

スギの切株の建築基礎としての活用

Utilization of cedar stumps as building foundations

家政学研究科住居学専攻 平原 朱莉
Division of Housing, Graduate School of Human Sciences and Design Hirabara Akari
住居学科 江尻 憲泰
Dept. of Housing and Architecture Ejiri Norihiro

抄 録 森林の多面的機能の一つに土砂災害防止機能があるが、表層崩壊の抑止には、樹木の根系の働きが関係する。“樹木の根系を含むことで土のせん断強度が増加するため、根による崩壊抑止効果が評価できる”という砂防学の先行研究から、著者らは、樹木根のせん断強度を「建築物の基礎」として用いることができるのではないかと推論した。本論の研究対象は「スギの切株」だ。建築構造の視点で、切株の強度を分析した。切株に対して押込み試験・水平載荷試験方法を行い、切株の建築基礎としての強度を確認した。その結果、スギの切株は建築基礎としての強度を十分に満たす可能性が確認されたので、その結果について述べる。

キーワード：切株、基礎、地盤調査、強度試験、バウビオロギー

Abstract One of the multifaceted functions of forests is to prevent landslides. We hypothesized that the resistance of tree roots to the ground could be used as a foundation for buildings, based on previous research on erosion control which suggests that “the horizontal root system of trees exerts resistance to the ground and also reinforces the shear strength of the soil”. The subject of this paper's research is the “cedar stump”. The strength of the stump was analyzed from the viewpoint of building structure. Push-in and horizontal loading tests were conducted on the stumps to confirm their strength as building foundations. As a result, it was confirmed that cedar stumps have the potential to fully meet the strength requirements for building foundations.

Keywords: Cedar Stumps, Building Foundation, Geotechnical Survey, Strength Test, Baubiologie

1. 研究の背景と目的

現在、スギの人工林では、50年生を超えた木々が伐採されずに放置されている。全伐採すると、斜面の表層崩壊が起こる恐れがあるため、再生させるには、人の介入が重要である。もし、自然物をそのまま建築構造に活用できるのであれば、バウビオロギーの思想のもと、生態系を保ったまま、自然の再生に有効な建物づくりができる。

本論の研究対象は「スギの切株」である。“樹木の根系を含むことで土のせん断強度が増加するため、根による崩壊抑止効果が評価できる”という砂防学の先行研究¹⁾から、樹木根のせん断強度を「建築

物の基礎」として用いることができるのではないかと推論した。

切株を扱う研究分野としては、森林・木材・森林の多様な機能などを主な研究対象とする森林学や、土砂災害の発生機構を解明し、その防止・軽減につながる手法の開発などを主な研究対象とする砂防学があるが、切株を扱った先行研究は少ない。建築構造学においても、自然物は人が扱えないと考えられているからか、生木の研究事例はほとんどない。

しかし、強度の推定ができれば、「人は自然物の強度を扱えない」という常識に対して新しい可能性を示唆できる。林業では、“木を植え、手入れをし、育った木を切り、跡地にまた木を植える”というサ

イクルが重要であり、木を切る過程で切株が必ず作られるが、人工素材のコンクリートで造られる建築基礎は、土壌の生態系に影響が大きい。切株に建物を支える強度があるのであれば、切株を建築基礎に用いる有効性が、斜面地の崩壊や生態系の維持につながる建築となり得る。

2. 試験の概要

2.1 概要

茨城県常陸太田市にある伐採から10ヶ月経った樹齢54~68年と推定される4つのスギの切株を対象とする(図1)。うち2つの切株に対し、2022年10月26日~28日に鉛直・水平方向から載荷試験を行った。載荷試験での数値を、切株の樹齢から推定した鉛直地盤応力度・転倒モーメントと、2022年10月9日に実施した地盤調査から算出した長期と短期の許容鉛直支持力度・浮上り限界モーメントと比較した。

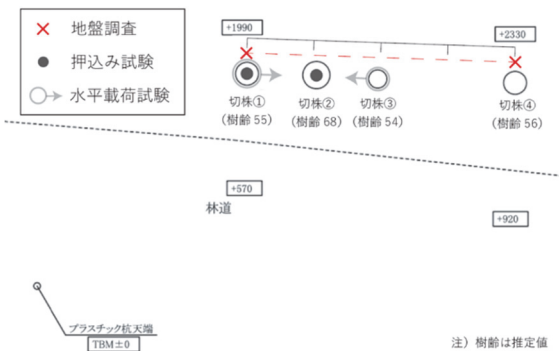


図1 調査位置図と樹齢

2.2 事前調査

2.2.1 鉛直支持力度の推定

年輪を数えて明らかにした切株の樹齢から推測して、切株が負担していた丸太の生木状態の重さ(図2)を概算で推定した。樹高はスギ民有林収獲表²⁾を用いて樹齢から引用し、切株の断面積Aは縦と横の平均直径Iから円として算出した。それらを円柱の計算式に当てはめて体積を算出し、体積から重さに換算するための生材密度は、後藤ら(2008)が明らかにした島根県内5地域の林分から採取したスギ丸太300本の生材密度の平均値 $\rho_s=0.81\text{g/cm}^3$ を用いた³⁾。その後、根を無視した切株重量に対する鉛直地盤応力度を推定した。

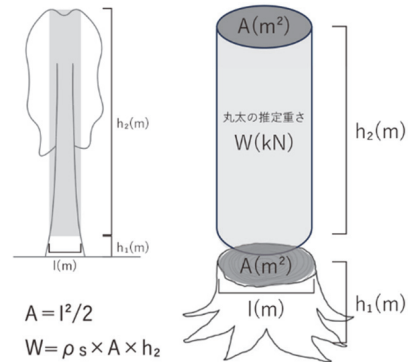


図2 切株重量に対する鉛直地盤応力度の概念図

鉛直地盤応力度は平均 38.74kN/m^2 であり、切株の断面積が大きいほど地盤応力度が大きい結果となった(表1)。

表1 切株重量に対する地盤応力度

	樹齢	h ₁ : 切株の高さ	h ₂ : 丸太の樹高	I: 切株の直径	A: 切株の断面積	W: 丸太の推定重さ	切株重量に対する鉛直地盤応力度
単位		m	m	m	m ²	kN	kN/m ²
切株①	55	0.53	18.57	0.38	0.47	17.33	37.21
切株②	68	0.53	21.17	0.44	0.59	25.33	42.61
切株③	54	0.36	18.54	0.30	0.27	10.22	37.37
切株④	56	0.48	18.83	0.36	0.38	14.53	37.75

2.2.2 風によって基礎に生じる応力の推定(水平方向)

切株と立木が受ける風圧力W(N)を、

$$W=1/2 C_D \rho v^2 S \quad 4)$$

の式で計算した。立木は常時吹く風に対して、十分な強度を有していることから、平年値より逆算して強度を推定した。

切株においては、切株を円柱と見立てて計算し、

$$C_D=0.74,$$

$$\rho=1.293 \text{ (kg/m}^3\text{)},$$

$$\text{常陸太田市の基準風速 } v=30 \text{ (m/s)} \quad 5)$$

$$\text{受圧面積 } S=\text{切株高さ } h_1 \times \text{切株直径(m)}$$

と仮定し、図3のように算出した。

立木においては、

$$C_D=0.6 \quad 4),$$

$$\rho=1.293 \text{ (kg/m}^3\text{)},$$

$$\text{常陸太田市の基準風速 } v=30 \text{ (m/s)} \quad 5),$$

$$\text{樹冠縦断投影面積 } S=\text{樹高 } h_2 \times \text{平均樹冠幅 } 4.56\text{m}$$

と仮定し、図3のように算出した。

平均樹冠幅は、島田ら(2011)のスギ高齢林の調査で、切株②と同じ樹齢68の平均樹冠幅が4.56mであったことから、同値を使用した⁶⁾。

立木が、風心に風を受ける場合、樹木への風圧力は地際部が最大となり、その転倒モーメントは、風圧力に樹高を掛けることで算出できる⁸⁾。求めた風圧力 W から、切株と立木の転倒モーメントを算出した（表2）。

なお、本水平載荷試験での載荷荷重 12.20kN を風圧力 W と見立てた転倒モーメントも算出した（表2）。切株に関しては、基準風速の転倒モーメントより、本水平載荷試験の転倒モーメントの方が大きいことを確かめた。

表2 切株・立木に生じる転倒モーメント

	切株転倒 モーメント	切株転倒 モーメント	立木転倒 モーメント	立木転倒 モーメント
単位	kN・m	kN・m	kN・m	kN・m
計算指標	基準風速 $v=30(\text{m/s})$	載荷荷重 $W=12.2(\text{kN})$	基準風速 $v=30(\text{m/s})$	載荷荷重 $W=12.2(\text{kN})$
切株①	0.05	6.47	636.79	233.02
切株②	0.05	6.44	821.96	264.74
切株③	0.02	4.42	623.53	230.58
切株④	0.03	5.80	650.20	235.46
平均	0.04	5.78	683.12	240.95

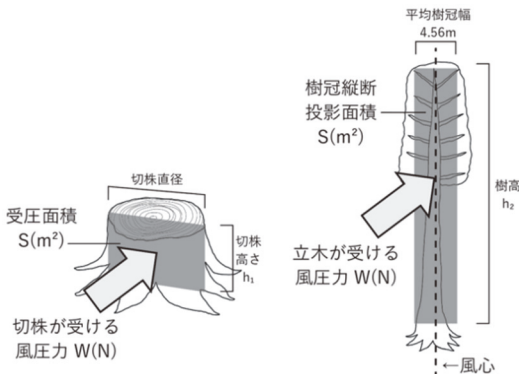


図3 風圧の概念図

2.3 地盤調査

切株①と切株④の位置で「スクリーウエイト貫入試験(SWS 試験)」を実施した。SWS 試験での貫入抵抗値 \overline{Nsw} から、支持力式

$$q_a = 30 + 0.6 \overline{Nsw} \quad ^7)$$

で極限鉛直支持力度 q_u (kN/m²) を求めた。試験場所における推定土質は砂質土・礫質土であった。そこから、

長期の場合の耐力係数 $\phi_R = 1/3$,

短期の場合の耐力係数 $\phi_R = 2/3$,

SWS 試験の貫入抵抗値から求めた極限鉛直支持力度 q_u (kN/m²)

基礎の底面積 $A =$ 切株の断面積 A (m²)

より、

$$R_d = \phi_R q_u A \quad ^7)$$

の式で、長期と短期における鉛直支持力 R_d (kN) を算出した（表3）。

また、基礎に作用する鉛直荷重 $V = R_d$ (kN) と仮定し、水平力が作用する方向（基礎が回転する方向）の基礎幅 $B =$ 表1に記載した切株の直径 (m) より、

$$M_1 = VB/6 \quad ^7)$$

の式で、浮上り限界モーメント M_1 (kN・m) を算出した（表3）。

表3 SWS 試験結果から算出した浮上り限界モーメント

	極限鉛直 支持力度 q_u	長期の 鉛直支持力	短期の 鉛直支持力	浮上り限界 モーメント
単位	kN/m ²	kN	kN	kN・m
切株①	62.85 ^{*1}	9.85	19.69	1.25
切株②	58.31 ^{*3}	11.47	22.94	1.68
切株③	53.78 ^{*2}	4.84	9.68	0.48
切株④	44.70 ^{*1}	5.66	11.32	0.68

^{*1}: SWS試験結果/^{*2}: 切株①・切株④の平均値/^{*3}: 切株①・切株③の平均値
地盤支持力が保有すると仮定し、図1調査位置図より算出した。

2.4 押込み試験（鉛直方向）

切株①・②において、写真のような2種類の重りを、19段階で載荷した。試験最大荷重は、安全性の面から、1,044kg (=10.23kN) としている。切株に変位計を4箇所設置し、単サイクルの連続載荷方式で測定した。

10.23kN の載荷に対して、最大変位量が 0.32mm と 0.40mm となった。また、本試験の最大荷重であった 10.23kN を、切株の表面積 A で割ることで、許容支持力度を算出した。切株①は 22.42kN/m²、切株②は 17.56kN/m²であった。

加えて、荷重 P (kN) と、各荷重段階における杭頭変位量 S (mm) の関係を、図5の通り19段階でプロットした。切株①が55年、切株②が68年の樹齢であったが、切株①の方が大きい変位量となった。樹齢が少なく樹径が小さい切株の方が、同じ荷重でも最終荷重時の変形が①では勾配が小さくなり始めるのに対し、②は直線上であることから、壊れやすいと考察した。切株は塑性に近い変形となったが、10.23kN を5分載荷しても、クリープによる現象は

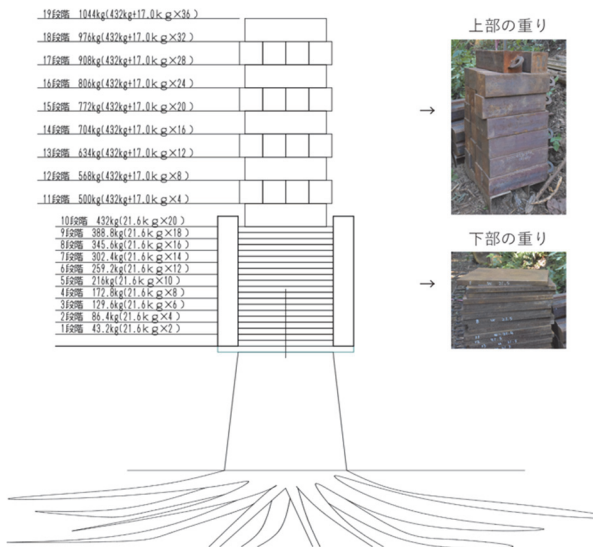


図4 押込み試験の概要図



写真1 最大荷重 1,044kg (=10.23kN) 時

切株① 試験最大荷重: 10.23kN	切株② 試験最大荷重: 10.23kN
最終ゼロ荷重の残留変位量 S_r : -0.06(mm)	最終ゼロ荷重の残留変位量 S_r : 0.07(mm)
弾性戻り量(変位量) S_e : 0.46(mm)	弾性戻り量(変位量) S_e : 0.25(mm)

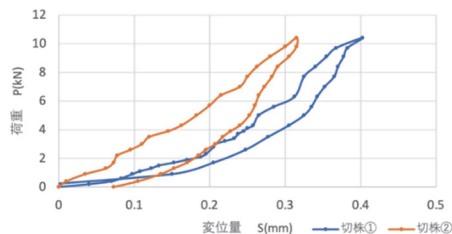


図5 鉛直方向に対する支持力度の比較

発生しなかった。

2.5 水平載荷試験 (水平方向)

切株①・③において、油圧ジャッキを用いて、水平載荷を進めた。試験最大荷重は、レバーブロックの耐荷重の面から、12.20kN としている。切株に変位計を2箇所設置し、2サイクルの多段階載荷方式により実施した。



写真2 最大荷重 12.20kN 時

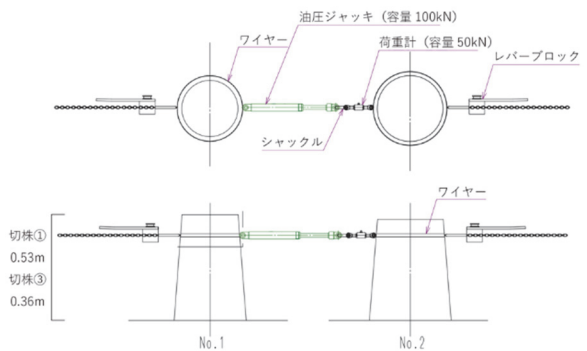


図6 水平載荷試験の概要図

12.20kN の載荷に対して、最大変位量が 0.74mm となった。また、本試験の最大荷重であった 12.20kN を、切株が負担していた丸太の樹高 h_2 で割ることで、転倒モーメントを算出した。切株①は 233.02kN・m、切株③は 230.58kN・m であった。

加えて、荷重 $P(kN)$ と、新規荷重段階における杭頭変位量 $S(mm)$ の関係を、図7の通り多サイクルでプロットした。切株①と切株③で変化が出た可能性として、樹齢・陽当たり・地形・土質等の影響が考えられる。

切株① 試験最大荷重：8.00kN

・ 1回目

最終ゼロ荷重の残留変位量 S_r : 0.03(mm)弾性戻り量(変位量) S_{se} : 0.28(mm)

・ 2回目

最終ゼロ荷重の残留変位量 S_r : 0.03(mm)弾性戻り量(変位量) S_{se} : 0.29(mm)

切株③ 試験最大荷重：12.20kN

・ 1回目

最終ゼロ荷重の残留変位量 S_r : 0.07(mm)弾性戻り量(変位量) S_{se} : 0.68(mm)

・ 2回目

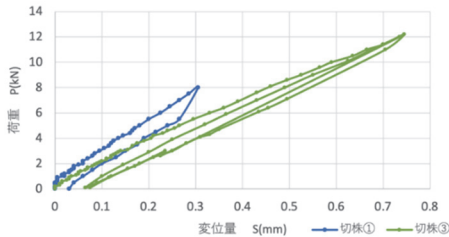
最終ゼロ荷重の残留変位量 S_r : 0.08(mm)弾性戻り量(変位量) S_{se} : 0.66(mm)

図7 荷重(P)—変位(S)履歴曲線図(水平載荷)

表4 鉛直方向に対する重さの比較

	樹齢	SWS試験より 長期の 鉛直支持力	SWS試験より 短期の 鉛直支持力	切株が負担していた 丸太の 推定重さ
単位		kN	kN	kN
切株①	55	9.85	19.69	17.33
切株②	68	11.47	22.94	25.33
切株③	54	4.84	9.68	10.22
切株④	56	5.66	11.32	14.53

表5 鉛直方向に対する支持力度の比較

	樹齢	10.23kN載荷時 切株自身の 鉛直支持力度	立木状態のときに 地盤に与えている 鉛直地盤応力度	土がもつ地盤の 最大強度 極限 鉛直支持力度
単位		kN/㎡	kN/㎡	kN/㎡
切株①	55	22.42	37.21	62.85
切株②	68	17.56	42.61	58.31
切株③	54	—	37.37	53.78
切株④	56	—	37.75	44.70

3. 切株基礎の考察

3.1 鉛直支持力度

まず、SWS 試験と事前調査の重さの値を比較した(表4)。地盤の長期の鉛直支持力の2倍が、樹齢54~68年のスギの立木の重さと地盤の短期の鉛直支持力に近い値となった。このことから、立木における鉛直支持力の大きさは、SWS 試験で求められる地盤の硬軟に加えて、立木と地盤をつなぐ“根”の効果で補強されていることが推定される。

続いて、押込み試験と事前調査と SWS 試験の支持力度の値を比較した(表5)。小さい順で、切株

自身の支持力度、立木状態のときに地盤に与えている鉛直地盤応力度、土がもつ地盤の最大強度となったため、樹齢55年以上の切株は、10.23kN以上の鉛直力を支えることが十分可能であると考えられる。重い荷重をかけても切株が0.32mm~0.40mm程度しか沈まなかったことから、根は切株と地盤をつなぐ効果があると考察する。

3.2 水平方向の転倒モーメント

SWS 試験と事前調査の転倒モーメントの値を比較した(表5)。地盤の支持力から求めた浮上り限界モーメントより、転倒モーメントの方が大きくなる結果となったが、今回12.20kNの水平載荷を行っても、切株は転倒しないことはもちろん、切株の変形は弾性域内であった。よって、“根”が地盤の強度を補強していることが証明でき、地盤の支持力が向上していると考えられる。

表6 水平方向に対するモーメントの比較

	樹齢	地盤の鉛直支持力 より浮上り限界 モーメント	12.20kN載荷時の 切株転倒 モーメント
単位		kN・m	kN・m
切株①	55	1.25	6.47
切株②	68	1.68	6.44
切株③	54	0.48	4.42
切株④	56	0.68	5.80

4. まとめ

鉛直支持力度・水平方向の転倒モーメントを求めた本試験を通して、切株は建築物の鉛直力・水平力を両方支えることができるため、スギの切株を建築基礎に用いることは可能であると結論づけることができた。

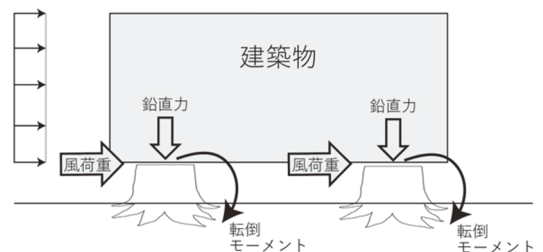


図8 建築基礎として活用する切株の概念図

5. あとがき

今回行った SWS 試験での地盤調査・押込み試験・水平載荷試験が、生木を建築的視点で分析する機会かつ切株の強度分析の第一歩になり、健康や環境に配慮した建築につながることを期待する。

また、生の木や丸太の使用が建築で敬遠されている理由は、腐朽の問題であると思う。何年後に消滅するのかを研究した先行研究はなかったが、酒井ら(2008)らは、気温が高く降水量がある本州以南のスギにおいて、切り捨て間伐木の重さが半分まで減少するのに15年かかるとしている⁹⁾。腐朽菌は根から侵入してくるため、根がある切株は、切り捨て間伐木の15年よりも早く腐朽するのではないかと考える。

しかし切株の腐朽を、一律に「15年よりも早い」とは決めつけられない。牛島ら(2006)による屋久島のヤクスギ天然林内の切株の調査によると、切株22個体の発生時期は、紀元前後から西暦1500年までの期間であることが分かった。つまり、天然林の豊かな土壌においてだと、切株は最短でも、500年間存在し続けられるということが記載されている¹⁰⁾。

以上の論文からも、切株の腐朽の明確なメカニズムは判明していない。これは、試験場所の地質や土壌の状態、立木の生育状況などの複雑性が原因だと推察する。

腐朽の問題は解決できる可能性が高く、切株の建築基礎としての活用は腐朽の面からも可能であると推察される。

6. 謝辞

本研究の試験計画においては、旭化成建材株式会社基礎事業部基礎技術開発部 前嶋匡氏・塚田義明氏の多大なご協力を頂いた。また地盤試験ではテクノハーツ株式会社、押込み試験・水平載荷試験では株式会社地盤試験所にご尽力頂いた。厚く御礼申し

上げる。

7. 参考文献

- 1) 山本蓉子ら, 平成30年度砂防学会研究発表会概要集, p.605-606, 2018, 樹木根系による土のせん断強度補強効果—疑似根を用いた一面せん断試験による検討—
- 2) 高知県, “スギ民有林収穫表”, https://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/030201/files/2012030100634/20120301006_34_www_pref_kochi_lg_jp_uploaded_attachment_36922.pdf, (参照 2022-11-24)
- 3) 後藤崇志ら, 木材工業, Vol.63, No.7, p.307-312, 2008, 島根県産スギ造林木の材質及び強度特性に及ぼす枝打ち・間伐の影響(第1報)—丸太の外観特性と動的ヤング定数について—
- 4) 四手井綱英, 森林保護学—改訂版—, 朝倉書店, p.59, 1987
- 5) 気象庁, 日立(茨城県), 平年値(年・月ごとの値), https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/nml_amd_vm.php?prec_no=40&block_no=1011&year=&month=&day=&view=, (参照 2022-11-24)
- 6) 島田博匡, 三重県林業研報, No.3, p.19-26, 2011, 三重県の高齢人工林における胸高直径、樹高、樹冠幅の関係—大径材生産を目指した密度管理技術の検討—
- 7) 日本建築学会, 建築基礎構造設計指針第3版, 日本建築学会, p.112-177, 2019
- 8) 陶山正憲, 水利科学, Vol.37, No.1, P.25-53, 1993, 台風による樹木の風倒・折損機構
- 9) 酒井佳美ら, 森林立地, Vol.50, No.2, p.153-165, 2008, 材密度変化による主要な針葉樹人工林における枯死木の分解速度推定
- 10) 牛島伸一, 九州森林研究, Vol.59, p.150-153, 2006, ヤクスギ林内の切株に関する年輪年代学的研究