

1-2-1 CO2 固定と循環型社会形成のための土木分野における間伐材利用技術の開発①

研究予算 : 運営費交付金 (一般勘定)
 研究期間 : 平 14~平 17
 担当チーム : 施工技術チーム
 研究担当者 : 大下武志、小野寺誠一、堤祥一

【要旨】

優良な森林を育成し、CO2 固定機能を高めるとともに防災・水涵養機能を持続させるためには間伐などの管理が不可欠である。しかし近年は、必要な間伐面積のうちわずか 40%程度しか実施されず、また生産された間伐材も価格競争の弱さなどから十分に活用されず、半数近くが林内に放置されている状況にある¹⁾。そこで、間伐材利用技術を開発することにより、間伐材の新たなマーケットを見出し、良好な人工林の育成、CO2 の固定、資源循環型社会の構築などに貢献することが求められている。本研究では、間伐材の利用技術として短杭群による軽度の地盤改良材としての利用方法を提案し、コスト、改良地盤の変形特性等について検討した。

キーワード : 軟弱地盤、間伐材、浮式地盤改良、遠心模型実験

1 はじめに

本研究では、間伐材の利用技術として短杭群による軽度の地盤改良材としての利用方法を提案し、間伐材を地盤改良材として利用できるかを検討する為、次の 3 項目について検討した。①間伐に要するコストの調査および既存の地盤改良工法とのコスト比較、②間伐材の短杭群地盤改良としての利用した場合を想定し、地盤の変形特性を把握することを目的とした遠心模型実験、③木材の腐食による強度低下を考慮し、木材の耐用年数と強度の低下に関する調査と検討である。

ついて、素材換算立木価格は間伐材が主材を下回るが、素材生産費は間伐材が主材より高いことが分かる。これは、間伐材は主材と比較し生産量も少なく作業効率の低いことが原因だと考えられる。

表-2-1 素材価格の内訳

素材 価格	素材生産費	労務費
		物品費
		間接費
	素材換算立木価格	立木購入価格
運搬費		

表-2-2 素材価格の比較結果

	間伐材 (円/m ³)	主材 (円/m ³)	間伐材/主材	
スギ	素材生産費	9,686	7,486	1.29
	素材換算立木価格	4,887	6,982	0.70
	運搬費	2,269	2,068	1.10
	素材価格	16,841	16,536	1.02
ヒノキ	素材生産費	13,123	10,153	1.29
	素材換算立木価格	10,275	15,546	0.66
	運搬費	2,636	2,609	1.01
	素材価格	26,034	28,309	0.92
マツ	素材生産費	16,943	7,738	2.19
	素材換算立木価格	9,438	4,212	2.24
	運搬費	1,810	2,544	0.71
	素材価格	28,191	14,494	1.95
カラマツ	素材生産費	7,128	5,105	1.40
	素材換算立木価格	1,875	2,845	0.66
	運搬費	2,118	1,668	1.27
	素材価格	11,121	9,618	1.16

2 間伐に要するコストおよび地盤改良工法のコスト比較

間伐材は売却費が生産費を下回り赤字になることで、間伐が十分に行き届かない現状があり、入手が困難な状況がある。ここでは、間伐に要するコストの現状を把握することを目的に、文献調査およびアンケートを行った。また、地盤改良工法として利用した場合の費用について、既存の地盤改良工法と比較検討した。

2.1 間伐材の生産コストに関する現状調査

間伐材の費用を把握する方法の一つとして、林野庁より発行されている「素材生産費等調査報告書」を参考にすることができる²⁾。ここでは平成 12 年~16 年までの主材および間伐材の生産コストについて、4 種類の素材別に整理した。素材価格の内訳を表-2-1、素材価格を比較した結果を表-2-2 に示す。

表-2-2 より、素材価格について、間伐材と主材とでは大きな差がないことが分かった。素材価格の内訳に

2.2 間伐材の生産費用・市場価格の現状調査

間伐材は主材と比較して生産費用が高く生産量も少ないことから、市場に出回らないのが現状であり、間伐材の市況に関する情報が少ない。間伐材を建設材料として調達するには、市場価格および生産費用に関

する情報を正確に把握する必要がある。そこで、各都道府県の森林組合連合を通じ、アンケートを行った。

スギ、ヒノキ、トドマツ、カラマツに関して間伐材の市場価格と生産費用を調査した結果を表-2・3 に示す。

表-2・3 間伐材の市場価格と生産費用の比較結果

材種	末口	採材長	市場価格 平均 (円/m ³)	生産費用 平均 (円/m ³)	生産費用 /市場価格 (%)	備考
スギ	~10cm	3.0m	8,984	13,083	145.6	北海道以外
	10~14cm	3.0m	10,673	12,639	118.4	北海道以外
	14~22cm	3.0m	13,117	12,194	93.0	北海道以外
ヒノキ	~10cm	3.0m	9,575	13,306	139.0	北海道以外
	10~14cm	3.0m	12,909	12,861	99.6	北海道以外
	14~22cm	3.0m	19,947	12,417	62.2	北海道以外
トドマツ	~10cm	3.0m	12,500	7,250	58.0	北海道
	10~14cm	3.0m	14,500	7,250	50.0	北海道
	14~22cm	3.0m	17,500	7,250	41.4	北海道
カラマツ	~10cm	3.0m	11,500	7,250	63.0	北海道
	10~14cm	3.0m	13,500	7,250	53.7	北海道
	14~22cm	3.0m	15,500	7,250	46.8	北海道

いずれの材種についても、末口が小さくなるに従い、生産費用/市場価格が大きくなる傾向にある。特に、スギの末口 10~14cm 以下、ヒノキの 10cm 以下のものについては、生産費用/市場価格 > 100% という結果であり、生産費用が市場価格を上回っている現状がある。これは、末口の小さいものは需要が低く、その結果市場価格が低くなるのに対し、生産費用は末口の大小に関わらず、ほぼ同じ費用が発生するためである。これが間伐事業において、小口径の木材が山に放置される原因である。こうした小口径の間伐材の有効利用方法を開発し、市場の活性化を図れば、現状の生産費 > 市場価格という問題の解消が期待される。

2.3 既存地盤改良工法とのコスト比較

ここでは、間伐材を短杭群の地盤改良として利用した場合のコストを従来の地盤改良工法と比較した。地盤改良の設計には、すべり安定・支持力・沈下量の検討等、多くの検討が必要であるが、ここでは作業を簡略化し、任意に設定する上載荷重 W (kPa) に応じた、改良地盤強度となる改良率 a_p (%) を試算し、それから単位面積当たりの必要となる杭本数 N (本/m²) を算出し、杭 1 本の施工単価 c (円/本) を導入することにより、施工単価 C (円/m²) を試算し比較した。試算のフローを図-2・1 に示す。

杭 1 本当たりの施工単価 c (円/本) は杭長、杭径、改良材添加量により算出され、国土交通省の積算基準に準じて試算した。また、労務・材料単価は平成 17 年度の建設物価の関東標準単価を使用した。ここでは、

木杭工法と比較する地盤改良工法として DJM 工法を挙げた。改良率 a_p の試算では、改良柱体の設計基準強度 q_{uck} の設定が必要となるが、「深層混合処理工法 設計・施工マニュアル」の一軸圧縮強度 q_{uf} の平均値を使用した³⁾。

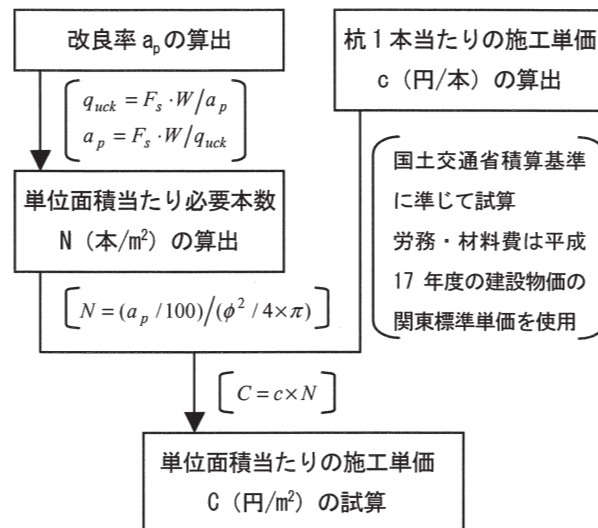


図-2・1 施工単価の試算フロー

上載荷重 $W = \gamma_t \times H$ (ここで $\gamma_t = 1.9t/m^3$) に盛土を想定し、盛土高 H に対する単位面積当たりの施工単価 C (円/m²) を試算比較した。結果を図-2・2 に示す。

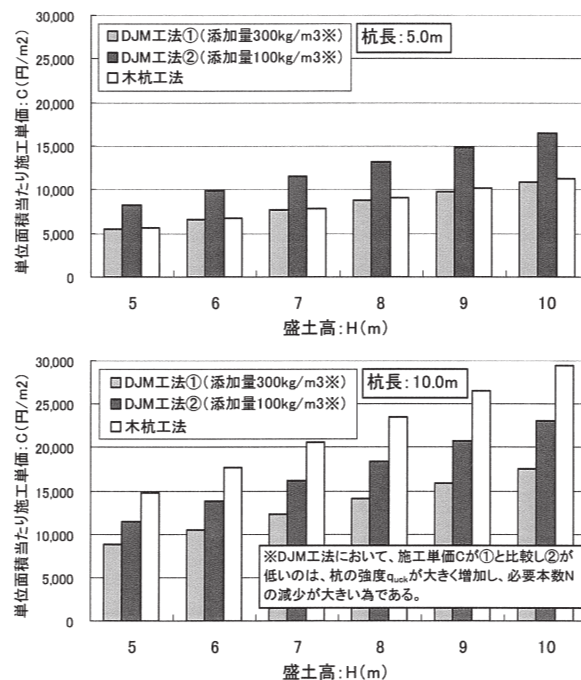


図-2・2 施工単価の試算結果

図-2・2 の上段図のように、杭長 5.0m では、木杭工法は他と比較して、施工単価 C が低いことが分かる。また、下段図のように杭長 10.0m では木杭工法が高い

ことが分かる。今回の試算に当たり、木杭工法の施工歩掛り条件を木杭長 5.5m~10.5m としており、杭長が短くなると作業効率が良くなることを考慮すると、杭長 5.0m 以下において木杭工法は他の工法と比較しても、施工コストは低いことが予想され、十分、実用化可能な工法であると考えられる。

2.4 間伐材のコストに関するまとめ

- 以上の調査・検討結果より以下のことが分かった。
- ① 間伐材の生産費用は主材と比較し、ほぼ同程度である。
- ② 市場価格と生産費用を比較した場合、小口径のものについては、生産費用が上回る現状がある。
- ③ 地盤改良材としての利用を考慮する場合、改良長 5.0m 以下の軽度の改良では、既存の地盤改良工法と比較しても、コスト面で十分有効である。

3 短杭群地盤改良としての利用に関する遠心実験

短杭群地盤改良としての利用を考慮する際、実施可能な範囲の改良率、改良長でどの程度までの荷重を適用できるかを定性的、定量的に評価する必要がある。遠心模型実験により、沈下量、円弧すべり、側方流動の検討を行った。

3.1 改良条件の沈下量に及ぼす影響に関する実験

ここでは、杭径、杭長、改良率をパラメータとして、改良条件が沈下量に及ぼす影響度について定量的に検討するため、改良地盤上に盛土を載荷し、沈下量の計測を行った。

実験では、実験地盤にカオリンクレイを使用し、載荷実験前に圧密荷重 23.9kPa により両面排水条件下で、遠心加速度 70G で 24 時間先行圧密を掛けたものに、2.5m の盛土（上載荷重 46.6kPa）を載荷することを想定した。改良杭はせん断破壊しないことを前提とし、材質はアルミニウム製のものを使用した。実験ケースを表-3-1、実験概要を図-3-1 に示す。

表-3-1 実験ケース一覧

実験ケース	杭径:φ (mm)	改良率:α _p (%)	杭長:L (m)	杭間距離:p (mm)	備考
Case1	—	0.0	—	—	無対策
Case2	200	3.0	2.5	1036	改良率(極低)
Case3	200	6.0	2.5	728	改良率(低)
Case4	200	9.0	2.5	623	改良率(中)
Case5	200	12.0	2.5	539	改良率(高)
Case6	350	9.0	2.5	1022	杭径が大きい
Case7	200	3.0	5.0	1036	杭長が長い
Case8	200	3.0	2.5	1036	千鳥配置
Case9	200	3.0	2.5&5.0	1036	法尻補強*1
Case10	200	3.0	2.5&5.0	1036	要所補強*2

*1 法尻部L=5.0m、その他L=2.5m (値は実大換算値)

*2 法尻、盛土中央L=5.0m その他L=2.5m

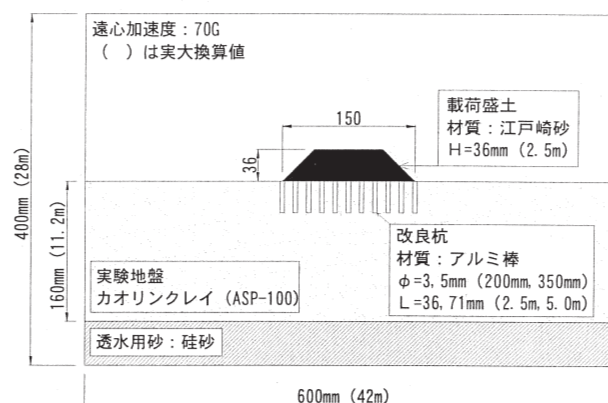


図-3-1 実験概要図

計測は盛土上面の中央および法尻に設置した、ポテンシオンメーターにより、盛土の沈下量の経時変化を計測した。計測結果を図-3-2 に示す。沈下量は実大スケールに換算し、450日（実験での時間では 2.2 時間）経過後の沈下量である。

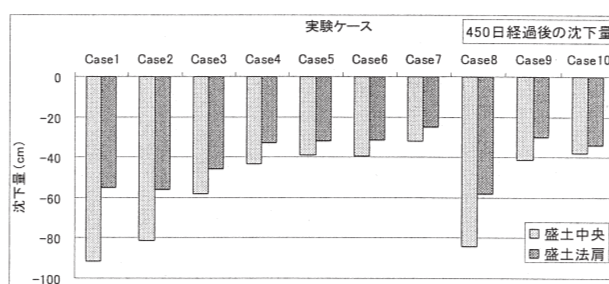


図-3-2 各実験ケースの沈下量の計測結果

実験結果より、Case1（無対策）と比較して、Case2~Case5のように改良率が高くなるほど沈下量が軽減していることが分かる。また、改良率が高くなるにつれて、沈下量の低減が小さくなる傾向にあり、ある一定の改良率に低減効果が収束していることが分かる。今回の実験条件では改良率 9~12%での沈下量の差が小さくなっている。

- 今回の実験より以下のことが分かる。
- ① 改良率が高く、杭長が長いほど沈下抑制に効果があることが分かった。沈下量の低減には杭長の影響によるものが大きく、Case2 と Case7 を比較して、同改良率 3%でも、杭長が 2.5m から 5.0m と長くなることにより、沈下量は半分以下に低減された。
- ② 改良率の効果については、今回の実験条件において改良率 3~9%までは、沈下量抑制効果が顕著に発生しているが、改良率 9%を超えると沈下抑制効果が収束することも分かった。これは、群杭効果の検討基準である杭間距離 2.5D である、改良

率 12%付近で抑制効果が低減していることと合致する。

- ③ Case4 と Case6 との比較で分かるように、低改良率の範囲では杭径の違いによる沈下量への影響は小さいことが分かった。

3.2 円弧すべり、側方変位の影響に関する実験

ここでは、盛土载荷による地盤の円弧すべり、側方変位への影響を把握することを目的に実験を行った。

実験では、遠心加速度 70G の遠心場において、サンドホッパーにより、盛土を急速载荷した場合の地盤の変形量を求める為、地盤側面に設置した標点の移動量を、画像解析により計測することにより検討した。サンドホッパーを使用することにより、遠心場での载荷が可能で、実験地盤への急速载荷による、地盤の即時沈下および地盤の変形・破壊状況を再現することができる。

実験地盤にはカオリンクレイを使用し、载荷実験前に圧密荷重 39.9kPa により両面排水条件下で先行圧密を掛けたものに、2.8m の盛土（上载荷重 52.0kPa）を载荷することを想定した。改良杭にはアルミ棒を使用し、実験ケースに合わせて実験地盤に設置した。実験概要を図-3.3、実験ケースを表-3.2 に示す。

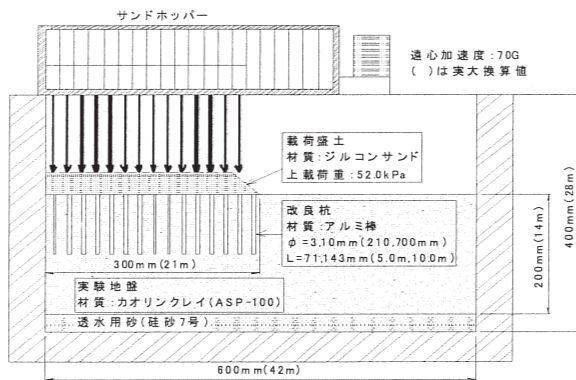


図-3.3 実験概要図

表-3.2 実験ケース一覧

実験ケース	杭径 (mm)	杭長 (m)	改良率 (%)	上载荷重 (kPa)	地盤強度 (kPa)	備考
Case1	-	-	-	52.0	39.9	無対策
Case2	210	5.0	3.0	52.0	39.9	改良率 (極低)
Case3	210	5.0	6.0	52.0	39.9	改良率 (低)
Case4	210	5.0	9.0	52.0	39.9	改良率 (中)
Case5	210	5.0	12.0	52.0	39.9	改良率 (高)
Case6	210	10.0	3.0	52.0	39.9	杭長 (長) - 改良率 (極低)
Case7	210	10.0	6.0	52.0	39.9	杭長 (長) - 改良率 (低)
Case8	210	10.0	9.0	52.0	39.9	杭長 (長) - 改良率 (中)
Case9	210	10.0	12.0	52.0	39.9	杭長 (長) - 改良率 (高)
Case10	700	10.0	13.3	52.0	39.9	杭径 (高) - 改良率 (低)
Case11	700	10.0	61.2	52.0	39.9	杭径 (高) - 改良率 (中)
Case12	700	10.0	32.9	52.0	39.9	杭径 (高) - 改良率 (高)
Case13	-	-	-	52.0	39.9	無対策

*Case13は含水比の違いが結果に影響を及ぼすか確認のために実施。結果、影響がない

この実験では、改良条件の差異による地盤変形への影響度を把握することを目的としており、画像解析結果から得られる地盤の変形量から、盛土底面の沈下土量 V_{ρ} 、盛土法尻から鉛直方向に仮想面を想定し、仮想面からの側方移動による流動土量 V_{δ} を算出した。また、盛土法尻付近で発生する、隆起土量 V_{μ} も算出した。水平・鉛直方向の各土量の分布を図-3.4~6、変形した土量を集計したものを表-3.3 に示す。

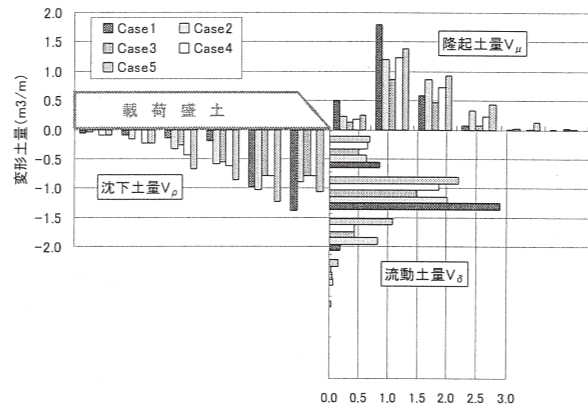


図-3.4 変形土量の分布 (Case1~5)

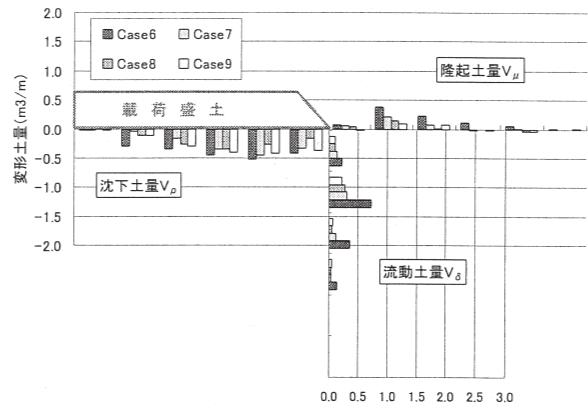


図-3.5 変形土量の分布 (Case6~9)

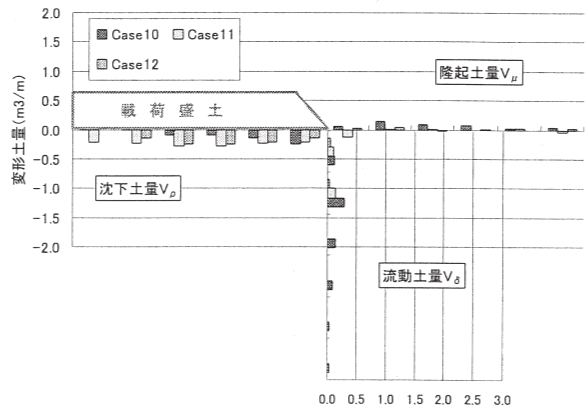


図-3.6 変形土量の分布 (Case10~12)

表-3.3 各実験ケースの変形土量

実験ケース	沈下土量 $V\rho$ (m^3/m)	隆起土量 $V\mu$ (m^3/m)	流動土量 $V\delta$ (m^3/m)	備考
Case1	3.00	3.26	4.03	無対策
Case2	3.19	2.84	3.55	改良率(極低)
Case3	2.49	1.74	2.51	改良率(低)
Case4	3.13	2.54	3.02	改良率(中)
Case5	4.33	3.31	4.19	改良率(高)
Case6	2.11	0.92	1.36	杭長(長)-改良率(極低)
Case7	1.41	0.42	0.53	杭長(長)-改良率(低)
Case8	1.16	0.17	0.43	杭長(長)-改良率(中)
Case9	1.70	0.14	0.45	杭長(長)-改良率(高)
Case10	0.19	0.44	0.72	杭径(高)-改良率(低)
Case11	1.57	0.03	0.19	杭径(高)-改良率(中)
Case12	0.97	0.07	0.07	杭径(高)-改良率(高)

- この結果より以下のことが分かる
- ① 図-3.4~6 より、地盤は盛土法尻付近での変形が大きく出ていることが分かる。今回の実験では Case1 (無対策) のケースでは、明確な円弧すべりが発生しており、実験地盤地表面より 5.0m (模型寸法では 7.0cm) 付近である。すべり破壊が発生したことにより、局所的な地盤変形であったため、表-3.3 に示した結果では、Case1 の沈下土量 $V\rho$ が Case2~5 のように改良したケースよりも、少ない結果となっている。
- ② 図-3.4 (杭長 $L=5.0m$) と図-3.5 (杭長 $L=10.0m$) を比較すると、同じ改良率でも、杭長が長くなることにより、顕著に地盤変形の低減に効果があることが分かる。今回の実験条件では、Case1 (無対策) のケースにおいて、5.0m 付近にすべり面が発生したこともあり、すべり面以深までの改良が重要であることが分かる。

続いて、各土量の相関を見るため、土量を比率で比較した結果を図-3.7 に示す。

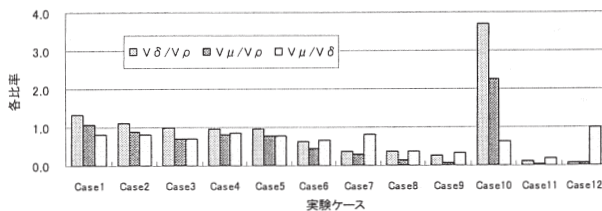


図-3.7 変形土量の比較結果

- この結果より以下のことが分かる。
- ① 図-3.7 の結果より、改良長 $L=5.0m$ の Case2~5 では $V\delta/V\rho \approx 1.0$ となり、沈下土量 $V\rho \approx$ 流動土量 $V\delta$ であることが分かる。この結果からも、すべり面付近までの改良では、地盤の圧縮変形による沈下よりも、側方流動により地盤が改良杭と共に流され、その結果、沈下が発生していることが

分かる。

- ② Case10 では、 $V\delta/V\rho > 1.0$ となっており、沈下土量 $V\rho$ よりも流動土量 $V\delta$ が大きく、これは、低改良率に加え、杭径が大きいことにより、杭間距離が広いことから、地盤のすり抜け現象が発生しているものと考えられる。

3.3 実験のまとめ

- 改良条件の違いから以下のことが分かる。

① 改良率による効果

今回の実験では、すべり面程度までの浅い改良 (杭長 5.0m) とすべり面以深までの深い改良 (杭長 10.0m) とでは、地盤変形に及ぼす影響が全く異なることが実験により確認できた。浅い改良では地盤の変形を抑制する効果が非常に低く、改良杭が地盤と共に押し流される現象が発生することもあり、改良率を高くしても地盤の変形には大きな影響がないことが分かった。深い改良では、改良率の増加により、地盤変形抑制効果が顕著に発生することが分かった。

② 杭長による効果

すべり破壊面を基準に、大きく効果が異なる。杭長はすべり破壊面より深い改良が必要であることが分かった。

③ 杭径による効果

Case9 と Case10 を比較しても、同程度の改良率、改良長であっても、杭径が違うことにより、地盤の変形状態が異なることが分かった。低改良率で杭径を大きくし、杭間距離が広がることにより、杭間の地盤のすり抜け現象が発生する。

4 間伐材の腐食に関する調査と検討

間伐材を地盤改良杭として使用する際、木材の腐食による強度低下が懸念される。そうした中、木材の経年による耐久性評価について、森林総合研究所では野外杭暴露試験が行われており、木材が腐食するのにどの程度の期間を要するのか報告されている⁴⁾。

4.1 木材の腐食による耐用年数の評価

木材の腐食の度合いの評価法として、被害度という指標が定義されているが⁵⁾、腐食による断面欠損を目視で判断するなどの定性的な評価基準である。ここでは、被害度-縦圧縮強さの関係、耐用年数-被害度の関係について林野庁より報告された結果から、耐用年数-縦圧縮強さを試算し検討した。表-4.1 に被害度の評価基準を示す。

表-4.1 木材の被害度の評価基準⁵⁾

被害度D _g	観察された状態
0	健全
1	部分的に軽度の被害
2	全面的に軽度の被害
3	2の状態の上に部分的に激しい被害
4	全面的に激しい被害
5	破壊

続いて、被害度と縦圧縮強さの相関を求めた研究結果があり⁴⁾、図-4.1にスギとカラマツについて、検討された結果を示す。

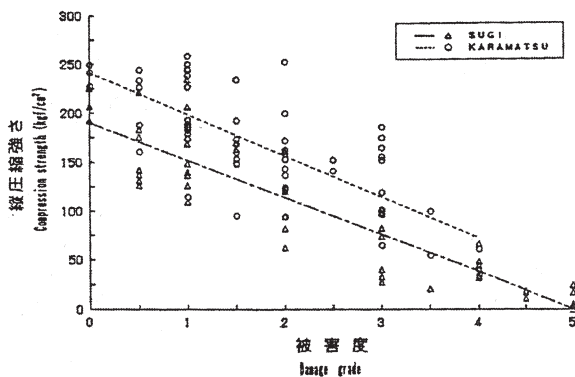


図-4.1 被害度と縦圧縮強さの関係⁴⁾

この結果より、被害度と縦圧縮強さの関係は直線近似関係であることが分かる。

定性的な表現である被害度を定量的に表現する指標として、生物量 W が提案されており、木材の容積に占める、木材を分解する生物量の割合を百分率で表現している。被害度ごとに容積密度の算出を行ない、Richards 生長曲線式による解析を行うことで、被害度と耐用年数との関係の試算が行なわれている。図-4.2に生長曲線式の内容を示す。

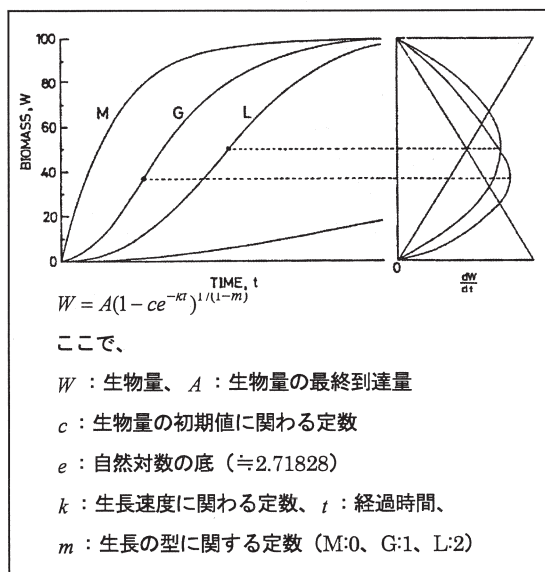
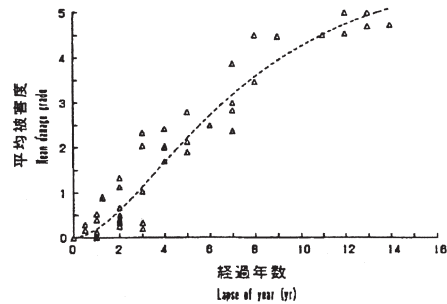


図-4.2 Richards 成長曲線式の式と図

スギとカラマツにおける、経過年数 t と被害度 D_g を試算した結果を図-4.3、図-4.4に示す。

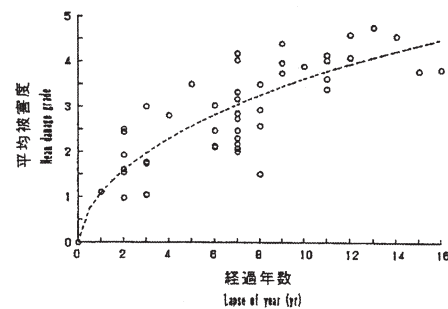


注) 回帰曲線 (Richards) 式:

Note) Richards' formula of the regression:

$$D_g = 5.95205 (1 - e^{-0.182493t})^{1/(1-0.48)}$$

図-4.3 スギの経過年数 t と平均被害度の関係 D_g



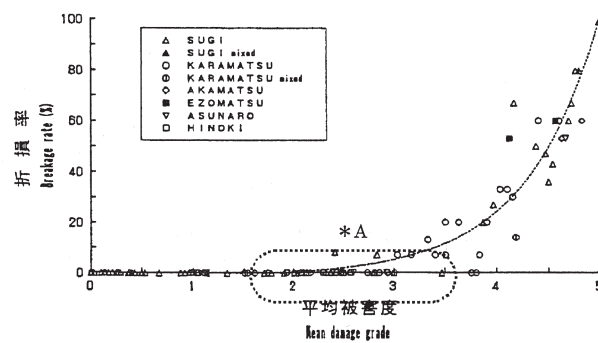
注) 回帰曲線 (Richards) 式:

Note) Richards' formula of the regression:

$$D_g = 7.62232 (1 - e^{-0.0307388t})^{1/(1+0.79)}$$

図-4.4 カラマツの経過年数 t と平均被害度 D_g の関係

続いて、被害度 D_g と折損率 F の関係を示したものを図-4.5に示す。



注) 回帰曲線 (Richards) 式:

Note) Richards formula of the regression:

$$D_g = 5 + \frac{1}{1.37693} \cdot \log_e \left(\frac{F+1.329}{101.329} \right)$$

図-4.5 平均被害度 D_g と折損率 F の関係

図-4.5より、平均被害度3程度の範囲(※A)であれば、杭の折損率も5%程度に抑えられており、平均被害度3を木材の腐食に対する限度と仮定すると、ス

ギの場合、図-4・3 の回帰曲線の逆算より経過年数は 6.6 年、カラマツの場合、図-4・4 より経過年数は 6.8 年であることが分かる。続いて、被害度 3 の場合の各素材の縦圧縮強さは図-4・1 より、マツは 7.45MPa (76.0kgf/cm²) カラマツは 11.41MPa (116.3kgf/cm²) となる。表-4・2 に結果をまとめる。

表-4・2 被害度 3 での木材の耐用年数、縦圧縮強さ

	平均被害度Dg	3
	折損率F	5.1
スギ	耐用年数(年)	6.6
	縦圧縮強さ(MPa)	7.45
カラマツ	耐用年数(年)	6.8
	縦圧縮強さ(MPa)	11.41

このデータは地表面付近での試算結果であり、杭としての利用を想定した場合、木は空気から遮断された環境であり、腐食に遅れが生じることが考えられ、7 年以上は耐用年数があると考えられるので、便宜上、耐用年数を 7 年として計算した。

4.2 木材の腐食による強度低下を考慮した沈下と円弧すべり

木材の腐食を考慮し、耐用年数-縦圧縮強度との関係を用いて、圧密沈下量の試算、円弧すべりの検討を行った。

地盤は、遠心実験で用いたカオリンクレイ (ASP100) と有明海沿岸道路工事での有明粘土の 2 ケースを想定した。木材はスギとカラマツを想定し、改良地盤は複合地盤とみなし、木材の初期せん断強度をスギ・カラマツの一般値である 7.85MPa (80kgf/cm²) と仮定し、試算では縦圧縮強度の低減率を考慮した。計算条件を表-4・3 と表-4・4 に示す。

表-4・3 試算で用いた想定条件 (地盤)

地盤特性	実験ケース	現場データ
	カオリンクレイ	有明粘土
圧密指数 Cc	0.63	0.4~0.6
粘着力 cu(kPa)	5.502+0.23×6.57×Z	7.9+1.2×Z
圧密係数 Cv(cm ² /day)	146.5	700

表-4・4 試算で用いた想定条件 (木材)

木材の初期せん断強度 (MPa)	7.85	木材
腐食を考慮した低減係数	0.40	スギ
	0.48	カラマツ
耐用年数経過時の木材のせん断強度 (MPa)	3.14	スギ
	3.77	カラマツ

カオリンクレイの遠心実験と有明粘土の有明沿岸道路工事での圧密終了に要する時間を試算した結果を表-4・5 に示す。この結果より、適切な改良深さ (木杭

の長さ) を設定すれば、圧密終了により地盤が安定するまでの期間、安全を確保することが分かる。

表-4・5 改良部の圧密に要する試算結果

カオリンクレイ		備考
【全盛土荷重を地盤で負担すると想定】		
排水距離:Hd(m)	2.5	木杭の改良深さ
時間係数:T	0.9	*90%圧密完了時
圧密係数:Cv(cm ² /day)	146.5	P=47.2kPa時
圧密時間:t	384	日
	1.1	年
【耐用年数から排水距離の試算】		
排水距離:Hd(m)	6.4	耐用年数から逆算
時間係数:T	0.9	*90%圧密完了時
圧密係数:Cv(cm ² /day)	146.5	P=47.2kPa時
圧密時間:t	2555	日
	7.0	年
有明粘土		備考
【有明粘土地盤の場合】		
排水距離:Hd(m)	11.0	最長ケースの長さ
時間係数:T	0.9	*90%圧密完了時
圧密係数:Cv(cm ² /day)	700.0	
圧密時間:t	1556	日
	4.3	年
【耐用年数から排水距離の試算】		
排水距離:Hd(m)	14.1	耐用年数から逆算
時間係数:T	0.9	*90%圧密完了時
圧密係数:Cv(cm ² /day)	700.0	
圧密時間:t	2555	日
	7.0	年

続いて、円弧すべりの検討を行った。試算では盛土の高さ、改良率、改良深さを変化させ、円弧すべり計算を行った。図-4・6 に概要図を示す。

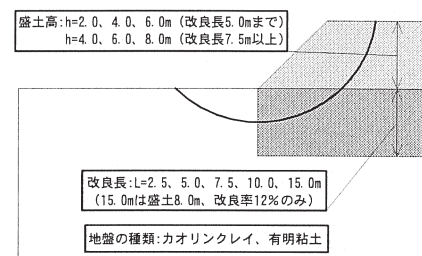


図-4・6 円弧すべり計算の概要図

円弧すべり計算より、各改良条件における、安全率 Fs を求めたものを表-4・6 に示す。

表-4・6 円弧すべりの安全率 Fs の試算結果

改良長L (m)	盛土高h (m)	無対策	カオリンクレイ				有明粘土				
			改良率a ₀ (%)				改良率a ₀ (%)				
			3	6	9	12	無対策	3	6	9	12
2.5	2.0	0.99	-	-	-	-	1.18	-	-	-	-
2.5	4.0	0.66	-	-	-	-	0.71	-	-	-	-
2.5	6.0	0.55	-	-	-	-	0.55	-	-	-	-
2.5	8.0	0.49	-	-	-	-	0.47	-	-	-	-
5.0	2.0	-	3.75	4.98	6.00	6.80	-	3.20	4.20	4.80	5.52
5.0	4.0	-	1.81	2.42	2.89	3.30	-	1.59	2.04	2.38	2.68
5.0	6.0	-	1.20	1.59	1.90	2.16	-	1.05	1.34	1.57	1.76
5.0	8.0	-	0.92	1.19	1.41	1.60	-	0.80	1.00	1.17	1.31
5.0	2.0	-	5.07	6.85	8.20	9.40	-	4.20	5.50	6.50	7.35
5.0	4.0	-	2.46	3.34	4.00	4.60	-	2.06	2.70	3.20	3.62
5.0	6.0	-	1.62	2.19	2.63	3.00	-	1.36	1.78	2.10	2.36
5.0	8.0	-	1.21	1.63	1.95	2.23	-	1.02	1.32	1.56	1.77
7.5	2.0	-	6.13	8.31	10.00	11.60	-	5.00	6.60	7.70	8.81
7.5	4.0	-	2.99	4.07	4.90	5.60	-	2.44	3.20	3.80	4.34
7.5	6.0	-	1.96	2.67	3.20	3.70	-	1.61	2.12	2.52	2.86
7.5	8.0	-	1.46	1.98	2.38	2.73	-	1.20	1.58	1.88	2.13
10.0	2.0	-	7.04	9.60	11.80	14.00	-	5.60	7.40	8.80	10.04
10.0	4.0	-	3.44	4.70	5.70	6.80	-	2.77	3.60	4.30	4.96
10.0	6.0	-	2.26	3.08	3.70	4.40	-	1.62	2.42	2.80	3.27
10.0	8.0	-	1.68	2.28	2.76	3.30	-	1.36	1.80	2.10	2.43

※Fs ≤ 1.0 は灰色、Fs ≥ 1.25 (一般的基準値) は太字で表示した。

これらの結果から、各盛土高での改良条件は以下のようになる。

- ① 盛土高 2.0m、4.0m で施工する場合
改良長 2.5m 以上、改良率 3%以上の軽度の改良でも地盤は円弧すべりが発生しない。
- ② 盛土高 6.0m で施工する場合
改良長 2.5m 以上で少なくとも改良率 6%以上が必要
- ③ 盛土高 8.0m で施工する場合
改良長 2.5m で改良率 12%以上、改良長 5.0m または 7.5m で改良率 6%以上、改良長 10.0m であれば改良率 3%でも円弧すべりは発生しない。

生産される間伐材の長さが 5m 程度であると考慮すると、盛土可能な高さは 2~6m の範囲であることが分かった。

5 最後に

5.1 間伐に要するコストについて

- ① 間伐材の生産費用は主材と比較し、ほぼ同程度であることが文献調査の結果分かった。しかし、市場価格と比較した場合には、特に小口径の間伐材は生産費用が市場価格を上回ることも分かった。これは、小口径の木材に対する需要の低さが原因であり、小口径の間伐材の有効利用法が提案できれば、解消できるものと予想される。
- ② 今回の研究で提案した短杭群による地盤改良工法は、既存の地盤改良工法と比較しても、改良長（杭長）5.0m 以下のものについては、試算の結果、作業コストが低いことも分かり、実用的であることも分かった。

5.2 短杭群地盤改良としての利用に関して

- ① 沈下量を抑制するには杭長の影響が大きく、今回の浮式地盤改良の場合、改良部以深の未改良部の沈下が支配的であることから、改良率の変化による影響と比較し、杭長の変化による影響が大きいことが原因である。
- ② 改良率 12%以下の低改良率では、杭間が広い（改良率 12%で杭間距離は 2.5D）こともあり、群杭効果を検討する基準の 2.5D 以上の杭間であったことから、群杭効果も発生せず、杭径の違いによる沈下量への影響は少ないことも分かった。
- ③ 改良地盤の側方変位に注目した実験では、すべり面付近までの浅い改良（今回は改良長=5.0m）では改良率の増減に関わらず、改良地盤全体が流動す

る現象が起き、側方変位量、沈下量の軽減に大きく影響しないことが分かった。むしろ、改良率の増加により盛土法尻付近での局所的な地盤変形が、地盤内へ影響範囲が拡大している様子も分かった。また、すべり面より深い改良では、改良率の増加に伴い側方変位量、沈下量ともに抑制され、杭の地盤改良効果を期待できたものと考えられる。

- ④ また、改良率が 30%を超えると、今回の実験地盤では、側方変位、沈下がほとんど発生せず、30%以上の改良率では地盤改良効果に大きな差は発生しないことも分かった。これは改良率が高い（改良率 30%で杭間距離は 1.6D）ことにより群杭効果が発生し、ブロック基礎のような振る舞いをした結果、杭 1 本あたりに作用する分担応力が低下したことが原因であると考えられる。

5.3 腐食による強度低減の影響について

- ① 間伐材の腐食による耐用年数は約 7 年ということが、今回の検討の結果分かった。盛土を載荷した初期の段階では、円弧すべり・支持力破壊等の抵抗力として杭の強度は重要であるが、杭の耐用年数内に圧密が進行し、地盤強度が増加することを想定すると、十分な期間であると考えられる。
- ② 円弧すべりの試算結果から、生産される間伐材の長さが 5m 程度であることを考慮すると、盛土可能高さは 2~4m の範囲であることが分かった。

参考文献

- 1) (社)日本林業協会、図説：森林・林業白書—新たな「木の時代」を目指して—、平成 16 年 7 月、p149~166
- 2) 林野庁、平成 12~16 年度素材生産費等調査報告書、平成 13~17 年
- 3) (財)土木研究センター、陸上工事における深層混合処理工法設計・施工マニュアル改訂版、平成 16 年 3 月、p32~35
- 4) (社)日本木材保存協会、木材保存 Vol. 19-1、「富山県における治山木杭の耐久性（第 1 報）—柵工におけるスギ及びカラマツ木杭の耐用年数について—」、平成 5 年 1 月、p13~22
- 5) (社)日本木材保存協会、木材保存 Vol. 17-1、「野外杭試験と室内耐朽性試験の関係」、平成 3 年 1 月、p17~25