

工學及土質工学
施工
材料

UDC 624.182:634.9
674.03:620.178.74

墜石防止林の基礎的研究

准員 山口伊佐夫*

FUNDAMENTAL STUDIES ON THE PREVENTION FOREST OF STONE FALL

(Trans. of JSCE April 1953)

Isao Yamaguchi, C.E. Assoc. Member

Synopsis The writer has proposed a certification method of intensity of resistance of tree against stone fall by reason of fundamental studies on the prevention forest of stone fall. Namely, he calculated experimental value of impact-absorb-energy by the test piece of several species of tree.

Moreover, the relation between energy of falling stone, impact-absorb-energy of test piece and diameter of tree is expressed by an equation.

Namely, these results will give the fundamental data to the formation of forest, selection of tree kind of tree, determination of age tree years etc. of prevention forest of stone fall.

要旨 木材(生材)の各樹種について衝撃曲げ吸収エネルギーを測定し、これを立木の強度に応用することを試みた。つぎに墜石のエネルギーに対する立地の斜距離及び勾配のおおのについて必要な立木径を計算した。なお造林学の検討を加え墜石防止林に対する2, 3の考察を加えた。

1. 緒言

飯田線(新城、飯田間)の墜石山崩による鉄道被害ははなはだしい。従つて林木による墜石防止の方策が意図されつつあるが沿線の一部ではすでに着手され現在ではある程度成功した箇所も存在している。筆者は国鉄の依頼により墜石防止林の基礎的研究として木材強度の検討を行い、ついで墜石エネルギーに対する立木の必要樹径を計算してみた。

これらは墜石防止林の林分構成に対する基礎的資料となり得ると思う。

御指導御援助をたまわつた砂防教室萩原教授、立地研究所門田氏及び材料学教室北原助教授に対し深淵な感謝を捧げる。

2. 幹折れ根返りに関する単木の力学的検討

一般に墜石が林木に撃突して生ずる根返り幹折れについて次の3つのことが考えられる。

図-1 B点に墜石が撃突した場合

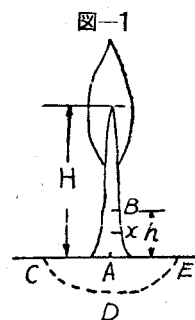
- (1) B点あるいはその上部の点からクロネが前方へ幹折れする。
- (2) AB間において後方へ幹折れする。
- (3) CDE線の後方へ根返りする。

このうち(1)の現象は片持梁の一端に梁と平行な荷重があつてそれに急激なエネルギーが撃突した場合生ずると想像される。すなわち樹幹が長くクロネが重くて、重心が上方にあり、しかも撃突エネルギーの加速度が大きかつた場合に生ずるのである。

(2)は樹幹の応力限界が小さく撃突点が比較的上部にあつた場合生ずる。

(3)の場合は一般に樹種が浅根性で土壌が疎鬆な場合に起るわけであるが図-1のCD線の受動土圧、D点の土及び根系の剪断力及びDE線の土及び根系の抗張力の3つがそのエネルギーよりも小さかつた場合に生ずる。

大体以上3つの場合が考えられるが本論文では(1)(3)は後刻にゆづつて(2)の場合について特に検討を加えていく。いま樹幹を片持梁と仮定ししかも樹幹の応力強度はすべて樹幹の各点において等しいものと仮定する。



* 東京大学農学部林学科砂防教室

その場合 図-1 の AB 間における幹折れについて検討してみる。

樹幹長: H , B点の高さ: h , B点に作用する墜石のエネルギー: W , 破壊点の高さ: x ($x \geq 0$)
とすればそのモーメントは

$$M = W(h-x) \quad \dots\dots\dots(1)$$

x 点の断面の縁応力を σ_x とすれば

$$\sigma_x = \frac{MR}{I} \quad \dots\dots\dots(2)$$

慣性モーメント I は

$$I = \frac{\pi R^4}{4} \quad \dots\dots\dots(3)$$

x 点の樹幹の半径を R とすれば Kunze 式より

$$R^2 = p(H-x)^2 \quad \dots\dots\dots(4)$$

が成立する。(2)式に(1)(3)(4)式を代入すれば

$$\sigma_x = \frac{4W(h-x)}{\pi p^{3/2}(H-x)^{3/2}} \quad \dots\dots\dots(5)$$

$r=2$ と仮定し $4/\pi p^{3/2} = K$ とすれば (6) 式が得られる。

$$\sigma_x = KW(h-x)(H-x)^{-3} \quad \dots\dots\dots(6)$$

(6) 式は 図-2 のような曲線を描き $3h-2x-H=0$

$$h = \frac{H}{3} + \frac{2}{3}x \quad \dots\dots\dots(7)$$

の時 σ_{xmax} となりその点でもつて破壊される。しかし実際の場合樹高の 1/3 の点より高い点に石礫が衝突するとは考えられず、樹高の 1/3 より低い場合においては σ_{xmax} の点は 図-2 のように $x < 0$ の点において起る。しかし $x \geq 0$ は必要条件であり結局地上部における σ_{xmax} は $x=0$ の点において起る。従つて地上部においては接地点における σ_x が最も大きく結局そこにおいて幹折れしやすいことになる。以上の観点に立脚して各樹種についての木材の強度試験を行つてみる。

2. 木材の強度試験

本目的に最も合致した木材の強度試験の意味でアイゾット衝撃試験機による実験を試みた。この場合テストピースは固定点においてモーメントが最大となりその点において最も破壊しやすい。これらの事象は前項と相通ずるものがあり、またテストピースが片持梁である点も立木に対する墜石の現象と似通つている。またテストピースは従来からの試験法としてテストピースに切口を作つて衝撃を行うのであるが本実験では実状にそくするために切口なして衝撃を行つた。

鎚の重さを W kg, テストピースの断面積を ab cm², 鎚の打撃点の廻転半径を R cm とすればそのエネルギーは WR kgm となる。従つて衝撃値 U は

$$U = \frac{WR(\cos\beta - \cos\alpha)}{ab^2} \text{ kgm/cm}^2 \quad \dots\dots\dots(8)$$

α : 鎚の落下角, β : テストピースによつてエネルギーを吸収された後の上昇角, ここに鎚の廻転軸に対する摩擦力を無視すれば上式が成立する。

いま $\alpha=90^\circ$ $\beta=90^\circ$, $-\beta'$ とすれば (8) 式は

$$U = \frac{WR\sin\beta'}{ab^2} \text{ kg/cm}^2 \quad \dots\dots\dots(9)$$

すなわち (9) 式の値が衝撃吸収エネルギーとなるわけである。従つて各樹種の衝撃吸収エネルギーを算出しておけばそれを規準として墜石ひいては山崩れに対する林木の強度を検定することができる。ただテストピースと立木との相似によつて大きな問題に直面するわけであるが本論文では以下の方法で解決の意図をつかんだつもりである。

図-2 樹幹の縁応力と幹折れ高との関係曲線

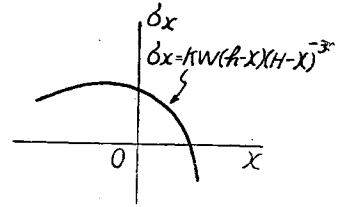
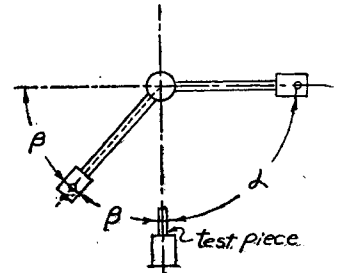


図-3 アイゾット衝撃試験機



そのうちまづ含水量について検討してみる。すなわち木材内の含水量は木材強度の最も大きな因子であるといわれているが、従つて気乾材でもほとんど生材に近い60%の含水率におけばほぼ生材に近い強度を有しているといえるわけである。従つて生材の資料を得ることができなかつた樹種については上述の状態において実験を行つたわけである。

つぎに断面積の相似率については以下の方法をとつた。すなわち従来の木材試験においては一般に断面積の1次に比例するとの仮定にもとづいて実験が進められている。しかし東大農学部北原氏のシャルピー型試験機からの実験によれば断面積の横の辺長の1次、縦の辺長の2次に比例するとの結論が得られている。従つて本実験においては ab^2 に比例するとの仮定のもとに論議を進めてゆく。

すなわち木材の衝撃吸収エネルギーを $U(\text{kgm/cm}^2)$ テストピースに与えられるエネルギーを W_1 とすれば

$$W_1 = WR \sin \beta', \quad U = \frac{W_1}{ab^2} \dots\dots\dots(10)$$

つぎに実際の石礫のエネルギーを $W_2 \text{kgm}^2/\text{sec}^2$ としそれが α の傾斜角で作用するとすれば

$$Ug = \frac{\cos \alpha W_2}{n^3 ab^2}, \quad g: \text{重力の加速度}, \quad n: \text{テストピースの辺長の倍数}$$

従つて $n^3 ab^2$ の矩形に等しい慣性能率を有する円形の直径を得れば求める樹木の接地点の直径とみなし得る。

矩形の慣性モーメントはそれを I_1 とすれば

$$I_1 = \frac{n^4 ab^3}{12}$$

円形の慣性モーメントはそれを I_2 とすれば

$$I_2 = \frac{\pi d^4}{64}$$

$$I_1 = I_2 \quad \text{より} \quad \frac{n^4 ab^3}{12} = \frac{\pi d^4}{64}$$

故に

$$d^4 = \frac{16 n^4 ab^3}{3 \pi} \dots\dots\dots(12)$$

すなわち a, b はテストピースの辺長であり n はまた (11) 式から判断できるから (12) 式によつて求める直径が得られる。

いまテストピースにおいて $ak=b$ とすれば (k : 常数), (12) 式より

$$d^4 = \frac{k^3}{3 \pi} (2an)^4, \quad d = 1.142 k^{3/4} na$$

故に

$$n = k^{-3/4} \frac{d}{1.142 a} \dots\dots\dots(13)$$

(13) 式を (11) 式に代入して

$$Ug = \frac{\cos \alpha W_2}{\left(k^{-3/4} \frac{d}{1.142 a} \right)^3 a^3} = d^{-3} k^{9/4} 1.49 \cos \alpha W_2$$

故に

$$d = k^{3/4} 1.142 (\cos \alpha W_2)^{1/3} (Ug)^{-1/3} \dots\dots\dots(14)$$

すなわち衝撃吸収エネルギーの $1/3$ 乗の値を各樹種について算出しておけば簡単に墜石のエネルギーからその樹種の直径を知り得る。

実験は前述したようにアイゾット型衝撃試験機で樹種は、クロマツ、モミ、ツガ、スギ、ヒノキ、ブナ、ヤチダモ、ヒメヤシャブシ、ニセアカシアの9樹種について行つた。そのうちクロマツ、ヒメヤシャブシ、ニセアカシアは生材を行い、他は前述の60%に近い含水率で実験した。その結果は表-1, 2である。表-2は表-1の平均値に対する $1/3$ 乗の値である。ヒメヤシャブシ、ニセアカシアの2樹種は強度が大きいため (14) 式の k は $1/2$ にとつてあり他の樹種は1になつている。

表-1 (a) 各樹種の衝撃吸収エネルギー

	Tsuga Sieboldii Carr (Zuga)			Abies firma Sieb- et Zucc			Pinus thunbergii Parl (Mumugi)		
	含水率 %	年輪巾 cm	衝撃吸収 エネルギー kgm/cm ²	含水率 %	年輪巾 cm	衝撃吸収 エネルギー kgm/cm ²	含水率 %	年輪巾 cm	衝撃吸収 エネルギー kgm/cm ²
1	42	0.10	0.471	59	0.22	0.559	101	0.11	0.449
2	39	0.12	0.621	53	0.47	0.652	87	0.13	0.649
3	40	0.22	0.616	59	0.22	0.680	97	0.11	0.642
4	31	0.06	0.463	50	0.40	0.634	107	0.14	0.458
5	40	0.09	0.366	56	0.22	0.496	86	0.13	0.682
6	39	0.11	0.684	52	0.40	0.684	93	0.13	0.681
7	39	0.13	0.592	57	0.40	0.530	124	0.14	0.510
8	36	0.12	0.525	49	0.22	0.684	123	0.11	0.463
9	40	0.07	0.522	66	0.22	0.411	130	0.14	0.421
10	37	0.16	0.597	56	0.26	0.505	73	0.13	0.682
11									
12									
13									
Max	39	0.11	0.684	52	0.40	0.684	86	0.13	0.682
Min	40	0.09	0.366	66	0.22	0.411	130	0.14	0.421
Ave	38	0.13	0.537	56	0.31	0.584	102	0.13	0.564

表-1 (b)

	Fraxinus excelsior Maxim (Kashi)			Fagus Crenata Blume (Kuma)			Alnus Pendula Maxim		
	含水率 %	年輪巾 cm	衝撃吸収 エネルギー kgm/cm ²	含水率 %	年輪巾 cm	衝撃吸収 エネルギー kgm/cm ²	含水率 %	年輪巾 cm	衝撃吸収 エネルギー kgm/cm ²
1	50	0.16	0.435	51	0.16	0.259	67	0.14	1.499
2	48	0.35	0.470	55	0.22	0.270	64	0.14	1.773
3	47	0.14	0.287	58	0.35	0.325	65	0.25	1.645
4	56	0.12	0.355	63	0.13	0.449	64	0.25	1.607
5	46	0.35	0.514	54	0.10	0.293	62	0.17	1.795
6	50	0.22	0.366	56	0.15	0.282	70	0.50	1.632
7	50	0.13	0.281	52	0.16	0.346	64	0.25	1.540
8				54	0.16	0.382	70	0.25	1.466
9				53	0.13	0.259	63	0.33	1.513
10				56	0.23	0.348	69	0.39	1.493
11				62	0.22	0.386	60	0.20	1.593
12				61	0.17	0.494	68	0.25	1.618
13									
Max	46	0.35	0.514	61	0.17	0.494	62	0.17	1.795
Min	50	0.13	0.281	53	0.13	0.259	70	0.25	1.466
Ave	50	0.21	0.387	56	0.18	0.341	65	0.26	1.578

表-1 (c)

	Chamaecyparis Spach			Gyptomeria japonica Don			Robinia Pseudacacia L.		
	含水率 %	年輪巾 cm	衝撃吸収 エネルギー kgm/cm ²	含水率 %	年輪巾 cm	衝撃吸収 エネルギー kgm/cm ²	含水率 %	年輪巾 cm	衝撃吸収 エネルギー kgm/cm ²
1	58	0.06	0.402	58	0.40	0.181	61	0.33	0.808
2	51	0.07	0.490	53	0.47	0.167	49	0.30	1.264
3	45	0.07	0.559	67	0.50	0.146	57	0.25	0.841
4	48	0.11	0.410	56	0.50	0.242	47	0.50	0.692
5	55	0.14	0.683	65	0.50	0.156	55	0.50	0.700
6	55	0.05	0.368	48	0.56	0.346	51	0.50	0.841
7	46	0.13	0.654	56	0.33	0.236	55	0.25	1.192
8	50	0.08	0.407	55	0.56	0.231	48	0.20	1.059
9	48	0.05	0.435	58	0.50	0.191	50	0.33	0.739
10	53	0.07	0.378	46	0.40	0.282	52	0.33	1.051
11	49	0.08	0.525	62	0.67	0.114	51	0.33	0.868
12				62	0.40	0.144	50	0.33	0.863
13									
Max	55	0.14	0.683	48	0.56	0.346	55	0.25	1.192
Min	55	0.05	0.368	62	0.67	0.114	55	0.50	0.700
Ave	51	0.08	0.483	57	0.48	0.196	52	0.37	0.888

表-2 各樹種の衝撃吸収エネルギー (平均値)

	ウ	ウ ² キ
Tsuga Sieboldii Carr (Zuga)	0.537	0.813
Abies firma Sieb et Zucc (Momi)	0.584	0.836
Pinus thunbergii Parl (Mumugi)	0.564	0.826
Chamaecyparis Spach (Hinoki)	0.483	0.785
Gyptomeria japonica Don (Sugi)	0.196	0.581
Robinia Pseudacacia L. (Acacia)	0.882	0.959
Fraxinus excelsior Maxim (Kashi)	0.387	0.729
Fagus Crenata Blume (Kuma)	0.341	0.699
Alnus Pendula Maxim (Araushi)	1.598	1.169

3. 立木への応用

まづ墜石のエネルギーについて検討してみる。すなわち互解した岩石が斜面を転り落ちる状態は物理学でいう並進運動と回転運動の両運動を同時に行うと考えられる。その場合の運動エネルギーは並進運動エネルギーと回転運動エネルギーの和とみなすことができる。

$$E = E_G + E' \dots\dots\dots(15)$$

E_G : 並進運動エネルギー, E' : 回転運動エネルギー

そのうち

$$\left. \begin{aligned} E_G &= \int \frac{1}{2} v^2 dm = \frac{1}{2} m v^2 \\ E' &= \int \frac{1}{2} dm (r\omega)^2 = \frac{1}{2} \omega^2 \int r^2 dm \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(16)$$

v : 速度, m : 質量, r : 石礫の半径

(16) 式を (15) 式に代入して

$$E = \frac{7}{10} m v^2 (\text{kgm}^2/\text{sec}^2) \dots\dots\dots(17)$$

すなわちこの (17) 式の E が (14) 式の W_2 に匹敵するわけである。(17) 式の E のディメンションは ML^2T^{-2} であり (14) 式の U_g は ML^2T^{-2}/L^3 で明らかに両者は一致した意味を有している。従つて (14) 式の W_2 の代りに (17) 式を代入して支障ないわけである。いまクロマツで地面傾斜 $45^\circ \sim 10^\circ$ 斜面長 $100 \sim 5m$ に墜石の径 $100 \sim 10cm$ について (17) 式 (14) 式から計算すればほぼ表-3のような結果が得られる。この場合石礫の比重は 2.5 にとつてある。

表-3 (a~d) 傾斜-斜面長-墜石大きさ

傾斜	斜面長	100cm	60cm	40cm	20cm	10cm
		kg	kg	kg	kg	kg
10°	5m	9.72	5.83	3.88	1.94	0.95
	10	12.21	7.34	4.88	2.44	1.21
	15	14.03	8.43	5.61	2.80	1.38
	20	15.40	9.24	6.15	3.08	1.52
	30	17.67	10.61	7.06	3.53	1.74
	40	19.43	11.67	7.77	3.88	1.92
	50	20.91	12.55	8.36	4.18	2.07
	70	23.41	14.06	9.36	4.68	2.31
	100	26.36	15.83	10.60	5.27	2.60
	20°	5	16.54	9.96	6.61	3.18
10		20.80	12.52	8.31	4.17	2.00
15		23.89	14.39	9.55	4.79	2.30
20		26.21	15.79	10.47	5.26	2.52
30		30.08	18.12	12.02	6.03	2.89
40		33.08	19.93	13.21	6.63	3.18
50		35.60	21.44	14.22	7.14	3.42
70		39.86	24.00	15.92	7.99	3.83
100		44.88	27.03	17.93	9.00	4.31
30°		5	18.35	11.01	7.34	3.68
	10	23.06	13.85	9.23	4.62	2.34
	15	26.50	15.91	10.61	5.33	2.69
	20	29.07	17.45	11.64	5.83	2.95
	30	33.37	20.03	13.36	6.69	3.39
	40	36.69	22.03	14.69	7.35	3.72
	50	39.48	23.70	15.80	7.91	4.00
	70	44.21	26.53	17.69	8.86	4.49
	100	49.76	29.88	19.93	9.97	5.52
	45°	5	19.22	11.53	7.70	3.86
10		24.31	14.59	9.73	4.87	2.49
15		27.94	16.76	11.21	5.60	2.86
20		30.64	18.39	12.27	6.14	3.14
30		35.17	21.10	14.07	7.05	3.60
40		38.67	23.21	15.48	7.75	3.96
50		41.44	24.97	16.65	8.34	4.27
70		46.59	27.95	18.65	9.34	4.78
100		52.48	31.48	21.00	10.51	5.37

4. 造林上及び理學上より視た墜石防止林

一般に保安林は經濟林と異なるのであるからまづ収益性は2次的なものとして強固な立木帯を得る点を主眼として対処すべきである。すなわち樹幹に対しても必ずしも大径木あるいは直材を必要とせずまたそれらの伐期その他についてもその最高の収益性あるいは収益の恒続性等は2次的なものとして取扱わなければならない。また立地条件においても必ずしも良好なものとは限らず従つて各種の造林上の障害を克服し得る樹種の選択が必要である。すなわち立地条件に対する抵抗性、生長率、根系の浅深度の良否が問題になってくるのである。

一般に造林学という陽樹は凍寒、炎熱、旱魃その他の危害に対する抵抗力が強くかつ土壤の肥瘠地乾湿地その他に対する適応力が強いとされ、陰樹はそれに反して立地を選ぶ傾向がいちじるしく幼時の生長が緩慢でかつ諸害に対する抵抗力に乏しいとされている。従つてこれら防火用樹種としては一般に陽樹の傾向が多い。すなわち以下のことがらを具備した樹種が最も目的に合致したものと見えるわけである。

1. 立地に対する要求が少ないこと、すなわち瘠悪地に耐えること。
2. 諸種の危害に対する抵抗力が強いこと、ことに乾燥寒害及び積雪霜等に耐えること。
3. 根系の発達が旺盛で速かに土地を固定すること。
4. 煙害に対して強いこと。
5. 樹幹の生長が旺盛で強靱なこと。

の諸点が必要とする。このうち(1)(2)については一般に陽樹がその目的によく合致し(3)は深根性植物がよいとされている。

これらの諸点から前述の樹種について表-1を参考とし各樹種の性質について列記してみる。

すなわち従来から土砂防止林として用いられているクロマツ、ヤシヤブシ、アカシア、ヒノキ等はやはりよく目的に合致した感がある。しかし造林上の見地に立つた場合墜石防止林を仕立てる立地が必ずしもそれらの悪条件のみと限られたわけではなく適宜樹種選択の余裕はあるわけである。また表-1からみて特にヤシヤブシの強度が目立つて大きいとその生長は灌木程度にとどまつてしまう。従来ヤシヤブシは造林上地方の回復の意味でも有意で他の樹種特にクロマツとの混淆林において成功した例が多い。またマツ、ヒノキ等の樹種においても墜石防止林としての有効な樹径を得るためには、各立木の間隔はある程度の長さが必要とする。従つてその立木帯によつて完全に墜石を捕捉することは困難になつてくる。それらの意味から墜石のエネルギーを減殺する目的で強度の大きなしかも灌木程度にとどまるヤシヤブシ、カシ等を利用することが考えられる。

すなわち立地条件その他によつて一概に断言することはできないが1方法としてクロマツ等の大径木を主林木としそれらの中間に強度の大きなヤシヤブシ、カシ等を混植した混淆林を造林したならばより有効な結果をもたらすものではあるまいか。

参 考 文 献

- 1) 北原覚一：衝撃仕事に対する試験片の巾の影響について（未発表）
- 2) 北原覚一：木材の衝撃曲げ吸収エネルギーの計算法について（東京大学農学部演習林報告 38号）
- 3) 堀田正逸：測樹学
- 4) 中村賢太郎：育林学原論

表-4 各樹種の性質

樹種	樹種特性	生長の速さ	陽陰性	根系の浅深度	造林上適性	枝葉の強弱
ヒノキ	常緑針葉樹	中(大径木)	半陰性	中根	伐傷弱	強い
ツガ	常緑針葉樹	速(伏径木)	半陰性		伐傷弱	強い
スギ	常緑針葉樹	早(伏径木)	陽性	中根	伐傷強	弱い
モミ	常緑針葉樹	速(伏径木)	陰性	深根	伐傷弱	強い
クロマツ	常緑針葉樹	早(伏径木)	陽性	深根	伐傷強	強い
ブナ	落葉広葉樹	速(大径木)	陰性			中
ヤシヤブシ	落葉広葉樹				瘠土耐性強	中
ヒノキ	常緑針葉樹	遅(灌木)	陽性	深根	伐傷強	非常に強い
アカシア	落葉広葉樹	早(喬木)	陽性	浅根	伐傷強	強い

(昭.27.9.16)