

膨張固化性能を有する材料「TAFDEX」を用いた液状化対策工法

—材料の膨張特性と製造試験、施工試験結果—

堀越 研一^{*1}・檜垣 貫司^{*2}・川井 俊介^{*2}・藤原 斉郁^{*2}・志波 由紀夫^{*2}・原田 健二^{*3}

Keywords : liquefaction countermeasure, compaction, lime, steelmaking slag, expansion, hardening material

液状化対策, 締固め, 石灰, 転炉スラグ, 膨張, 固化材料

1. はじめに

阪神大震災を契機として、構造物の耐震性を向上させることの重要性が再認識され、あわせて各種設計基準も改訂されてきた。地盤に着目した場合、砂地盤の液状化現象は、設計上の重要な検討項目のひとつであり、種々の原理に基づく対策工法が開発されている。

このような背景のもと、著者らは、密度増大原理に基づく液状化対策工法の一つとして実績が増加している静的締固め工法¹⁾(写真-1)をベースとした工法の開発を進めてきた。開発を進めてきた対策工法は、従来の砂の代わりに、地中で膨張固化する性状を有する新材料「TAFDEX」を用いるものである。「TAFDEX」の膨張

固化は、周辺地下水との化学反応によるものであり、図-1に示すように、砂を用いた従来工法で期待される打設時の‘物理的な締固め’効果に加えて、材料の膨張による‘化学的締固め’によって周辺地盤を締固め、地盤の強度を効率的に増加させるものである。打設後の膨張によって実質的な改良率が増加するので、従来よりも改良体打設本数を削減することが可能であり、ひいては液状化対策に要する工期の短縮に寄与するものである。

「TAFDEX」の基本膨張特性と改良効果を確認するための振動試験結果は、既に文献2)3)に報告されているので、本論文では、同液状化対策工法に関して、周辺地盤の拘束圧と転炉スラグの初期含水比が「TAFDEX」の膨張特性に及ぼす影響、現地で使用可能な混練装置を用いた「TAFDEX」の製造と品質確認試験結果、ならびに地盤改良効果確認のための施工試験結果を報告する。



写真-1 静的締固め工法(SAVE工法)
Non-vibratory Compaction Method

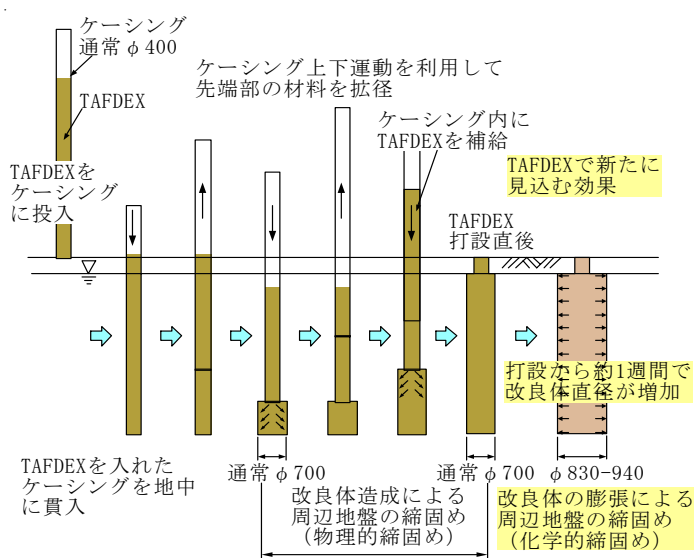


図-1 「TAFDEX」で見込む化学的締固めの概念
Chemical Compaction Expected for 'TAFDEX'

* 1 技術センター技術企画部企画室
* 2 技術センター土木技術研究所地盤・岩盤研究室
* 3 不動産建設(株)ジオ・エンジニアリング事業本部

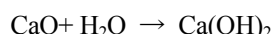


写真-2 「TAFDEX」の混合材料
Materials used for Producing ‘TAFDEX’

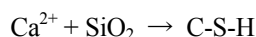
2. 「TAFDEX」を構成する材料の仕様

「TAFDEX」は、硬焼石灰(CaO ：酸化カルシウム)、製鉄所の製鋼過程で発生する副産物である転炉スラグ、および硫酸アルミニウム(Al_2SO_4)の混合体である(写真-2)。各材料が混合され、水と反応することにより、下記のメカニズムで反応が進行する。

- (1) 硬焼石灰の吸水・消化で消石灰を生じる。この反応で体積膨張が生じる。



- (2) 消石灰と転炉スラグはポズラン反応により、固結が長期にわたって進行する。



- (3) 消石灰は、硫酸アルミニウムと反応してエトリンガイトを生じ、硬化体の耐久性を向上させる。



各材料の配合と仕様は、表-1、表-2に示すとおりであり、無拘束圧条件下では、約80%の体積膨張率($\Delta V/V_0$ ：体積増分 ΔV の元の体積 V_0 に対する比率)を呈することを既に確認している²⁾。

表-1 「TAFDEX」構成材料の粒度と標準配合
Grain Size and Normal Mixture of ‘TAFDEX’

	粒 度	乾燥重量比率
硬焼石灰	5 ～ 35 mm	34 ～ 40 %
転炉スラグ	0 ～ 5 mm	65 ～ 59%
硫酸アルミニウム	粉末状	1 %

表-2 硬焼石灰と転炉スラグの仕様
Basic Specifications for Hard-burnt Lime and Steelmaking Slag

硬焼石灰	活性度 100 g 法10 分値で110 ml程度
転炉スラグ	含水比 10 %以内 土壌環境基準に適合し、かつJIS A5015に規定されたエージング処理を施したもの

表-2中、硬焼石灰の仕様に示した活性度は、化学反応の速さを示す指標であり、この値が大きいほど反応が速いことを示している。生石灰(CaO)は、石灰石を高温で加熱することにより生成するが、長時間加熱すると、結晶が大きくなり、硬焼石灰となる。この結晶が大きいほど、硬焼の程度が高く、反応性が鈍くなり活性度は低くなる。「TAFDEX」で扱う硬焼石灰は活性度が低く、反応性を鈍くしている。これは、地中に投入するまでの膨張ロス(次節で述べる1次膨張)を最小限に抑え、施工時の取扱いを容易にするためである。

また、転炉スラグは、製鉄所ヤード内に野積みされているため、通常、7 %程度の含水比を有している。含水比が高い場合、地中に打設する前に硬焼石灰との化学反応が進むため、締固めに寄与しない膨張ロスの割合が高くなる。なお、転炉スラグ単体も石灰を含有しており、長期にわたる膨張挙動を示すことが知られている。このような膨張は、周辺構造物への影響を考えた場合、好ましいものではなく、「TAFDEX」では、この膨張作用を抑えるためのエージング処理された転炉スラグを使用することが前提となっている。

なお、本工法に関連して、環境への影響を把握するための各種溶出試験、地下水水質試験、ならびに含有量試験が実施されており、本工法が環境基準に適合するものであることを確認している⁴⁾。

3. 「TAFDEX」の膨張性能把握試験

3.1 転炉スラグの初期含水比の影響

地中での「TAFDEX」の膨張性能に影響を及ぼす要因として、転炉スラグの初期含水比および地中での拘束圧が挙げられ、これらが膨張特性に及ぼす影響を把握するための室内膨張試験を実施した。

本論文では、「TAFDEX」の膨張反応を以下のように定義する。

- 1 次膨張…転炉スラグの初期含水比と硬焼石灰との化学反応に起因する膨張。地中に打設する前の膨張であるため、締固め効果に寄与しない。
- 2 次膨張…「TAFDEX」を地中に打設した後の、地下水との反応による実質的な膨張で、締固め効果に寄与する。

「TAFDEX」による地盤改良効果を精度良く予測するためには、上記、1 次膨張量を把握し、実際に改良効果に寄与する 2 次膨張量を求める必要がある。そこで、転炉

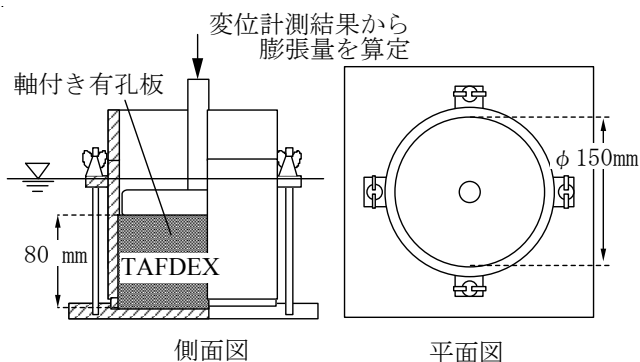


図-2 膨張試験 試験装置
Setup for Expansion Test

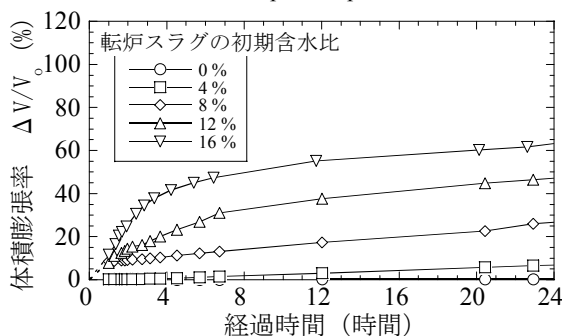


図-3 「TAFDEX」の1次膨張量の時間変化
Primary Expansion of 'TAFDEX'

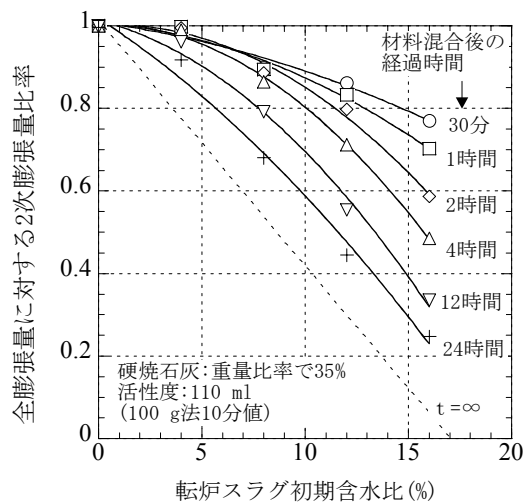


図-4 転炉スラグの初期含水比が膨張ロスに及ぼす影響
Influence of Initial Water Content of Slag on Expansion

スラグの初期含水比を変化させた「TAFDEX」を、図-2に示す鋼製容器（直径 150 mm）に詰めて室内膨張試験を実施し、各含水比に対応する 1 次膨張量を把握した。試験に使用した材料の配合は、標準配合（硬焼石灰：転炉スラグ：硫酸アルミニウム=35%：64%：1%）である。

膨張試験で得られた 1 次膨張量の経時変化を図-3に示す。初期含水比が 16 %のケースでは、混合後、約 8 時間で 50 %もの体積膨張率を示しており、想定される水浸後の最終膨張率（約 80 %）に対して大部分の膨張が既に生じていることを示している。図-4 は、実験結果を材料混合後の経過時間の観点から整理したものである。例えば、転炉スラグの初期含水比が 10 %の場合、混合後 30 分で約 10 %の膨張ロスが生ずることが同図からわかる。

3.2 周辺地盤の拘束圧の影響

3.2.1 土槽試験

上載圧が「TAFDEX」の膨張性能に及ぼす影響に関して、直径を変えた各種土槽試験結果²⁾および遠心載荷模型試験結果³⁾を図-5にまとめた。図中の縦軸は、試験で得られた最終体積膨張率を無拘束圧時の体積膨張率で正規化している。同図によれば、異なる土槽試験から得られた結果がほぼ同じ傾向を示すこと、上載圧の増加につれて、「TAFDEX」の体積膨張率が減少する明確な傾向があることがわかる。なお、図中の点線は、後述の試験施工の際の改良体打設間隔設定のために想定した低減曲線（後述の式(2)）を示している。

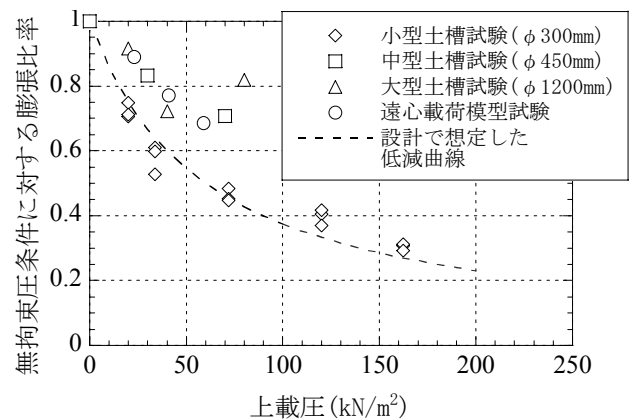


図-5 上載圧が「TAFDEX」の膨張性能に及ぼす影響
Effects of Overburden Pressure on 'TAFDEX' Expansion

3.2.2 「TAFDEX」の膨張圧測定試験

地中の「TAFDEX」がどの程度の深度まで膨張を示すのかを明らかにするために、体積変化を拘束した状態での膨張圧測定試験を実施した。実験では、図-2に示した鋼製モールド内に「TAFDEX」を投入し、軸付き有孔

板の変位をロードセルを介して拘束した状態で注水し、膨張力の経時変化を計測した。試験状況および試験結果をそれぞれ写真-3、図-6 に示す。

同図によれば、体積変化を拘束した状態での「TAFDEX」膨張圧は少なくとも 350 kN/m^2 程度あり、通常、液状化対策が必要とされる深度(20 m)の有効拘束圧でも体積膨張する性能を有していることが確認された。

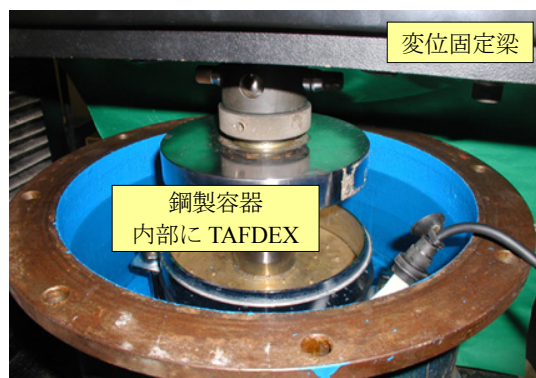


写真-3 膨張圧測定状況
Test Setup to Measure Expansion Pressure

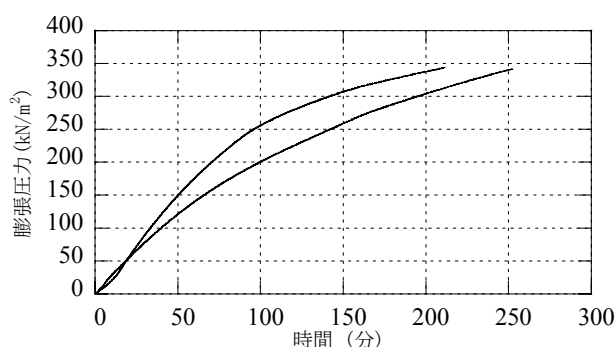


図-6 「TAFDEX」の膨張圧測定試験結果
Expansion Pressure Profiles of 'TAFDEX'

4. 現地混練装置による「TAFDEX」製造試験

現地混練装置（写真-4）を使用して製造された「TAFDEX」の品質を確認するための製造試験を実施した。使用した装置の性能を表-3 に示す。同装置は、各材料を別々の容器に投入し、それぞれの単位時間当りの排出量をキャリブレーションによって設定することにより、所定の配合での材料の混合を行うものである。写真-5 は、各材料の排出状況を示したものである。各材料は、この後、スクリーコンベア内で混練される。製造試験では、排出された「TAFDEX」を計量升に受け、密度計測結果の再現性からその均一性を確認した。なお、製造試験での材料の配合は、標準配合（硬焼石灰：転炉スラグ：硫酸アルミニウム=34%：65%：1%）とし、供給された転炉スラグの初期含水比は 9 %程度であった。



写真-4 「TAFDEX」の現地製造装置
Mixing Plant for 'TAFDEX'

表-3 「TAFDEX」混練装置の仕様
Specification of Mixing Plant

名 称	コンクリートモービル
形 式	CM-250
混 練 能 力	25 m³/h
硬焼石灰瓶容量	4.0 m³
転炉スラグ瓶容量	4.0 m³

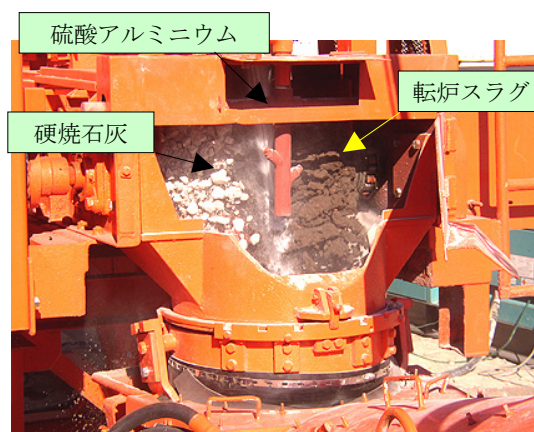


写真-5 排出される各材料
Discharged Material from Mixing Plant

表-4 「TAFDEX」の均一性確認試験結果
Density Measured at Mixing Test

計測回数	排出量計量値(kg)	密度 g/cm³
1 回目	129.60	1.677
2 回目	131.40	1.700
3 回目	130.30	1.686
4 回目	129.75	1.679
5 回目	130.30	1.686
平均値	130.27	1.685

製造された「TAFDEX」の密度計測結果を表-4 にまとめる。同表によれば、計測密度の平均値からの誤差は、最大で 0.9 %程度であり、高い再現性を示していることがわかる。

さらに、同装置で製造された「TAFDEX」を実験室に

持ち帰り、図-2 に示した装置による膨張試験を実施した。試験工程の関係で、「TAFDEX」製造から注水開始までに4日が経過したため、「TAFDEX」の1次膨張は既に終了している。合計5供試体に対して得られた体積膨張率測定結果を図-7 にまとめた。同図によれば、膨張量の再現性は極めて良好であり、密度だけでなく、膨張性能の観点からも、均一性の高い「TAFDEX」を製造することが可能であることが判明した。

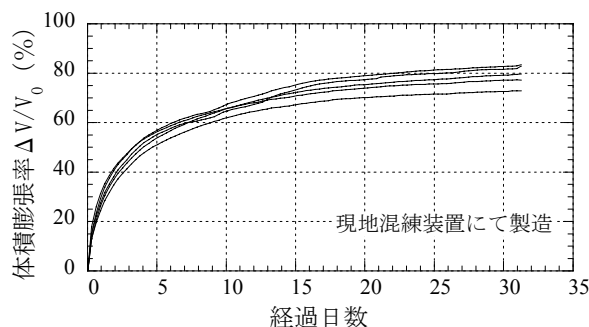


図-7 膨張性能からみた「TAFDEX」の均一性確認試験結果
Uniformity of Expansion Behavior of 'TAFDEX'

5. 試験施工による地盤改良効果の確認

5.1 試験概要ならびに地盤条件

「TAFDEX」を締固め工法に適用した場合の改良効果を従来の締固め砂杭工法と比較するための試験施工を千葉県内の湾岸地域で実施した⁵⁾。試験施工地点の地盤は図-8 に示すように砂質シルトならびに細砂からなり、細粒分含有率は、深さ方向にばらついている。試験施工では、深度4 m～8 mに存在する細砂を地盤改良対象として、「TAFDEX」による改良体と砂杭を静的締固め機械により打設した。

5.2 改良率の設定⁴⁾

「TAFDEX」による地盤改良では、地中の改良体が地下水と反応して膨張するため、改良体断面積に基づく実質改良率は、材料の膨張につれて増加することになる。本論文では、図-9 に示すように、改良体断面積の増加を加味した以下の改良率を定義することとした。

$$a'_s = \frac{A'_s}{x^2} = \frac{\pi r'^2}{x^2} \quad (1)$$

ここに、 a'_s : 「TAFDEX」の膨張を考慮した改良率

A'_s : 「TAFDEX」膨張後の改良体断面積

r' : 「TAFDEX」膨張後の改良体半径

x : 改良体打設間隔

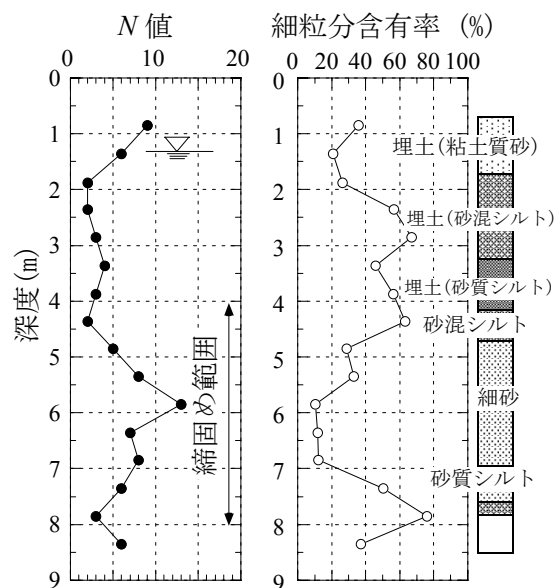


図-8 試験施工地点における地盤条件
Ground Conditions at Test Site

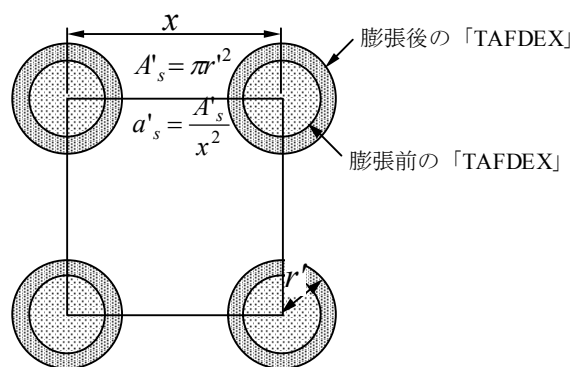


図-9 本論文における改良率の定義
Definition of Improvement Ratio

改良体の打設間隔を設計する方法は、有効締固め係数 R_c を用いた静的締固め工法に対する従来の設計法¹⁾を踏襲するものとし、これに式(1)で定義された改良率を適用した。

本試験施工では、表-5 に示す目標 N 値 (N_1 値) を設定することとした。この値は、道路橋示方書 耐震設計編 (平成14年3月) に基づき、液状化判定の際の水平震度を $k=0.19$ とした際に、締固め後の当該地盤の液状化に対する抵抗率 F_L が1以上になるように設定したものである。この表によれば、深度-4.85m～-6.85mの細砂に相当する部分が液状化する可能性があり、締固めによって地盤強度を高める必要があると判断された。同表には、静的締固め工法に対する設計法を用いて算定された必要改良率 a'_s も併せて示したが、深度GL-4.85m地点の細砂に対する必要改良率 ($a'_s=11.16\%$) が最も高くなっていることがわかる。

表-5 試験施工地点における必要改良率の設定

Calculation of Required Improvement Ratio at Trial Site

深度 GL-m	原地 盤 N 値 N_0	地盤 種別	$F_c(\%)$	塑性 指数 Ip	目標 N 値 N_1	間隙比		ΔN_f	R_c	改良前		改良後		必要改 良率 a'_s (%)
						最大 $e_{\max}$	最小 $e_{\min}$			相対密度 $D_{ro}(\%)$	間隙 比 e_0	相対密度 $D_{ri}(\%)$	間隙 比 e_1	
4.35	2	砂質シルト	63.3	19.3	与えられた条件では、液状化しないものと判定された。									
4.85	5	細砂	29.0	NP	9.4	1.580	0.832	8.9	0.38	64.8	1.10	76.63	1.01	11.16
5.35	8		33.0	NP	9.3	1.660	0.864	9.3	0.35	73.2	1.08	76.39	1.05	3.49
5.85	13		10.3	NP	15.1	1.206	0.682	6.1	0.58	78.9	0.79	83.50	0.77	2.31
6.35	7		11.8	NP	15.2	1.236	0.694	6.4	0.56	63.9	0.89	83.27	0.79	9.97
6.85	8		12.3	NP	15.6	1.246	0.698	6.5	0.55	66.2	0.88	83.40	0.79	9.11
7.35	6	砂質シルト	50.2	19.2	与えられた条件では、液状化しないものと判定された。									
7.85	3	76.1	20.1											

次に、表-5 に示した必要改良率を満足するために必要な「TAFDEX」改良体の打設間隔を設定する。設定に際し、本論文では、地中の上載圧の増加が「TAFDEX」の体積膨張率に及ぼす影響として以下の式を仮定した(図-5 の点線)。

$$\beta = \frac{60}{60 + \sigma'_v} \quad (\sigma'_v \text{ の単位は、kN/m}^2) \quad (2)$$

(2)式に示した関係は、室内試験から設定されたものであり、今後、実施工データが蓄積するにつれて精度を向上させる必要がある。

表-6 は、必要改良率と「TAFDEX」の地中での膨張性状から算定された「TAFDEX」改良体の最小打設間隔を従来の砂杭と比較したものである。「TAFDEX」の膨張量算定に際し、無拘束圧時膨張量を、同現場試料の膨張試験結果から 70 %と設定している。この表によれば、「TAFDEX」改良体打設間隔が 2.2 m と設定されるのに対し、従来の砂杭の場合には 1.8 m となる。すなわち、膨張による改良率の増加を見込むことにより、改良体打設間隔を従来よりも、約 1.22 倍に拡げることが可能である。これは、改良対象敷地面積を同一とした場合の改良体打設本数を 2/3 に低減可能であることを示している。

5.3 試験施工の概要⁶⁾⁷⁾

地盤改良体は、「TAFDEX」ならびに、その比較対象である砂杭のそれぞれに対して、図-10 に示す正方形配置で 16 本を打設することとし(「TAFDEX」については、施工工程の関係で隅角部 1 本を除く 15 本のみの打設)、改良後の地盤強度の増加傾向を比較した。改良体の打設間隔は、既に示したとおり、砂杭に対しては 1.8 m、「TAFDEX」に対しては 2.2 m とした。

本試験施工で適用した材料の配合は、乾燥重量比率で硬焼石灰 34%、転炉スラグ 65%、硫酸アルミニウム 1%

表-6 改良体打設間隔の設定

Calculation of Improvement Pile Spacing

深度 GL-m	必要改 良率 a'_s	膨張量 低減率 β	実質体積 膨張率 (%)	改良体 断面 積 (m ²)	改良体打設間隔*	
					TAFDEX (m)	砂杭 (m)
4.85	11.2	0.57	39.85	0.538	2.20	1.86
5.35	3.5	0.55	38.60	0.533	3.91	3.32
5.85	2.3	0.53	37.42	0.529	4.78	4.08
6.35	10.0	0.52	36.29	0.525	2.29	1.97
6.85	9.1	0.50	35.27	0.521	2.39	2.06

*)正方形配置の場合の打設間隔

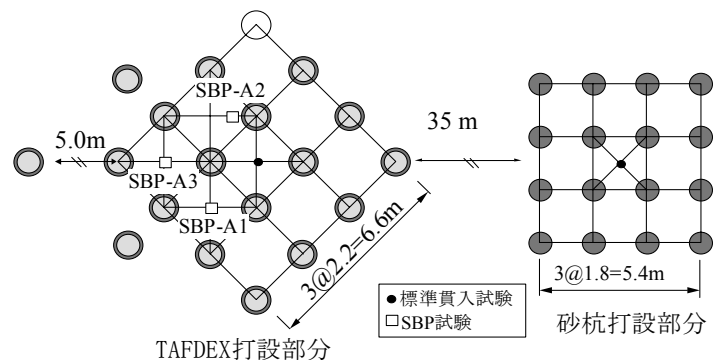


図-10 試験施工における改良体配置と地盤調査

Allocations of Improvement Piles and Soil Investigation

である。但し、試験施工地点の制約から、それぞれの材料を生コン用のミキサーで別の場所で事前に混合し、これを現地へ運搬し打設することとした。事前混合時に測定した転炉スラグの含水比は、約 3%であり、混合後、打設するまでに、約 12 時間経過している。

改良効果の判定に際しては、標準貫入試験、3 成分コーン貫入試験、およびセルフボーリング型孔内水平載荷 (SBP)試験を地盤改良前後に実施するものとし、前 2 者については、砂杭に対しても同様に実施した。改良後の試験については、「TAFDEX」が十分に膨張したと判断される時期 (打設後、約 1 ヶ月経過時点) に実施した。

本論文では、これらの調査結果のうち、標準貫入試験結果ならびにセルフボーリング型孔内水平載荷(SBP)試験結果を報告するものとする。

5.4 地盤改良効果の検証

図-11 は、「TAFDEX」を打設した地盤に対して、改良前後の N 値、ならびにその改良効果を従来の砂杭と比較したものである。図-11 によれば、膨張後の N 値に関して、細粒分含有率が他の地点よりも高めの深度 (深度 6.85m)を除き、ほぼ設計で想定した目標 N 値以上の地盤強度が達成されており、改良体間隔を拡げて打設しても、従来の砂杭とほぼ同等な効果が得られていることが確認された。

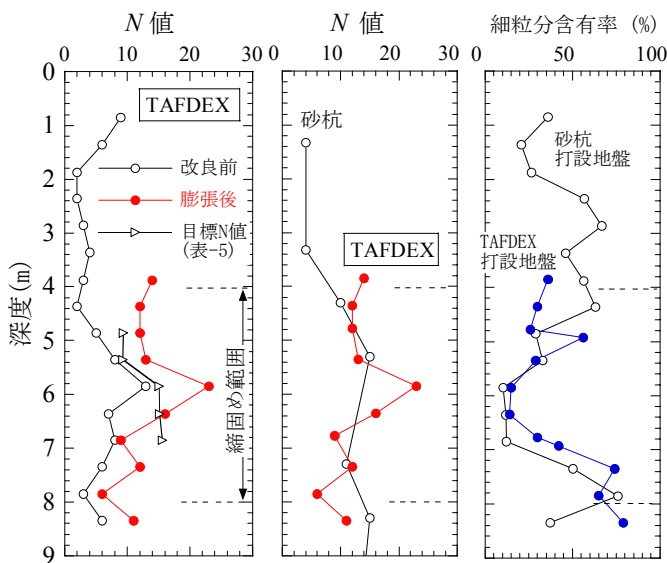


図-11 地盤改良効果の比較
Comparison of Soil Improvement

また、SBP 試験結果を表-8 に示す。同表によれば、改良体杭間地盤の変形係数、土圧係数の双方が「TAFDEX」打設後に増加していることがわかる。これらの効果は、「TAFDEX」打設による物理的締固めと化学的締固め (図-1 参照) の双方の効果として現れたものである。

5.5 地盤改良体の試掘調査

「TAFDEX」打設後 21 カ月経過時点で試験施工地点の掘削工事が実施されたことに伴い、「TAFDEX」の地中での膨張特性を確認するための試掘調査を実施した。試掘深度は、掘削工事工程を勘案し深度 GL-5m、-7.5m とし、すべての改良体の直径を計測し、初期直径 (700mm) からの膨張量を推定した後、密度や強度、変形特性を把握するための試料採取を行った。

写真-6 は直径計測状況を示したものであり、杭間地盤の N 値の増加に寄与する 15 本の改良体直径計測結果

表-8 孔内水平載荷試験結果

Results from Self Boring Pressuremeter Tests

測定時期	測定位置	深度 GL -m	K_o	E_p (MN/m ²)
改良前		-5.25	0.42	4.38
膨張後	SBP-A1	-5.25	0.89	12.1
	SBP-A2	-5.25	0.78	14.0
		-6.50	0.78	6.0
	SBP-A3	-6.50	0.80	21.8



写真-6 「TAFDEX」試掘調査状況
Excavation of 'TAFDEX'

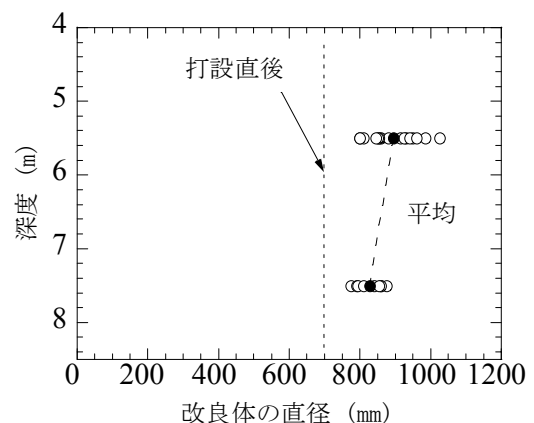


図-12 「TAFDEX」改良体の直径計測結果
Diameter of 'TAFDEX'

表-9 地中の「TAFDEX」の直径計測結果

Summary of Measured Diameter of 'TAFDEX'

深度 (m)	有効上 載圧 (kN/m ²)	実測直径 (平均値) (mm)	体積膨 張量 (%)	無拘束圧時 に対する膨 張比率
GL -5.5	50	903	66	0.94
GL -7.5	64	835	42	0.60

を図-12、表-9 に示した。表-9 によれば、改良体直径は深度 5.5m で平均 903 mm、深度 7.5 m では 835 mm に達しており、それぞれの深度における平均体積膨張率は、66 %ならびに 42 %となる。無拘束圧時の体積膨張率は 70 %であるので、各深度の膨張量は無拘束圧時の 94 %、60 %に低減されたことになる。特に前者の割合が土槽試験結果と比較して高いが、その原因のひとつとして細

粒分含有率の高い地盤が不均一に存在したことが考えられる。

改良体の直径を計測した後、試料を採取し一軸圧縮試験を実施した。得られた一軸圧縮強さの度数分布を図-13 に示す。「TAFDEX」打設後 21 カ月経過時点での一軸圧縮強さは、平均で 327 kN/m^2 あり周辺砂地盤と比較して、十分に高い強度を発現していることが確認された。

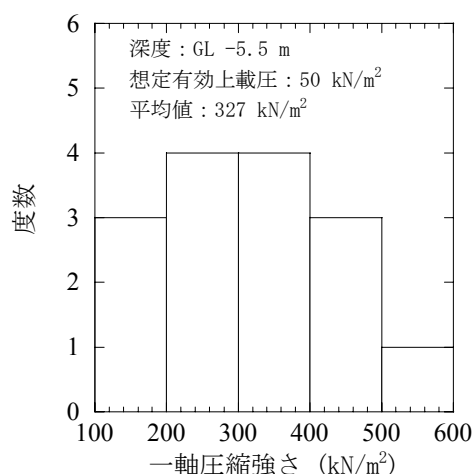


図-13 TAFDEX の強度分布
Unconfined Strength of 'TAFDEX'

6. まとめ

地下水との化学反応によって膨張固化する性状を有する新たな材料「TAFDEX」を締固め工法に適用した液状化対策工法に関して、周辺地盤の拘束圧と転炉スラグの初期含水比が「TAFDEX」の膨張特性に及ぼす影響、現地で使用可能な混練装置を用いた「TAFDEX」の製造と品質確認試験結果、ならびに地盤改良効果確認のための施工試験結果を示した。本論文にて得られた主な知見を以下に示す。

- 1) 「TAFDEX」の体積膨張率は、周辺地盤からの拘束圧に大きく依存する。したがって、材料の膨張による改良体直径の増加を加味した改良率を設定するには、この効果を適切に評価する必要がある。
- 2) 「TAFDEX」の地中での膨張量を精度良く予測するためには、混合材料の一つである転炉スラグの初期含水比と硬焼石灰との化学反応に起因する膨張ロス（1 次膨張）を把握することが重要である。本研究

- を通して、転炉スラグ初期含水比と材料混合後の経過時間から 1 次膨張量を評価するための図を示した。
- 3) 現地混練装置を使用した「TAFDEX」の製造試験を実施し、材料の密度ならびに膨張性能からみた品質の均一性が十分に確保されることを確認した。
- 4) 「TAFDEX」を実際の締固め施工機械を使用して地中に打設し、砂を用いた従来の締固め工法との効果の比較検討を行った。その結果、「TAFDEX」の膨張による改良率増加効果を考慮して改良体打設間隔を拡大しても、従来工法とほぼ同等の改良効果が得られることを確認した。しかしながら、現段階では、適用事例が限られているのも事実であり、今後、多様な地盤に対する適用性を実施工を通して確認していく必要がある。
- 5) 4)で打設した改良体の試掘調査を実施し、当初想定した地中での膨張量が確保されていること、ならびに長期間経過後、周辺砂地盤と比較して十分に高い強度を有していることが確認された。

参考文献

- 1) (財)国土開発技術センター：SAVE コンポーザーによる静的締固め砂杭工法，1997.
- 2) 石井裕泰，宇野浩樹，藤原斉郁，堀越研一，立石章，檜垣貫司，志波由紀夫：膨張性固化材料を用いた液状化対策工法に関する実験的検討，大成建設技術センター報，第 34 号，2001.
- 3) Uno, H., Fujiwara, T., Ishii, H., Horikoshi, K., Tateishi, A. and Harada, K. : Physical Modeling of New Liquefaction Countermeasure based on Soil Densification, Proc. Physical Modeling in Geotechnics, pp.539-544, 2002.
- 4) (財)土木研究センター：膨張固化性能を有する締固め工法用材料 TAFDEX (タフデックス)，建設技術審査証明報告書，建技審証第 0323 号，2004.
- 5) 堀越研一，藤原斉郁，石井裕泰，檜垣貫司，原田健二：液状化対策として膨張性固化材を打設した場合の砂地盤の密度増大効果について，第 36 回地盤工学研究発表会，pp.1139-1140，2001.
- 6) 堀越研一，藤原斉郁，石井裕泰，宇野浩樹，檜垣貫司，志波由紀夫，原田健二，出口敏博：膨張性固化材を利用した液状化対策工法の開発，土木学会第 6 回耐震補強・補修技術，耐震診断技術に関するシンポジウム，pp. 57-64，2002.
- 7) Horikoshi, K., Fujiwara, T., Ishii, H., Uno, H., Higaki, K. and Harada, K. : Liquefaction Countermeasure with the use of Expansive Material, Proc. 12th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp.481-484, 2003.