

III—3 小樽臨港線建設に伴うヘドロ固化工法について

北海道小樽土木現業所 正会員 荒木良悦

橋本達則

正会員 畑 秀叔

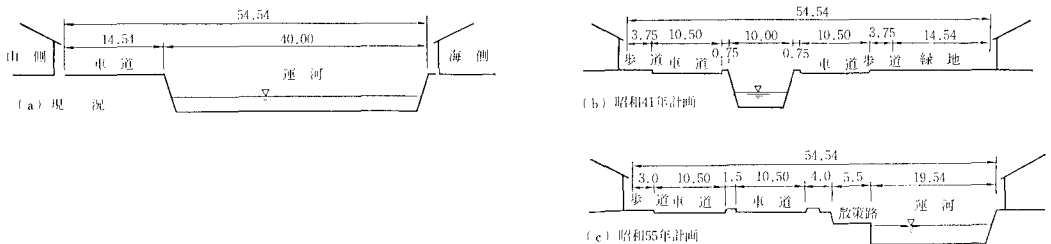
1. まえがき

小樽市は、後志支庁の北側に位置し、三方を山に囲まれその山々が海へせり出しているため、坂道の多い港まちとして知られている。

小樽都市計画道路臨港線は、この小樽港の臨港地区と一般都市部との境界に位置し、標準幅員30m・延長3550mで昭和41年都市計画決定された。臨港線は都市交通のほか港湾交通にも機能できるものとして同年から事業が始まり、延長2540mが整備されすでに完成部分は供用開始している。

臨港線の小樽運河にかかる延長約650mの区間については、当初幅員40mで中央部に幅10mの水路を抱く構成(図-1)とし、港湾計画においても道路以外の運河水面(幅員約14.5m)を緑地として全面埋立することで計画決定されていたが、「小樽運河と石造倉庫群が一体となったこの地区特有の歴史的遺産と街並み景観の保存と再生」を求める保存運動が台頭し全国的に関心を集めるようになり、地域の開発と環境の保全という新しい都市づくりの課題としてあげられるようになった。このため、運河の水面を可能な限り残し、周辺的环境に配慮するということから、都市計画については昭和55年9月に幅員35mで運河沿いに散策路を設け、車道との間に緩衝帯を配置する計画(図-1)に、港湾計画については昭和56年4月に変更を行い、当初の運河全面埋立から一部埋立に変更され、昭和57年9月公有水面埋立の免許が下り、同年12月から工事を開始したところである。

(図-1) 臨港線・小樽運河部の道路断面図



2. 小樽運河とヘドロ

小樽運河とその周辺地区は、小樽が港湾・商業都市として隆盛を誇った時代(明治中期、大正、昭和初期)の中心的地区で、北海道開拓の歴史のなかで、海陸輸送の拠点として北海道の発展に貢献した地区である。港湾施設として明治30年北防波堤の建設が始まり、その後迂余曲折があったが艀による従来の荷役方式を生かすということで、大正3年から9年の歳月をかけて沖合を埋立し、延長1328m、幅40m、水深2.5mの運河が完成したのである。しかしながら、その後の時代の要請もあり近代港としての整備が進められてゆくのにしたが、埠頭岸壁の接岸荷役へと変遷し、港湾施設としての運河の役割は次第に衰亡して来たのである。ほぼその役割を終えた運河には、3カ所から河川が流入しており毎年多量の土砂、家庭雑排水等が放出され、それが長年の間にヘドロ化し1.5～3.5m程の厚さで堆積している。

3. ヘドロの性質

ヘドロの性質を解明するために、化学分析及び物理試験を行なったが、結果は(表-1、2)のとおりである。

(表－１) 底質分析結果表(乾泥当り)

分析項目	水分率 (乾泥) %	PH	鉛 ppm	カドミ ウム ppm	銅 ppm	亜鉛 ppm	鉄 %	マン ガン ppm	全ク ロム ppm	六価 クロム ppm	ひ素 ppm	シアン ppm	総水銀 ppm	有機水銀 ppm	有機水銀 ppm	PCB ppm	COD mg/g	硫化物 mg/g	フェノ ール類 ppm	n-ヘキ サン抽出 物 ppm
試料名																				
A－1	36.3	7.4	137	1.40	94.1	314	4.1	392	71.9	ND	1.86	0.16	0.27	ND	ND	0.36	44.4	5.19	4.3	27,300
A－2	37.2	7.4	139	1.40	98.7	306	4.3	420	77.9	〃	1.56	0.12	0.30	〃	〃	0.32	40.8	4.88	3.9	28,600
A－3	36.8	7.4	135	1.42	98.1	329	4.2	396	71.9	〃	1.64	0.12	0.30	〃	〃	0.29	42.0	4.87	4.0	28,100
平均	36.8	7.4	137	1.41	97.0	316	4.2	403	73.8	〃	1.69	0.13	0.29	〃	〃	0.32	42.4	4.98	4.1	28,000
B－1	26.6	7.2	45.0	0.43	38.8	77.0	4.0	319	80.9	〃	1.02	0.10	0.06	〃	〃	0.11	8.2	0.39	2.0	3,000
B－2	26.9	7.2	44.8	0.42	34.2	78.7	3.9	337	99.1	〃	1.18	0.10	0.05	〃	〃	0.17	9.1	0.35	2.0	3,900
B－3	26.3	7.1	44.5	0.41	34.3	80.1	3.9	339	93.1	〃	1.23	0.10	0.07	〃	〃	0.07	8.3	0.37	2.2	3,700
平均	26.6	7.2	44.8	0.42	35.8	78.6	3.9	332	91.0	〃	1.14	0.10	0.06	〃	〃	0.12	8.5	0.37	2.1	3,500
地殻平均値																				
Taylor and Matsui goldschmit (1954)			15	0.15	55	40	5.1	1,000	100		2		0.08							
Clark and Kimura Lange (1956)			16	0.2	70	80		1,000	200		5		0.5							
土壤中通常 (Bowen)			15	0.5	100	40		900	200		5		0.2							
			16	0.15	70	—		960	370		5		0.5							
			2～ 200	1	2～ 100	10～ 300	0.7～ 55	100～ 4,000	5～ 3,000		0.1～ 40		0.03							

注 1) Ahrens－Taylor (1961) による。

2) NDとは、定量限界値未満を示し、定量限界値は、六価クロム 2 ppm、有機磷 0.01 ppm、有機水銀 0.01 ppmである。

(表－２) 底泥の物理的特性

		ヘドロ状粘性土	砂質土
土粒子の真比重Gs		2.3～2.5	2.6～2.7
含水比W(%)		90～200	25～45
粒度特性	砂分 (74～2,000 μ) %	8～40	50～94
	シルト分 (5～74 μ) %	40～75	5～40
	粘土分 (5 μ 以下) %	16～25	0～14

(表－３) 室内試験における固化後
分析項目及び分析方法

項目	分析方法
検液の作成	告示第13号 供試試料に溶媒(再蒸留水に水酸化ナトリウムを加え、PH8.0になるようにしたもの)とを重量体積比10%の割合で混合し、常温で6時間振とうし、遠心分離した後の上澄み液から必要量をとり各分析に供した。
PH	JIS・K・0102、8、1 ガラス電極法
銅	〃 37、2 備考1)及び(3)原子吸光光度法
亜鉛	〃 〃 〃
鉛	〃 〃 〃
カドミウム	〃 〃 〃
鉄	〃 47、2 〃
ひ素	〃 48、2 ジェチルジチオカルベン酸銀法
全水銀	告示第59号附表第2に掲げる方法、還元気化循環法
PCB	〃 第4 〃 ガスクロマトグラフ法

注 1) 告示第13号 : 環境庁告示第13号「産業廃棄物に含まれる有害物の検定方法」S 48.2

2) JIS・K・0102: 日本工業規格「工場排水試験方法」1974

3) 告示第59号 : 環境庁告示第59号「水質汚濁に係る環境基準について」S 46.12

分析項目及び分析方法は(表－３) 環境庁水質保全
局水質管理課編による「底質調査方法とその解説」

(S 52.2)に基づいて行ったが、これに規定されてい
ない項目については、本地区の底質の性状を考慮して
既に発表された文献から選択して分析を行った。

化学分析の結果、土壤中に通常含まれている値を上
廻るのは、重金属ではカドミウムだけでこれについて
も通常の場合、カドミウムは最低 0.05 ppm、最高で 2.0
ppm と考えられており、通常の範囲内の数値である。
また物理試験の結果、於古発川が流入している浅草橋
附近は砂質土、これより色内川部まではヘドロ状粘性
土と２種類に大別されるが、これは比重の大きい粒子
及び粒径の大きい粒子が掃流流速の小くなった地点
で沈降した結果と考えられる。

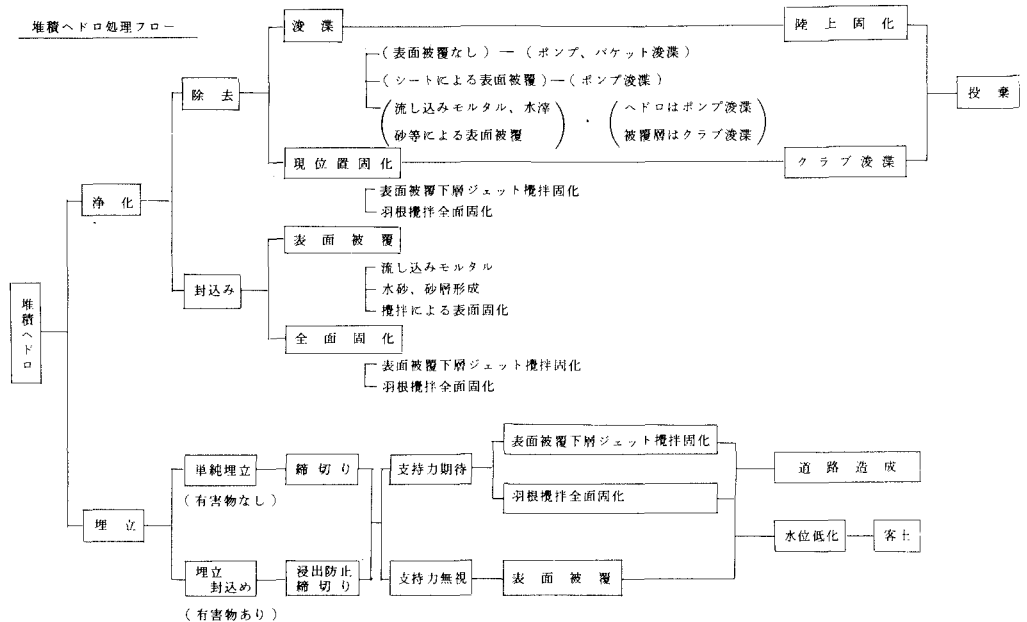
4. ヘドロ固化の目的

調査の結果、ヘドロは運河内全体で約 8 万 m³ 堆積し
ており、これを浚渫し他地域へ投棄する場所がない為
現位置に埋立てる以外ないことや、またヘドロはすで
に炭化しており雨が降ったり船が通過した後など運河
が攪拌された時や、特に高温多湿の夏期に異常な悪臭
を放すことが、附近住民のアンケートから知れていた
こともあり、ヘドロの処理計画は、(図－２) のヘド
ロ処理フローから、以下の目的で現位置で水中固化処
理を行うこととした。

い) 有害物質の２次溶出の防止

- ii) 道路基盤として圧密沈下の防止
- iii) 河川部浚渫時におけるヘドロの水中拡散防止及び悪臭防止
- iv) 河川部基盤として洗堀防止
- v) 護岸構造物に対する水平抵抗の増加

(図-2) 堆積ヘドロ処理フロー



5. セメント等による固化反応

固化材の選択にあたっては、前述の固化目的を満足することが第一条件となるが、固化材自体に要求される性能として

- i) 固化体強度は通常コンクリート強度より非常に低くて良い。(1/10 以下)
- ii) 高含水軟弱土が固化できる。
- iii) 施工上、早期強度が望まれる。
- iv) スラリー状でも使える。(工法上)
- v) 単価が安い。

などの条件が必要である。

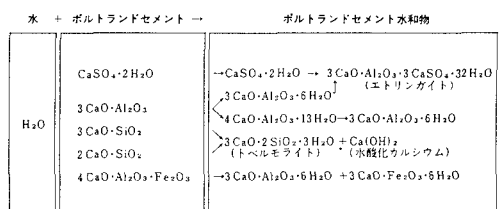
固化材の実績等からはヘドロ等の軟弱土のセメント系材料による改良工法が、その施工機械の開発と共に最近著しい進歩をとげている。これはセメントをベースにその効果をより高めるために適当な添加材を加える等の改良を行い、軟弱土等の特性に合った固化反応を持たせている。すなわち

- i) エトリンガイトの生成で有機質土、高含水土でも経済的に固化できる。
- ii) 粒子構成、添加材効果で急硬性の付加。
- iii) 珪酸カルシウム水和物による長期安定性の付加。

等を配慮したものである。この固化反応は、基本的にはセメント鉱物の水和反応が主体であり、ポルトランドセメントの水和反応で説明すると(図-3)のとおりである。

ポルトランドに水が加えられると各鉱物が加水分解を

(図-3) ポルトランドセメントの水和の説明



受けカルシウム、 CaSO_4 等が溶け出し、最も反応が早い $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ の水和物と反応し $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ (エトリンガイト) を生成する。エトリンガイトは一般に膨張材として市販されているものの主生成物で、通常のセメントコンクリートにとっては有害となるケースが多く、このためポルトランドセメント中に含まれる硫酸根の量は JIS 規格に規制されている。セメント硬化体の強度を支配するのは、珪酸カルシウムの水和反応によるダブルモライトを主体とするセメントゲルである。すなわち多少強度を低下させても、多量の H_2O をエトリンガイトの結晶として中に封じ込め、珪酸カルシウム水和物により長期に安定させることである。

6. 固化材の強度試験

前述のヘドロの物理試験から、ヘドロ状粘性土と砂質土の 2 種類について、各種固化材の配合を変えて一軸圧縮強度の比較をした。

- i) 固化材の種類 4 種類
- ii) 供試体の配合

試料に対する固化材の割合は試料の乾燥重量に対して 10、15、20、30、40、50 % の割合で配合した。

- iii) 供試体の作製

材料の混合には、ホバート型ソイルミキサーを使用した。計量した試料及び固化材を混合容器に入れ、回転数 140 rpm で 3 分間攪拌し、右図に示す様なモールドに入れ、3 層に分けて各層ごとにモールドをコンクリート台上で 15 回叩き振動を加えて、上端をヘラでならしてビニールシートでキャップする。

- iv) 供試体の本数

供試体は、各ケース共各材令につき 3 本ずつ作成した。

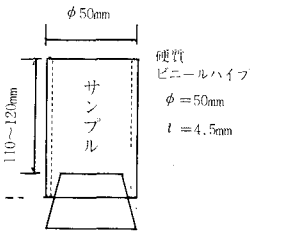
- v) 供試体の養生

養生箱にモールドに入れたままの供試体を入れ、上に濡れムシロを被せムシロが乾燥しないように 2 ~ 3 日おきに散水し、養生を行なった。

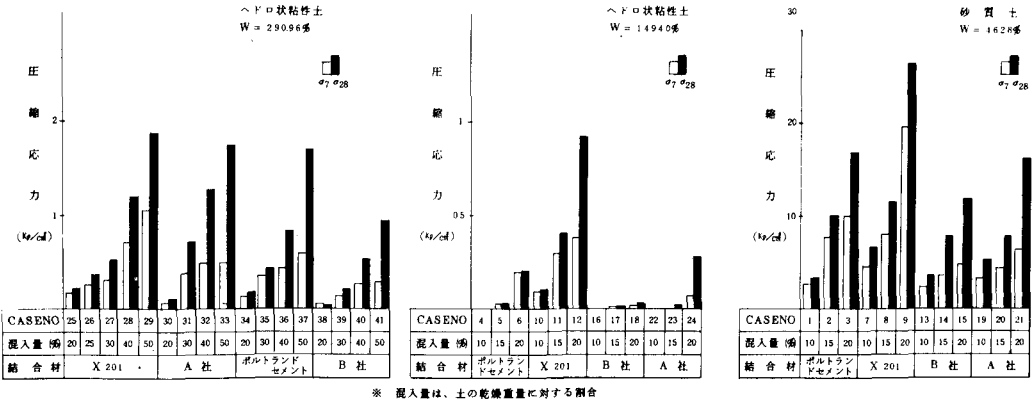
- vi) 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験は、JISA 1216 の方法で行ない試験機はヒズミ制御型試験機を用い、ヒズミ速度 1 % / min で圧縮を行なった。試験結果は、(図 - 5) のとおりである。

(図 - 4)



(図 - 5) 強度試験結果一覧



ヘドロ状粘性土については、X201 を除いて、10% 混入量ではほとんど強度が発現せず、15% 以後強度が大きくなる傾向を示しているが、B社は混入量を増加しても強度は小さい。X201 は混入量を増加するに従い、急激に強度増加する傾向を示している。砂質土については、全体に混入量を示している。X201

及びA社は、混入量15％から急激に強度が上昇しているが、ポルトランドセメント及びB社はほぼ直線的な伸びを示している。

7. 固化後の溶出試験

溶出試験の供試体は、固化材2種について配合割合3種（10、15、20％）のものを夫々3個ずつ同筒形のテストピース（半径2.5cm、高さ11.5cm）を作成し、4週間経過したものについて行った。

分析項目及び分析方法は、環境庁告示第13号「産業廃棄物に含まれる有害物質の検定方法」に基づき、検液の作成及び各項目を分析した。この検定方法に指定されていないPH、鉄、銅、亜鉛については、JISK0102に基づき分析した。分析結果は（表－4）のとおりである。

（表－4） 溶出試験分析結果

No	疑問材の種類	配合割合 %	PH	銅 mg/l	亜鉛 mg/l	鉛 mg/l	カドミウム mg/l	鉄 mg/l	ひ素 mg/l	全水銀 mg/l	PCB mg/l	
4	1	10	10.5	0.003	0.040	ND	ND	0.21	0.007	ND	—	
	2		セメント	10.6	〃	0.042	〃	〃	〃	〃	—	
	3		(ポルトランド)	10.7	〃	0.042	〃	〃	〃	〃	—	
平	均			10.6	〃	0.041	〃	〃	〃	〃	—	
5	1	15	11.3	ND	0.011	〃	〃	0.09	ND	〃	—	
	2		〃	11.4	〃	〃	〃	〃	0.07	〃	—	
	3		〃	11.3	〃	〃	〃	〃	0.09	〃	—	
平	均			11.3	〃	〃	〃	〃	0.08	〃	—	
6	1	20	11.2	〃	0.007	〃	〃	0.05	〃	〃	—	
	2		〃	11.3	〃	〃	〃	〃	〃	〃	—	
	3		〃	11.2	〃	〃	〃	〃	〃	〃	—	
平	均			11.2	〃	〃	〃	〃	〃	〃	—	
10	1	10	10.9	〃	0.024	〃	〃	〃	〃	〃	—	
	2		X 201	10.8	〃	〃	〃	〃	〃	〃	—	
	3		〃	10.7	〃	〃	〃	〃	〃	〃	—	
平	均			10.8	〃	〃	〃	〃	〃	〃	—	
11	1	15	11.4	〃	0.018	〃	〃	0.04	〃	〃	—	
	2		〃	11.4	〃	〃	〃	〃	0.04	〃	—	
	3		〃	11.3	〃	〃	〃	〃	0.03	〃	—	
平	均			11.4	〃	〃	〃	〃	0.04	〃	—	
12	1	20	11.6	〃	0.011	〃	〃	0.03	〃	〃	ND	
	2		〃	11.6	〃	0.012	〃	〃	〃	〃	—	
	3		〃	11.6	〃	0.011	〃	〃	〃	〃	—	
平	均			11.6	〃	0.011	〃	〃	〃	〃	—	
溶出基準						3 以下	0.3以下		1.5 以下	0.005 以下	0.003以下	注2)
排水基準			海域 5.0～9.0	3 以下	5 以下	1 以下	0.1 以下	10 以下	0.5 以下	0.005 以下	0.003以下	注3)
環境基準			海域A 7.8～8.3			0.1 以下	0.0 以下		0.05以下	0.0005以下	検出されな いこと	注4)
水道水 基準			5.8～8.6	1 以下	1 以下	0.1 以下	0.0 以下	0.3 以下	0.05以下	検出されな いこと		注5)

注1) NDとは、定量限界値未満を示し、銅0.002mg/l、鉛0.001mg/l、カドミウム0.002mg/l、ひ素0.004mg/l、全水銀0.000mg/l、PCB 0.0025mg/l。

注2) 「金属等を含む産業廃棄物等に係る判定基準」（総理府令第5号 S48.2）

注3) 「有害な産業廃棄物に係る判定基準を定める総理府令」（総理府令第6号 S48.2）

注4) 「水質汚濁に係る環境基準について」（環境庁告示第59号 S46.12）

注5) 「水質基準に関する省令」（厚生省令第56号 S53.8）

成分分析では、（表－1）の底質分析結果から、鉛、亜鉛、カドミウムが地殻平均値をかなり上廻っていたが、固化材の使用によりPHを除き水道水クラスの濃度しか溶出しなかった。

8. 実施設計

前述の室内試験より、次のことがわかった。

i) 固化後におけるヘドロの強度は注入した固化材の量と供試体中の水の量との比率（C/W Total）により推定できる。

ii) 安定計算により改良後の強度は1.0 ㎏が必要である。

よって、固化材の必要量はヘドロの含水比を測定することにより求められることになる。実験によるヘドロ状粘性土と砂質土の圧縮応力とC/W Totalの関係は、（図－6）のとおりである。

パイルの配置は、ヘドロ固化の目的が違いため河川部と道路部において(図-7)のとおり設計した。

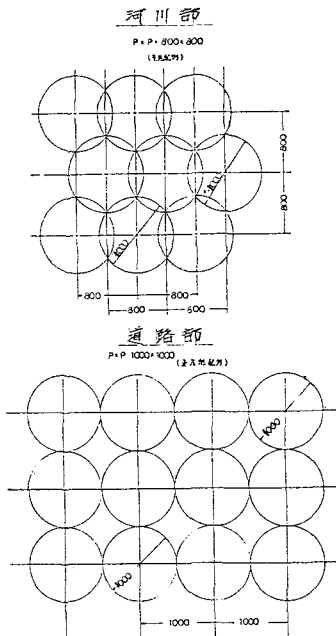
また、固化工法の選択については、
i) 運河内には沈船、その他自転車、冷蔵庫等の大型鉄くづが捨てられている可能性がある。

(羽根の損傷、固化むらの防止)

ii) ヘドロを極力飛散、攪拌させない。(悪臭の防止、圧さく空気を使用しない)

などから、高圧噴射攪拌方式とした。この施工手順は(図-8)のとおりである。

(図-7) パイル配置図



9. おわりに

ヘドロの固化について調査から実施設計まで、その概略を述べてきたが、固化材の性質による運河水のPHの上昇、攪拌浚渫時におけるCOD、SSの増加等があり、これらの濁水処理も合わせて施工計画をたて現在工事を実施中であります。

今後機会があれば、現場の施工報告をしたいと考えています。

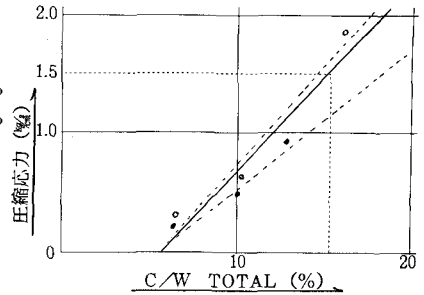
<参考文献>

- 小樽運河史 (昭和54年 渡辺悌之助著)
- 小樽運河とその周辺地区環境整備計画 (昭和56年 小樽市)
- 3.2.4 臨港線道路改良工事の内運河ヘドロ処理工法検討書 (昭和53年 北海道小樽土木現業所)
- セメント系材料による軟弱土等の固化について (小野田セメント株式会社 古谷俊明著)

(図-6) 圧縮応力 C/W Total 図

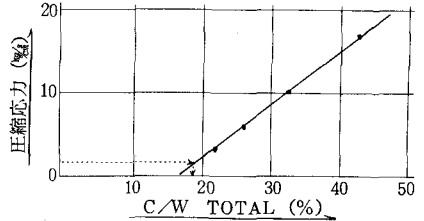
1. ヘドロ状粘性土

- SP200 W= 290.96%
- SP630 W= 149.40%
- 材令28日、固化材X201の場合

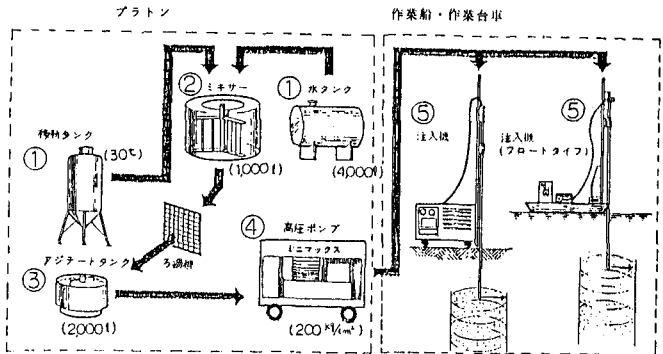


2. 砂質ヘドロ

- SP750 W= 46.28%
- 材令28日、固化材ポルトランドセメントの場合



(図-8) 固化施工手順



- ① 固化材と水を計量する。
- ② 計量された材料をミキサー (1,000 ℓ) で十分混合してスラリーを作る。
- ③ ミキサーで調合されたスラリーは調合タンク (アジテータンク 2,000 ℓ) に一時貯えられる。
- ④ 常用圧力 200 ㏩の超高压ポンプホースを通じ注入機に圧送される。
- ⑤ 注入機のロッドを定速回転させながら連続して引き上げる。高压圧送されたスラリーはロッドの先端に取付けられているノズルから高速噴流となって軟弱地盤中に噴射されスラリーと軟弱土は強制攪拌されて円柱状の改良土が出来上がる。注入完了後注入機を移動し、次の施工位置にセットする。