較を示す。ここでの重錘変位とは、重錘の最大鉛直変位を意味する。

表 - 8 重錘衝撃力および重錘変位の比較

CASE	衝撃力(kN)		重錘変位(cm)		
	実験	解析	加速度積分	解析	高速度カメラ
1	179.9	282.2	201	141.8	
2	貫通	320.5		174.2	
3	226.5	191.5	171	165.0	
4	貫通	198.2		196.5	173.6
5	201.8	178.6	175	182.5	184.6
7	182.4	141.2	165	146.7	
8	277.5	268.5	182	183.9	189.1
9	297.6	276.2	185	175.9	183.9

加速度波形には、かなりのノイズが含まれており、加速度に重錘質量を乗じて求めた衝撃力および重錘変位には誤差が含まれていると考えられる。記録することができた高速度カメラの読みより得られた重錘の最大変位、加速度および解析より得られた値の間には、有意な差はなかった。

CASE-8 と CASE-9 は、重錘エネルギーは同一であるが、重錘質量は異なり、また、落下位置も異なっている。しかし、衝撃力および重錘変位ともほぼ同じであり、本防護柵においては落石エネルギーが同じであれば、落石質量および衝突位置の影響はあまりないことがわかる。

表 - 9 支柱頭部の最大変位

CASE	支柱 NO.1		支柱 NO.2		支柱 NO.3		支柱 NO.4	
	X(cm)	Y(cm)	X(cm)	Y(cm)	X(cm)	Y(cm)	X(cm)	Y(cm)
1	18.0	3.5	18.6	13.5	18.6	13.5	18.0	3.5
2	28.6	5.3	25.9	30.8	25.9	30.8	28.6	5.3
3	10.6	2.0	10.9	16.0	10.9	16.0	10.6	2.0
4	24.1	4.5	24.3	45.2	24.3	45.2	24.1	4.5
5	25.4	4.6	24.6	46.3	24.6	46.3	25.4	4.6
6	4.1	0.5	5.5	6.4	5.5	6.4	4.1	0.5
7	4.1	0.5	5.5	6.4	5.5	6.4	4.1	0.5
8	25.7	4.8	25.3	38.2	25.3	38.2	25.7	4.8
9	27.1	5.4	20.2	78.1	15.5	15.3	18.5	3.4

CASE-3～CASE-9 における横ロープの緩衝金具取付け位置近傍の測定ワイヤロープ張力は、実験値および解析値とも、おおむね設定した緩衝金具の滑り張力 40kN 近くの値を示しており、解析の妥当性がうかがえる。

表 - 9 は、支柱頭部の最大変位の解析値を示している。同一の重錘エネルギーに対しては、2種の重錘質量に対してほぼ同じ変位を示しており、支柱の変位に及ぼす重錘質量の影響は少ないものと推測される。

図 24 は、CASE-5 における各測定点でのワイヤロープの張力の測定値と計算値の比較を行ったものである。NO.5 と NO.6 の測定点のワイヤストレインゲージが途中で切断したが、緩衝金具取付け点位置では、その滑り張力 40kN を超えるものは認められなかった。また、全般的に測定値と計算値はよく一致しており、解析の妥当性が認証されたと思われる。

図 25 は、重錘に取付けた加速度計より得られた加速度に重錘質量を乗じた重錘衝撃力と解析より得られた重錘と阻止面の接触力を比較したものである。実験値が多少大きい値を示しているが、全体的な傾向はよく一致している。図 26 は、重錘に取付けた加速度計より得られた加速度を 2 回積分して得られた重錘の変形前の阻止面からの鉛直変位(実験値) 解析値お

よび高速度カメラより得られた値が比較されている。加速度を2回積分した値が小さめになっているが、計算値と高速度カメラによる鉛直変位は、ほぼ同じ値となっており、それらの間には有意な差は認められなかった。加速度を2回積分したものは、誤差が蓄積されている可能性がある。また、高速度カメラの値は、高速度カメラから指標までと重錘位置までの距離の差とカメラの水平となす角度による補正が行われている。

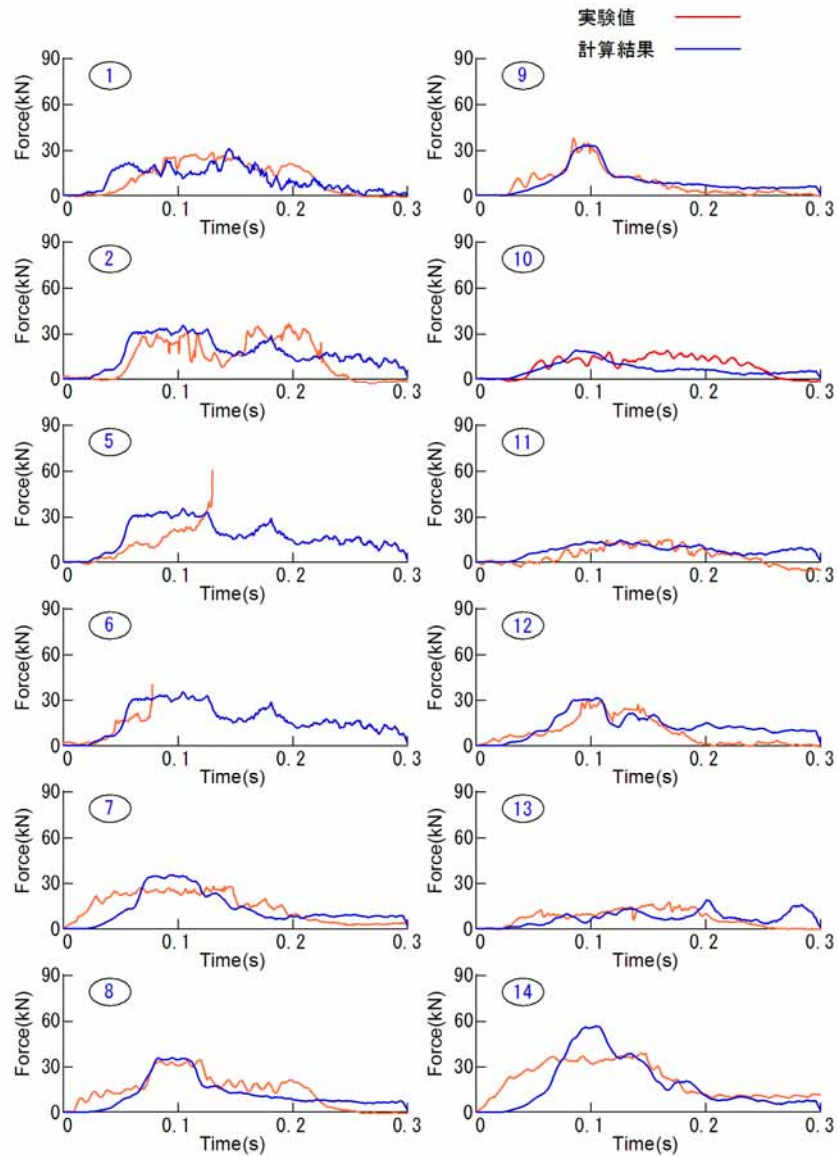


図 24 ワイヤロープの張力の経時変化 (CASE-5)

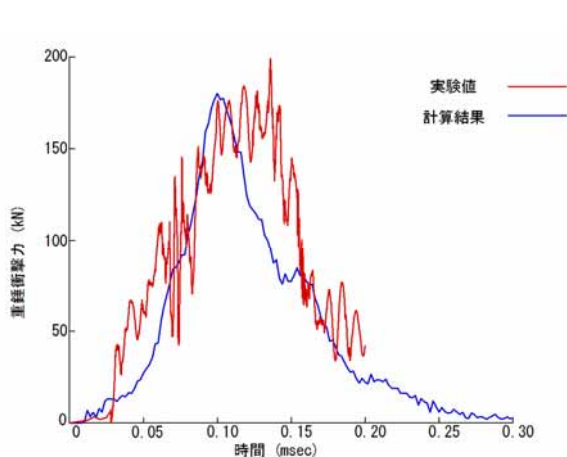


図 25 重錘衝撃力の経時変化 (CASE-5)

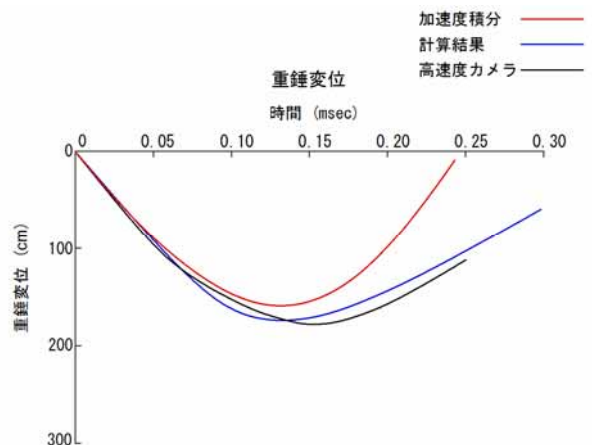


図 26 重錘変位の経時変化 (CASE-5)

7. 結 論

本研究により、以下の結果を得ることができた。

- (1) 最大 200kJ のエネルギー（約 1.0ton の落石が 20m から垂直に落下したとき有するエネルギーに相当）の落石を停止できる能力を有し、経済性に富んでいる。200kJ の落石エネルギーに対応するために、小型で高性能な緩衝金具を開発した。この緩衝金具を最も適切な箇所に、最小限の個数で可能な防護柵の構造を開発した。
- (2) 開発した緩衝金具のワイヤロープの滑り張力は、約 10kN 単位で制御可能であり、現場での管理を一切必要としないので、施工性がよい。
- (3) 緩衝金具の滑り張力が 80kN では大き過ぎて、衝撃力が大きくなり、ワイヤロープが破断する。本防護柵における適性な緩衝金具の滑り張力は、約 40kN である。
- (4) 既存の防護柵および高エネルギー吸収防護柵に落石が衝突すると、変形により落石を停止できる高さ（有効高さ）が減少し、後続の落石が飛び越えることが考えられ、また、防護柵の下端は引上げられて後続の落石が潜り抜けることも考えられる。本防護柵では、ワイヤロープのループ効果により、有効高さの減少を最小限に抑える構造形式を開発することができた。
- (5) わが国で落石対策に使用する金網は、素線を 1 回抛り合わせた菱形金網であるが、強度が小さく、変形能力が十分でない。本防護柵では、高強度鋼線をワイヤロープ状に抛り合わせたストランドを用いた。このワイヤロープストランドを用いた菱形金網を開発した。このワイヤ金網を使用することにより、素線が破断することなく、かつ通常の菱形金網以上に変形能力を有し、金網自身によるエネルギー吸収を期待できる防護柵が製作可能となった。
- (6) 本防護柵は、鋼管、ワイヤロープおよび緩衝金具を組み合わせて製作される。既存の防護柵や高エネルギー吸収防護柵に比較して部品数が少なく、製作が容易であり、現場での管理が少ない。
- (7) 部品数が少なく軽量であるので、架設が容易である。
- (8) 本防護柵を適正にモデル化することにより、大変形非弾性動的解析により十分な精度で実験結果を再現することが可能であることが明らかになった。実験では、最大落石エネルギーを 200kJ に設定したが、より大きい落石エネルギーに対する防護柵の設計が、解析により十分可能であることが証明された。