

第6章 戸建て住宅を対象とした浅層盤状改良工法の経済性評価

6.1 概要

本章では、第4章および第5章で得られた知見に基づいた浅層盤状改良のコストについて試算を行ったものである。

本研究で述べている浅層盤状改良工法は、地盤の浅層部分を盤状に液状化しない状態に地盤改良する方法である。地盤改良による液状化対策の原理については文献 1)などにも示されているが、一般には図 6.1.1 に示されるように、地盤が液状化するために必要な条件を取り除くような原理に基づくものである。一方、わが国で実施されている地盤改良による液状化対策工法は図 6.1.2 に示すような工事件数の分布を示しており、「締固め」「固結」「間隙水圧消散」が主な工法であることがわかる。各工法の原理と、特徴、今回の試算で想定した工法の概要については 6.2 で述べることとする。

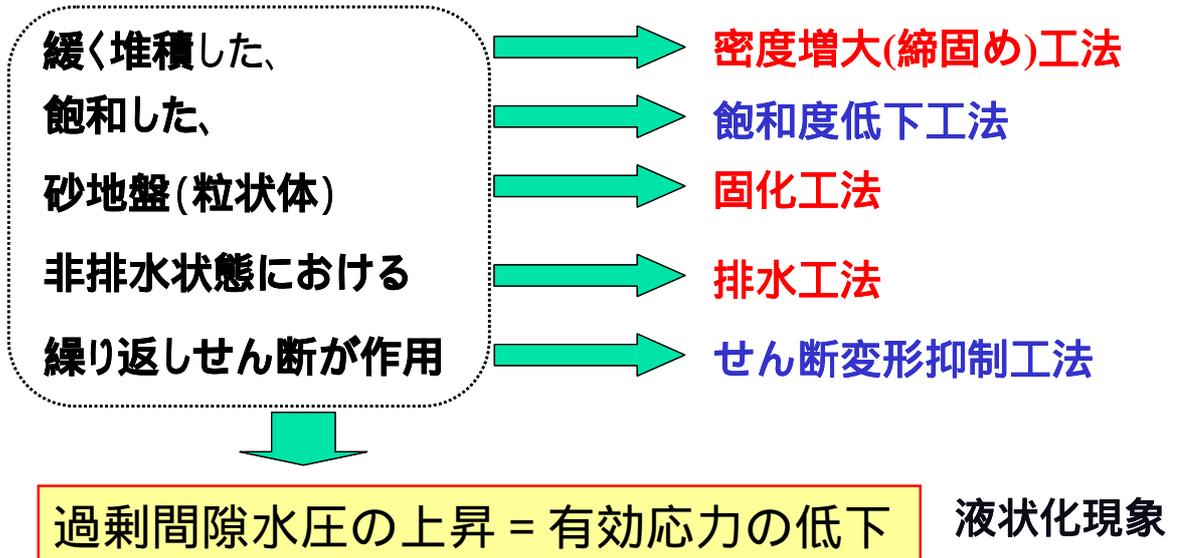


図 6.1.1 地盤が液状化する条件と地盤改良の原理

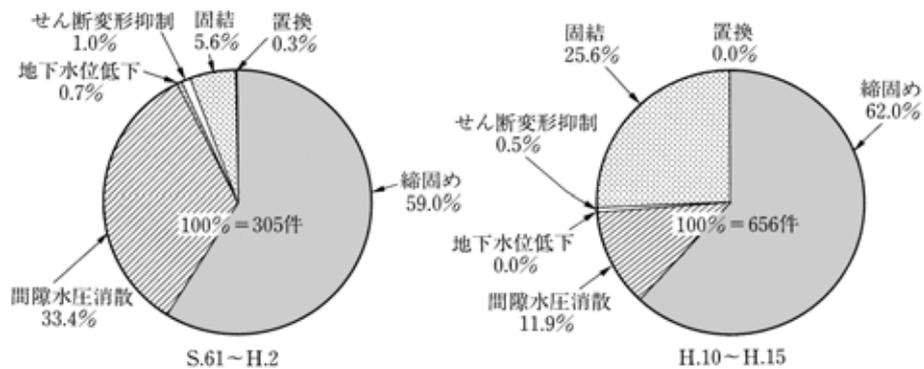


図 6.1.2 わが国における液状化対策工法の実績件数 1)

一般に、地盤改良のコストの算出において、いわゆる経費等を除いた直接工事費は施工費と固定費に分けられる。施工費とは実際に地盤改良の改良体を施工する費用で施工機械の損料（一日当たりの運転経費）や材料費などから算出される。一方、固定費は地盤改良の施工機械を運搬したり組み立てる費用となる。また、既設の戸建て住宅の周辺や直下に施工する際には、外構の撤去や建物内部の養生が必要になる場合があり、それらの補修費用なども必要になるため、本研究ではそれらも加味して算出した。

施工費は、地盤条件や建物の大きさによって1軒あたりの地盤改良数量が異なれば変動し、さらに、施工現場の環境による施工能率によって変動する費用であるが、固定費は地盤改良の数量に寄らず必要な費用となる。これも、現場へアクセスできる道路の事情や地盤改良施工機械を出庫するモータープールからの距離などによって変動するものである。固定費は、同一現場内で地盤改良を1箇所施工しても100箇所しても一定に発生する費用になる。

上述したように、コスト試算は設定する条件によって大きく異なるので、ここではある一定の条件を仮定して試算を実施することとした。比較のためのパラメータとしては、施工面積（戸数）、改良深さとした。また、本研究では既設戸建て住宅の液状化対策を目標としているが、ここでは、比較のために新設も含めることとした。

6.2 浅層盤状改良に適用する地盤改良工法

地盤の浅層部分を液状化しないようにする方法としての地盤改良による液状化対策工法は、前述したとおりわが国で実績の多い工法原理から3つの原理を抽出した。すなわち、密度の増大により液状化強度の増加を図る「締固め工法」、地盤の固結により液状化強度の増加を図る「固化工法」、地震時に発生する過剰間隙水圧の消散を原理とした「排水工法」である。以下にそれらの原理と設計方法および適用できる工法について説明する。

6.2.1 締固め（密度増大）による液状化対策

(1) 原理

締固めによる液状化対策は、地盤を締め固めることにより、砂粒子間の間隙を小さくするとともに、堆積状況の変化（地中の応力状態や地盤の均質化）などを図ることにより、地盤全体として液状化に対する抵抗を増加させる方法である。図 6.2.1²⁾は相対密度とせん断応力比の関係を示したものである。実験は細粒分を含まない細砂に対する非排水繰返しせん断試験の結果であり、相対密度の増加とともに液状化抵抗（せん断応力比）が増加し、特に、相対密度が80%程度を超えると急増することが示されている。また、図 6.2.2³⁾は中空円筒ねじりせん断試験装置を用いて、側方ひずみがゼロになるように制御しながら、サイン波形の両振りせん断を加えたもので、相対密度および初期鉛直応力を一定にして、初期静止土圧係数 K_0 を3通りに変化させた場合の結果を初期有効平均応力に対するせん断応力比の関係として示したものである。この図から、せん断応力比は K_0 の値に係らずほぼ等

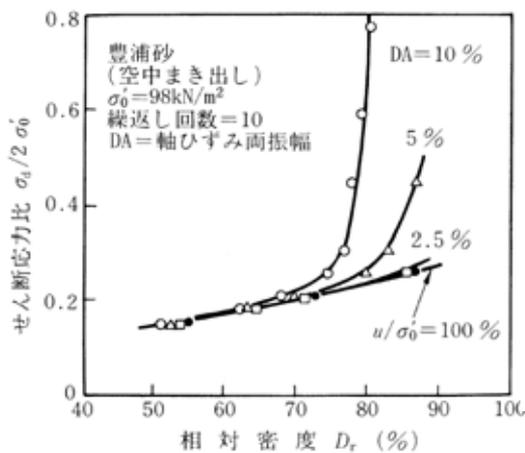


図 6.2.1 相対密度とせん断応力比の関係²⁾

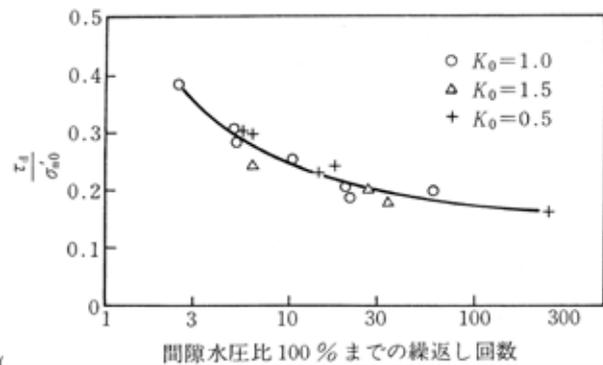


図 6.2.2 有効平均主応力で整理したせん断応力比³⁾

しい値を示していることがわかる。

締固めによる液状化強度の増加原理として上記の実験結果などが参考になる。

緩い砂地盤を締め固めて砂粒子間の間隙を小さくする有効な方法としては衝撃および振動締固めや材料の圧入締固めがある。大型の土木工事などでは衝撃や振動による締固め方法を採用する場合も多いが、ここでは宅地の液状化対策を考えているので、周辺環境への影響に配慮する必要がある、周辺環境への影響が比較的少ない静的締固めタイプと静的圧入タイプを対象とした。

(2) 設計

圧入締固めによる設計法は中空管を地盤中に貫入して砂を圧入するサンドコンパクションパイル工法の設計法としてこれまで多くの研究がなされてきた。実績に基づいた調査結果を整理した結果から、改良効果を予測するパラメータとして原地盤の強度、細粒分含有率、砂の圧入率が挙げられている⁴⁾。その相関関係から、設計の基本的な考え方として図 6.2.3 に示すように、圧入した砂の量に相当する地盤の間隙の減少によって密度が増大するという概念が整理されている。その後、細粒分含有率の影響を合理的に判断できるように図 6.2.4(左)のフローに示される方法が提案⁵⁾され、さらに、施工時に地盤表面が盛り上がることを考慮した図 6.2.4(右)に示す方法が提案⁶⁾されている。本研究で対象とした静的締固めタイプや静的圧入締固めタイプにおいてもこれらの設計法が適用されている。

設計上の留意点としては、細粒分の含有率によって改良後の効果が大きく影響されるため、事前の段階でこれらを十分に把握するように努めることが必要である。

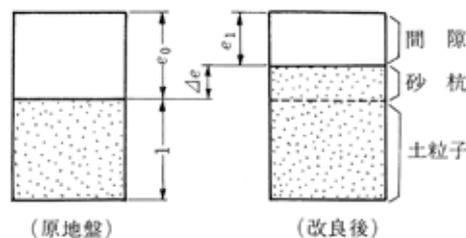


図 6.2.3 砂質土に対する圧入締固めの改良原理



正方形・矩形配置

$$a_s = \frac{A_s}{A} = \frac{A_s}{x^2} \quad \text{or} \quad \frac{A_s}{x_1 \cdot x_2} \quad (1.1)$$

三角形配置

$$a_s = \frac{A_s}{A} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{A_s}{x^2} \quad (1.2)$$

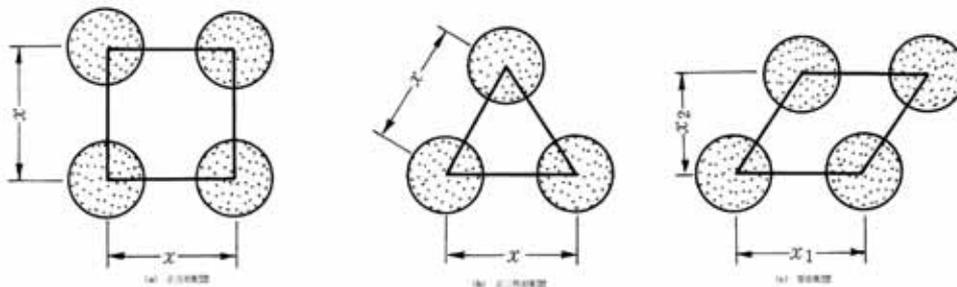


図 6.2.4 圧入締固め工法の設計法

(3) 施工方法

静的締固めタイプ

静的締固めタイプは周辺への振動・騒音等の環境影響に配慮した油圧モーターを用いて中空のケーシングパイプを地中の所定の深さまで貫入し、地盤中で砂を排出しながらケー

シングパイプを一定長さ引抜いた後に打ち戻して締め固めるといった動作を繰り返しながら、周辺地盤と排出した砂を締め固める工法である。図 6.2.5 に施工手順の模式図を示す。本工法では、既設戸建て住宅の直下の施工は不可能であり、新設の場合が対象となる。

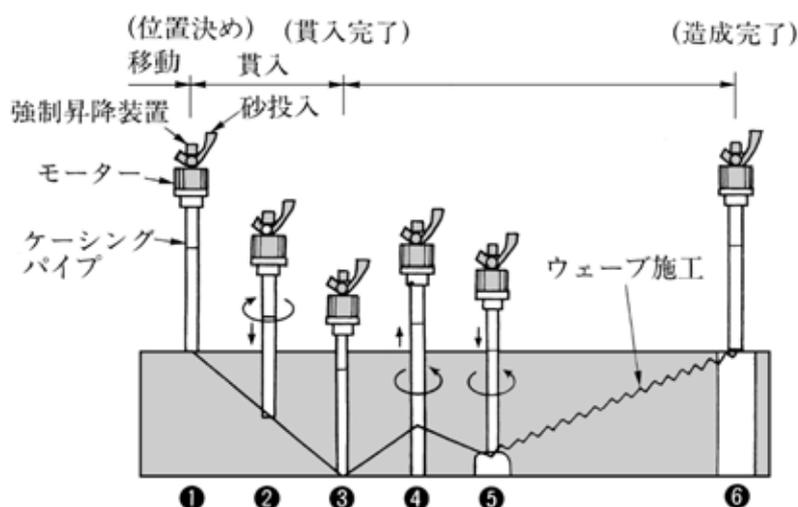


図 6.2.5 静的締め固めタイプの施工手順

静的圧入タイプ

静的圧入タイプは小径のロッドを地中に貫入し、砂やモルタルなどの材料を特殊注入ポンプを用いて地盤中に圧入する工法である。ボーリングマシンなどのような施工機械の小型化が可能で、斜め削孔や曲がり削孔の技術なども開発されている。したがって、既設戸建て住宅の直下においても対策が可能となるが、斜め削孔の場合には、建屋周辺にある程度の空間があることが必要になる。図 6.2.6 に施工手順の模式図と図 6.2.7 に斜め施工の模式図を示す。

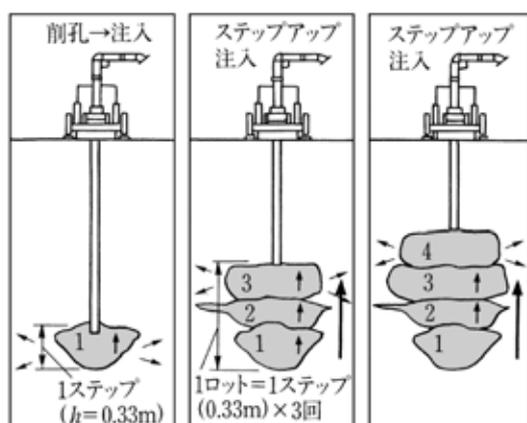


図 6.2.6 静的圧入タイプの施工手順

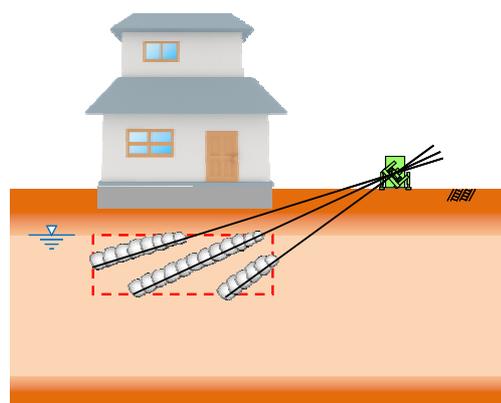


図 6.2.7 斜め施工の模式図

(4) 留意点

締固めによる液状化対策の場合には、適用については以下の点に留意する必要がある。

施工時の変位

工法の原理上、材料を地盤中に圧入して地盤を締め固めるため、地盤の隆起や側方への変位の発生が懸念される。特に、既設戸建て住宅の場合には隣家や外構などとの関係を十分に確認する必要がある。

改良効果の発揮

圧入による地盤の締固め効果は地盤特性によって変化する。設計でも述べているが細粒分含有率の大きな地盤などでは締固め効果を発揮するために多くの圧入をする必要がある。さらに、そのような地盤の場合には地盤変位が発生しやすくなるため、さらに留意が必要になる。

6.2.2 固化による液状化対策

(1) 原理

固化による液状化対策は、砂質土にセメントなどの安定剤を添加、混合あるいは注入して砂質土の液状化抵抗を増加させる工法である。図 6.2.8⁷⁾はまさ土および秋田外港砂に対してセメントを添加して改良を行った場合の繰返し三軸試験結果である。これによると、未処理土として示されている改良前の液状化抵抗は、セメントを 5%程度添加することによって 4 倍程度大きくなるのがわかる。このような固化工法の改良原理については、その固結状況にもよるが、以下のように説明されている。

粒子構造の安定化：セメント等の安定材を砂質土に添加・混合すれば図 6.2.9 のように砂粒子が結合し、粒子構造が外力に対して安定となる。したがって、地震外力に対しても粒子構造が安定していれば、過剰間隙水圧の発生が抑制されて液状化が起こらないというものである。

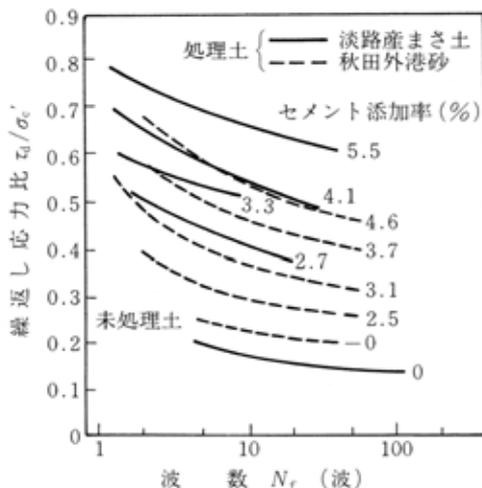


図 6.2.8 セメント添加による液状化抵抗の増加

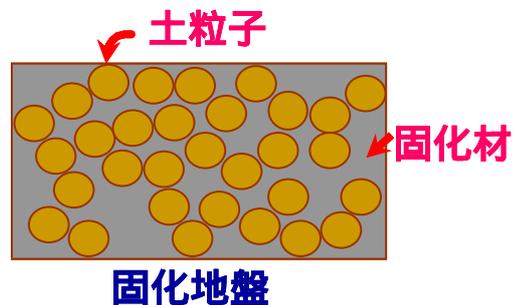


図 6.2.9 固化された地盤の模式図

粘着力の付加：セメント等の安定材の添加・混合によって砂質土に粘着力が付加されることによって、地震外力によって過剰間隙水圧が発生し仮に有効応力が失われても地盤は粘着力で外力に抵抗できるので液状化による被害は発生しないというものである。

間隙水の置換：薬剤の浸透注入などの場合には、土粒子間の間隙水がゼリー状の粘性の高いものに置換されることによって過剰間隙水圧の発生を抑制する効果⁸⁾や、ダイレイタンシー特性が緩い砂から密な砂の特性に変化することによって液状化しにくくなるという効果⁹⁾も得られている。

地盤を固化する方法には、セメント等の安定材を地盤に添加・混合することであるが、その方法としては一般に攪拌混合処理工法や薬液による注入工法（注入固化工法）などが挙げられる。攪拌混合処理工法は図 6.2.10 に示すように機械式攪拌混合と高圧噴射式攪拌混合に分類できる。さらに、機械式攪拌混合には深層混合と浅層混合などに分類できる。浅層混合処理工法は図 6.2.11 に示すように改良厚さによって施工機械や施工方法が細分化されている。ここでは、1.5～4.5m 程度の改良を想定していることから、中層混合処理工法を対象とした。また、既設戸建て住宅の場合には、建屋内部からの施工を想定した高圧噴射攪拌工法と斜め施工が可能で施工機械も小さい薬液注入固化工法を想定した。



図 6.2.10 攪拌混合処理工法の分類

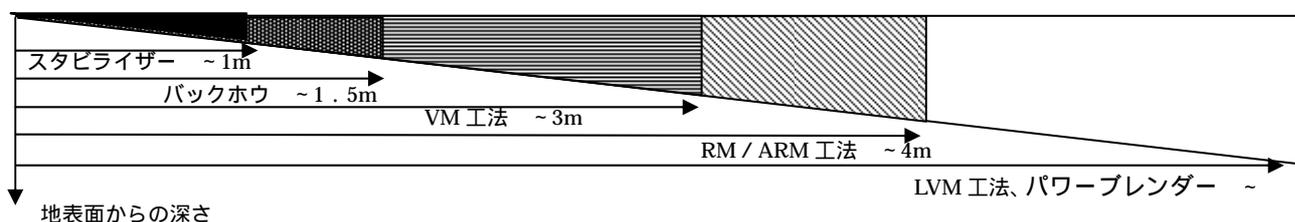


図 6.2.11 浅層混合処理工法の施工方法

(2) 設計

図 6.2.12¹⁰⁾にはセメント添加量と一軸圧縮強さの関係の例を示す。一般に中層混合処理工法や高圧噴射攪拌工法でセメント混合された改良土は少なくとも一軸圧縮強さで $q_u=300$

～500kPa の強度を有するように設定されている。この程度の強度があれば改良土そのものが液状化することは無い。したがって、この程度の強度発現が可能なようにセメントの添加量を設定する必要がある。セメント添加量の設定については、事前に地盤調査を実施して強度発現に影響を与える特性の有無についての基礎資料を得ると共に、室内配合試験を実施してセメントの添加量を設定するのが望ましい。図 6.2.13¹⁾には室内配合試験のフローを示すが、この際にセメント安定処理土からの溶出が懸念される六価クロムなどの環境物質の溶出についても確認し、万が一認められる場合には添加するセメントの種類を検討するなどの措置が必要となる。

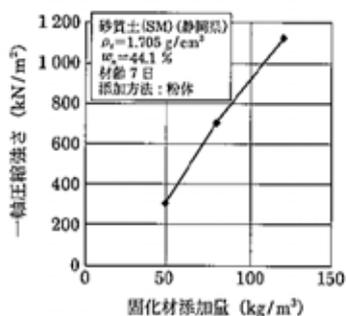


図-2.9 添加量と一軸圧縮強さ (砂質土)

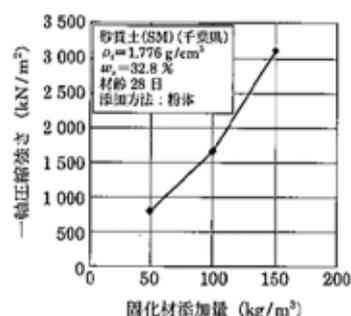


図-2.10 添加量と一軸圧縮強さ (砂質土)

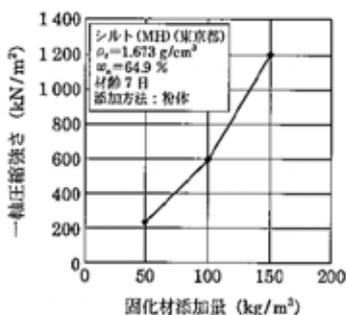


図-2.11 添加量と一軸圧縮強さ (シルト)

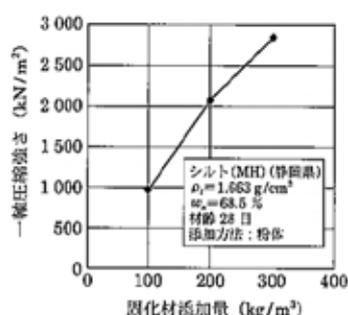


図-2.12 添加量と一軸圧縮強さ (シルト)

図 6.2.12 セメント添加量と一軸圧縮強さの例

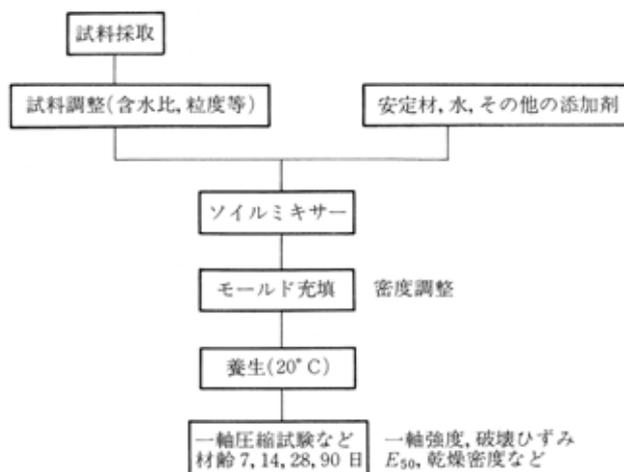


図 6.2.13 配合試験フローの例

また、薬液による固化工法では施工性などから一般に溶液型の薬液が使用されており、この場合の一軸圧縮強さと繰返しせん断応力比の関係は図 6.2.14¹¹⁾のように得られている。これまでの施工実績では、設計基準強度には $Rl_{20.5\%} = 0.3 \sim 0.6$ に対応する値として、50 ~ 100kN/m² 程度の値が用いられている。

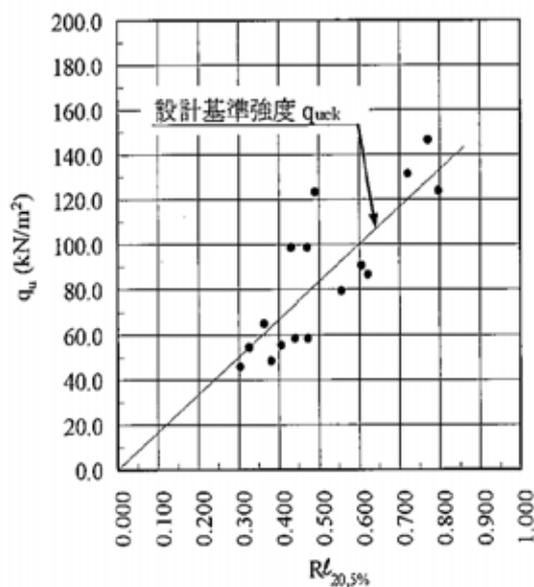


図 6.2.14 溶液型薬液注入改良土の一軸圧縮強さと繰返しせん断応力比の関係

(3) 施工方法

中層混合処理タイプ

中層混合処理工法は図 6.2.15 に示すようにバックホウ前面のアタッチメントにトレンチャーのような攪拌機構を有したのものや、回転する羽（ブレード）を装備したものなどがある。施工機械は改良する深さによって大きさが変わる。本工法では既設建物直下の施工は不可能であり、新設の場合の適用工法となる。

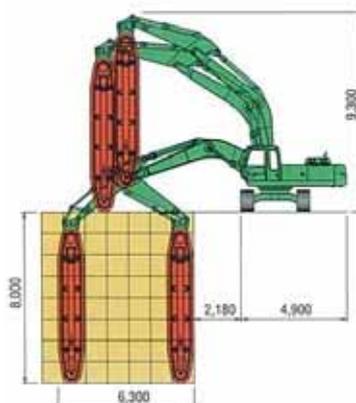


図 6.2.15 中層混合処理タイプの施工機械例

高圧噴射攪拌タイプ

高圧噴射攪拌工法は径の細いロッドを地盤中に貫入し、ロッド先端からスラリーを高圧で吐出することによって地盤を切削混合して固化材を形成するものである。一般には、単管や二重管、三重管などを用いた方法が使い分けられており、工法に応じて大小様々な仕様の改良体を造成する。ロッドを地盤中に貫入することによいので、他の固結工に比べて施工機械のコンパクト化を図ることが可能である。近年では、既設戸建て住宅での対策工事に対応した技術が開発されており、図 6.2.16 に示すように、従来技術と同等以上の改良品質を確保しながら、狭隘空間での施工を可能とする超小型機械も活用されている。



図 6.2.16 超小型の高圧噴射攪拌施工機¹²⁾

薬液注入タイプ

薬液の注入は地盤中に貫入したロッドから低圧で薬液を地盤中に浸透させるものである。斜め注入や曲がりボーリングを用いて建物直下までロッドを誘導して施工する場合もある。本工法の場合には、薬液の浸透性に影響を与える、地盤の細粒分含有率、土層特性、地下水の流れ等の把握が重要になる。最も重要な検討項目は細粒分含有率で、細粒分含有率が40%以上では適用不可、25～40%の場合には改良土の不均一性が増すので十分な注意が必要である。その他、改良対象範囲に粘性土が互層にある地盤、貝殻混じりの地盤、礫混じりの地盤、地下水の流れの速い地盤では改良地盤の均一性やゲルタイムなどに影響が生じるので留意が必要である。

6.2.3 排水工法による液状化対策

(1) 原理

排水工法（間隙水圧消散工法）は、礫や人工材料によるドレーンを地盤中に設置することにより地盤の透水性を高め、地震時の砂質土内で発生する過剰間隙水圧の上昇を抑制して液状化を防止するものである。図 6.2.17¹³⁾ に示すように、地盤全体としての透水性を高

めれば地震動に伴う繰返しせん断による過剰間隙水圧の蓄積速度が小さくなり、その結果、地震動継続中には液状化に至らない。また、地震終了時に地盤内に残留した過剰間隙水圧は、その後、分布を変えながら次第に消散していく。また、水圧の速やかな消散のために、ドレーン頭部からの排水にも配慮する必要があり、一般には、砕石マットなどを敷設してドレーン頭部からの排水を速やかに水平方向に開放するようにしている。

排水工法の場合には、締固めや固化のように地盤強度そのものを増加させるものではないため、排水効果によって過剰間隙水圧の抑制が図られていれば液状化による構造物への影響を抑止できるが、地震動の大きさや継続時間等によって地盤内に蓄積される過剰間隙水圧が一定値以上になった場合には、地盤剛性の低下を招くことがある。そのために、締固めと併用したような施工方法¹⁴⁾なども開発されている。

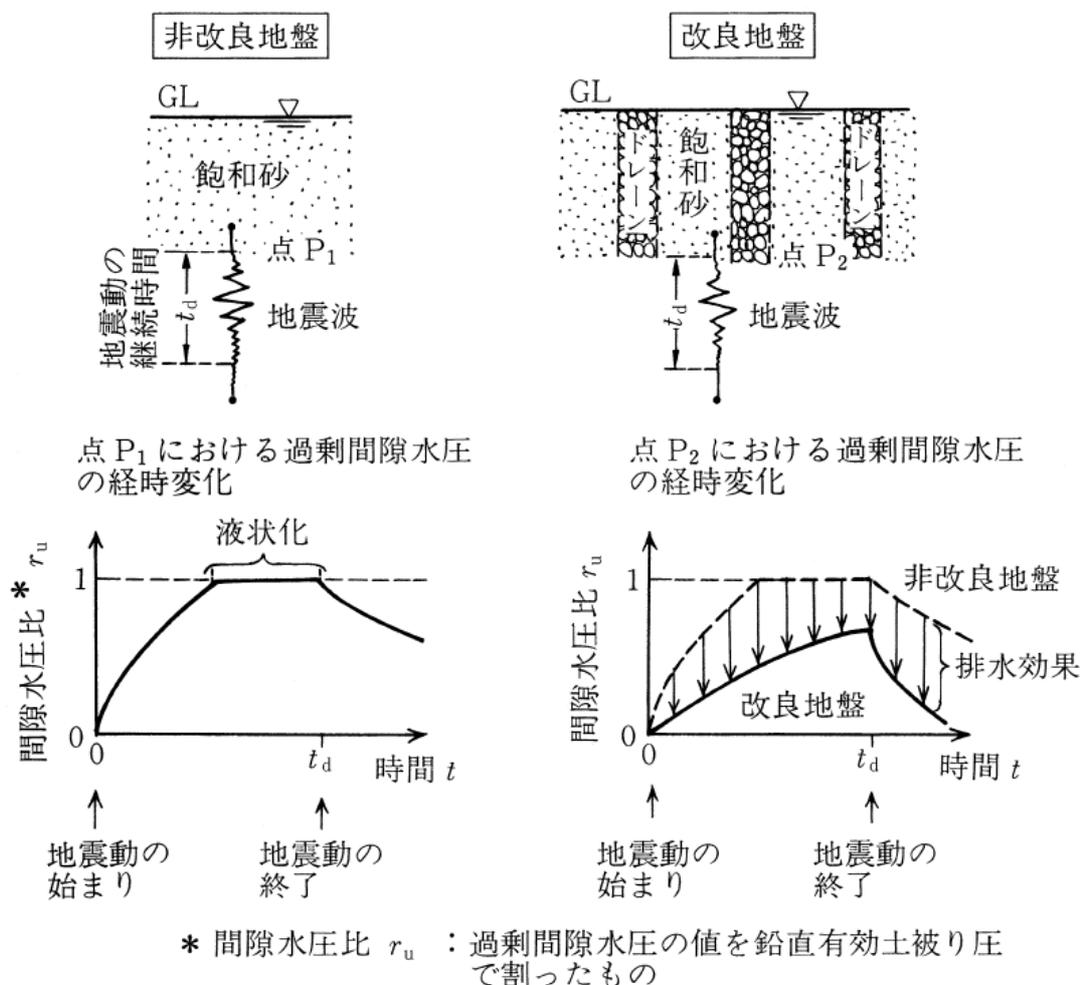


図 6.2.17 排水（間隙水圧消散）工法の液状化防止効果の模式図

(2) 設計

排水工法の設計は、碎石などの高い透水性を有する材料からなるドレーンを砂質土地盤中に柱状に打設するもので、1977年に Seed ら¹⁵⁾によってグラベルドレーンの設計法が提案された。これは、ドレーンによる改良地盤の地震時挙動を軸対象問題として解析的に扱ったもので、水平方向の浸透のみを考慮した過剰間隙水圧の発生を地盤の透水係数と地盤の体積圧縮係数をパラメータにした浸透流の基本方程式によったものである。また、繰返しせん断によって発生する過剰間隙水圧は、De Alba¹⁶⁾の実験式を用いている。ここで、地震動の有効継続時間を設定する必要があるが、過去の地震記録から地震のマグニチュードと地震動の有効継続時間の関係が時松ら¹⁷⁾によって示されており、一般にはこれが用いられている。図 6.2.18¹⁸⁾には一般に用いられている設計フローを示す。

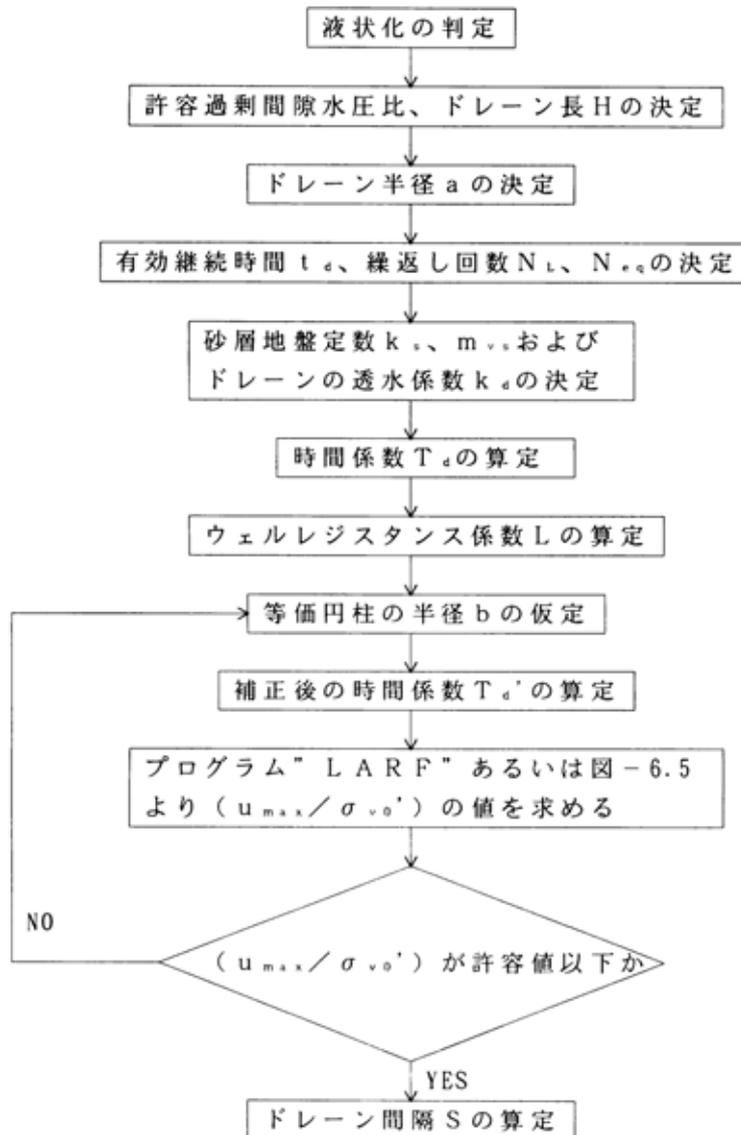


図 6.2.18 排水工法（グラベルドレーン）の設計フロー

(3) 施工方法

砕石を用いた排水工法（グラベルドレーン工法）は、中空のケーシングパイプを地盤中に打設して砕石をケーシングパイプの先端から排出することによって砕石の柱を地盤中に設置する。鉛直方向の施工によるため、既設建物の直下の施工は不可能である。

また、用いる砕石の透水係数は改良効果に大きく影響する。したがって、粒径が大きく透水性能の高い材料を用いる必要がある。しかしながら、粒径が大きすぎる場合には目詰まりが生じて透水性の低下を生じる場合もある。特に、地震時の圧力消散によって地盤中の細粒分が砕石に入り込むことによる目詰まりには十分留意しなければならない。したがって、フィルター材の選定基準¹⁹⁾²⁰⁾や目詰まり試験²¹⁾などによって適切な材料選定が必要になる。十分に吟味された砕石材料によって改良された地盤において、1993年の釧路沖地震後に液状化防止効果を発揮した砕石杭の掘り起こし調査を実施した結果、目詰まりなどの現象が生じていなかったことが確認され報告されている²²⁾。

6.2.4 本研究で対象とした液状化対策工法

液状化を防止する工法について表 6.2.1 に示す。表 6.2.1 には工法の概要や適用性について整理して示した。本研究では前述のように実績が多い代表的な液状化対策の工法原理として「締固め」「固化」「排水」を選定し、表 6.2.1 から適用できる具体的工法を選定した結果、既設戸建て住宅の浅層盤状改良に適用できる工法を選択することとした。ただし、検討は経済性の比較のために新設についても実施することとし、表 6.2.2 に示す工法についてコスト試算を実施することとした。

表 6.2.1 液状化防止工法

分類	原理	具体的な工法	概要	適用		適用に関する事項				留意事項
				新設	既設	施工中の周辺影響			施工機械の大きさ	
						振動	騒音	地盤変位		
液状化の防止	締固め (密度増大)	動的締固め工法	砂などの材料を地盤中に圧入することによって周辺地盤を圧縮して密度の増大を図る		×	大きい	大きい	留意が必要	大	地盤の細粒含有率などによって締固め効果異なる。
		静的締固め工法			×	小さい	小さい	留意が必要	大～中	
		圧入締固め工法				小さい	小さい	留意が必要	小	
	固化	中層混合処理工法	固化材と地盤とを攪拌混合して地盤を固化させる		×	小さい	小さい	小さい	大～中	セメントの混合量などを事前に確認する必要がある。
		薬液注入工法 (浸透注入工法)				小さい	小さい	小さい	小	
		機械式攪拌工法			×	小さい	小さい	留意が必要	大～中	
		高圧噴射攪拌工法				小さい	小さい	留意が必要	小	
	せん断変形抑制	格子状改良	地盤を格子状に囲み地震時あるいは液状家事の地盤のせん断変形を抑制して液状化の発生を抑制する			小さい	小さい	留意が必要	大～中	格子の間隔によって液状化の抑止効果が変わる
		セル状人工材料			×	小さい	小さい	留意が必要	小	
	排水 (間隙水圧消散)	グラベルドレーン工法	地震時に地盤内に発生する過剰間隙水圧を速やかに消散して液状化を防ぐ		×	小さい	小さい	小さい	大～中	表層に排水層が必要になる
		人工材ドレーン工法			×	小さい	小さい	小さい	大～中	
	地下水位低下		地下水位を低下し、不飽和層を表層付近に設けるとともに、地盤内の有効拘束圧を増加させ液状化抑制する			小さい	小さい	留意が必要	小	地下水位低下に伴う地盤沈下などへの留意が必要。また、地下水位を一定に保つための維持管理が必要
載荷盛土		表層の非液状化層を厚くするとともに地盤内の有効拘束圧を増加させ液状化を抑制する工法		×	小さい	小さい	留意が必要	小	載荷盛土による周辺地盤の変状などについて確認が必要	
飽和度低下		空気や泡の混入した水を地盤中に注入したり真空で吸引することによって部分的に飽和度を低下させ液状化抑止をする			小さい	小さい	小さい	小	長期の安定性の確認が必要	
過圧密	真空吸引	液状化層を過圧密にして液状化強度を増加させる			小さい	小さい	小さい	小	過圧密効果の定量的評価の確認が必要	

表 6.2.2 コスト試算する工法

工法原理	工法	新設	既設
密度増大工法 (締固め工法)	静的締固めタイプ		×
	静的圧入タイプ		
固化工法	中層混合処理工法		×
	高圧噴射攪拌工法	×	
	薬液注入工法		
排水工法	砕石杭工法		×

新設の場合には中層混合処理に比べて高価になるため経済性の評価は実施せず

6.3 経済性の評価

6.3.1 経済性の評価手順

6.2で抽出した工法についてコスト試算を実施する。地盤改良のコストは、地盤条件、外力条件などの設計に起因するものと、現場条件や周辺環境などの施工に起因するもので変化する。ここでは、地盤条件については4章の実験で扱った地盤を想定することとした。また、施工に起因する条件として施工面積をパラメータにコストの試算を実施し、1戸あたりのコストをそれぞれ比較して示すこととした。図6.3.1²²⁾には一般の地盤改良の施工面積と1m²あたりの地盤改良コストを試算したものである。これによると、1000m²を超えると従来の大型施工機械での施工が可能であり、それ以下になると種々の制約条件によって施工費用が上昇することがわかる。

本研究では、一般的な工事スケールを想定するために20戸のケースを設定し、それ以下については最も小さな単位である1戸の場合と、スケール差を照査するために3戸の場合を設定してコスト試算を行った。

施工面積：1戸（150m²）、3戸（450m²）、20戸（3000m²）

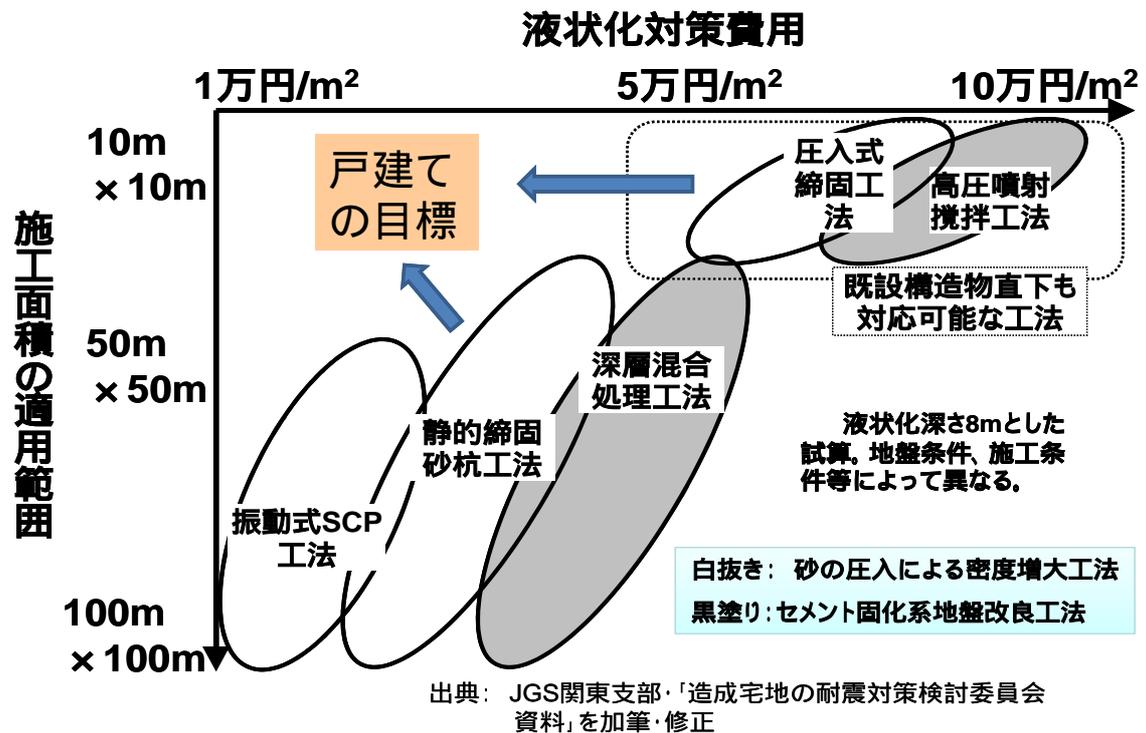


図 6.3.1 施工面積と液状化対策のコスト

6.3.2 各工法的前提条件・仮定条件

コスト試算を行うにあたって想定した条件は以下のとおりである。

(1) 共通の仮定条件

地盤条件

- ・4章の地盤モデルを想定し、相対密度 50%、地下水位 1m、細粒分の少ない細砂

改良に関する条件

- ・4章、5章で設定した結果に対応できるよう、改良厚さを 1.5m、3.0m、4.5m の 3 通りとした。

現場条件

- ・施工基盤は特に支障の無いものとした。
- ・既設の場合の隣家や外構については施工に支障となるものは特に無いものとした。
- ・現場までの搬入路には障害が無く、施工機械の運搬、材料の運搬について特別な措置を施す必要は無いものとした。
- ・地中に施工の障害となるようなものは存在しないものとした。
- ・プラントや材料の置き場などについては支障なくできるものとした。
- ・施工に際しての補助工法などは特に必要ないものとした。

周辺環境

- ・周辺に施工上配慮すべき施設等はなく、施工時間は昼間 9 時から 17 時まで 8 時間を確保できるものとした。
- ・現場作業員等は通勤できるものとした。
- ・使用する水や排水などに関する制約は無いものとした。

その他

- ・コスト試算に際しての材料費や機械損料などについては 2012 年 6 月号建設物価版²³⁾、平成 23 年度機械損料算定表²⁴⁾などを参考にした。

(2) 締固め工法の仮定条件

- ・締固め工法の改良率は 10% (正方形配置 2.0m) とし、1 戸あたりの本数は 36 本とした。
- ・締固め工法は、砂の圧入により密度の増大を図る原理であるため、平面的にも深度的にも局所的な圧入で実施することは少ない。したがって、1.5m 程度の改良厚さでは十分な密度増加効果が得にくいため実務上は用いられることは無い。そのため、最低改良厚さは 3m とした。したがって、コスト試算したケースは 3.0m と 4.5m である。
- ・静的締固めタイプは鉛直施工とし、新設のみに適用するものとした。
- ・静的圧入タイプは、新設においては鉛直施工、既設においては斜め施工によるものとした。

(3) 固化工法の仮定条件

- ・中層混合処理タイプは鉛直施工とし、新設のみに適用するものとした。
- ・中層混合処理タイプの改良強度は 400kN/m² とした。

- ・高圧噴射攪拌タイプは、既設のみに適用するものとした。
- ・高圧噴射攪拌タイプは建物内部からの施工を想定し、3500mmの改良体を改良率78.5%で配置するものとし、1戸あたりの本数は9本とした。
- ・高圧噴射攪拌タイプの配置に際して、支障は無いものとし、また連続施工するものとした。
- ・高圧噴射攪拌タイプの改良強度は400kN/m²とした。
- ・薬液注入タイプは、新設においては鉛直施工、既設においては斜め施工によるものとした。
- ・薬液注入タイプの鉛直施工については、1.5m間隔での施工を想定した。
- ・薬液注入タイプは二重管ストレーナを用い、恒久タイプの溶液型薬液とした。
- ・薬液注入タイプの斜め施工については、建物中央部かつ浅層部での改良に際して削孔角度が取れない場合があるので注意を要するが、ここでは出来るものとした。
- ・薬液注入タイプの改良強度は、工法の特長上100kN/m²とした。

(4) 排水（間隙水圧消散）工法の仮定条件

- ・排水工法は砕石を用いたグラベルドレーン工法を想定した。
- ・排水工法の改良は500mmのパイルを正方形配置1.3mとし、1戸あたりの打設本数は64本とした。
- ・排水工法は鉛直施工とし、新設のみに適用するものとした。

6.3.3 経済性の評価

(1) 従来設計法との比較

第4章、第5章の結果から、戸建て住宅の改良として浅層盤状改良の有効性が確認されている。実験のケースでは砂層が10m堆積した地下水位が-1mの一樣地盤において、固化工法では3m程度の改良であれば有効であることが明らかになっている。

一方、建築基礎構造設計指針²⁵⁾や建築基礎のための地盤改良設計指針案²⁶⁾などの従来の設計法によれば、液状化の対策においては、レベル1地震動においては全点のFL>1、レベル2地震動においてはPLやDcyによる判定をしている。したがって、本研究で想定したモデル地盤においては、砂層全体を対策することになる。

ここでは、地下水位以下の9mを対策した場合と、浅層盤状の対策の場合とのコスト比較を行った。

新設の場合

新設の場合のコスト比較結果を図6.3.2に示す。図は全て、各工法毎に従来設計法による対策、すなわち9mを対策した場合を1とした比率で整理している。

これによると、施工数量そのものが減るので、施工費が減少するためにコストは低減するが、その低減割合が工法によって異なる。締固め工法の静的圧入タイプや固化工法の薬液注入タイプでは、施工機械が比較的小さく全体コストに対する固定費の占める割合が小

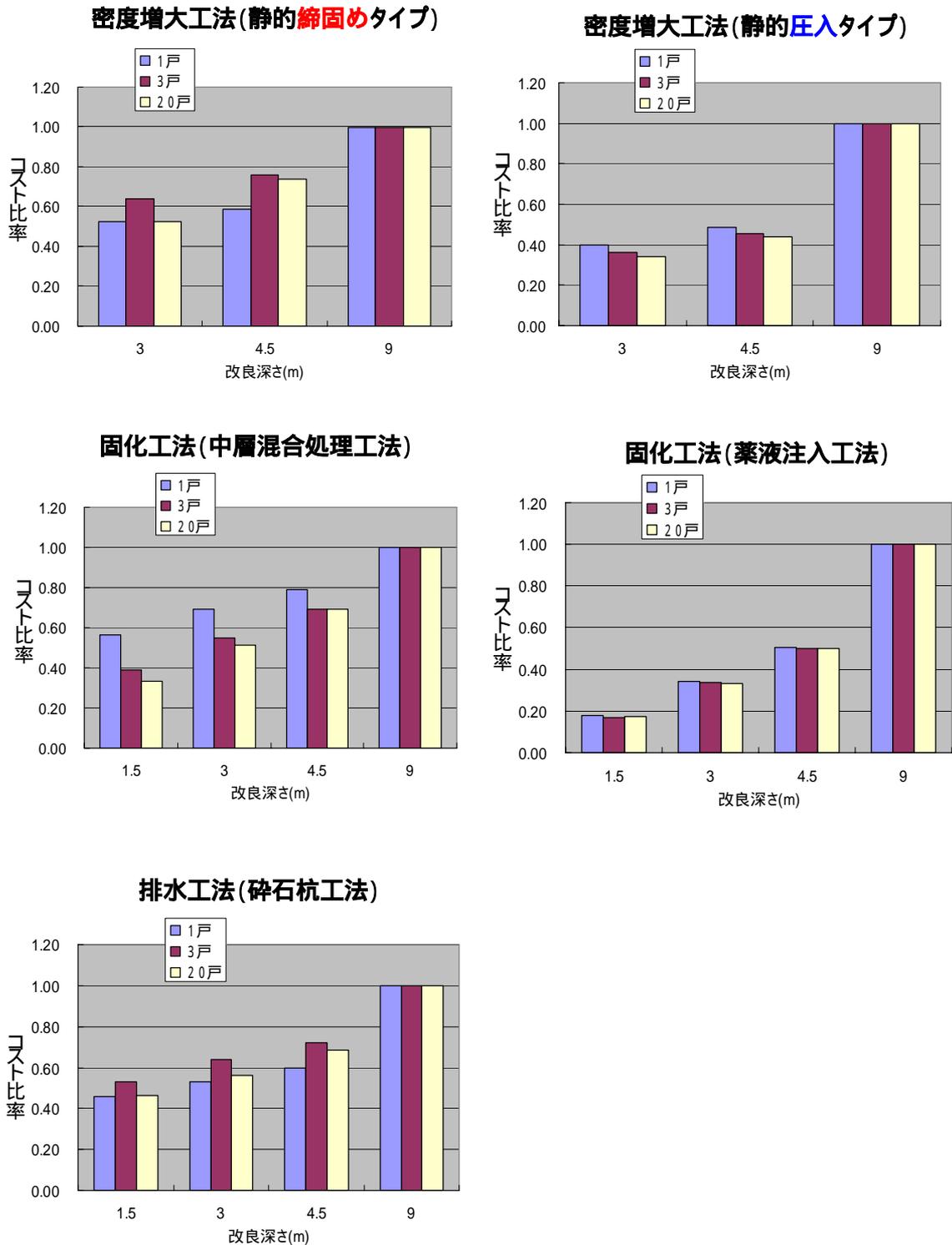
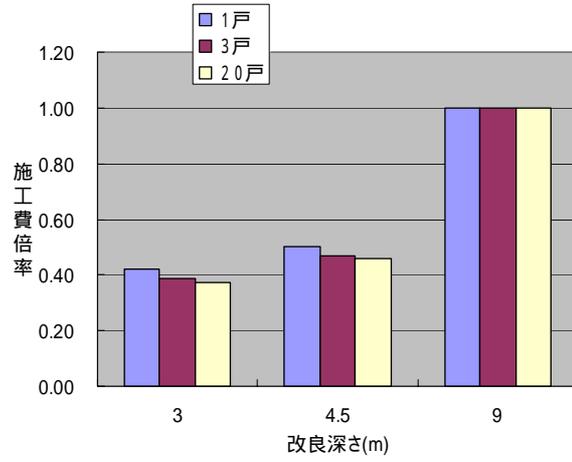
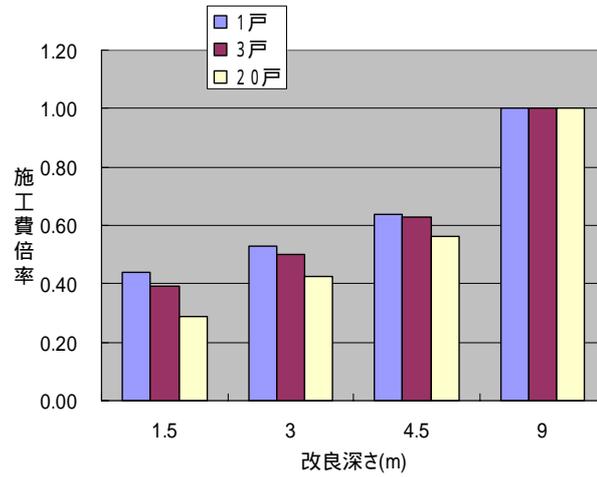


図 6.3.2 従来設計との比較 (新設の場合)

密度増大工法(静的圧入タイプ)



固化工法(高圧噴射攪拌工法)



固化工法(薬液注入工法)

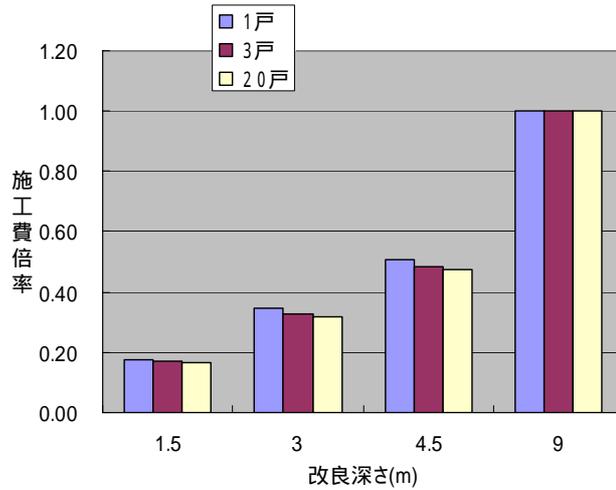


図 6.3.3 従来設計との比較 (既設の場合)

さいために、施工数量の減少分とコストの低下分が概ね比例しているが、その他の工法のように施工機械が比較的大きく、全体コストに対して運搬費や組立費などの固定費の比率が高い工法では、施工数量の減少に比べてコスト低減率は低い。また、全体的に対象戸数が多いほうがコスト低減率が高い。締め固め工法の静的締め固めタイプでは9mの施工をする場合には1戸の面積(150m²)に適用できる施工機械が無い場合、静的圧入タイプの9m施工との比較になっているため、全体傾向と異なっている。また、排水工法の場合には、施工面積による施工機械仕様が異なるため、やや傾向にバラツキがでている。

しかしながら、いずれの場合も従来設計に比べてコストダウンを図ることができるのは明らかである。

既設の場合

既設の場合のコスト比較結果を図 6.3.3 に示す。こちらも全て、各工法毎に従来設計法による対策、すなわち9mを対策した場合を1とした比率で整理している。

これによると、施工数量の減少によるコスト低減は明らかである。また、既設戸建て住宅に適用できる工法は比較的施工機械が小さく、全体コストに対する固定費比率が小さいために、施工数量の減少分と同様の比率でコストも低減する。

従来設計に比べてコストダウンを図ることができるのは明らかになっている。

(2) 現場条件による比較(新設と既設の比較)

現場条件によってコストは変動する。宅地の対策の場合には新設であるか既設であるか、どの段階で施工するかによってコストは影響される。ここでは、既設の場合にどの程度のコストアップになるのかを調べるために、施工的な制約が最も少ないケースと既設の条件との比較を行った。施工的な制約が最も少ないケースは新設で施工面積が20戸(3,000m²程度)のケースである。これを標準値として、既設の条件におけるコストを比較したものが図 6.3.4 である。新設で施工面積が20戸の場合には、制約条件が少ないため、工法の選択の自由度が広がる。本研究で対象とした工法のうち、改良原理毎に最も安価になる工法との比較を実施した。具体的には改良原理毎に次のような比較を行った。

- ・ 締め固め工法 新設：静的締め固めタイプ - 既設：静的圧入タイプ
- ・ 固化工法 新設：中層混合処理工法 - 既設：高圧噴射攪拌工法
- ・ 固化工法 新設：薬液注入工法 - 既設：薬液注入工法

異なる工法を比べているために、その比率に一定のものは無いが、新設に対して既設の場合にはコスト増になることが明らかである。ただし、それぞれを見ると、締め固め工法の場合には施工面積による変動は大きくなく、概ね3~4倍の範囲となる。静的圧入タイプでは次項で考察するが、施工面積によらず1戸あたりの施工費は大きく変動しないため、施工面積による変動が小さくなる。一方、固化工法のうち、中層混合処理タイプと高圧噴射攪拌工法で新設と既設を比較すると、コスト比率は施工面積(戸数)が少なくなると大きくなる。これは、工法の違いによる施工能率の問題や、既設においては高圧噴射攪拌工法の施工を建屋内部から実施するため、施工能率の低下がコストに影響し、施工面積が

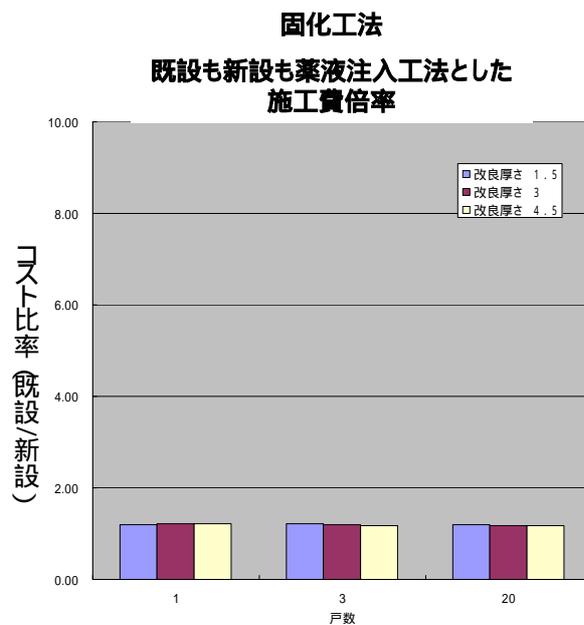
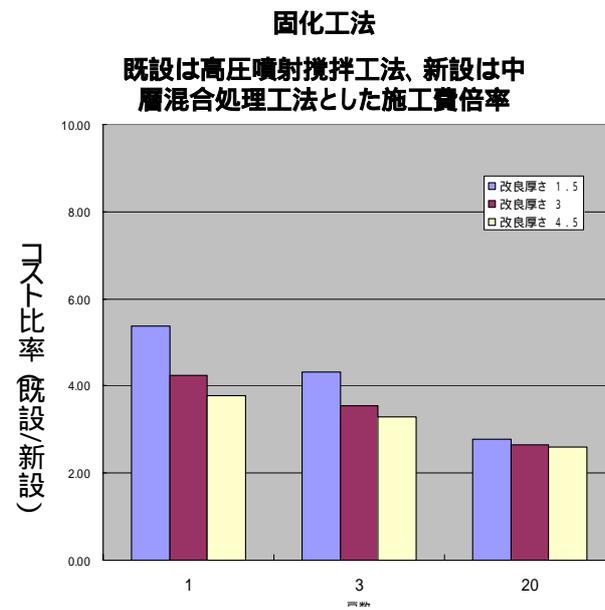
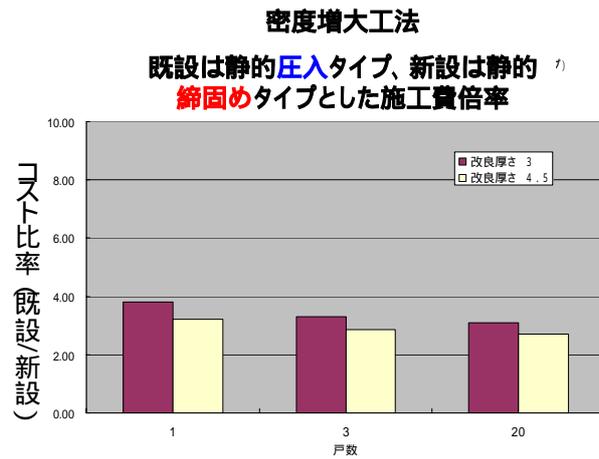


図 6.3.4 現場条件による比較 (新設と既設)

小さい（戸数が少ない）ほど施工能率の低下に伴う1戸あたりのコスト負担が大きくなるためと考えられる。一方、固化工法においても薬液注入タイプの場合には、工法は変化していないため、鉛直打設か斜め打設かによる施工能率の違い等による工費ギャップが生じており、その比率は1.6倍程度と小さく、戸数や改良深さに依存しない。

(3) 施工面積によるコスト変動

地盤改良の施工条件において施工面積がコストに与える影響が大きいことは図6.3.1で示したとおりである。施工面積によって、機種選定や固定費の分散が成されることで、コスト変動が生じる。

新設の場合

図6.3.5には新設における施工面積による比較を示した。また、改良深さによる変動もわかるようにした。図は改良厚さ1.5m（締固め工法については3m）で施工面積20戸のケースを1とした比率で示している。

(1)においても指摘したが、締固め工法の静的締固めタイプや、固化工法の中層混合処理タイプ、排水工法などでは施工機械が比較的大きいため施工面積による1戸あたりコストの変動が大きい。これは、固定費で大きなウェイトを占めるのは施工機械の運搬費と組立解体費が、施工機械の大きさに関係し、施工機械が大きいほど運搬費や組立解体費が大きくなり固定費が大きくなるためである。すなわち、締固め工法の静的締固めタイプや、固化工法の中層混合処理工法、排水工法などの場合には固定費比率が高いために、施工面積（戸数）が小さくなるとその負担割合が増加することに起因する。また、これらの工法では改良深さ（施工数量）に関する変動が小さく見えるのは固定費によるコスト変動要素が大きいいため、施工数量変動による施工費変動が小さく見えることによる。一方、施工機械が比較的小さい工法では固定費比率が小さくなるために施工面積によるコスト変動が小さい。すなわち、コストにおける固定費割合が小さく、施工費割合が大きいためにコストに対する施工費の変動が顕著に現れることになる。

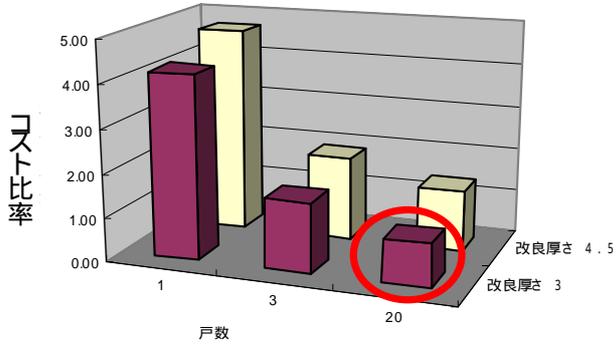
既設の場合

図6.3.6には既設における施工面積による比較を示した。ここでも、改良深さによる変動を併記している。図は新設の場合と同様に改良厚さ1.5m（締固め工法については3m）で施工面積20戸のケースを1とした比率で示している。

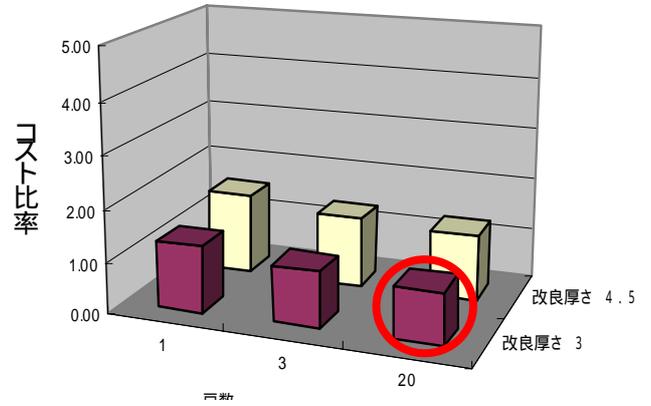
締固め工法の静的圧入タイプや固化工法の薬液注入工法では施工面積による変動が小さい。しかしながら、締固め工法（静的圧入タイプ）では一定の固定費が存在することによって、その比率が大きいため改良深さ、すなわち施工数量によるコスト変動も小くなる。一方の薬液注入工法の傾向は新設の場合に示したとおり、固定費そのものが小さいため改良深さ（施工数量）によるコスト変動が顕著になる。また、固化工法の高圧噴射攪拌工法では施工面積によるコスト変動も現れている。これは、高圧噴射攪拌工法の場合には材料供給のためのプラントなどの装備に一定の固定費がかかるためであるが、施工費とのバランスにおいては大きくないため、改良深さによる変動も現れている。

密度増大工法(静的締固めタイプ)

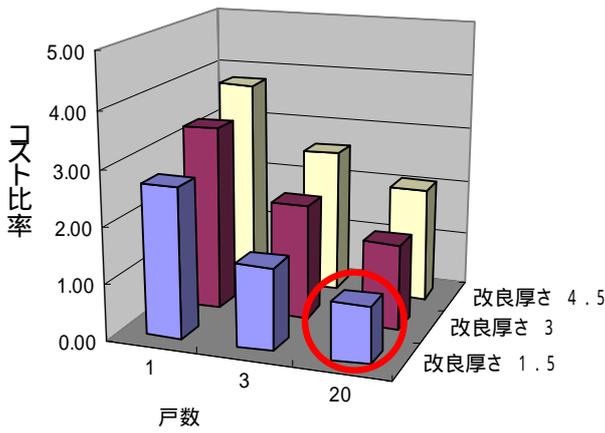
改良厚さ3m 20戸を1とした施工費倍率



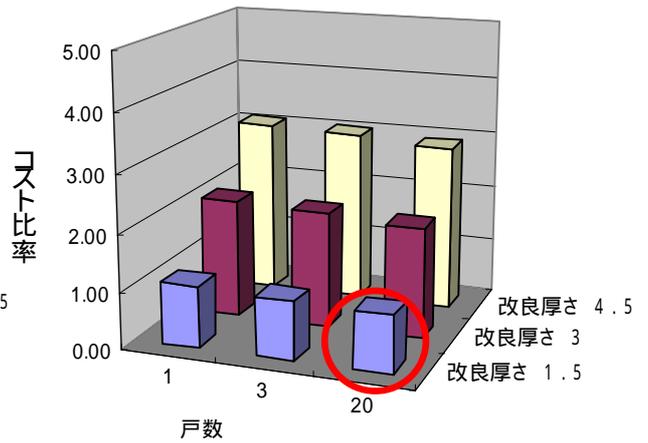
密度増大工法(静的圧入タイプ)



固化工法(中層混合処理工法)



固化工法(薬液注入工法)



排水工法(碎石杭工法)

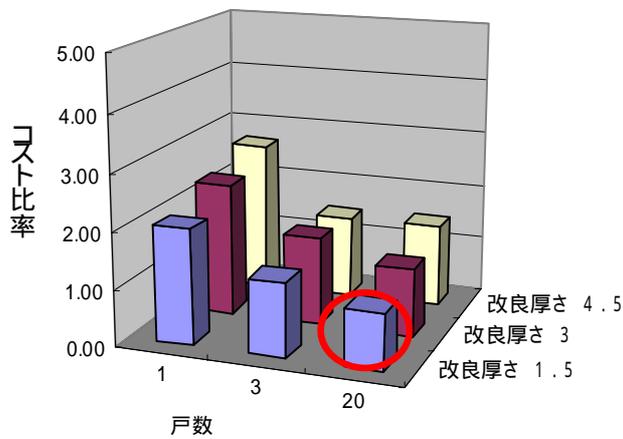
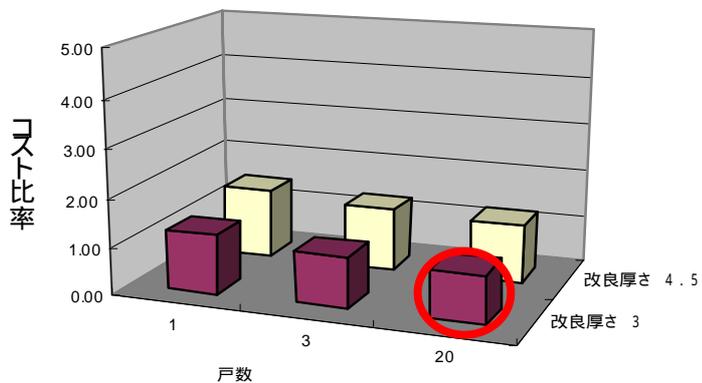
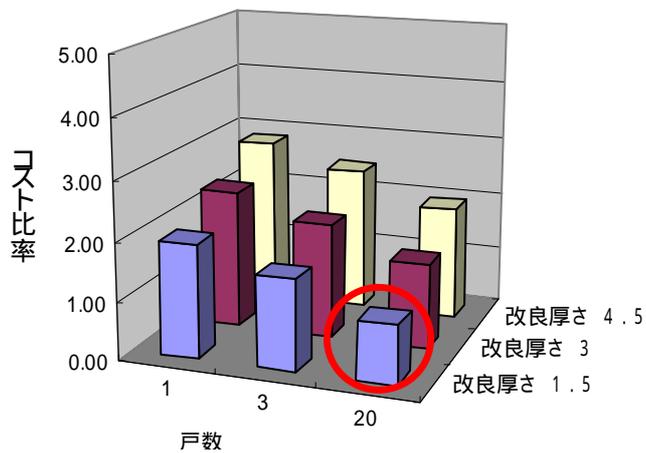


図 6.3.5 施工面積によるコスト変動(新設の場合)

密度増大工法(静的圧入タイプ)



固化工法(高圧噴射攪拌工法)



固化工法(薬液注入工法)

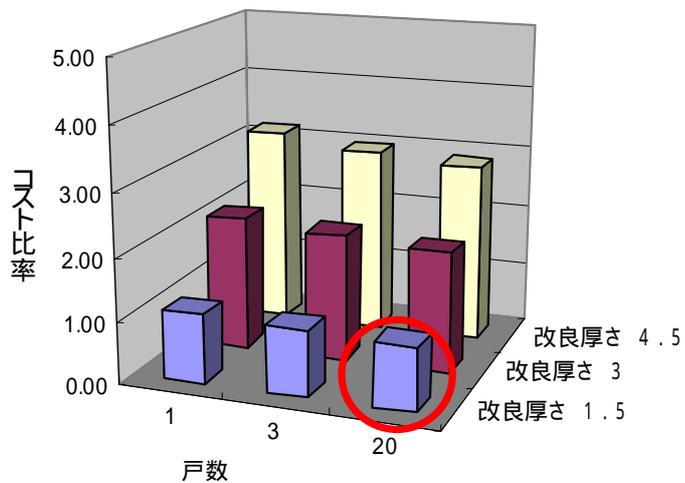


図 6.3.6 施工面積によるコスト変動 (既設の場合)

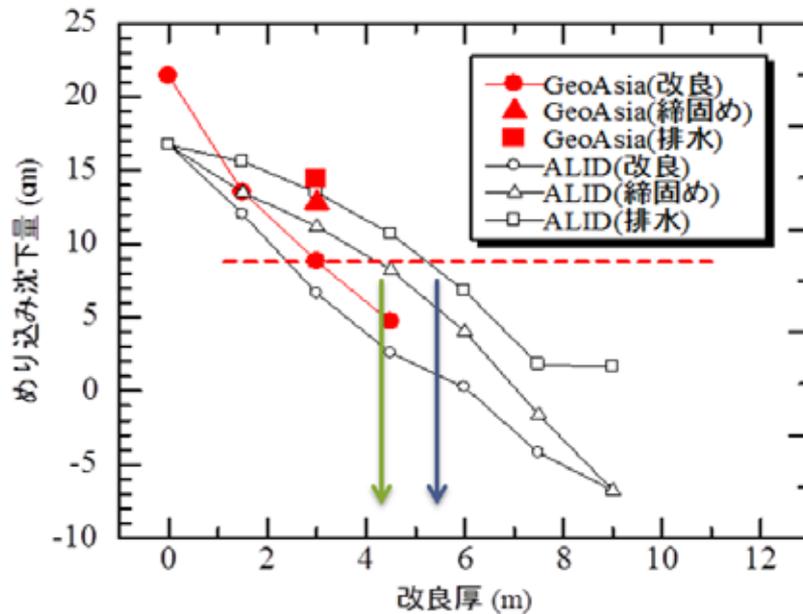


図 6.3.7 改良厚とめり込み沈下量の関係（地震動 1）

(4) 工法による比較

第 5 章における解析結果から、工法による改良地盤の特性によって建物に現れる変形量が異なる。図 6.3.7 に再掲するが、あくまでも解析上の相対比較ではあるが、固化工法と同等の変形性能を発揮する改良深さが読み取れる。例えば地震動 1 に対して、厚さ $t=3.0\text{m}$ で固化工法によって盤状改良した場合と同じ対策効果を期待するには、締固め工法であるなら約 4.2m 、排水工法であるなら約 5.5m 程度の改良が必要と読みとれる。これを、傾向的に解釈すれば、浅層盤状改良において固化工法と同等の改良効果を発揮する締固め工法と排水工法の厚さは $1.5 \sim 2$ 倍の厚さと考えられる。

そこで、締固め工法は改良厚さ 4.5m 、固化工法は改良厚さ 3m 、排水工法は改良厚さ 4.5m として工法ごとのコスト比較を試算した。この場合において、解析で設定した改良地盤に相当する効果を発揮するための改良仕様は、それぞれの工法毎の設計手法によって求めるため、地盤条件が本研究の条件と異なれば改良仕様は変化する。したがって、本研究で設定した改良仕様の変動すれば、工法のコストも変動する。締固め工法では地盤の細粒分含有率などによって改良率が変動するし、固化工法では地盤物性によってセメント添加量が変わったりセメントの種類を変更する場合もある。また、排水工法においても地盤の透水係数によって打設する間隔が変化する。したがって、本検討結果には多くの仮定条件があることに留意する必要がある。

図 6.3.8 には工法による比較試算結果を示した。新設の場合には、締固め工法の静的締固めタイプで施工面積が 20 戸のケースを 1 とした比率で示している。既設の場合には、締固め工法の静的圧入タイプで施工面積が 20 戸のケースを 1 としている。

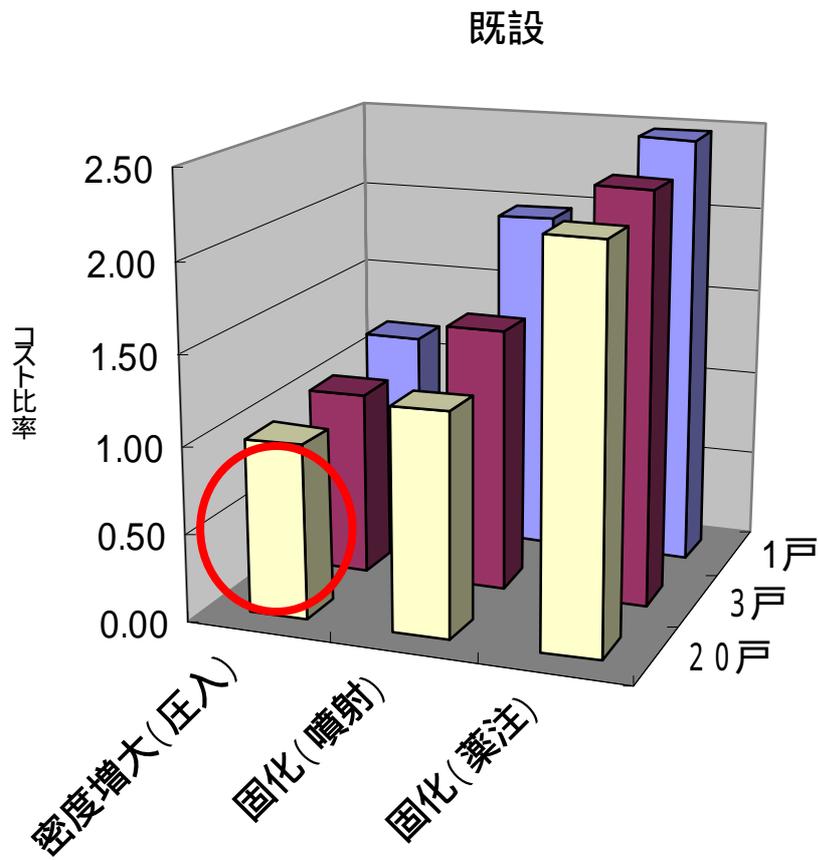
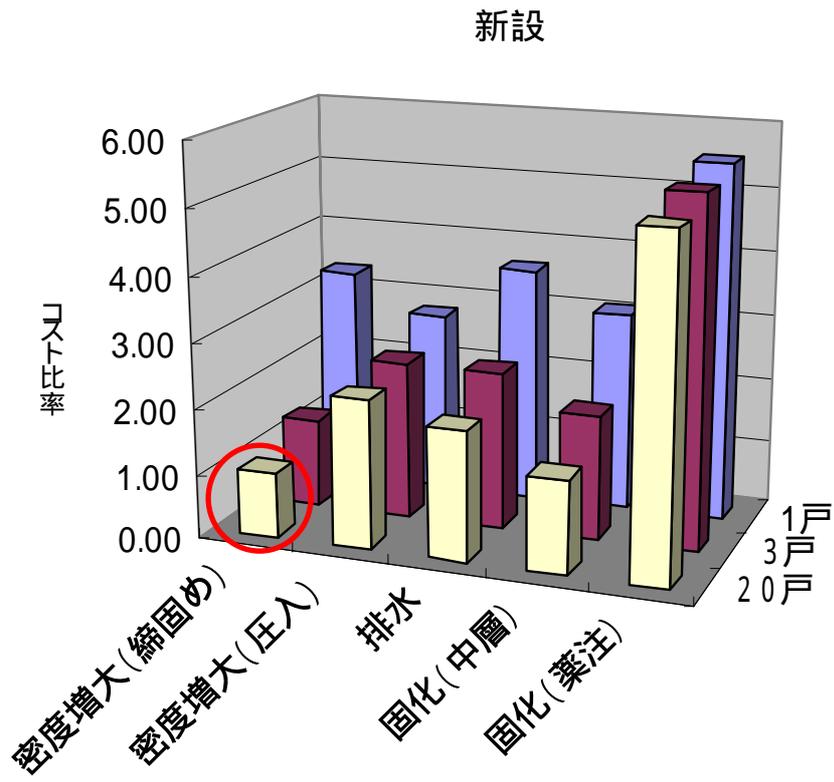


図 6.3.8 工法によるコスト試算比較 (地震動1を想定)

新設の場合

新設の場合については、工法による変動傾向は施工面積によって異なる。これは、これまでも分析してきたように、使用する施工機械の大きさなどの違いによるコストに占める固定費比率によるものが大きい。例えば、締固め工法（静的締固めタイプ）や固化工法（中層混合処理工法）では施工面積 20 戸の場合には約 1.5 倍の比率で締固め工法（静的締固めタイプ）が安く、施工面積 3 戸でも概ね 1.4 倍程度の比率で締固め工法が安い、施工面積 1 戸の場合には中層混合処理工法の方が安くなる。同様に、締固め工法（静的圧入タイプ）と固化工法（中層混合処理工法）を比較すると、施工面積 20 戸の場合には約 1.6 倍の比率で締固め工法（静的圧入タイプ）が高いが、施工面積 1 戸になると逆転して、締固め工法（静的圧入タイプ）が安くなる。これは、これらの工法の施工費や固定費比率のバランスのよって生じるものである。上記のコスト比率については、先に述べた地盤条件などの要因によっては変動するので、施工面積がどの程度で逆転現象が生じるのかなどの閾値は実際には個々のケースで検証する必要がある。

既設の場合

既設の場合においては、工法による変動は概ね一定の傾向がある。スケールメリットが生じる施工面積 20 戸の場合には締固め（静的圧入タイプ）と固化（高圧噴射攪拌工法）排水のコスト比率はそれぞれ 1.3 倍、2.2 倍である。施工面積が小さくなると比率は大きくなる傾向にあるが、工法による逆転現象は生じていない。工法のコスト比率については新設の場合と同様に、地盤条件などの要因によって変動するので、実際には個々のケースで検証する必要がある。

6.4 まとめ

本研究では、浅層に盤状に液状化しない層を形成するための手段として、国内で実施されている液状化対策工法のうち実績が多く設計手法が確立している「締固め」「固化」「排水」の 3 工法を抽出し、宅地に適用できる施工方法のタイプによってコスト試算を実施した。コスト試算に際しては、工法原理毎の設計手法が異なる点や、現場条件、環境条件などによる不確実性があることなどから、一定の仮定条件をおいて実施し、相対的な比較をすることとした。

本研究をまとめると以下ようになる。

- ・本研究における浅層盤状改良によって、従来設計法による液状化全層を対象とした対策に比べて 30～50%のコスト低減が可能となることが明らかになった。
- ・現場条件（新設と既設）による比較では、新設で全く制約条件の無い場合に比べて、既設の場合には制約条件が増えるため、工法選択の自由度が減ることや、施工方法、能率が限定されることからコストアップになることが明らかになった。本研究の仮定条件内では、締固め工法で約 2 倍、固化工法では約 6～8 倍となった。
- ・施工面積による比較では、施工機械が比較的大きくコストに占める固定費比率が大きい

工法ほど影響を受けることが明らかになった。一般に、既設戸建て住宅に用いられる施工機械は小型のものが多いため、その変動要素が小さいことも明らかになった。

・解析結果から、浅層盤状改良において工法原理別に同等の改良効果を有する改良深さを検討し、同等の改良効果（変形性能）をもつ対策について比較を行った。その結果、本研究で仮定した条件の範囲内では、新設の場合には施工面積によって最適となる工法について傾向が変動することがわかった。一方、既設の場合には施工面積によらず、概ね一様な傾向を示した。但し、工法原理によって設計法が異なり、それによっては改良仕様、施工数量が変動するために、その差を定量的に示すには至らなかった。

ここでは、これまで国内で用いられてきた液状化対策工法のうち、実績が多く、設計手法が確立した工法原理の中からいくつかの代表的施工タイプを抽出したが、新設や既設の戸建て住宅を対象とした液状化対策工法の技術開発は民間を中心に精力的に進められている。特に、ひとつの工法原理によるものだけではなく、複数の工法原理を融合したものなど多岐にわたっており、今後の技術開発の動向を見極めた補足が必要となる。ただし、その際に重要なのは、科学的根拠に基づいた設計法によって、その対策仕様が決定されているかを十分に吟味し、確実な液状化防止効果を得られているのかを実証、検証されていることを確認する必要がある。また、コスト比較に際しては、設定する地盤条件や現場条件によってコストに与える影響が大きいことに留意し、比較対象の現場におけるこれらの条件の洗い出しを十分に実施することである。

尚、本章の研究は飯沢誠氏（ケミカルグラウト株式会社）、新坂孝志氏（三信建設工業株式会社）、高田徹氏（株式会社設計室ソイル）、松岡大介氏（小野田ケミコ株式会社）の協力を得て実施された。

【参考文献】

- 1) 公益社団法人地盤工学会：地盤工学実務シリーズ18「液状化対策工法」
- 2) 佐々木勉・龍岡文夫・村松正重・関真一：振動さん軸試験における試験条件が砂の液状化強度に及ぼす影響，第16回土質工学研究発表会講演集，pp.597-600，1981．
- 3) 吉見吉昭：砂地盤の液状化（第二版），土と基礎シリーズ，技報堂出版，pp.32-34，1991.
- 4) 小川充郎・石堂稔：砂質土に対するバイプロコンポーザー工法の適用について，土と基礎，Vol.13，No.2，pp.77-81，1965．
- 5) 水野恭男・末松直幹・奥山一典：細粒分を含む砂質地盤におけるサンドコンパクションパイル工法の設計法，土と基礎，Vol.35，No.5，pp.21-26，1987．
- 6) 山本実・原田健二・野津光夫：締固め工法を用いた緩い砂質地盤の液状化対策の新しい設計法，土と基礎，Vol.48，No.11，pp.17-20，2000．

- 7) 善功企・山崎浩之・佐藤泰：事前混合処理工法による処理土の強度・変形特性，港湾技術研究所報告，第 29 巻，第 2 号，p.94，1990．
- 8) 山崎浩之・善功企・河村健輔：溶液型薬液注入工法の液状化対策への適用，港湾空港技術研究所，第 41 巻，第 2 号，pp.123-124，2002．
- 9) 日下部伸・森尾敏：薬液注入による低強度改良砂の液状化抵抗，第 33 回地盤工学研究発表会，pp.87-88，1998．
- 10) 社団法人セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル，p.35，2003．
- 11) 財団法人沿岸技術研究センター：浸透固化処理工法技術マニュアル(2010 年版)，p.25，2010．
- 12) ケミカルグラウト社提供
- 13) 田中幸久・国生剛治・江刺靖行・松井家孝：グラベルパイルの液状化防止効果，電力土木，No.188，pp.11-20，1984．
- 14) 桑原正彦・大林淳：グラベルドレーンによる液状化対策，土木技術，Vol.51，No.10，1996．
- 15) Seed, H.B. and Booker, J.R. : Stabilization of Potentially Liquefiable Sand Deposits Using Gravel Drains, , ASCE, Vol.103, No.GT7, pp.757-768, 1977．
- 16) De Alba, P., Seed, H.B. and Chan, C.K. : Sand Liquefaction in Large-Scale Simple Shear Tests, , J.GED, ASCE, Vol.102, No.GT9, pp.907-927, 1976．
- 17) Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y. : Effects of Vertical Drains on the Bearing Capacity of Saturated Sand during Earthquakes, Proc. Intern. Conf. on Eng. for Protection from natural Disasters, pp.643-655, 1980．
- 18) グラベルドレーン工法研究会：グラベルドレーン工法技術資料，1996．
- 19) Terzaghi, K. : Effect of Minor Geologic Detail on the Safety of Dams, Bulletin, American Institute of mining Eng., Tech., Pub, 215, 1926．
- 20) 日本大ダム会議：改訂ダム設計基準
- 21) 井合進・田中幸芳・棚邊隆・安藤裕・須見光二：釧路沖地震で液状化を防止したグラベルドレーンの目詰まりに対する有効性について，土木学会第 51 回年次学術講演会発表講演集，第 部門，pp.244-245，1995．
- 22) 地盤工学会関東支部：造成宅地の耐震対策研究委員会資料より
- 23) 財団法人建設物価調査会：建設物価，2012 年 6 月号
- 24) 一般社団法人日本建設機械施工協会：平成 24 年度版建設機械等損料表
- 25) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001．
- 26) 日本建築学会：建築基礎のための地盤改良設計指針案，2006．