JET GROUTING METHOD

J G P METHOD

TECHNICAL MANUAL

SOILCRETE TECHNOLOGY CO.,LTD.

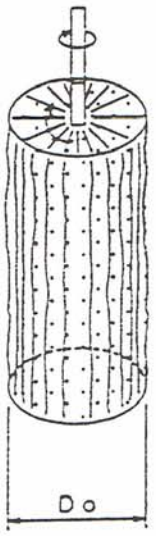
CONTENTS

		PAGE
1	SPECIAL FEATURES OF JGP METHOD	1
	1.1 OUTLINE OF JGP METHOD	1
	1.2 THE CHARACTERISTICS OF JGP METHOD	3
	1.3 CONDITIONS OF APPLICATION	4
	1.4 THE CASE WHICH REQUIRES CAREFUL INVESTIGATION AND COUNTERMEASURES	6
	1.5 UNSUITABLE CONDITION FOR JGP	6
2	BASIC CHARACTERISTICS	7
	2.1 STANDARD DIAMETER OF JGP COLUMN	7
	2.2 CHARACTERISTICS OF STABILIZATION	8
	2.3 INVESTIGATIONS	9
3	HARDENING AGENT AND MIXING RATIO	10
	3.1 HARDENING AGENT	10
	3.2 WATER CEMENT RATIO (W/C)	10
	3.3 MIXING AMOUNT NECESSARY IN EXECUTION	11
	3.4 MIXING AMOUNT DETERMINED FORM MIX PROPORTIONING TEST	12
4	TYPICAL DESIGN METHOD	13
	4.1 CALCULATION OF PENETRATION DEPTH OF EARTH RETAINING WALL FOR EXCAVATION WORKS	13
5	EXECUTION	17
	5.1 EXECUTION SYSTEM	17
	5.2 THE FLOW OF HARDENING AGENT AND CEMENT SLURRY	18
	5.3 PROCEDURE	19
6	MACHINERY FOR JGP WORK	20
	6.1 STANDARD MACHINERY	20
	6.2 ARRANGEMENT OF SLURRY PLANT	21
	6.3 JGP MACHINE	22
7	EXECUTION CONTROL	23
	7.1 EXECUTION CONTROL	23
	7.2 QUALITY CONTROL	24
8	EXAMPLES OF APPLICATION BY JGP METHOD	25

1. SPECIAL FEATURES OF JGP METHOD

1.1 OUTLINE OF JGP METHOD

JGP method is the soil stabilization method which can achieve the large diameter stabilized soil column by using the superior mixing performance of jet grouting. Jet grout mixing can get the highest mixing effect by the destruction of a soil organization using the impact of the hardening agent slurry with the powerful kinetic energy. We can make an improvement execution close to the foundation pile or sheet pile etc. utilizing the jet grouting mixing system with the high pressure, different from the mechanical mixing method. And this method is very economical because we can get a large diameter stabilized soil.



Improved soil

Fig. 1.1 Difference in the improved soil

THE PRINCIPLES OF JGP METHOD

The principles of jet grouting is the compulsory mixing of the soft soil with the agent by rotating and withdrawing the rod while jetting the hardening agent slurry horizontally from the nozzle of rod head.

The theory of destruction power is based on the principle of the high pressure jet stream mechanism.

$$F \fallingdotseq \rho \cdot Q_p \cdot V_o$$
$$F \fallingdotseq \rho \cdot (A \cdot V_o) \cdot V_o$$
$$F \fallingdotseq \rho \cdot A \cdot V_o^2$$

F : Destruction power of jet stream

ρ : Density ($\rho = \frac{\gamma}{g}$) $(kgf \cdot S^2/m^4)$

Q_p : Flow of a pump (m^3/S)

$Q_p = A \cdot Vo$

V_o : Velocity of a flowing fluid (m/S)

A : Area of nozzle cross section (m^2)

$$F \fallingdotseq K \cdot A \cdot P$$
$$\fallingdotseq K' \cdot Q_p \cdot P$$

P : Pressure of pouring (kgf/m^2)

K, K' : Coefficient

1.2 THE CHARACTERISTICS OF JGP METHOD

1) Economical execution

Large diameter stabilized soil can be obtained economically by the high pressure jet stream.

2) Safety and reliable effect

Safety and reliable effect can be expected over a long period of time.

3) Wide application range of soil type

JGP Method is application to all types of soil, for example, sandy soil, silt, clay, sludge and peat.

4) Execution close to earth retaining etc.

We can execute close to the earth retaining or foundation pile and make mutuality rapped stabilized soil column because of the high pressure jet stream. Therefore, JGP method has a possibility of prevention of heaving failure, increment of K-value and availability as underground beam.

5) Shortening of execution term

Substantial reduction of execution period is made possible because the large diameter stabilized soil can be made at a time by the effect of special rod head.

6) High ability of penetration

Penetration into the hard sandy ground ($N \leq 20$) is made possible by usi the high power boring machine.

1.3 CONDITIONS OF APPLICATION

The conditions for the determination whether the JGP method is applicable to the execution are as follows.

1 Classification of soil properties

2 Ability of penetration

3 Restriction of the execution

4 Purpose of the execution

1) Classification of soil properties

Table-1.1 Applications

Soil type	Soil conditions
Silty Clay	$C \leqq 3.0$ tf/m^2
Sandy soil	$N \leqq 10$
Peat	$W \leqq 1{,}000\%$
Sludge	$W \leqq 400\%$

2) Penetration ability

(1) It's not necessary to remove such obstacles as mass of concrete, gravel before execution.

3) Restrictions of the execution

Table-1.3 Restrictions of stabilization work

Conditions for work		Restrictions
Space for work		Over 12m clearance up to the upper obstacle is required.
Area for work		Over 150m^2 area is necessary at the plant site.
Distance		The distance from plant site to execution site should not be over 300 m as a rule. If it is over 300 m, we must move the plant site or set up a relay plant.
Temporary work of execution Point.	Level ground	After leveling of ground, crawler drill should be adjusted with iron plate or other materials.
	River etc.	The cross-beam should be set up to the crossing direction and then H beam for slide base should be installed on it.
Obstacles in the ground		If there is any obstacles, for example, pipe in the ground, we should excavate the ground and hang the pipe before the execution.

In addition to these conditions, we should make field observation if we execute close to an important structure.

4) Objectives for execution

The objectives for JGP method are as follows.

(1) The prevention of sliding failure of the embankment and cutting.
(2) Strengthening the bearing capacity and reduction of settlement of the structure.
(3) Prevention of heaving in excavation.
(4) Increment of K-value (Coefficient of horizontal subgrade reaction) in the execution of pile, earth retaining wall and cantilever revetment.
(5) Improvement of river bed soil and river banks.
(6) Making underground beam.
(7) Hardening of the special soft soil such as sludge or organic soil.
(8) Filling up a gap between the deep mixing soil pile and earth retaining wall.

1.4 THE CASE WHICH REQUIRES CAREFUL INVESTIGATIONS AND COUNTERMEASURES

1) Execution close to the pipes and other structures in the ground (Swelling, Lateral deformation)

   Sometimes JGP method causes the lateral deformation because the hardening agent slurry is injected into the ground compulsorily.

2) Structure of stabilized soil which receives bending stress
3) Use for independent pile
4) In the case of stabilizing solid sandy soil (N>1~20) or cohesive soil (C>3~5tf/m^2)
5) Use for cutting water

1.5 UNSUITABLE CONDITIONS FOR JGP

1) Ground conditions for stabilizing
   (1) Sandy soil (N>30), cohesive soil (C>10 tf/m^2)
   (2) Ground which has spring water

2) Purpose of stabilization
   (1) Cutting water in the depth of over 30 m in the ground
   (2) Protection of the valuable structures in the ground

2. BASIC CHARACTERISTICS

2.1 STANDARD DIAMETER OF JGP COLUMN

Diameter of column in stabilization velocity and soil type

Table-2.1 Standard diameter of JGP column

Soil type	Characteristics of soil	Standard diameter D (m)	Standard time for stabilization (min/m)
Sandy soil	N<5	0.5~1.2±0.1	0.5~3.0
	5≦N≦10	0.4~1.1±0.1	0.5~3.0
Cohesive soil W=60~150%	C≦1.0 tf/m^2 (W>100%)	0.6~1.4±0.1	0.5~3.0
	C≦3.0 tf/m^2	0.4~1.3±0.1	0.5~3.0
Organic soil W=150~1,000%	C≦1.0 tf/m^2 (W>500%)	0.6~1.4±0.1	0.5~8.0
	C≦3.0 tf/m^2	0.4~1.3±0.1	0.5~5.0
Sludge	(W>150~250%)	0.6~1.5±0.2	0.5~5.0
	(W>250~400%)	0.6~1.8±0.2	0.5~7.0

(1) In deciding the diameter of JGP column, we should consider the overall condition, that is, basic characteristics of soil, grain size, water content, cohesion, actual results, purpose and safety etc.

(2) If the soil type is not mentioned in the above table, we should confirm the diameter of JGP by trial work.

(3) In case the deformation is not avoidable, we use other mixing blade for the earth removing instead of ordinary rod. The earth removal is very effective for reducing the deformation.

2.2 CHARACTERISTICS OF STABILIZATION

1) Unconfined compressive strength

Design strength (unconfined compressive strength) of JGP column which is used actually is shown below.

Table-2.3 Design strength (unconfined compressive strength)

Soil type	**Range of design strength (Kgf/cm^2)**
Sandy soil	3.0~15.0
Cohesive soil	2.0~10.0
Organic soil	1.0~6.0
Sludge	1.0~6.0

2.3 INVESTIGATION

1) Soil investigation before stabilization work

The order of the laboratory mixing test is as follows.

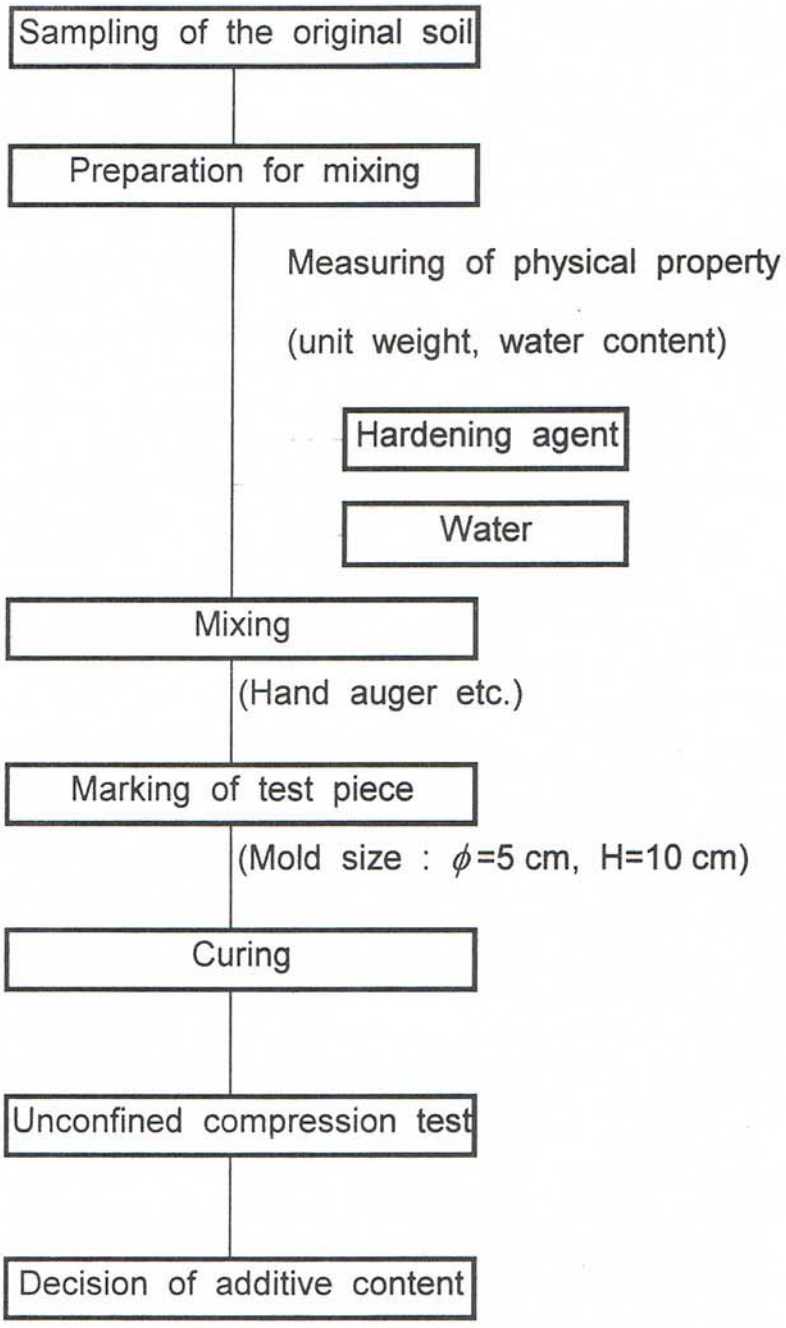


Fig.-2.7 Flow chart of laboratory mixing test

3. HARDENING AGENT AND MIXING RATIO

3.1 HARDENING AGENT

JGP method requires high stable hardening agent because it must improve the soil in very short time compared with other high pressure jet grouting methods.

We should use the cement type 1, TS 1 or TS 2 as the exclusive hardening agent according to the soil, region, purpose etc.

Table-3.1 Exclusive hardening agent

Hardening agent	soil	Feature
TS 1	General soft soil (Sand ~ Organic sonic)	Short term strength is large
TS 2	Organic soil, Sludge, Sandy soil	Long term strength is large

3.2 WATER CEMENT RATIO (W/C)

The range of water cement ratio in the JGP method is in principle as allows

$$1.0 \geqq W/C \leqq 1.5$$

Table-3.2 Standard water cement ratio

soil	W/C
Sandy soil, Cohesive	W/C = 1.5
Sludge, Organic soil	W/C = 1.0

3.3 MIXING AMOUNT NECESSARY IN EXECUTION

In JGP method, the soil improvement is made by the cutting effect using the high pressure jet stream.

For cutting the ground using high pressure jet stream, the improving time, rotation speed and rotation per minute become important factors.

The minimum injected time and rotation speed to make the column are determined by various tests in the development stage and results of execution.

The injected time of execution is managed by determined time which is shown in table-1.4, and mixing amount needed in execution is estimated as he formula below.

$$q_m \geqq \left(\frac{t3 \times Qp}{W/C + 1/\rho c}\right) \qquad (Kg/m)$$

$$a_{w1} \geqq q_m / A_p$$

Where,

q_m : Minimum mixing amount necessary in execution per 1m column (kg/m)

a_{w1} : Mixing amount necessary in execution (Kg/m^3)

t_3 : Injected time (min./m.)

(cf. Table-1.4)

Q_p : Volume flow of slurry pump

Q_p = 200 ℓ/min.

ρc : Specific gravity of hardening agent

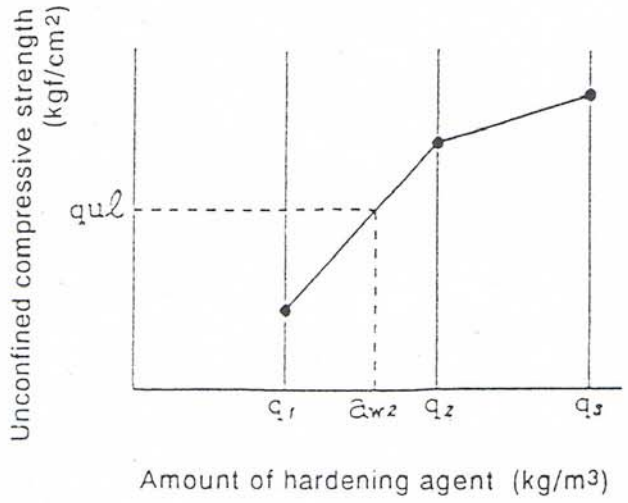
W/C : Water-hardening agent ratio

$W/C \geqq 1.5$

3.4 MIXING AMOUNT DETERMINED FROM MIX PROPORTIONING TEST

In JGP method, mixing amount for design Strength must be considered form mix proportioning test. And this amount must be kept separate form mixing amount needed in execution management.

Therefore, pre-mix proportioning test must be executed to decide the mix amount



a_{w2} : Mixing amount determined from mix proportioning test (kg / m^3)

$Q_{1\sim3}$: Level of mixing amount (kg / m^3)

$Q_u \ell$: Target of strength in laboratory (kgf / cm^2)

Fig-3.1 Mixing amount determined form mix proportioning test in laboratory

Form above figure, mixing amount can be estimated form relationship between unconfined compressive strength and mixing amount in laboratory.

4 TYPICAL DESIGN METHOD

The followings are some of the typical calculation methods of design of JGP method.

4.1 CALCULATION OF PENETRATION DEPTH OF EARTH RETAINING WALL FOR EXCAVATION WORKS.

1) Improvement of passive earth pressure

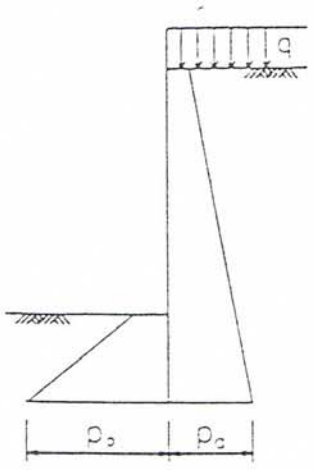
1) Earth pressure

Earth pressure is computed by using the following formula.(Rankine's earth pressure theory)

$$Pa = (\gamma t \cdot h + q) \tan^2 (45^\circ - \frac{\phi}{2}) - 2C \tan (45^\circ - \frac{\phi}{2})$$

$$Pa = (\gamma t \cdot h + q) \tan^2 (45^\circ + \frac{\phi}{2}) + 2C \tan (45^\circ - \frac{\phi}{2})$$

Where,



Pa : Active earth pressure (tf/m^2)

P_p : Passive earth pressure (tf/m^2)

γt : Unit weight (t/m^3)

h : Depth from the ground level (m)

q : Additional loading (tf/m^2)

ϕ : Angle of internal friction degree)

C : Cohesion (tf/m^2)

Fig. -4.1 Diagram of earth pressure

2 Calculation of heaving failure

The method of calculation of heaving failure is proposed in many formula by *Terzaghi, Peck* and *Tschebotaioff.*

However, Japanese Architecture Society's formula (revised formula or former formula) is most commonly adopted in case of soil improvement where only limited area has different strength

1) Former formula

The following formula is simplified Tschebotaioff method as an execution of infinite excavation so as to calculate simply and efficiently

$$Fs = \frac{Mr}{Md} = \frac{\chi \int_{o}^{\pi} Su\,(\chi\, d\theta)}{w\frac{\chi}{2}}$$

In case the stratum is regarded as uniform down to the bottom of excavation :

$$Fs = \frac{Mr}{Md} = \frac{2\pi \cdot Su}{(\gamma\tau \bullet h + q)}$$

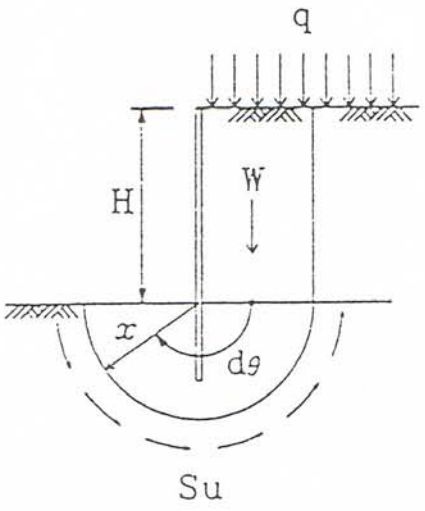


Fig.-4.3 Former formula

Where,

Mr : Resisting moment (tf m/m)
Md : Driving moment (tf m/m)
Fs : Safety factor (Original ground : Fs ≥ 1.2)
(Improved ground : Fs ≥ 1.5)
Su : Undrained shear strength of soil below the bottom of excavation (tf/m^2)
χ : Optional radius measured from the sheet pile wall (m)
W : $(\gamma_t \bullet h + q)\,\chi$ (tf/m)

2 Revised formula

This is the formula revised form the former formula in consideration of practical excavation works based on many measured data.

$$Fs = \frac{Mr}{Md} = \frac{\chi' \int_0^{\frac{\pi}{2}+\alpha} Su(\chi' d\theta)}{W \frac{\chi'}{2}}$$

α : Rad. Unit $(\alpha < \frac{\pi}{2})$

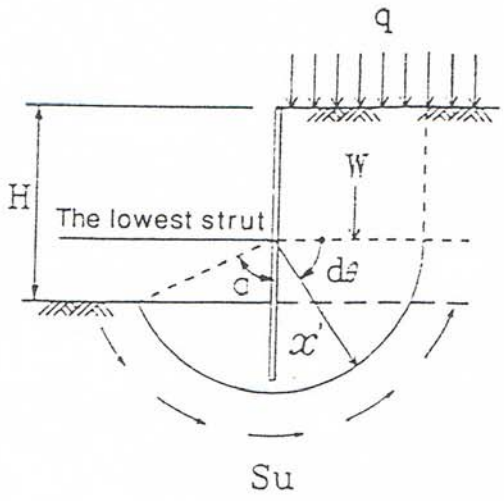


Fig.-4.4 Revised formula

In case the stratum is uniform layer up to deeper Zone, above formula is written as follow.

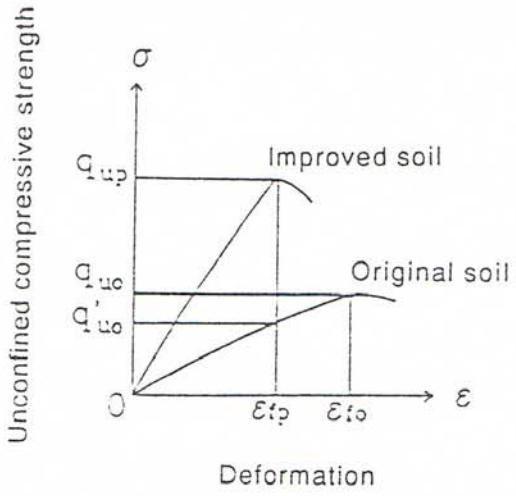
Remark : Safety factor of improved ground and original ground

In calculation of balance of earth pressure and heaving failure , safety factor of original ground is designed as more than 1.2. However, safety factor of

improved ground must be between improved ground and original ground. considered as more than 1.5.

This is the reason that the characteristic of deformation is the difference

Fig. -4.5 shows the relationship between unconfined compressive strength and deformation. It shows that the characteristic of deformation of improved soil is considerably difference from the original soil. This indicates that when we consider the resistance of the entire stabilized ground, we cannot simply add together peak strength of the improved and unimproved ground.



Therefore, safety factor must be designed as follows.

$$Fs \geqq \frac{1.2}{0.8 \sim 0.85}$$

$$\geqq 1.5$$

Fig.-4.5 Characteristic of deformation of ground

3) Minimum thickness of improved ground

In excavation works by using earth retaining wall, when the depth of excavation is relatively short, thickness of improved ground is estimated from results of calculation for balance of earth pressure and heaving failure. Minimum thickness of improved ground is prescribed as $\ell_{min} = 1.5m$.

This reason is as follows.

(1) If we use thin thickness of improved ground in the excavation work, the improved ground has a high possibility to have the bending and tensile stress.

(2) Generally speaking, Rankine's earth pressure theory cannot be applied if the thickness is thin. Various designs prescribe the minimum penetration depth. (Steel sheet pile : 3.0m, Berlinoise method : 1.5m)

5 EXECUTION

5.1 EXECUTION SYSTEM

1) Execution process

1) Prior to the execution, We should decide the mixing ratio of hardening agent by laboratory mixing test, and improving time, water cement ratio at the same time.

2) In the plant site, the hardening agent and water are mixing well after measuring each weight. After mixing by the mixing, the cement slurry is once stored in agitator tank, and through the flow meter, sent to the JGP machine by the super high pressure pump. (P = 400kgf/cm.)

3) At JGP machine, special rod head is penetrated up to the designated depth, and after confirming the high pressure (400kgf/cm.),the rod head is withdrawn automatically step by step with fixed revolution per minute. Cement slurry is injected with high pressure into the soft ground, and the agent particle and the soil particle are thoroughly mixed. As a result, the stabilized soil column is made.

5. 2 THE FLOW OF HARDENING AGENT AND CEMENT SLURRY

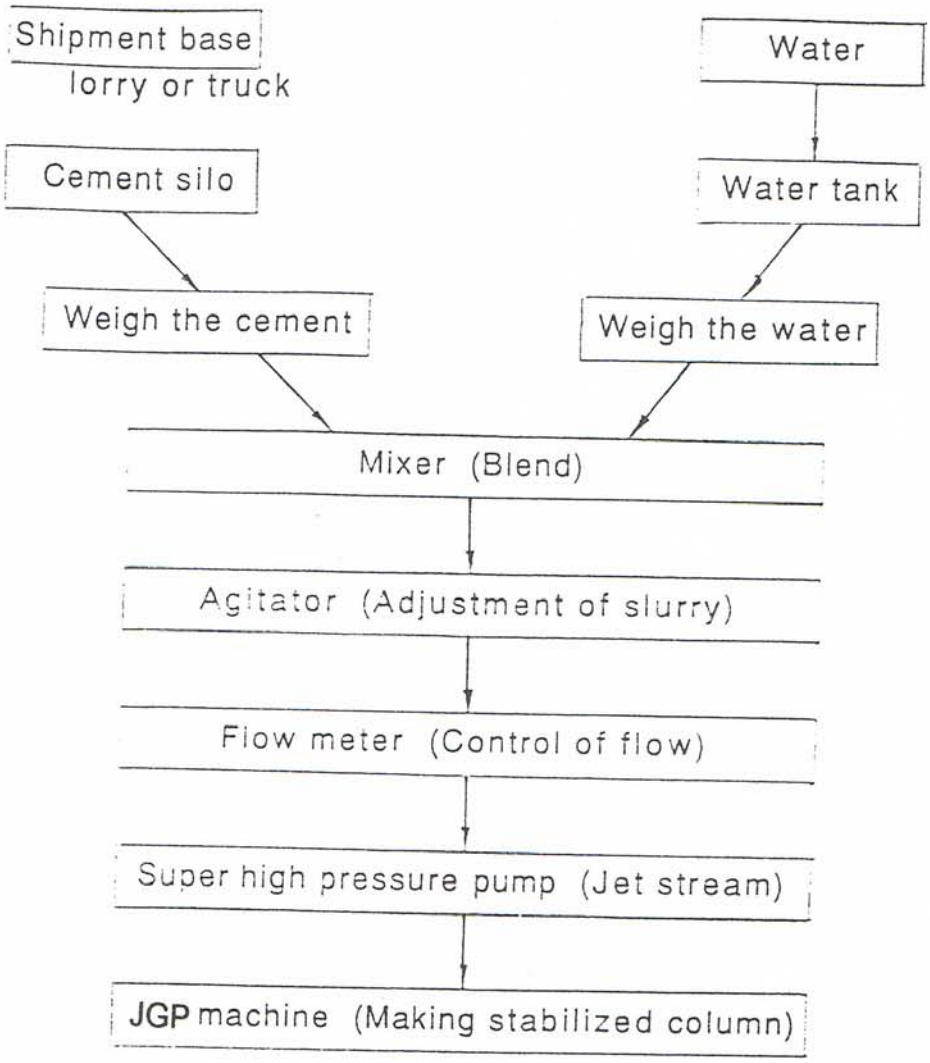


Fig.-5.1 Execution flow

5. 3 PROCEDURE

1) Execution procedure

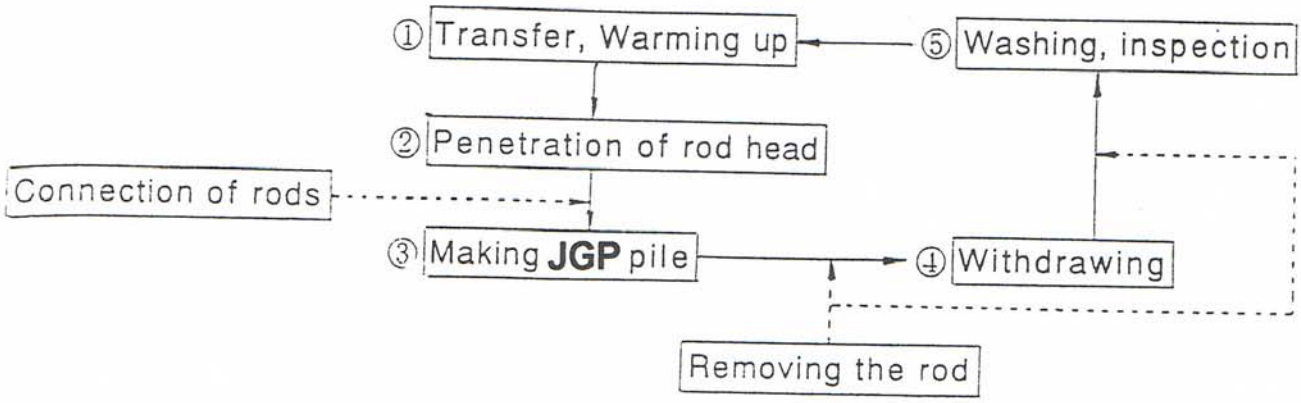
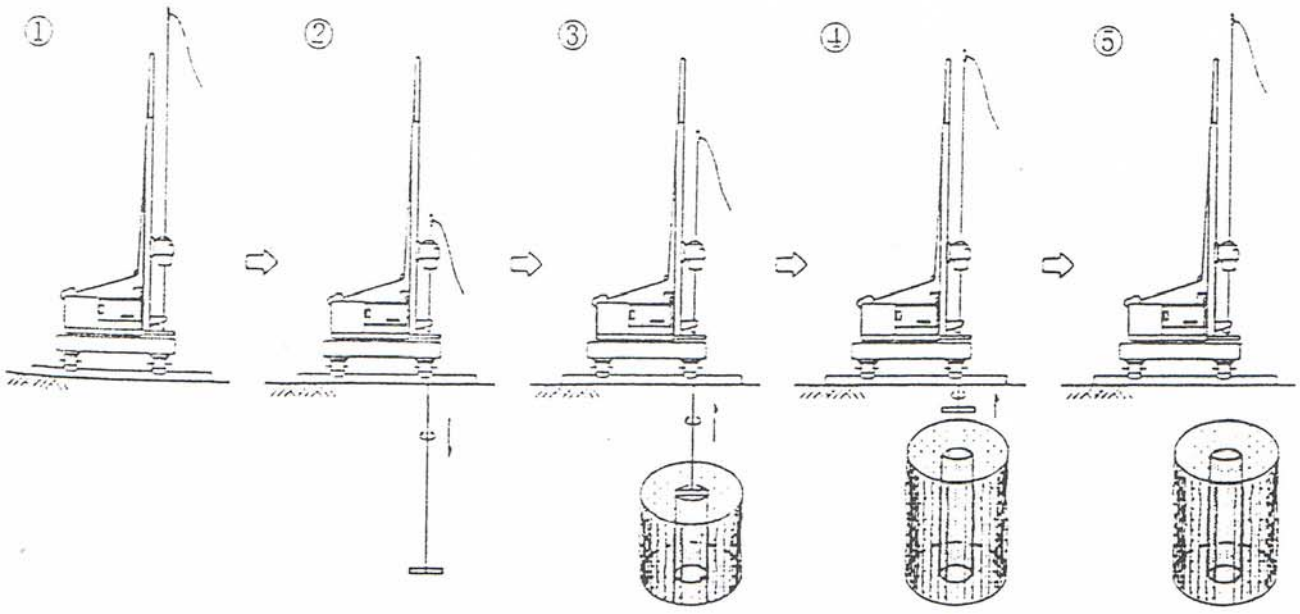


Fig.-5.2 Flow sheet of execution procedure

2) Execution procedure



① Transfer, Warming up

Slide base and JGP machine should be moved to the designated spot.

② Penetration of rod head

The rod head is penetrated up to the designated depth while rotating the rod.

③ Under making JGP pile

After confirming the designated pressure of slurry, rod should be withdrawn in the fixed speed.

④ Withdrawing

After stabilization up to the designate point, jetting should be finished and the rod should be withdrawn to the upper side.

⑤ Washing, inspection

By washing the inner rod and rod head. we should inspect a machine.

Fig.-5.3 Procedure of execution

MACHINERY FOR JGP WORK

6.1 STANDARD MACHINERY

Table - 6.1 Summary of machinery for JGP work

Machinery	Specification	Cap. (KW)	Size WxLxH (M)	Weight (kg)	Quantity	
					Bulk 2 machines	Pack 1 machine
Slurry plant	Mixer 0.5 m^3 Agitator 2.8m^3	30.0	2.6 X 6.0 X 2.4	4,500	15	—
Agent silo	50t (with screw conveyer)	15.4	2.4 X 7.0 X 3.3	4,500	16	—
High pressure pump	600 kgf/$cm.^2$ 200 ℓ/min.	270	2.5 X 5.5 X 2.3	9,000	14	—
Water tank	27 m^3	—	∅2.4 X 6.00	2,000	4	—
Flow indicator	0~280 ℓ/min.	—	0.6 X 0.5 X 0.7	30	14	—
JGP machine	3.5m stroke 3 ~ 60 r.p.m. 0 ~ 1,200 kg.m.	95	2.2 X 6.0 X 16	20,000	13	—
Slide base	Automatic control	—				—
Submersible pump	head 20m	4.2	—	60	5	—
Generator	65 KVA	—	1.10 x 2.40 x 1.50	2,680	2	—
Generator	150KVA187.5PS	—	1.2 X 3.4 X 1.5	2,800	—	1
Slurry plant	Mixer 0.5 M^3 Agitator 2.8 M^3	30	2.6 X 6.0 X 2.4	5,000	15	—

***NOTE**

As a rule , agent in bulk is used in 2 machines execution, and packed agent is used in 1 machine execution

6.2 ARRANGEMENT OF SLURRY PLANT

1) Case of 2 machines (using agent silo)

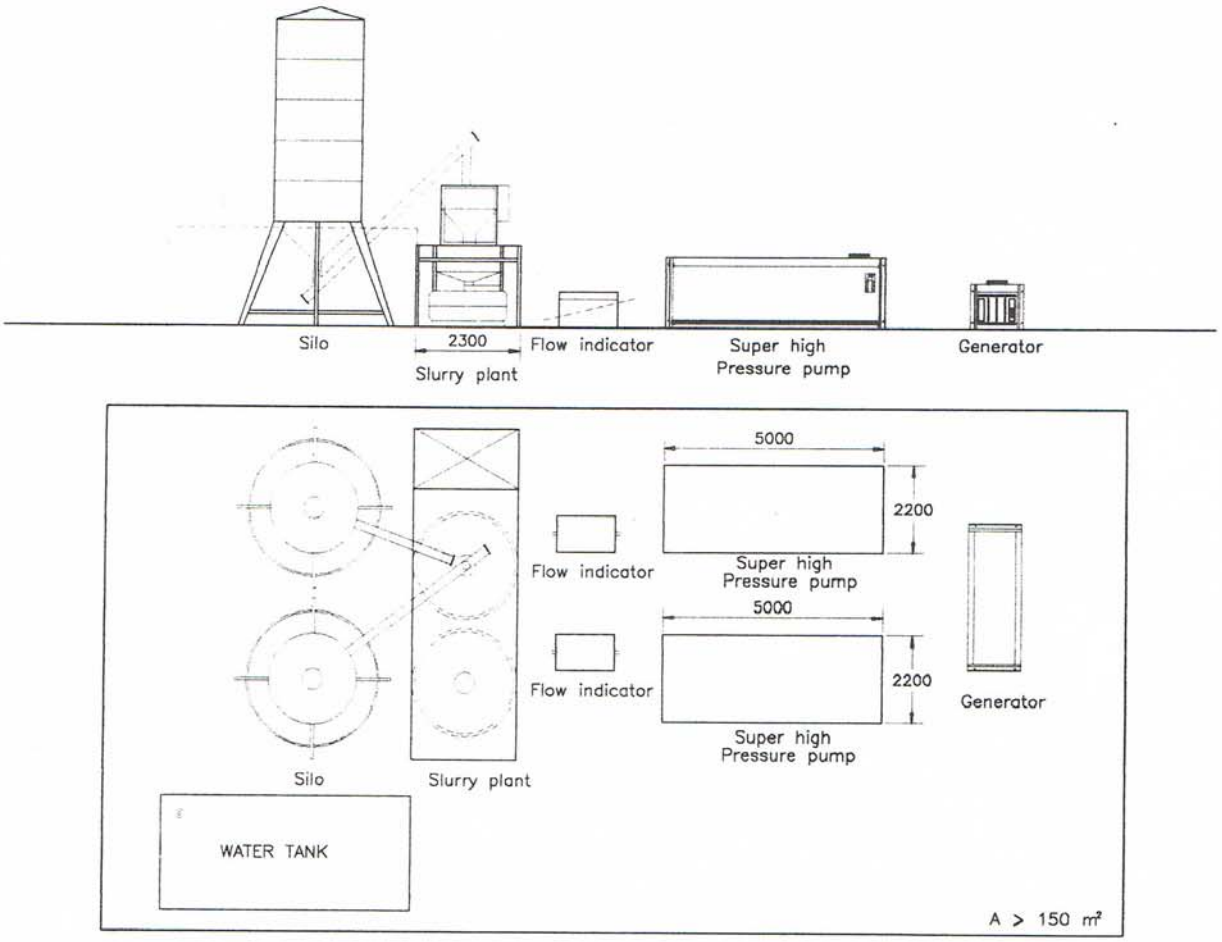


Fig.– 6.1 Arrangement of slurry plant using 2 machines

2) Case of 1 machine

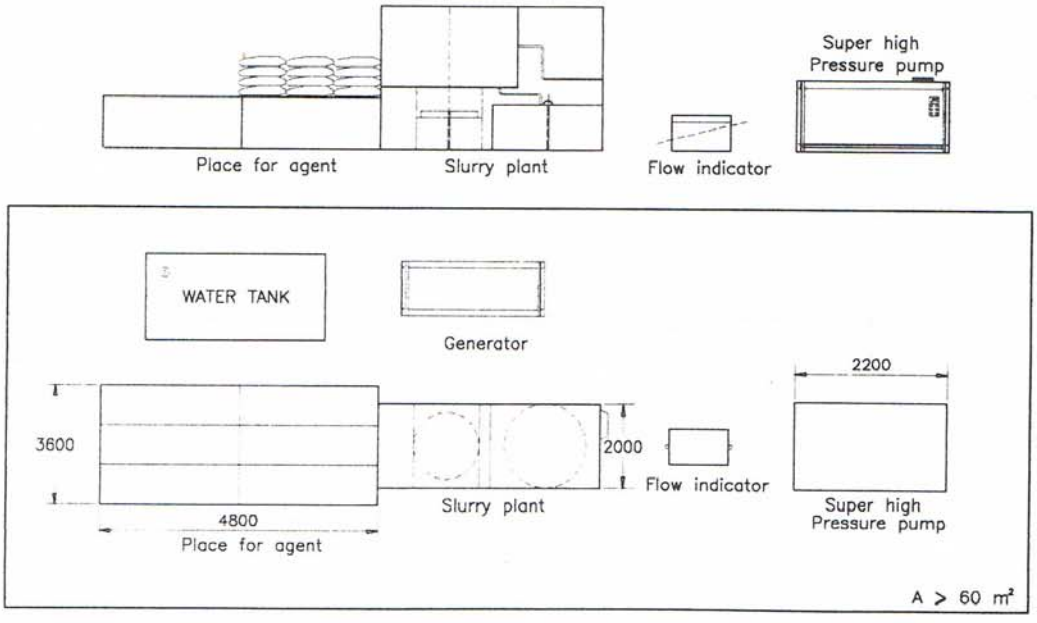


Fig.– 6.2 Arrangement of slurry plant using 1 machine

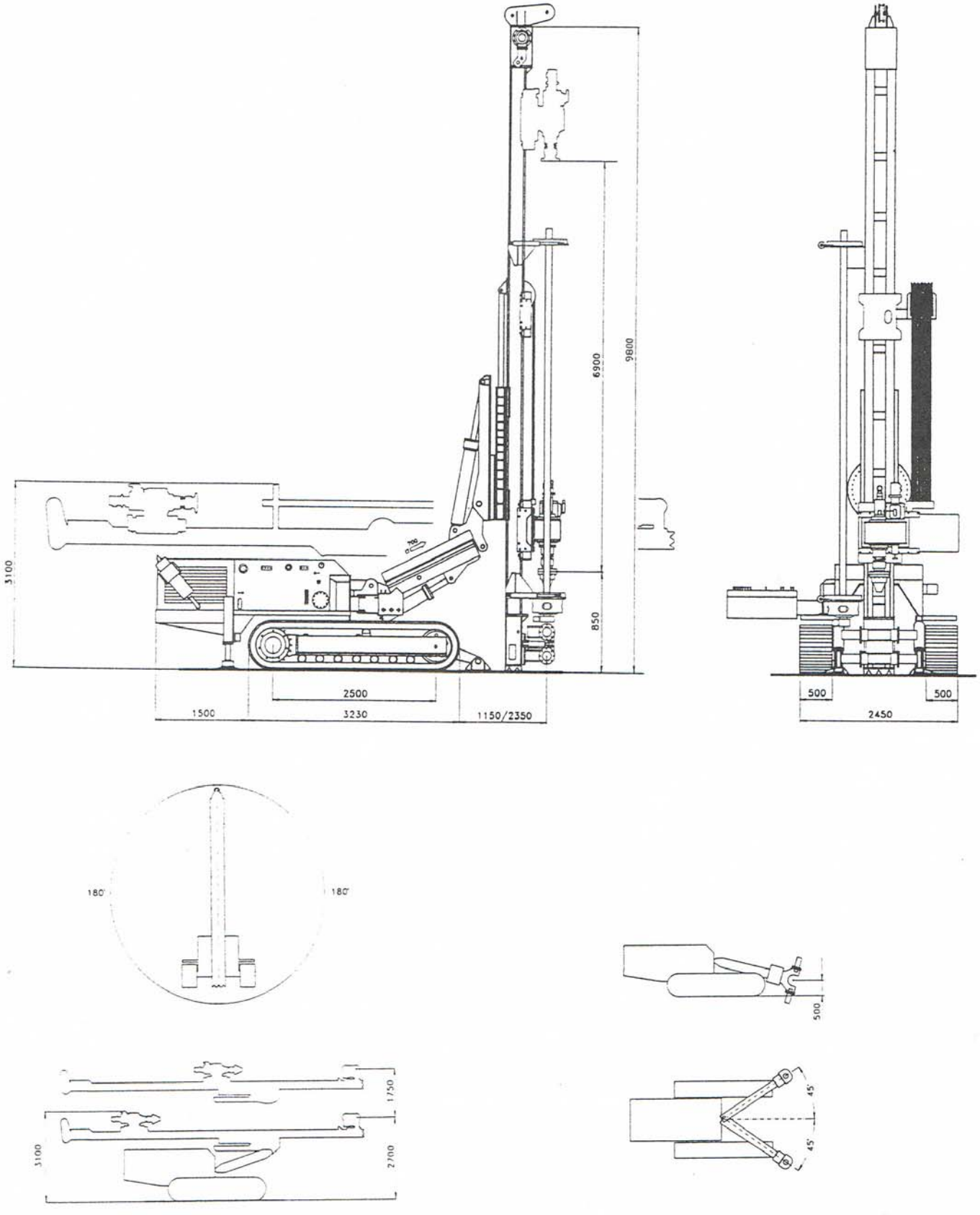


FIG 6.3 JGP machine

7 EXECUTION CONTROL

The following is the standard execution management of JGP method.

7. 1 EXECUTION CONTROL

1) Hardening agent

In the large-scale work, hardening agent is normally fed into the cement silo by pneumatic lorry truck. In the small-scale work, hardening agent is delivered to the site in paper bag of 40kg. The quantity is managed by checking invoice of each delivery.

2) Penetration depth

Designed penetration depth is managed by measuring the full length of rod, the height of machine and the length of remaining rod timely. The height of the machine's platform is used for the reference level in the depth management.

3) Jet mixing time

Though jet mixing time is controlled automatically, we should check the jet mixing time and revolution per minute of rod timely by using stop watch.

4) Pouring pressure and quantity of flow

We can control pouring pressure and quantity of flow by using pressure gauge and flow indicator.

5) Standard execution specification

Execution specification changes according to the condition of soil and the construction purpose. We can usually execute in the standard specification as follows.

Table-7.1 Execution specification

Item	Standard specification
Hardening agent	TS 1 , TS 2
Water cement ratio	W/C = 1.0～1.5
Pouring pressure	200 ±10kgf/cm^2
Quantity of flow	80 ℓ/min.
Jet mixing time	(Show the Table-2.1)
Revolution per minute of rod	20 ±2r.p.m

6) Example of standard mixture

① Water cement ratio W/C=1.5

Table-7.2 Example of mixture ①

(per 1,000 ℓ)

	Weight (kg)	Volume (ℓ)
Hardening agent (TS 1)	549	177
Water	823	823
Total	1,372	1,000

(W/C=1.5, ρ_c=3.1)

② Water cement ratio W/C=1.0

Table-7.3 Example of mixture ②

(per 1,000 ℓ)

	Weight (kg)	Volume (ℓ)
Hardening agent (TS 2)	750	250
Water	750	750
Total	1,500	1,000

(W/C=1.0, ρ_c=3.0)

7. 2 QUALITY CONTROL

1) Laboratory mixing test

As a rule, we should execute the mixing test. Original soil is mixed with hardening agent prior to the construction to decide the mixing ratio. The test is done according to ASTM-D-2166-85(unconfined compressive test).

2) Test for confirmation of stabilized pile

We should check the top and bottom of the stabilized soil and strength by boring.

8 EXAMPLE OF APPLICATION BY JGP METHOD

1) Prevention of sliding failure and settlement for banking.

Section

Arrangement

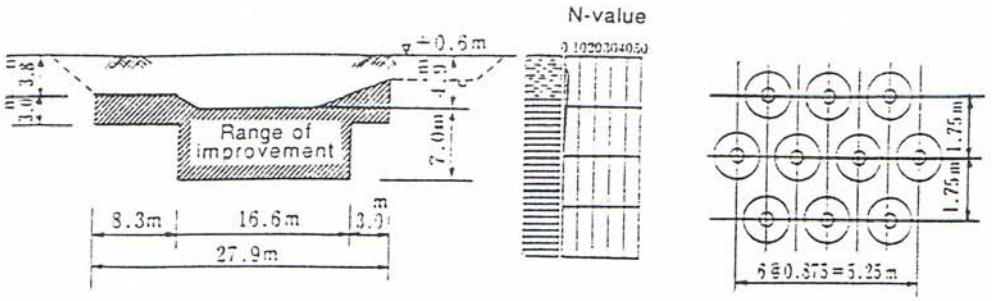


Fig.-8.1

2) Prevention of sliding failure of excavation slope.

Section

Arrangement

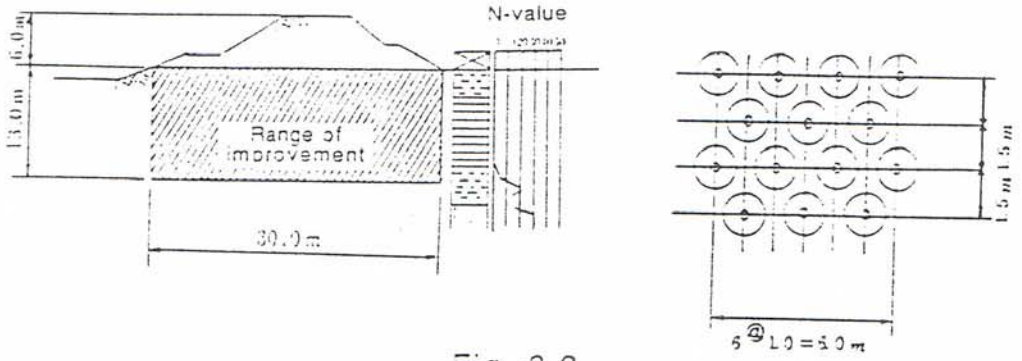


Fig.-8.2

3) Prevention of heaving of open cut part.

Section

Arrangement

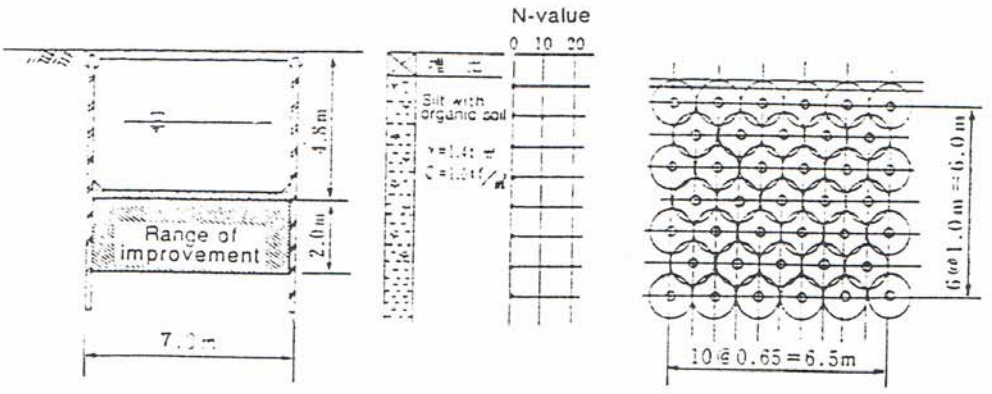
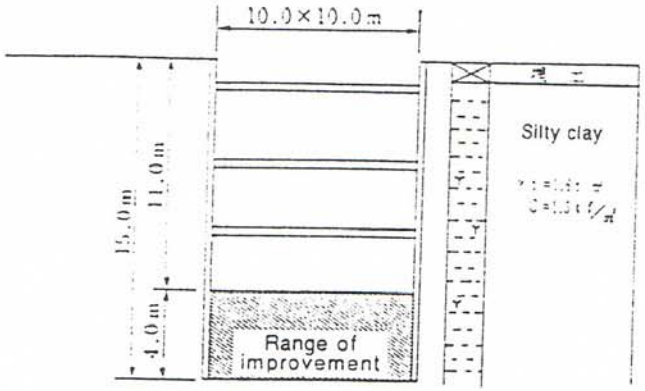


Fig.-8.3

4) Prevention of heaving and increase of passive earth pressure in the vertical shaft

Section



Arrangement

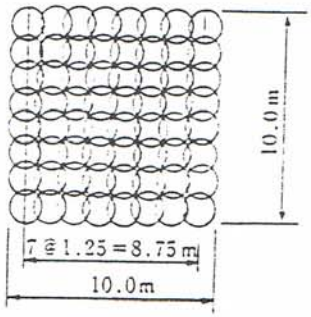
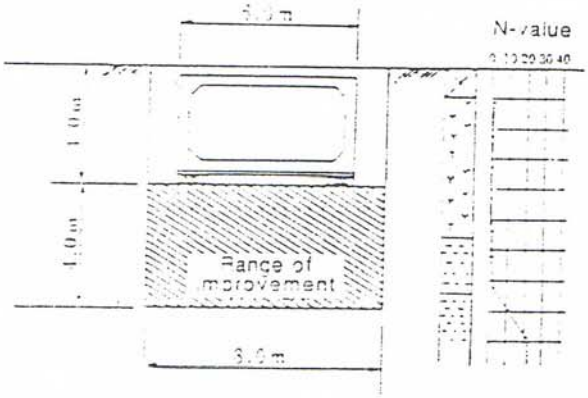


Fig.-8.4

5) Prevention of settlement and increase of bearing capacity in box culvert construction

Section



Arrangement

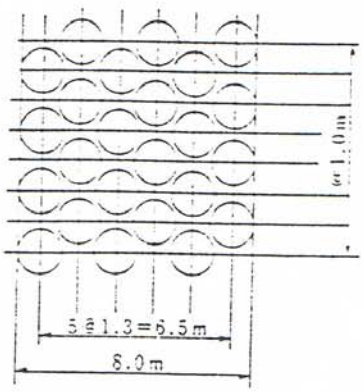
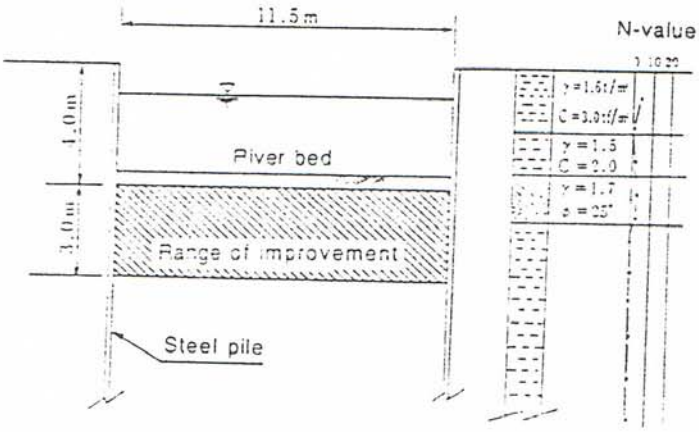


Fig.-8.5

6) Stability of cantilever sheet pile revetment

Section



Arrangement

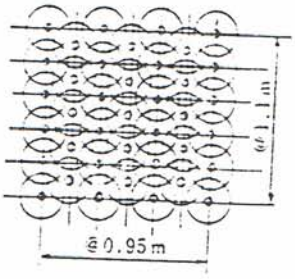
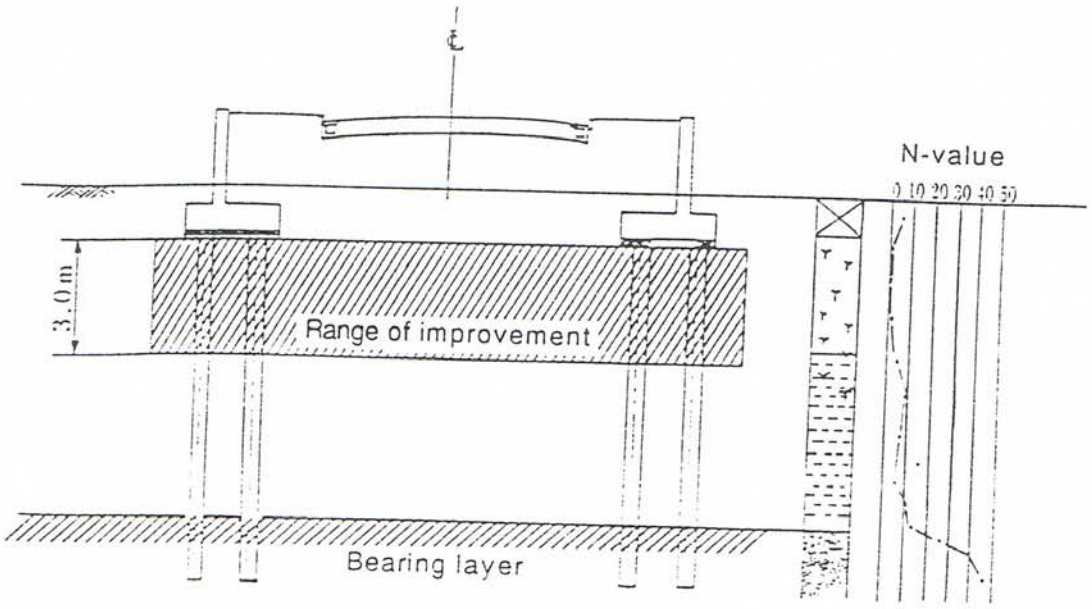


Fig.-8.6

7) Increase of K-value (coefficient of horizontal subgrade reaction) in pile foundation work

Section



Arrangement

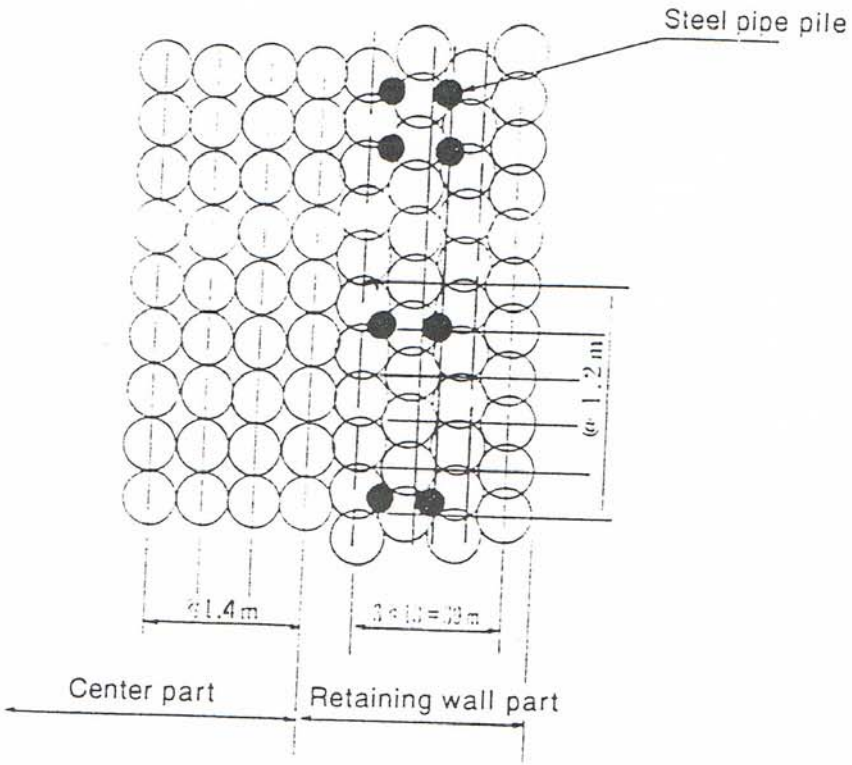
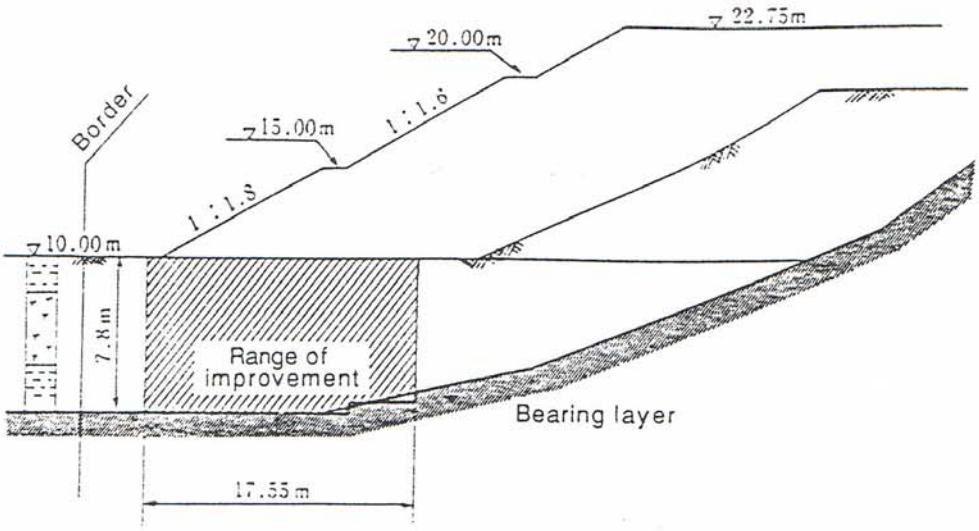


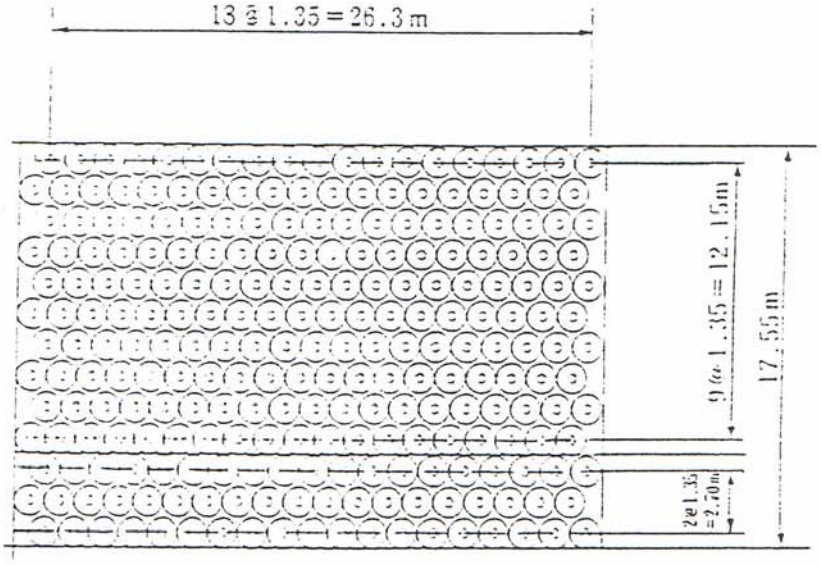
Fig.-8.7

8) Example of high banking execution

Section

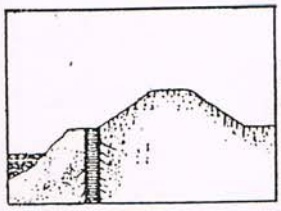


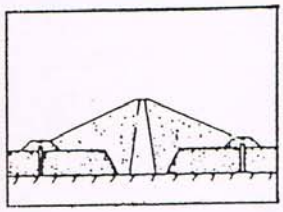
Arrangement

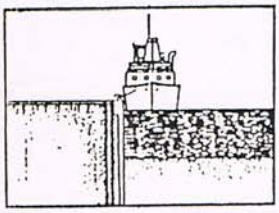


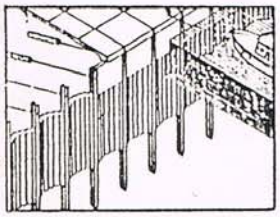
บริษัท ซอยล์กรีต เทคโนโลยี จำกัด
SOILCRETE TECHNOLOGY CO., LTD.

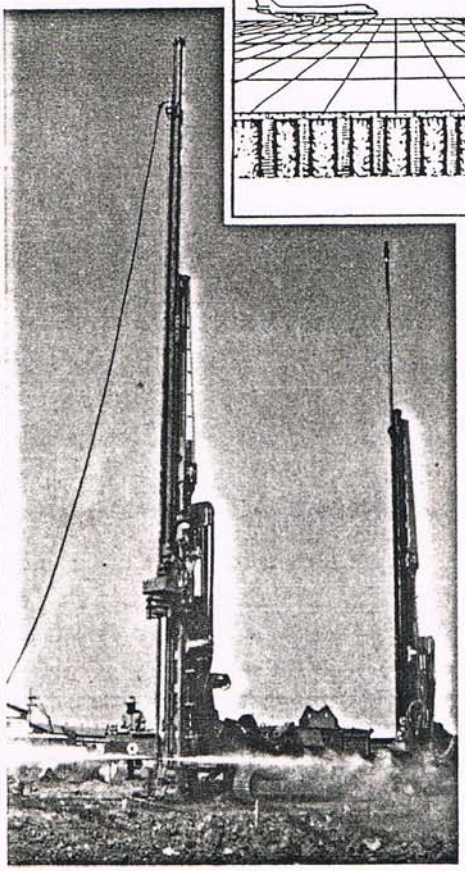
12/90 หมู่ 6 อาคารเดอะเสริ์นเตอร์ ชั้น 4 ห้อง 455 ถนนศรีนครินทร์ แขวงหนองบอน เขตประเวศ กทม. 10260
The Sen Center Building 4th Floor, Room 455, Srinakharin Rd., Nongbon, Praves.
Bangkok 10260, THAILAND. Tel. (662) 746-0851-4 Fax. (662) 746-0855

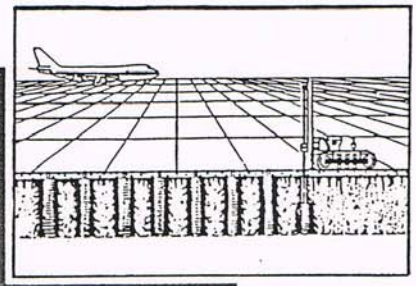


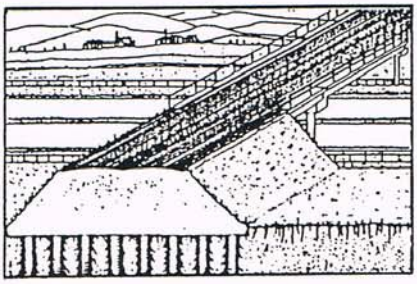






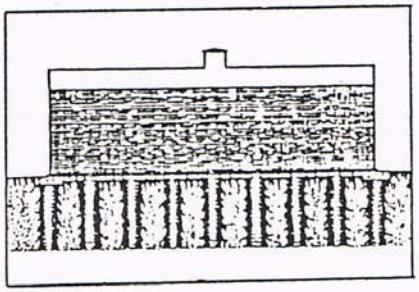


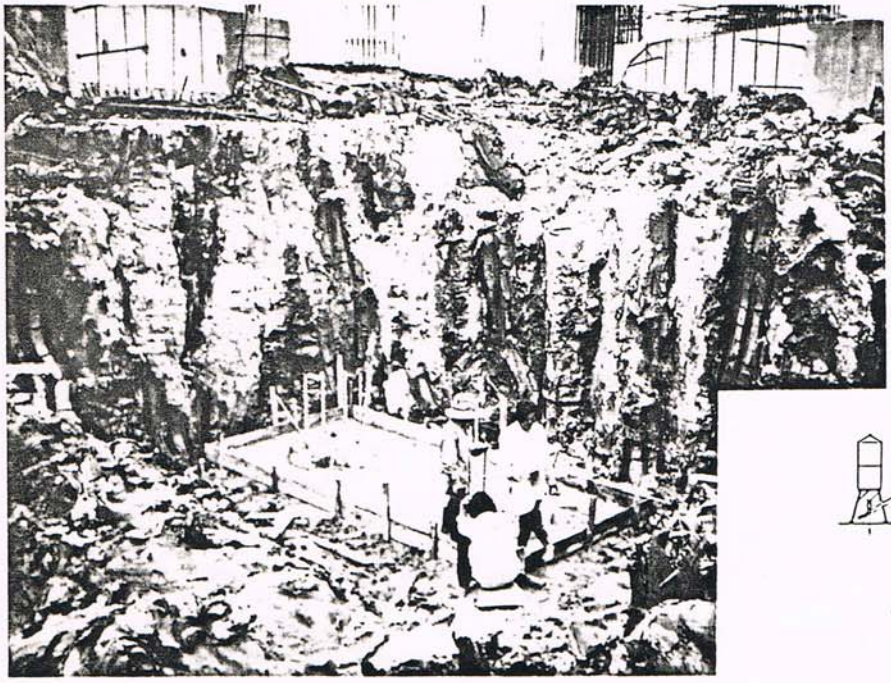


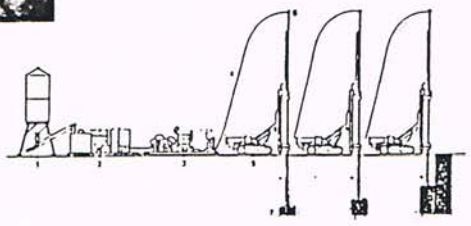


JET– GROUTING
ช่วยแก้ปัญหาการก่อสร้าง ในชั้นดินอ่อน อาทิ เช่น

- งานขุดเปิดบ่อดิน
- ป้องกันน้ำซึมผ่านเขื่อนดิน (DAM DIAPHRAGMS)
- ปัญหาการทรุดตัวของถนน, สนามบิน ถังน้ำมันขนาดใหญ่
- แก้ไขการกัดเซาะดิน, ทรายหลังกำแพงคอนกรีต หรือ SHEET PILES ของเขื่อนริมแม่น้ำ และทะเล







บริษัท ซอยล์กรีต เทคโนโลยี จำกัด
SOILCRETE TECHNOLOGY CO., LTD.
12/90 หมู่ 6 อาคารเดอะเสรีเซ็นเตอร์ ชั้น 4 ห้อง 455 ถนนศรีนครินทร์ แขวงหนองบอน เขตประเวศ กรุงเทพฯ 10260 โทร. (662) 746-0851-4 โทรสาร 746-0855
The Sen Center Building 4th Floor, Room 455, Srinakharin Rd., Nongbon, Praves, Bangkok 10260, THAILAND. Tel. (662) 746-0851-4 Fax. (662) 746-0855

JET MIXING

Jet Mixing Technique เป็นวิธีการทำให้ดินแข็งตัวขึ้น โดยการฉีดน้ำปูนซีเมนต์เข้าไปผสมกับดินแล้วปล่อยให้วัสดุผสมแข็งตัว ขณะก่อสร้างจะหมุนกดก้านเจาะซึ่งมีปลายล่างปิด เจาะแหวกดินลงไปจนถึงชั้นความลึกที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพดิน ต่อจากนั้นจะหมุนก้านเจาะพร้อมกับดึงขึ้นช้าๆ และในขณะเดียวกันจะฉีดน้ำปูนซีเมนต์ผ่านรูเล็กๆที่เจาะไว้ด้านข้างก้านเจาะในส่วนที่ใกล้กับปลายล่างของก้านเจาะด้วยความดันสูงในระดับ 200-400 บาร์ น้ำปูนซีเมนต์ซึ่งถูกฉีดด้วยความดันสูงจะแหวกเข้าไปกวนผสมกับดินจนกระทั่งมีสภาพเป็นของเหลวและก่อรูปเป็นแท่งทรงกระบอก การฉีดน้ำปูนซีเมนต์เข้าไปผสมกับดินสามารถควบคุมให้ก่อรูปเป็นทรงกระบอกขึ้นเฉพาะช่วงความลึกใดความลึกหนึ่งของชั้นดินก็ได้ อาจจะเป็นชั้นดินเหนียวหรือชั้นดินทรายและสภาพของดินอาจแห้ง, แข็งหรืออยู่ใต้ระดับน้ำ วิธีการฉีดด้วยความดันสูงเช่นนี้สามารถทำงานให้บรรลุผลดังประสงค์ได้ เมื่อเวลาผ่านไปไม่เกิน 1 สัปดาห์ดินผสมซีเมนต์จะก่อรูปเป็นเสาเข็มค่อนข้างกลมและความแข็งแรงจะพัฒนาขึ้นตามอายุ หากการเจาะฉีดน้ำปูนกระทำในลักษณะเรียงติดต่อกันไปเป็นแถวตลอดแนวขอบที่จะขุดเปิดดิน เมื่อดินผสมซีเมนต์มีอายุได้ประมาณ 2 สัปดาห์ เสาเข็มดินซีเมนต์จะมีกำลังแข็งแรงพอที่จะยืนต้านรับการขุดเปิดดินในลักษณะของกำแพงกันดินได้

หากการขุดดินจำเป็นต้องขุดลึกลงไปมาก เราสามารถปรับเพิ่มความแข็งแรงให้กำแพงดินซีเมนต์ได้โดยเพิ่ม Stiffness (EI)› ของกำแพงให้เหมาะสมกับสัดส่วนของแรงกระทำด้านข้างจากดินได้ การเพิ่ม Stiffness อาจทำได้โดยเพิ่มจำนวนแถวของการเจาะฉีดน้ำปูน เพื่อเพิ่มความหนารวมของกำแพงในชั้นความลึกต่าง ๆ หรือฉีดเพิ่มปริมาณซีเมนต์ หรือเสริมเหล็กเพิ่มความแข็งแรงให้เสาเข็มดินซีเมนต์หรือใช้ทุกวิธีการประกอบกัน การเพิ่มค่า Stiffness ของกำแพงเช่นนี้จะมีส่วนช่วยให้สามารถลดการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง(lateral deformation) ของกำแพงกันดินภายหลังการขุดเปิดดินลงได้มาก ซึ่งจะบรรลุผลเช่นนี้ได้ยากหากใช้เข็มพืดเหล็ก(steel sheet pile)ป้องกันการเคลื่อนตัวของดินด้วยวิธีการที่ใช้อยู่ตามปกติแม้จะใช้การค้ำยันเสริมเป็นจำนวนมากก็ตาม เนื่องจากค่า Stiffness (EI)ที่ระดับความลึกต่างๆของระบบเข็มพืดเหล็กซึ่งมีความหนาเดียวตลอดความลึก โดยเฉลี่ยแล้วค่าจะต่ำกว่าค่า stiffness ของกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ที่สามารถสร้างขึ้นและปรับแต่งความหนาตลอดจนความแข็งแรงให้มีสัดส่วนต้านรับแรงดันดินที่ชั้นความลึกต่างๆ ซึ่งมีขนาดไม่เท่ากันได้อย่างเหมาะสม

ในกรณีใช้เสาเข็มดินซีเมนต์อาจไม่จำเป็นต้องมีการค้ำยัน (bracing) หรือหากมีบ้างก็ไม่จำเป็นต้องมีจำนวนโครงค้ำยันมากมายเหมือนการค้ำยันเข็มพืดเหล็ก หากจะต้องขุดเปิดดินชนิดเดียวกันลงไปถึงความลึกที่อยู่ในระดับใกล้เคียงกัน โครงค้ำยันจำนวนมากของระบบเข็มพืดเหล็กทำให้เพิ่มความเกะกะในหน้างานขึ้นมาก ค่าใช้จ่ายและเวลาในการขุดเปิดดินจึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วยและหากจะถอนเข็มพืดเหล็กกลับคืนเมื่อเลิกงานก็จะต้องเสียค่าใช้จ่ายและเวลาสำหรับงานรื้อถอนเพิ่มขึ้นอีกส่วนหนึ่ง นอกจากนั้นยังจะต้องระวังปัญหาดินเคลื่อนตัวเนื่องจากการถอนเข็มพืดเหล็กขึ้นมาอีกด้วย โดยเฉพาะในกรณีที่มีอาคารสิ่งปลูกสร้างอยู่ประชิดกับบริเวณขุดเปิดดิน อัตราความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายกับอาคารข้างเคียงเมื่อใช้ระบบเข็มพืดเหล็กก็จะยิ่งเพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณ

บริษัท ซอยล์กรีต เทคโนโลยี จำกัด
SOILCRETE TECHNOLOGY CO., LTD.

12/90 หมู่ 6 อาคารเดอะเสริเซ็นเตอร์ ชั้น 4 ห้อง 455 ถนนศรีนครินทร์ แขวงหนองบอน เขตประเวศ กรุงเทพฯ 10260 โทร. (662) 746-0851-4 โทรสาร 746-0855
The Sen Center Building 4th Floor. Room 455. Srinakharin Rd., Nongbon, Praves, Bangkok 10260. THAILAND. Tel. (662) 746-0851-4 Fax. (662) 746-0855

การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เป็นกำแพงกันดิน มีข้อได้เปรียบกว่าการใช้เข็มพืดเหล็กดังต่อไปนี้.-

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงานมีขนาดเล็ก เคลื่อนที่ด้วยตัวเองได้สะดวกเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ตอกเข็มพืดเหล็ก สภาพการทำงานไม่เกะกะกีดขวางการทำงานอื่น จึงทำให้สามารถเริ่มดำเนินงานอื่น ๆ ควบคู่กันไปได้ตั้งแต่ระยะแรกของงานก่อสร้าง

2. อุปกรณ์ที่ใช้ไม่ก่อให้เกิดเสียงดังหรือเกิดความสั่นสะเทือนระหว่างทำงานรบกวนผู้อยู่อาศัยข้างเคียงเหมือนอุปกรณ์ตอกเข็มพืดเหล็ก

3. ทำงานได้สำเร็จรวดเร็วกว่าและต้องการช่วงเวลารอคอยก่อนขุดเปิดดินน้อยกว่าและไม่จำเป็นต้องมีการติดตั้งค้ำยันเพิ่มเติมในระหว่างขุดเปิดหน้าดิน เมื่อเทียบกับการใช้เข็มพืดเหล็กซึ่งต้องมีการติดตั้งระบบค้ำยันต่อไปในระหว่างที่งานขุดดำเนินอยู่แล้ว การใช้เสาเข็มดินซีเมนต์จะประหยัดเวลาในการก่อสร้างโดยส่วนรวมได้มากกว่า

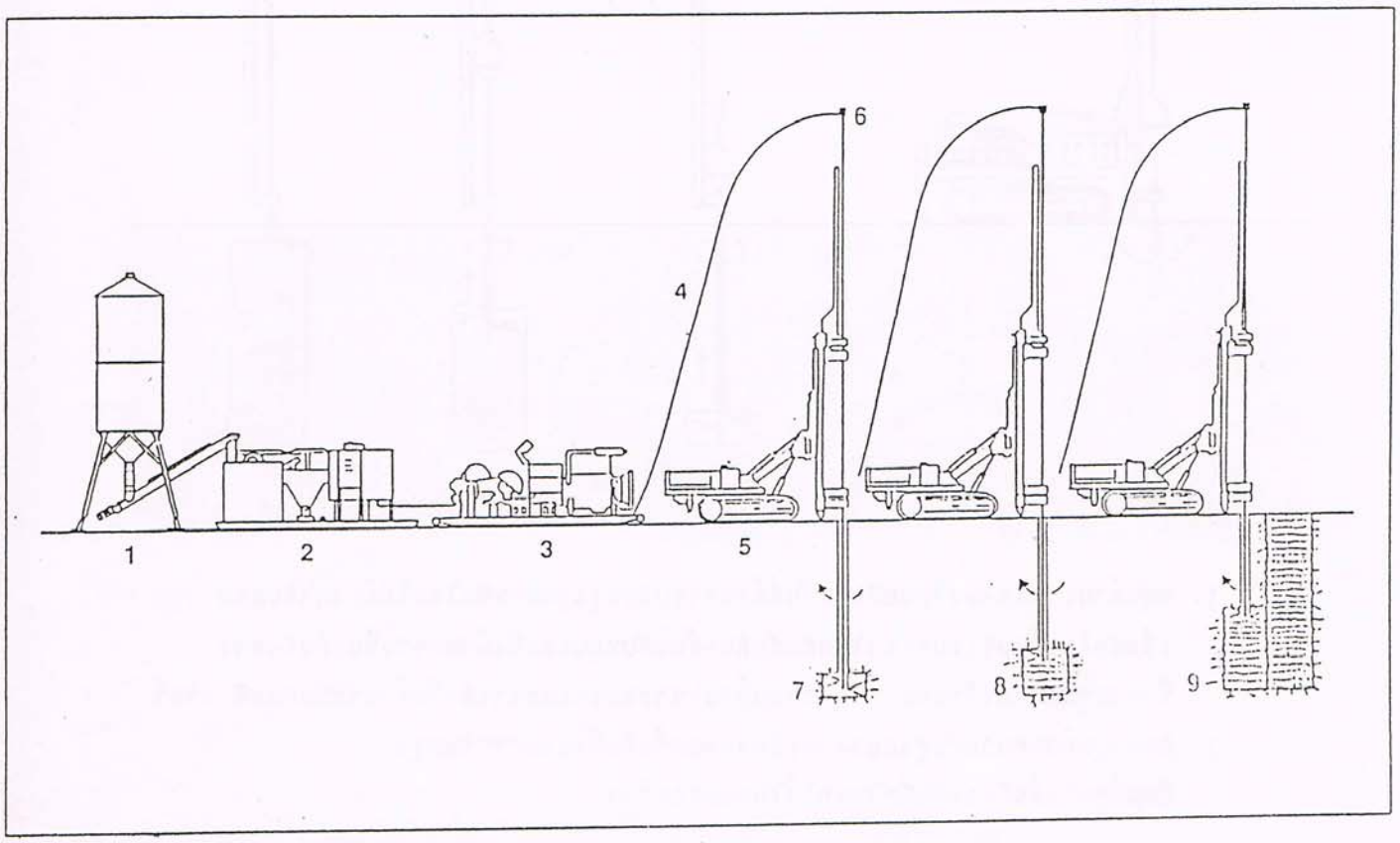
4. การเคลื่อนตัวทางด้านข้างเข้าหาบ่อขุดของกำแพงดินซีเมนต์จะเกิดขึ้นน้อยกว่ากรณีใช้เข็มพืดเหล็ก ดังนั้นโอกาสที่จะก่อความเสียหายแก่อาคารข้างเคียงบ่อขุดจากการเคลื่อนตัวของดินฐานรากจึงลดลงตามไปด้วย

5. ไม่มีภาระการรื้อถอนเมื่องานก่อสร้างใต้ดินแล้วเสร็จ จึงประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายลงได้อีกส่วนหนึ่ง

6. แรงดันดินด้านข้างที่กระทำต่อผนังถาวรของห้องใต้ดิน ในกรณีใช้กำแพงดินซีเมนต์จะต่ำกว่ากรณีใช้เข็มพืดเหล็กกันดินแล้วถอนออกเมื่อเสร็จงานมากเพราะแรงดันส่วนใหญ่จะถูกต้านรับไปโดยกำแพงดินซีเมนต์แล้ว ดังนั้นจึงสามารถลดความหนาหรือปริมาณการเสริมเหล็กของผนังกำแพงถาวรของห้องใต้ดินลงได้มาก ทั้งนี้เมื่อเทียบกันโดยถือว่าผนังกำแพงถาวรอยู่ในสภาพที่มีอัตราส่วนความปลอดภัยในระดับเดียวกันทั้งสองกรณี

****

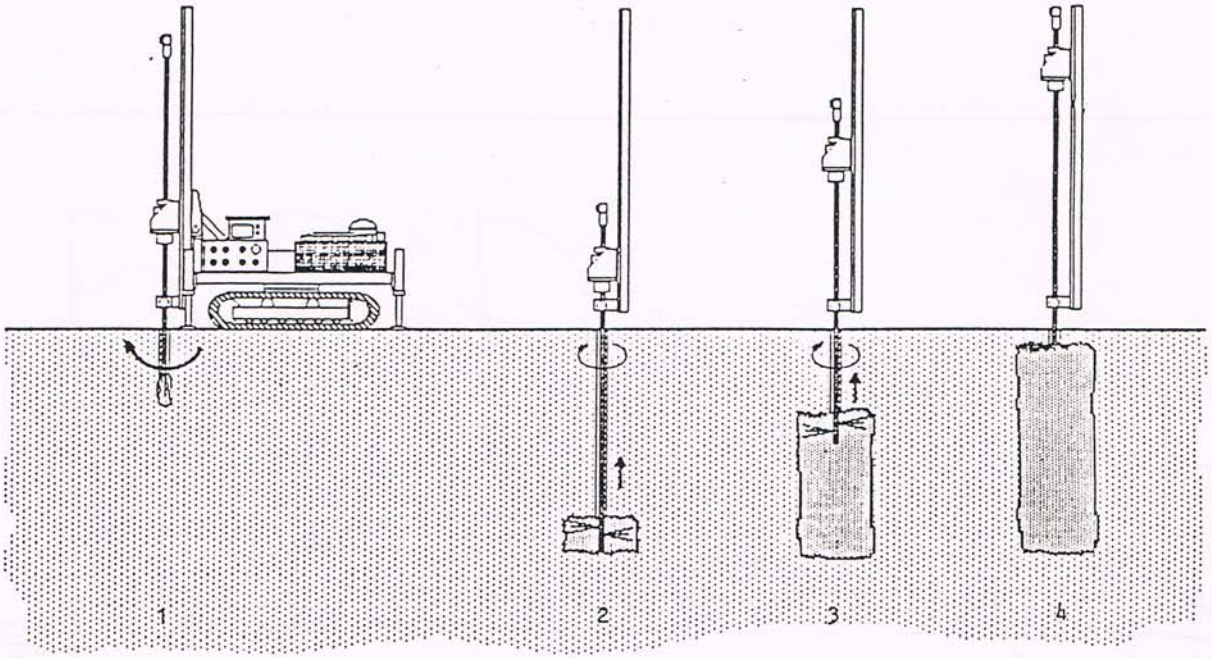
Operating diagram



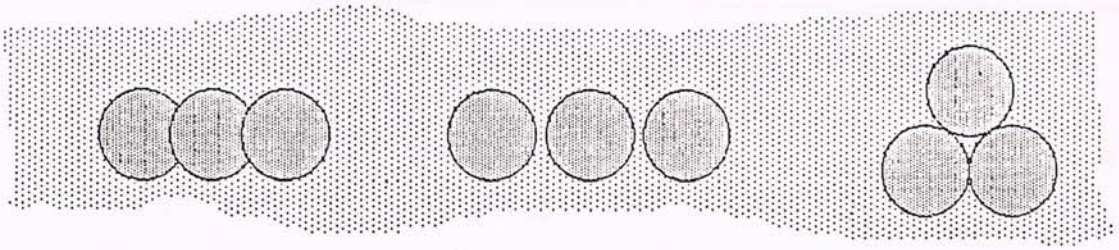
1. Cement silo
2. Mixing plant
3. Triplex high pressure pump
4. High pressure hose
5. Jetting drilling rig
6. High pressure swivel head
7. Drilling step
8. Lifting back and injection step
9. Process cycle finishing and repeating

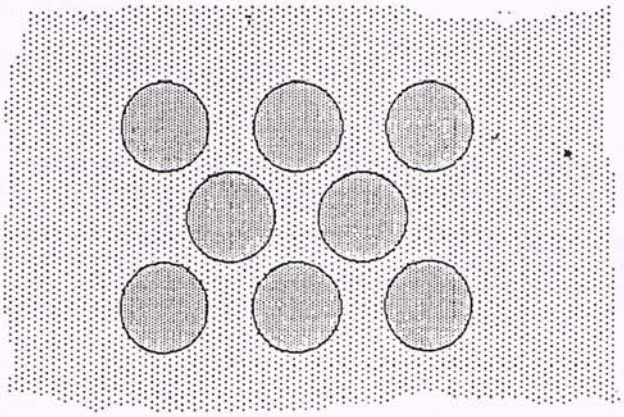
บริษัท ซอยล์กรีต เทคโนโลยี จำกัด
SOILCRETE TECHNOLOGY CO.,LTD.
12/90 หมู่ 6 อาคารเดอะเสรีเซ็นเตอร์ ชั้น 4 ห้อง 455 ถนนศรีนครินทร์ แขวงหนองบอน เขตประเวศ กทม. 10260
The Seri Center Building 4th Floor, Room 455, Srinakharin Rd., Nongbon, Praves.
Bangkok 10260, THAILAND. Tel. (662) 746-0851-4 Fax. (662) 746-0855

ลำดับขั้นตอนของการทำ Jet Mixing



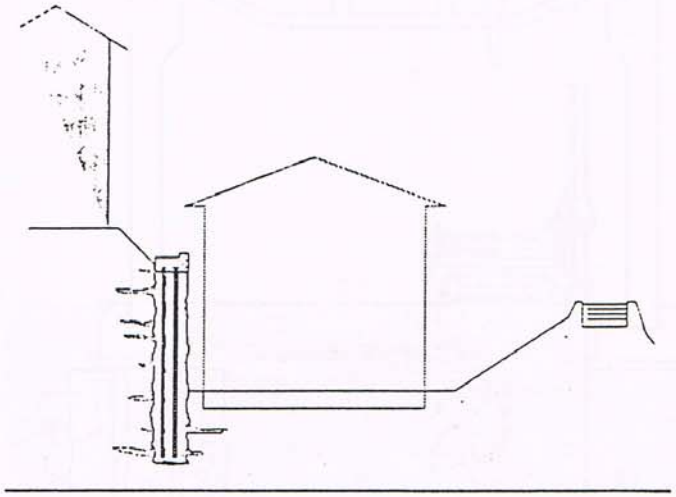
1. หมุนก้านเจาะกดลงไปจนถึงระดับที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพดินโดยไม่ต้องนำดินออก
2. เริ่มอัดฉีดน้ำปูนซีเมนต์เข้าไปผสมกับดินพร้อมกับหมุนและดึงก้านเจาะขึ้นเป็นจังหวะ ซึ่งควบคุมความเร็วรอบของการหมุนก้านเจาะและระยะการดึงขึ้นด้วยระบบคอมพิวเตอร์
3. ฉีดน้ำปูนด้วยความดันสูงอย่างต่อเนื่องตลอดชั้นดินที่ต้องการปรับปรุง
4. ฉีดน้ำปูนเสร็จถึงระดับที่กำหนดไว้ในแบบก่อสร้าง



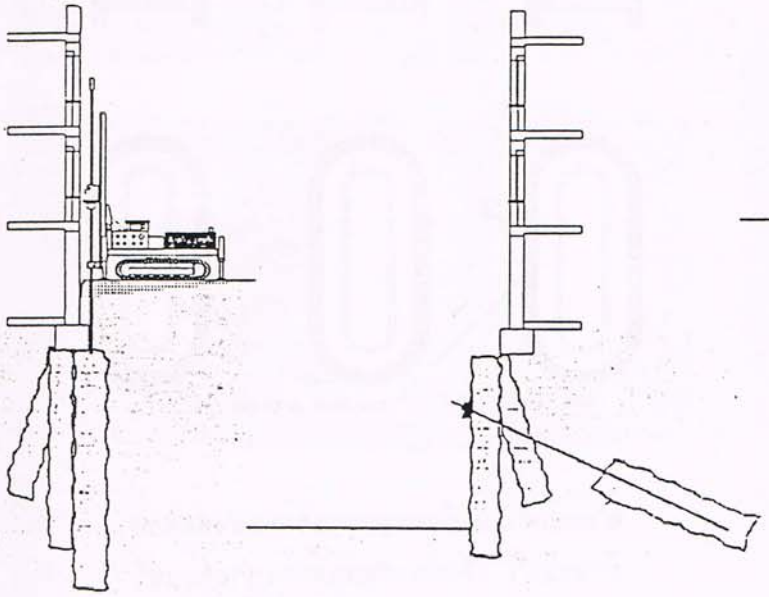


แสดงลักษณะของการจัดตำแหน่งของการทำเสาดิน-ซีเมนต์แบบต่างๆตามการออกแบบ เพื่อแก้ไขปัญหาการก่อสร้างให้เป็นไปตามจุดประสงค์ของงาน

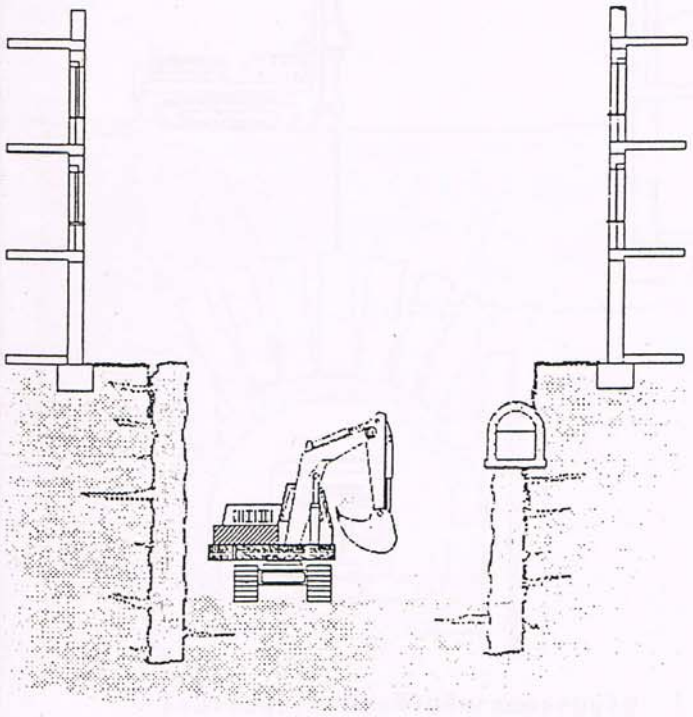
ตัวอย่างการนำวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยการผสมแบบอัดฉีดความดันสูง

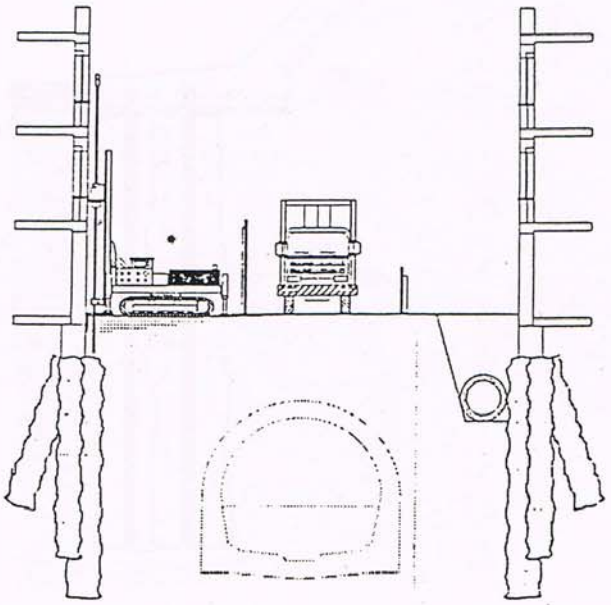


ทำเป็นกำแพงป้องกันดินพังทลายโดยเสริมเหล็กในเสาเข็มดิน-ซีเมนต์ ในงานขุดดินก่อสร้างอาคารซึ่งอยู่ประชิดอาคารเดิมหลังบน

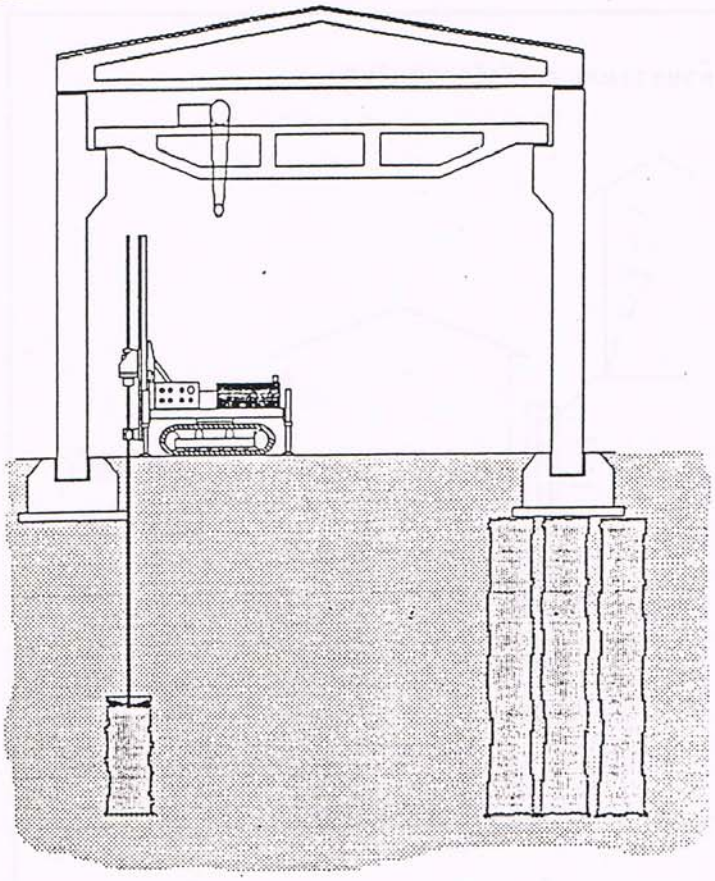


เสริมความมั่นคงของฐานรากอาคารเดิมในงานขุดดินลึกประชิดอาคารข้างเคียง

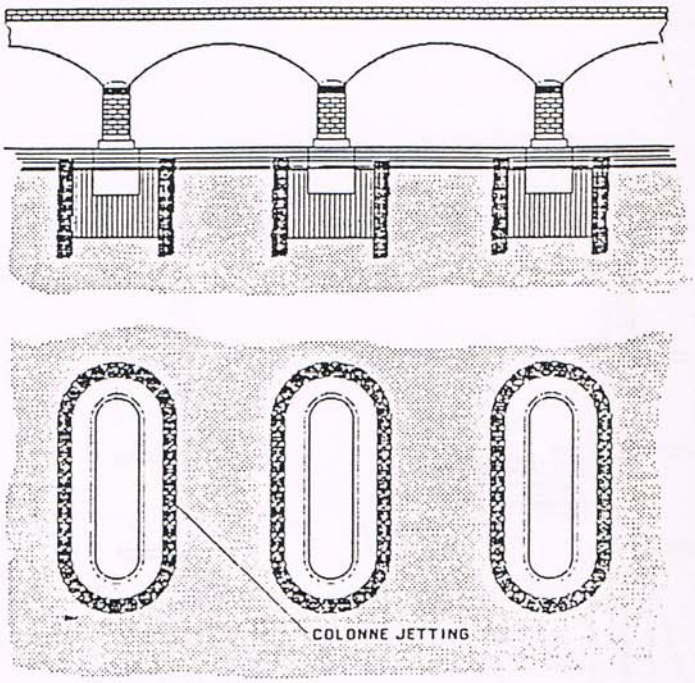




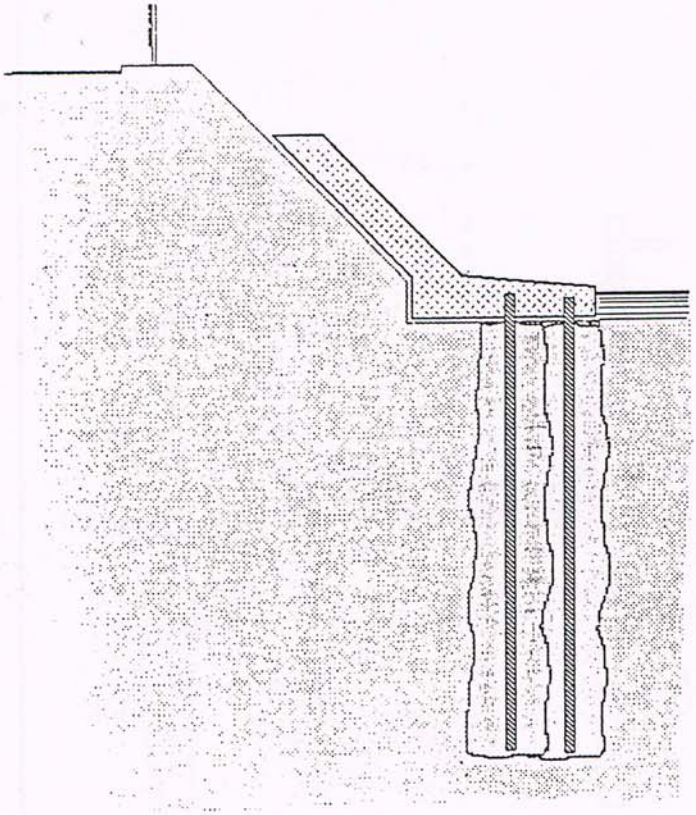
ฉีดน้ำปูนสร้างเป็นกำแพงกันดินและเสริมความมั่นคงของฐานรากเพื่อป้องกันความเสียหายของอาคารเดิมในงานขุดดินสร้างอุโมงค์สำหรับทางรถไฟใต้ดิน



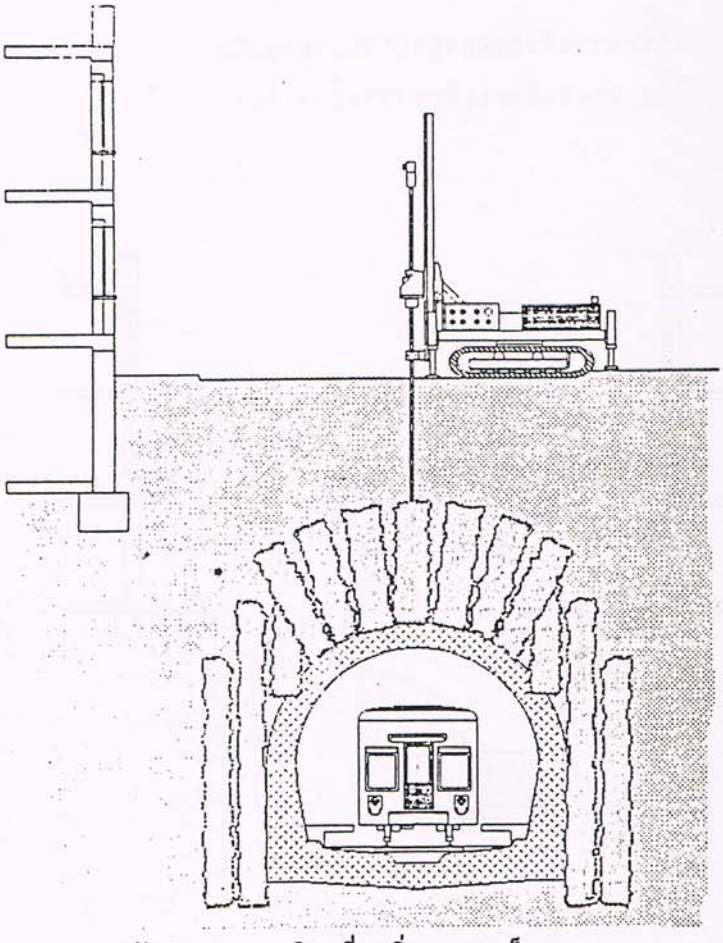
ฉีดน้ำปูนปรับปรุงดินใต้ฐานรากเพื่อเสริม
ความแข็งแรงของอาคาร



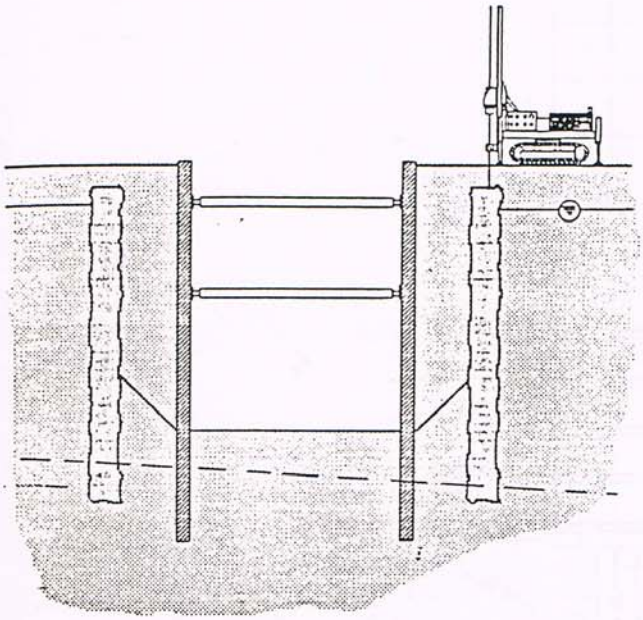
ทำแนวกำแพงล้อมรอบฐานรากของสะพาน
ข้ามแม่น้ำ เพื่อป้องกันการกัดเซาะของน้ำ



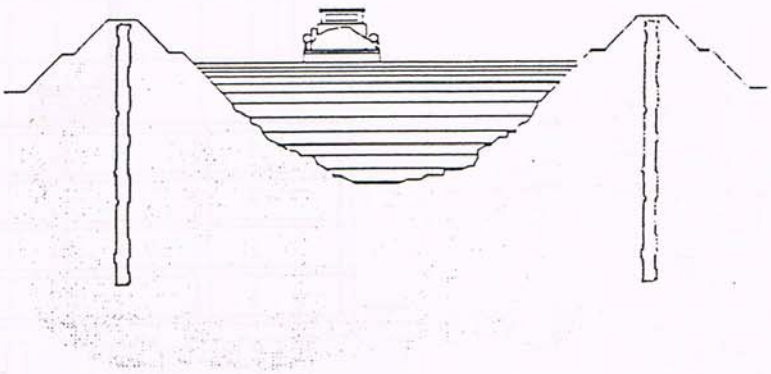
ฉีดน้ำปูนทำผนังกั้นน้ำต้านแรงกัดเซาะของน้ำ
บริเวณริมตลิ่ง



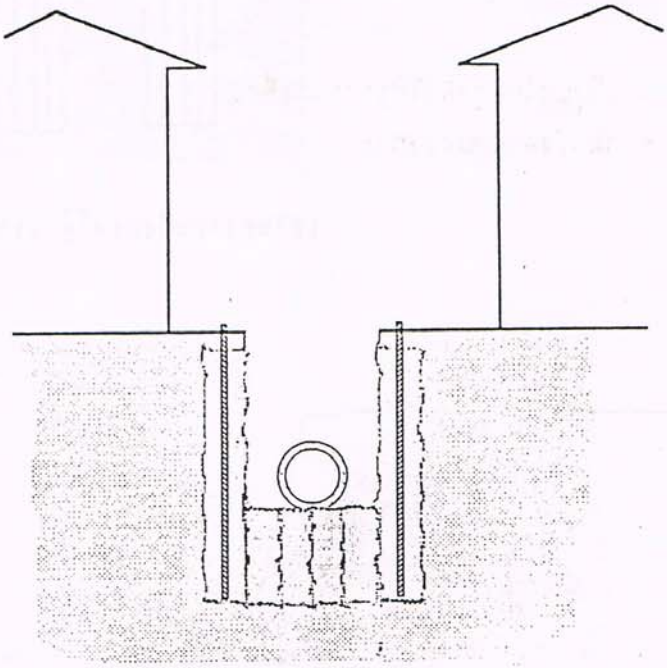
ปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อเพิ่มความแข็งแรง
ให้ดินรอบอุโมงค์ ป้องกันไม่ให้ดินยุบตัวลง
มา ในขณะขุดและสามารถทำผนังอุโมงค์
การที่มีความหนาน้อยกว่าปกติ



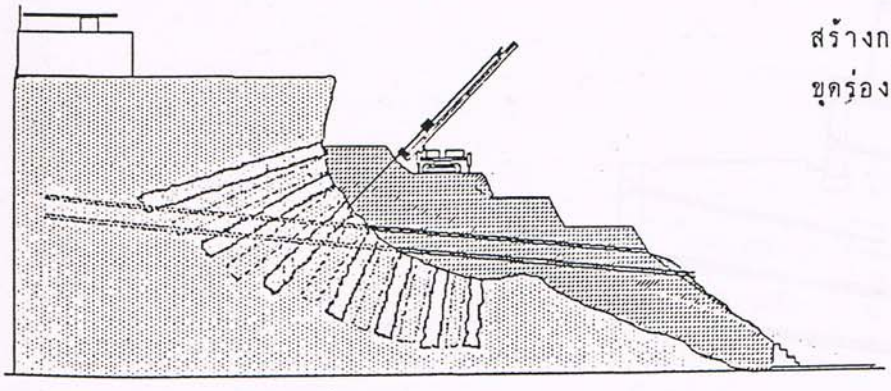
ฉีดน้ำปูนสร้างผนังกั้นน้ำโดยรอบบริเวณที่จะขุดดิน
ในกรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่สูงและชั้นดินมีก้อนวัสดุ
ขนาดใหญ่ใช้ระบบเข็มเหล็กผิดไม่ได้



ทำเป็นแนวกำแพงป้องกันการรั่วซึมผ่านคันดินของ
คลองส่งน้ำและอ่างเก็บน้ำ



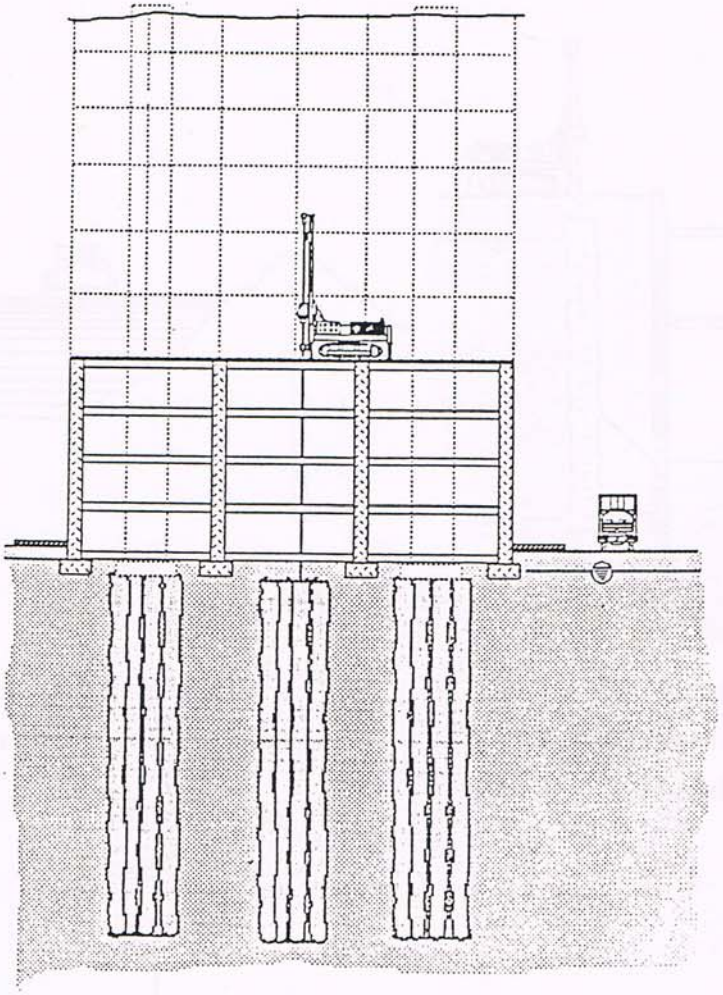
สร้างกำแพงป้องกันดินพังทลายในขณะ
ขุดร่องวางท่อน้ำ ในบริเวณที่คับแคบ



ทำเป็นเสาเข็มเพื่อเสริมความแข็งแรง
ให้ดินและเพิ่มเสถียรภาพให้ไหล่ดินตัด

บริษัท ซอยล์กรีต เทคโนโลยี จำกัด
SOILCRETE TECHNOLOGY CO.,LTD.

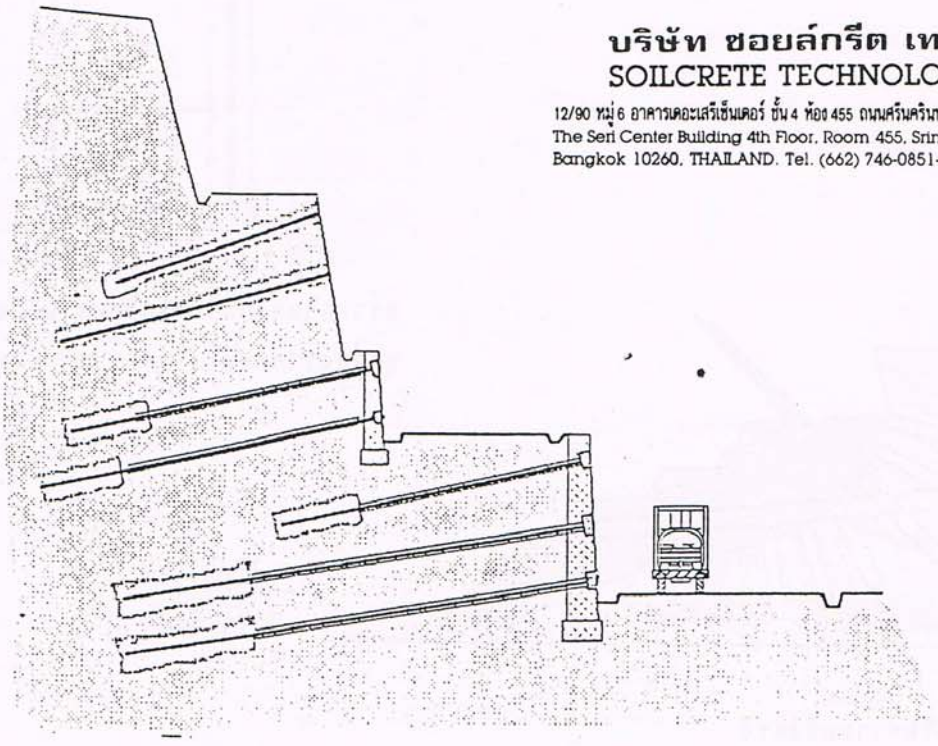
12/90 หมู่ 6 อาคารเดอะเสรีเซ็นเตอร์ ชั้น 4 ห้อง 455 ถนนศรีนครินทร์ แขวงหนองบอน เขตประเวศ กทม. 10260
The Seri Center Building 4th Floor, Room 455, Srinakharin Rd., Nongbon, Praves.
Bangkok 10260, THAILAND. Tel. (662) 746-0851-4 Fax. (662) 746-0855



เสริมความแข็งแรงให้ฐานรากอาคารเก่าที่เกิดการทรุดตัวสูง

บริษัท ซอยล์กรีต เทคโนโลยี จำกัด
SOILCRETE TECHNOLOGY CO.,LTD.

12/90 หมู่ 6 อาคารเดอะเสริเซ็นเตอร์ ชั้น 4 ห้อง 455 ถนนศรีนครินทร์ แขวงหนองบอน เขตประเวศ กทม. 10260
The Seri Center Building 4th Floor, Room 455, Srinakharin Rd., Nongbon, Praves.
Bangkok 10260, THAILAND. Tel. (662) 746-0851-4 Fax. (662) 746-0855



ทำเป็นสมอยึดรั้งกำแพงกันดินตามไหล่เขาดิบตัดที่มีความชันมาก

CANTIERE: Pontetaro (PR) (ITALY)
ANNO ESECUZIONE: 1982
COMMITTENTE: Azienda Autonoma Ferrovie dello Stato (FFSS)

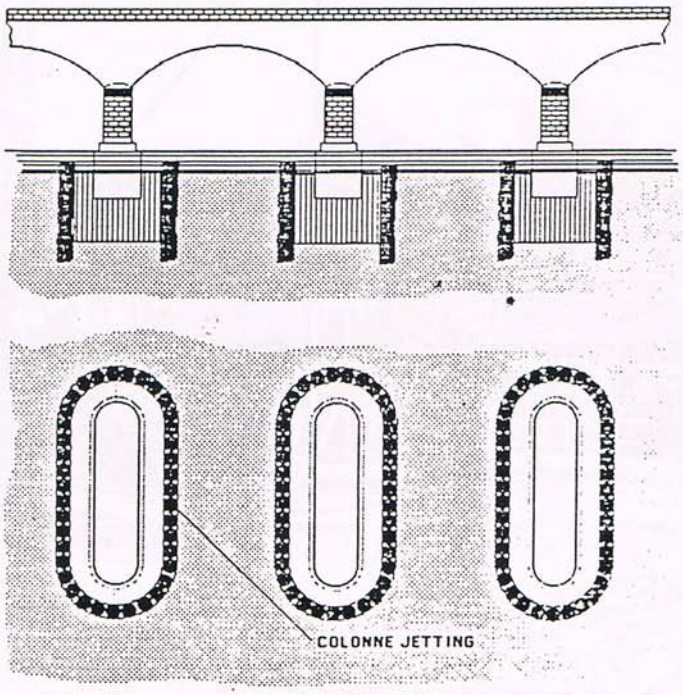
— Consolidamento del terreno di fondazione delle pile di un ponte ferroviario sulla linea MILANO/ROMA.
— La venuta di una piena di eccezionale violenza, che ha prodotto una profonda erosione nel letto del fiume, ha causato il ribaltamento di 2 pile ed il crollo di 3 arcate di un lungo ponte ferroviario di grandissima importanza sulla linea MILANO/ROMA.
— Oltre all'intervento urgente di ricostruzione delle pile e delle arcate crollate, vengono eseguite opere di consolidamento di tutte le fondazioni del ponte.
— Terreno: deposito alluvionale con prevalenza di ghiaia di media pezzatura con inclusioni lenticolari di argilla, limi sabbiosi e sabbie.
— Con l'intervento di consolidamento si è voluto ottenere il doppio risultato di:
• prevenire l'azione di dilavamento ed erosione prodotto dalle correnti subalvee e superficiali;
• di confinamento del terreno di fondazione onde conservare la capacità portante del terreno stesso ed incrementarla.
— Col "JET GROUTING" è stata eseguita una cintura protettiva continua al contorno delle fondazioni di ogni pila.

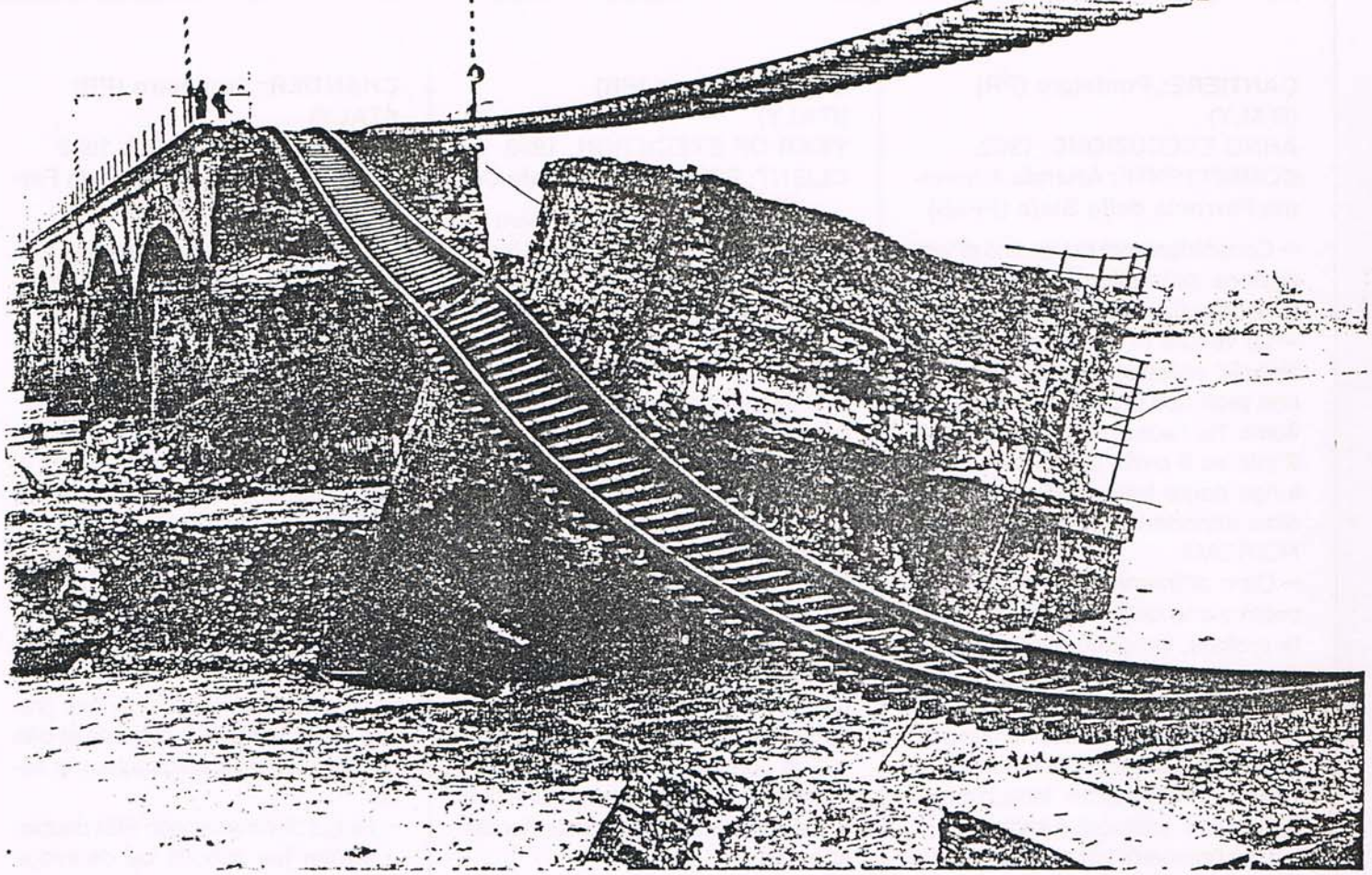
SITE: Pontetaro (PR) (ITALY)
YEAR OF EXECUTION: 1982
CLIENT: FFSS Railway State Co.

— Project: ground improvement by means of antiscouring cutoff-walls realized all around the foundations of the piers of the Taro River bridge, which represents a crucial section of the MILANO/ROMA railway.
— Due to a tremendous river flood causing a deep erosion of the Taro River bed, two piers and three arches of the bridge collapsed.
— In addition to the urgent reconstruction of the piers and arches, a big ground-improvement work around all the plinths foundations had to be carried out.
— Lithology: alluvial deposit constituted of medium grained gravel with lenses of clay, sandy silt and sand.
— The consolidation work aims to:
• prevent scouring and erosion due to the surface and underground water streams;
• to provide to the bridge foundations a confining action in order to increase the load capacity of the ground.
— The JET GROUTING technique allowed to realize a continuous wall of columns all around the foundations of each bridge pier.

CHANTIER: Pontetaro (PR) (ITALY)
ANNEE D'EXECUTION: 1982
CLIENT: Azienda Autonoma Ferrovie dello Stato FFSS

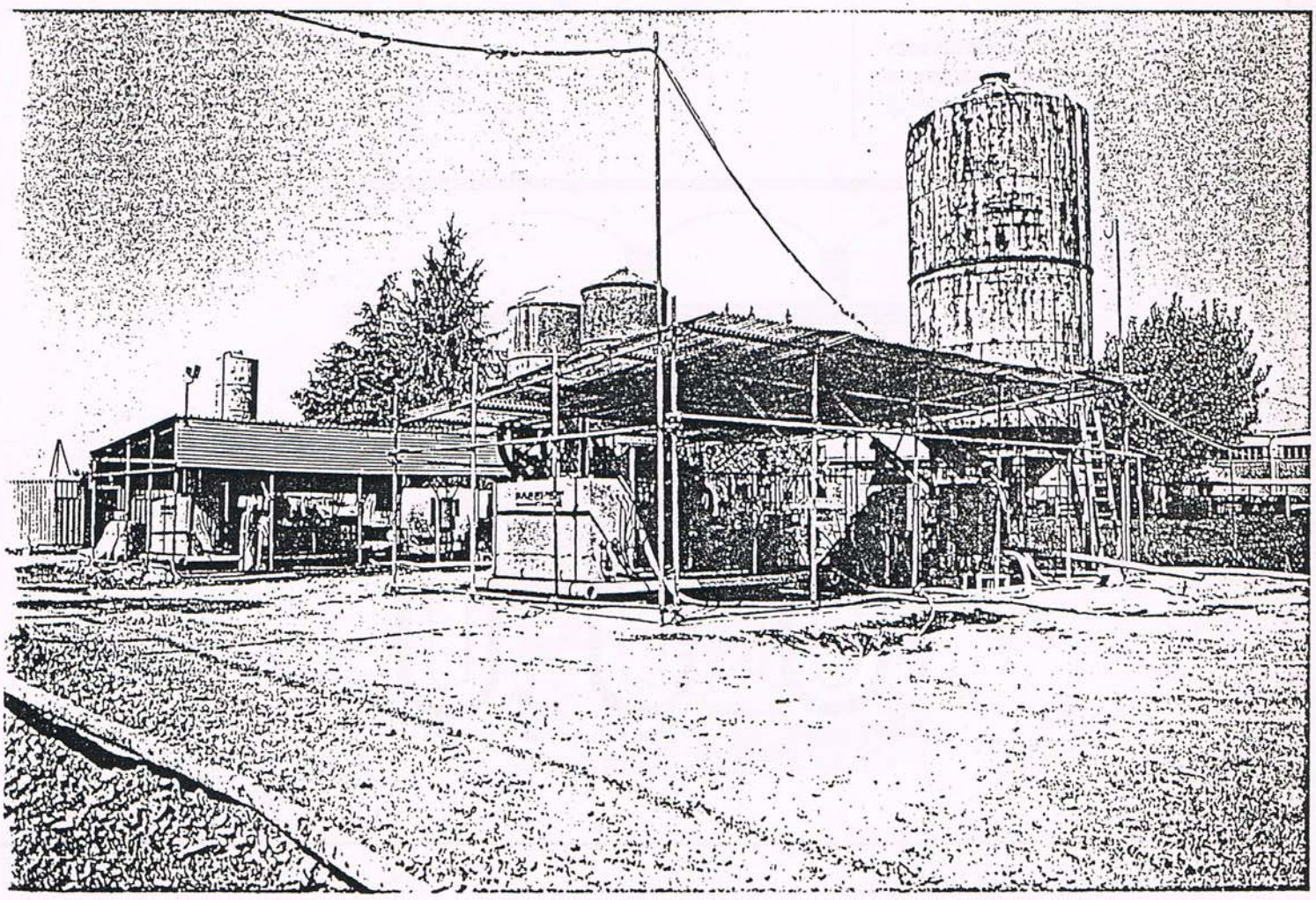
— Consolidation du terrain des fondations des piles d'un pont ferroviaire de la ligne MILANO/ROMA.
— Une crue fluviale d'une violence exceptionelle a produit une profonde érosion dans le lit du fleuve. Cette érosion a renversé deux piles et trois arcades d'un long et très important pont de la ligne ferroviaire.
— En plus de l'intervention d'urgence de reconstruction des piles et des arcades, des consolidations pour toutes les fondations du pont ont été faites.
— Terrain: remblai alluvionnaire gravier avec des galets moyens et des couches d'argille, limosableux et sable.
— Le but de l'intervention était double:
• arrêter les actions de délavage et d'érosion, produites par les courants des eaux;
• consolider le terrain des fondations pour conserver la capacité portante du terrain et lui donner de l'essor.
— Le piles sont aujourd'hui protégées par une ceinture de protection, exécutée avec la méthode du "JET GROUTING".

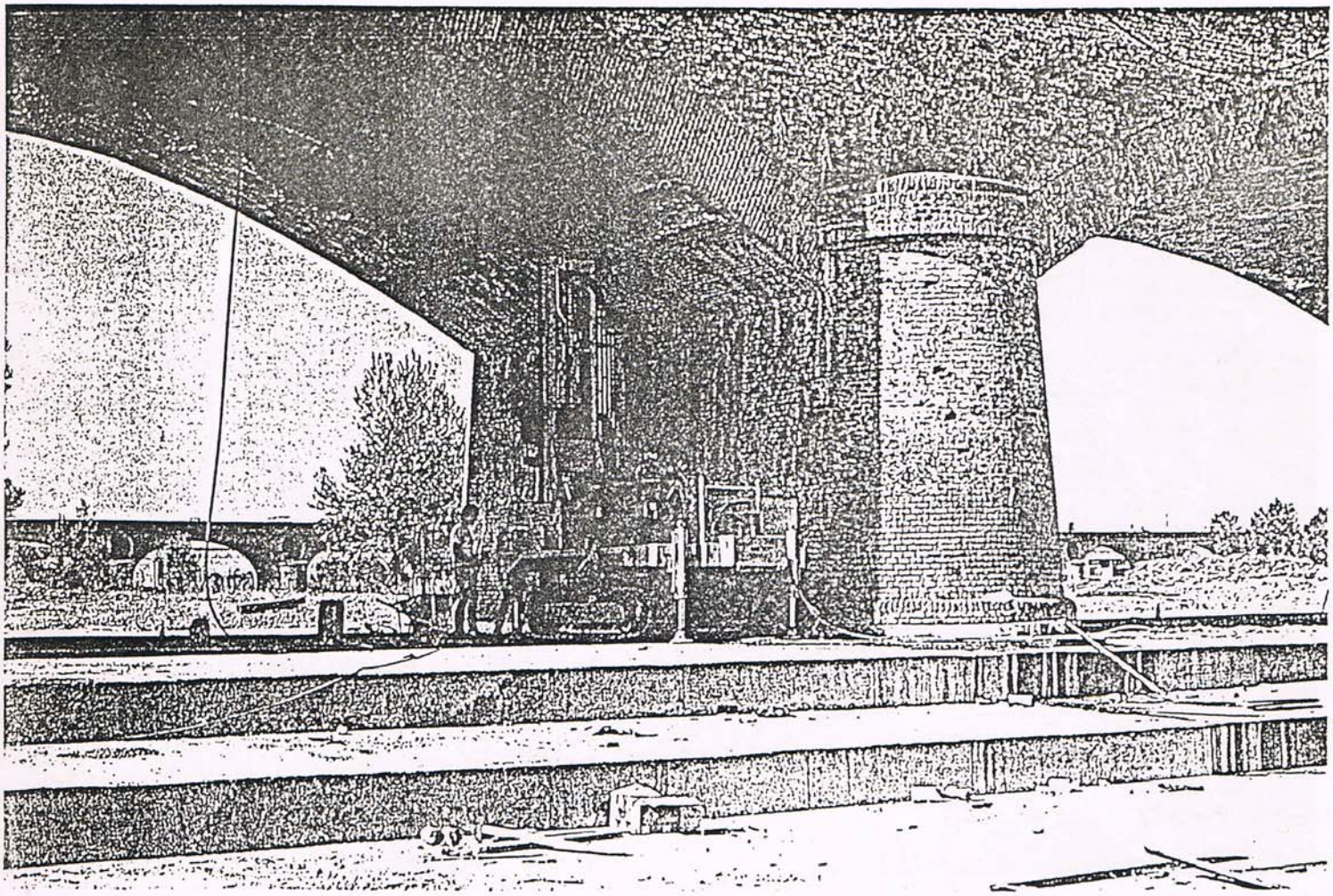




Pile crollate - Collapsed piers - Piles tombées

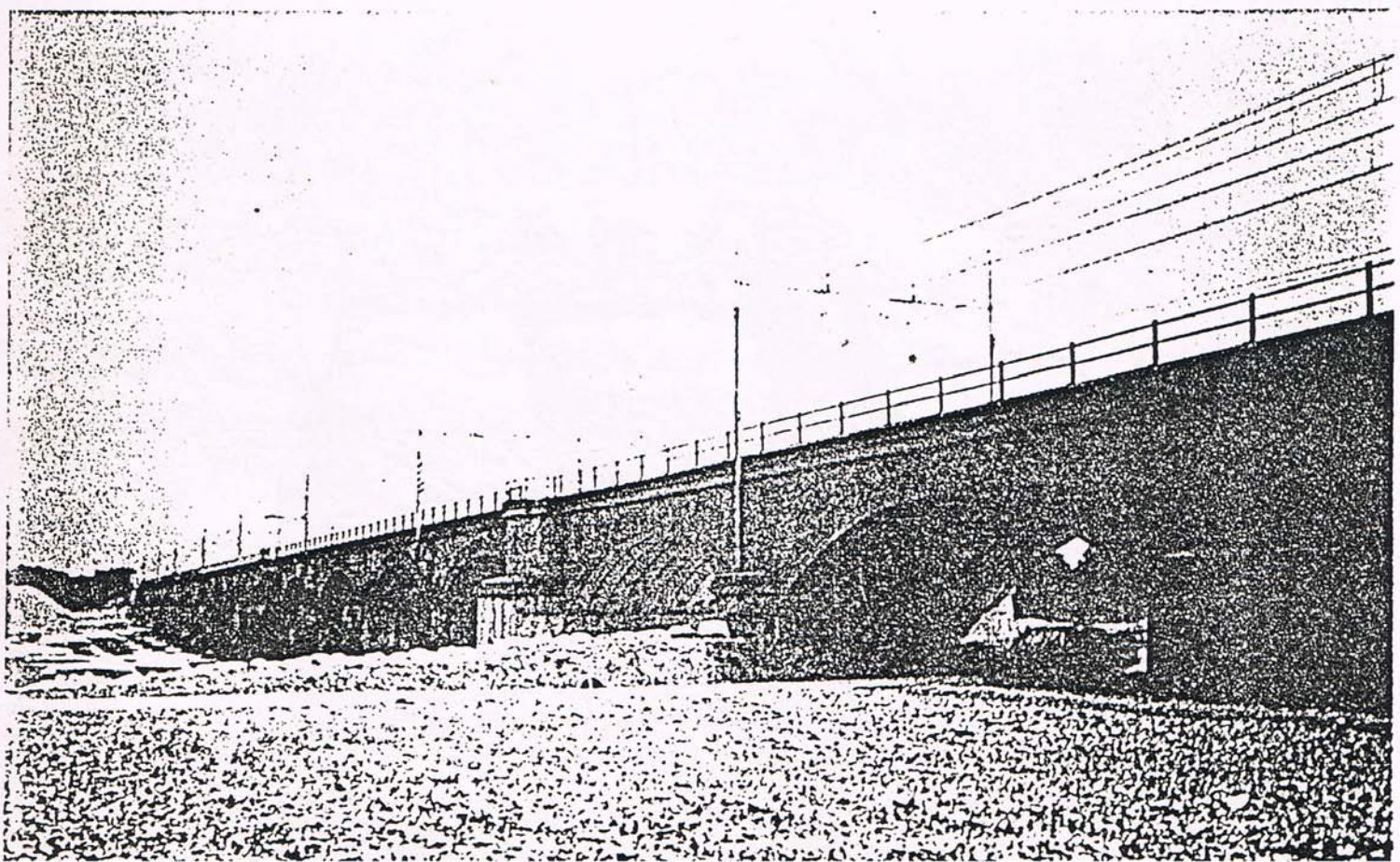
Due centrali di miscelazione e pompaggio - Two mixing and pumping plants - Double centrale de malaxage et pompage

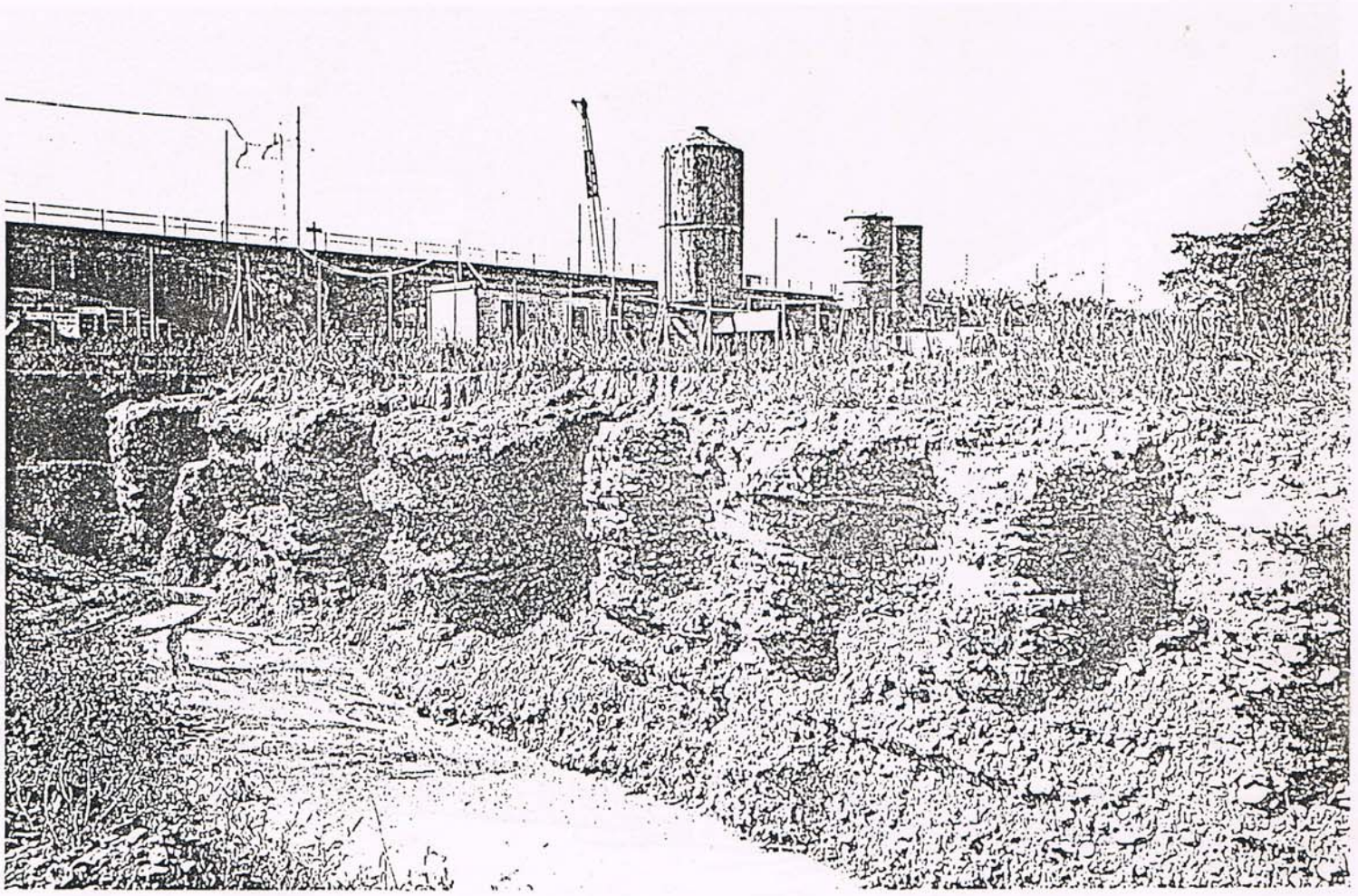




Sonda in fase di lavoro - Drill in operation - Foreuse pendant le travail

Vista del ponte a lavori ultimati - The bridge after the work completion - Travail terminé





Campo prove - Trial field - Champ d'essai

Particolare - Detail - Détail

แนวทางแก้ปัญหาการทรุดตัวของถนนซึ่งสร้างขึ้นบนชั้นดินอ่อนด้วยวิธี Jet Grouting

สมชัย กกกำแหง วย.867

ปัญหาการทรุดตัวที่อาจเกิดขึ้นกับงานถนนที่สร้างบนชั้นดินอ่อน

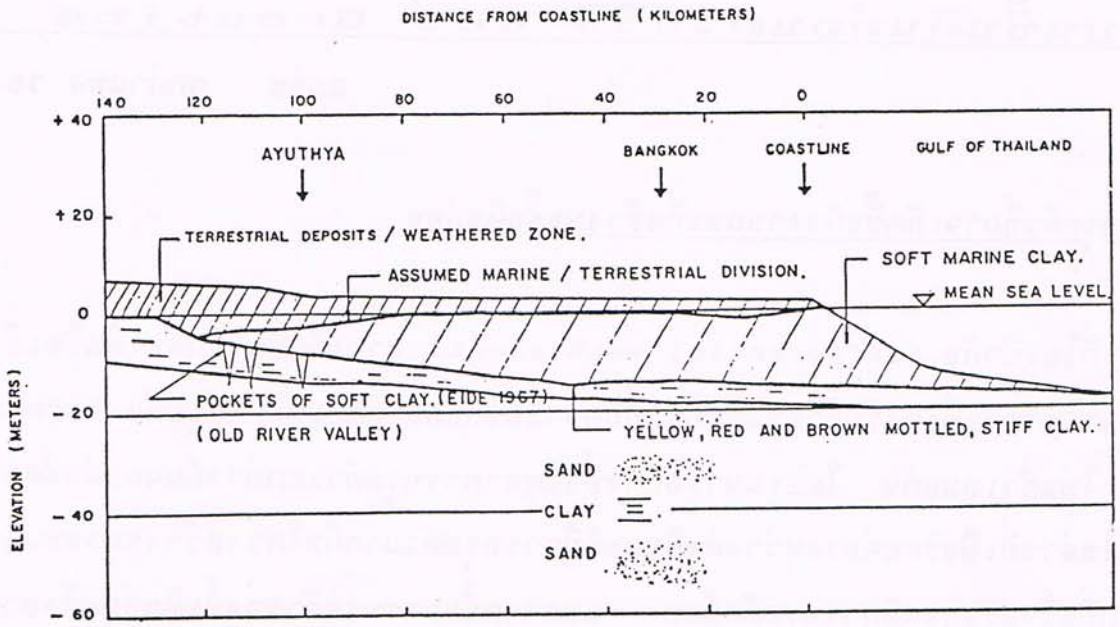
การทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน (differential settlement) อาจเกิดขึ้นบนถนนเส้นใดเส้นหนึ่งหากสร้างผ่านบริเวณที่รองรับด้วยชั้นดินอ่อนที่มีความหนาและมีคุณสมบัติการยุบตัว (compressbility) ไม่สม่ำเสมอกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาการทรุดตัวแตกต่างกันจะเด่นชัดมากตรงคอสะพานในส่วนที่เป็นรอยต่อระหว่างคันดินถมที่มีการทรุดตัวมากกับโครงสร้างของสะพานซึ่งวางบนฐานรากที่แข็งแรงและมีการทรุดตัวน้อย นอกจากนั้นการทรุดตัวของชั้นดินอ่อนยังอาจส่งผลให้คันถนนยุบลงเป็นแห่ง ๆ ซึ่งทำให้ผิวจราจรเสียระดับ เป็นคลื่น หรือแตกร้าว และถนนจะไม่สามารถใช้งานได้อย่างสะดวกราบรื่น ตัวอย่างความไม่สะดวกนี้จะเห็นได้ชัดเมื่อต้องมีการปิดช่องทางจราจรเพื่อซ่อมแซมถนนในขณะที่มีการจราจรหนาแน่น

ความเป็นมาของปัญหา

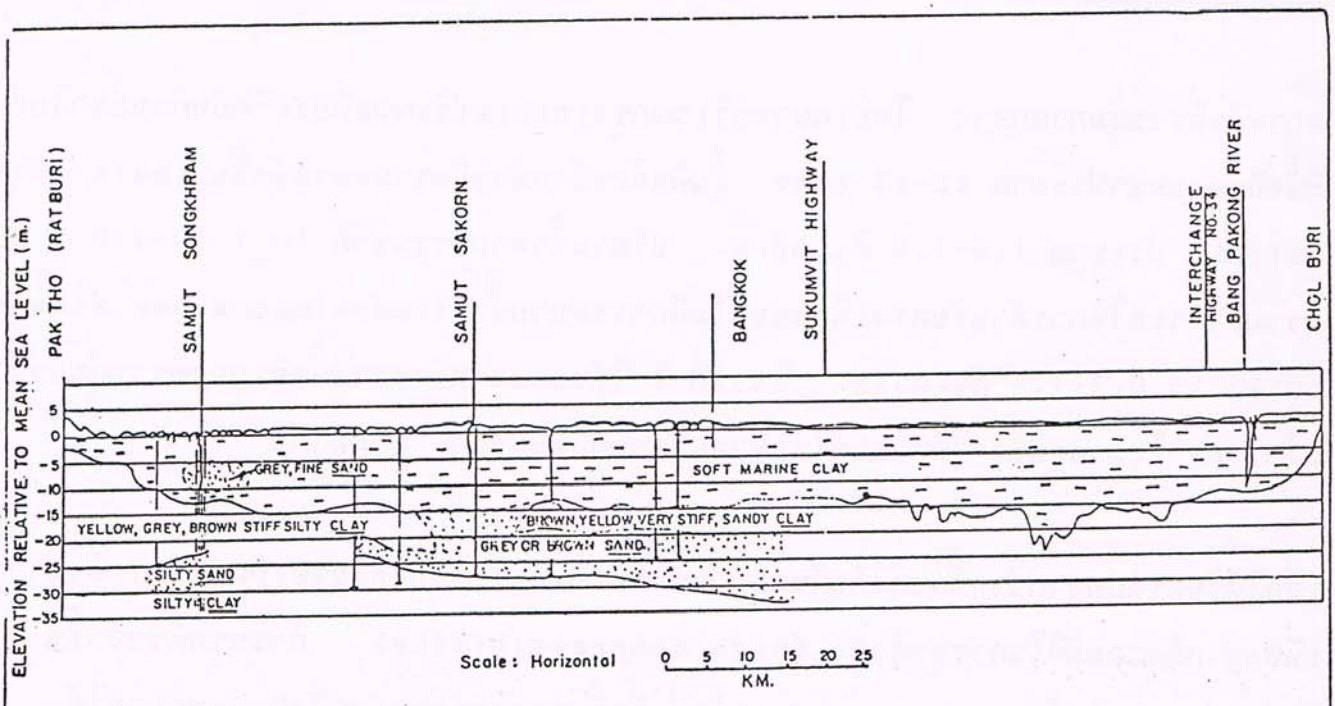
สภาพดินที่ราบลุ่มภาคกลาง โดยเฉพาะบริเวณกรุงเทพและปริมณฑลที่ประชิดกับด้านอ่าวไทยมีชั้นดินอ่อนหนาประมาณ 12-15 เมตร ชั้นดินอ่อนดังกล่าวมีความหนาแน่นชื้น (bulk unit weight) ประมาณ 1.3-1.6 ตัน/ลบ.ม. ปริมาณน้ำตามธรรมชาติ (w_n) 60-110 % และความสามารถในการต้านรับแรงเฉือนแบบไม่มีการระบายน้ำ (undrained shear strength) อยู่ระหว่าง 0.8-1.4 ตัน/ตร.ม. ในรูปที่ 1 ได้แสดงภาคตัดขวางชั้นดินของที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาในแนวเหนือ-ใต้ และในแนวตะวันออก-ตะวันตก ตามลำดับ

เมื่อได้รับแรงกดจากน้ำหนักของคันดินถม (embankment) ชั้นดินอ่อนจะเกิดการทรุดตัวมากเนื่องจากมีคุณสมบัติในการยุบตัวสูง (high compressibility) การทรุดตัวของชั้นดินอ่อนประกอบไปด้วยผลรวมของการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากหลายสาเหตุซึ่งอาจแยกออกได้ 4 ชนิดดังต่อไปนี้

บริษัท ซอยล์กรีต เทคโนโลยี จำกัด
SOILCRETE TECHNOLOGY CO.,LTD.
12/90 หมู่ 6 อาคารเดอะเสรีเซ็นเตอร์ ชั้น 4 ห้อง 455 ถนนศรีนครินทร์ แขวงหนองบอน เขตประเวศ กทม. 10260
The Seri Center Building 4th Floor, Room 455, Srinakharin Rd., Nongbon, Praves.
Bangkok 10260, THAILAND. Tel. (662) 746-0851-4 Fax. (662) 746-0855



รูป ๑ ก. ภาคตัดขวางที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาในแนวเหนือ – ใต้



รูป ๑ ข. ภาคตัดขวางที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาในแนวตะวันออก – ตะวันตก

$$S_T = S_i + S_u + S_c + S_s$$

เมื่อ S_T = ผลรวมของการทรุดตัว (total settlement)

S_i = การทรุดตัวที่เกิดทันทีเมื่อได้รับแรงกดดัน (immediate settlement)

S_u = การทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจาก local yield (flow) และ undrained creep

S_c = การทรุดตัวเนื่องจากขบวนการอัดตัวคายน้ำ (primary consolidation)

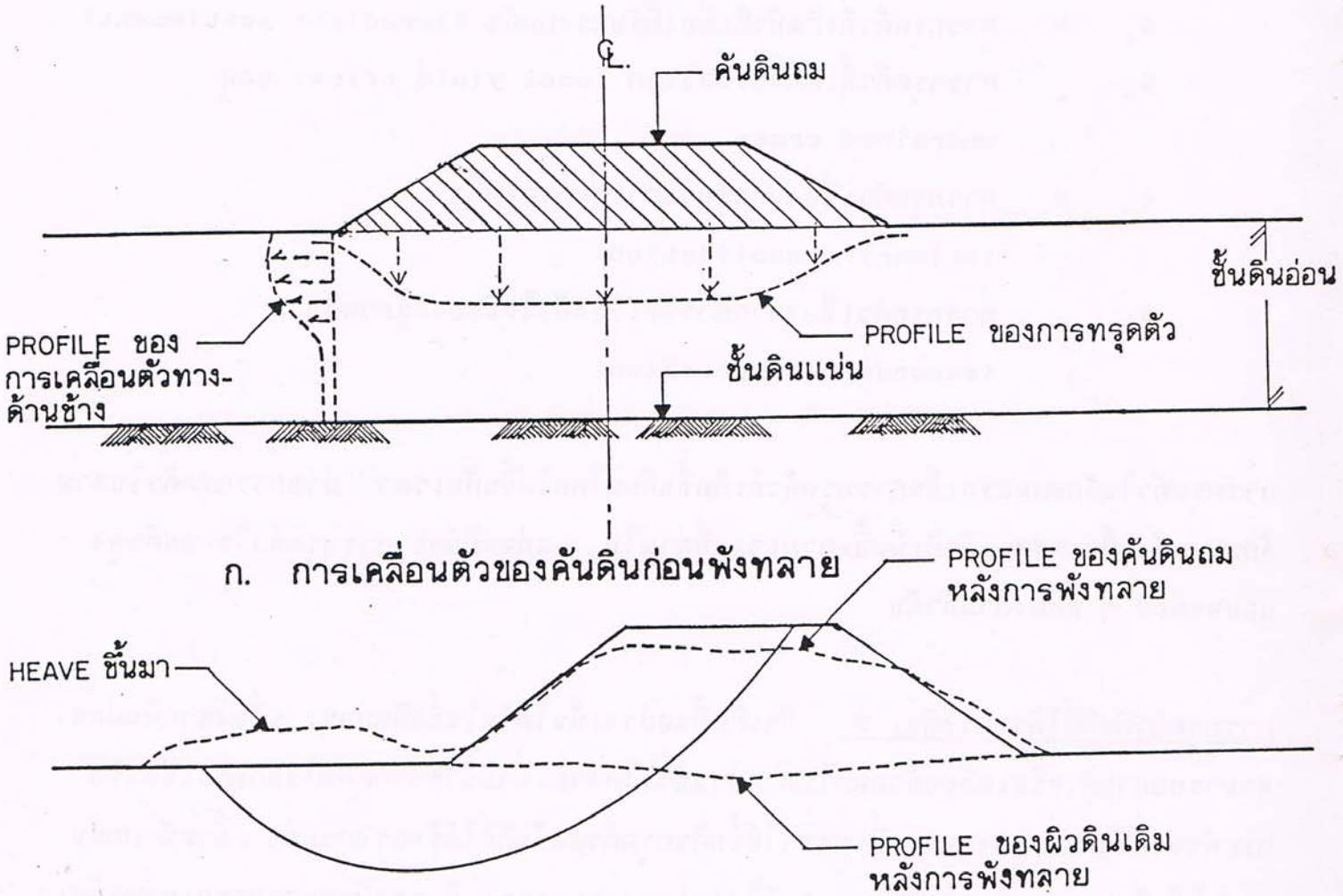
S_s = การทรุดตัวเนื่องจากการจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาคดิน (secondary compression)

การทรุดตัวในลักษณะแรกเป็นการทรุดตัวที่เกิดขึ้นทันทีโดยไม่ขึ้นกับเวลา ส่วนการทรุดตัวในสามลักษณะหลังเป็นการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นตามเวลาที่ผ่านไป แต่จะมีอัตราการทรุดตัวในตอนต้นสูงและจะค่อย ๆ ลดลงตามลำดับ

<u>การทรุดตัวทันทีที่ได้รับแรงดัน, S_i</u> มักเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในชั้นดินอ่อน เนื่องจากดินอ่อนสามารถขยายตัวหรือเคลื่อนตัวออกไปทางด้านข้างได้ง่ายเมื่อมีน้ำหนักกดทับในลักษณะเช่นแรงกระทำจากคันดินถมของถนน ซึ่งจะทำให้ชั้นดินทรุดตัวลงทันทีที่ได้รับแรงกระทำ น้ำหนักกดทับจะก่อให้เกิดความเครียดในลักษณะ 2 มิติ (plane strain) คือมวลดินจะสามารถเคลื่อนตัวได้ทั้งแนวดิ่งและแนวราบ ในระนาบที่ตั้งฉากกับแนวแกนของถนน (รูปที่ 2 ก.)

พฤติกรรมที่เกิดขึ้นเช่นนี้เป็นเพราะดินอิ่มตัวด้วยน้ำและมีความทึบน้ำสูง ดังนั้นขณะที่ได้รับน้ำหนักบรรทุก น้ำจะยังไม่สามารถเคลื่อนออกจากมวลดินได้ในทันทีที่ได้รับแรงกด มวลดินอุ้มน้ำทั้งก้อนจะยุบตัวลงในแนวดิ่งและขยายตัวออกในแนวราบ โดยรักษาปริมาตรรวมไว้คงที่ ลักษณะของการเปลี่ยนรูปทรงเช่นนี้อาจเทียบได้กับการเปลี่ยนรูปของลูกโป่งใส่น้ำเมื่อถูกแรงกดทับจากด้านบน

ถ้าการเพิ่มของน้ำหนักกดทับเกิดขึ้นในอัตราที่สูง เช่นถมดินขึ้นไปสูงมากในเวลาอันสั้น การทรุดตัวและความดันน้ำในโพรงดินของชั้นดินอ่อนอาจเกิดสะสมขึ้นมากจนถึงขีดที่ทำให้คันดินเกิดการวิบัติและพังทลายได้ การทรุดตัวประเภทนี้อาจเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า Undrained settlement (รูปที่ 2 ข.)



ก. การเคลื่อนตัวของคันดินก่อนพังทลาย

ข. การเคลื่อนตัวของคันดินจนถึงสภาพพังทลายของเชิงลาด

รูปที่ 2. ลักษณะการเคลื่อนตัวและการพังทลาย
ของคันดินที่สร้างขึ้นบนชั้นดินอ่อน

การทรุดตัวเนื่องจาก local yield (flow) และ undrained creep, S_u

การทรุดตัวในลักษณะ undrained local yield นี้ เกิดขึ้นในกรณีที่มีแรงกระทำจากภายนอกในขนาดที่สูงมาก จนทำให้เกิดหน่วยแรงเฉือน (shear stress) ขึ้นในมวลดินบางส่วนเท่ากับหน่วยต้านแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดิน (undrained shear strength) ดินอ่อนส่วนนั้นจึงมีพฤติกรรมการไหล (flow) ขึ้นได้ในลักษณะคล้ายโคลนเหลว พฤติกรรมนี้อาจหยุดลงได้หากขบวนการอัดตัวคายน้ำ (consolidation) เกิดขึ้นในมวลดินได้ทันท่วงที พฤติกรรมการไหลจะทำให้เกิดความดันน้ำส่วนเกินขึ้นบ้างในโพรงดิน (excess pore water pressure) แต่ถ้าขบวนการอัดตัวคายน้ำเกิดขึ้นได้พร้อมกัน ค่าความดันน้ำส่วนเกินนี้อาจมีแนวโน้มที่จะคงที่เมื่อเทียบกับเวลา

ถ้าการระบายน้ำออกจากดินเกิดขึ้นค่อนข้างช้า จะเกิดการสะสมของความดันน้ำส่วนเกินเพิ่มขึ้นในโพรงดินเรื่อย ๆ สืบเนื่องจากพฤติกรรมการไหล มวลดินจะเคลื่อนตัวไปอย่างช้า ๆ ในขณะเดียวกัน จนอาจถึงจุดพังทลายได้ด้วยผลของ undrained creep และ flow การทรุดตัวแบบ undrained creep ซึ่งแปรผันตามเวลา เป็นกรณีที่หน่วยแรงเฉือนในดินมีขนาดคงที่แต่สามารถก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวของมวลดินในสภาวะที่เป็น plastic ได้

การทรุดตัวเนื่องจากขบวนการอัดตัว คายน้ำ, S_c

เมื่อมวลดินเหนียวซึ่งอิ่มตัวด้วยน้ำได้รับแรงกดทับเพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดันน้ำส่วนเกินในโพรงดิน (excess pore water pressure) เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนที่ได้รับแรงกระทำ ความดันน้ำส่วนเกินนี้จะสูงกว่าความดันน้ำปกติในมวลดินทั่วไป นอกบริเวณที่ได้รับแรงกระทำ ดังนั้นจะเกิดการไหลของน้ำออกจากมวลดินจนกระทั่งความดันน้ำในโพรงดินปรับเข้าสู่สภาวะสมดุลย์กับความดันน้ำสถิตย์โดยรอบ การไหลของน้ำออกจากมวลดินนี้ ทำให้อนุภาคของมวลดินเคลื่อนที่เข้ามาอยู่ชิดกันยิ่งขึ้น ปริมาตรของมวลดินลดลง ผลสุดท้ายจึงทำให้เกิดการทรุดตัวขึ้นในชั้นดิน

การทรุดตัวเนื่องจากการจัดตัวเรียงกันใหม่ของอนุภาคดิน, S_s

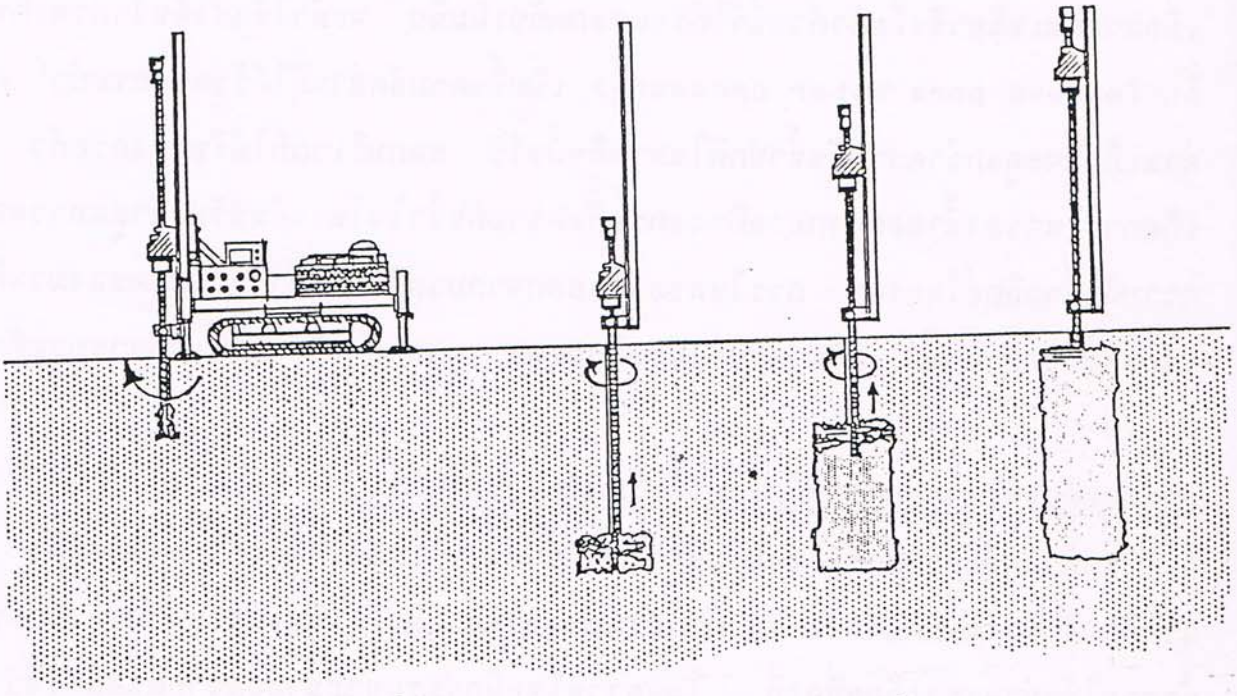
การทรุดตัวลักษณะนี้เกิดขึ้นได้แม้ไม่มีความดันน้ำส่วนเกินหลงเหลืออยู่ในมวลดินแล้ว เนื่องจากแรงที่กดทับทำให้เกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ของอนุภาคดินต่อเนื่องกันไปจากขบวนการอัดตัวคายน้ำภายใต้หน่วยแรงเฉือนที่คงที่ ในสภาวะนี้จะมีการระบายน้ำออกจากดินอย่างช้า ๆ แต่ไม่มีความดันน้ำส่วนเกินเกิดขึ้นในโพรงดิน สภาวะนี้อาจเรียกได้ว่า drained creep

บริษัท ซอยล์กรีต เทคโนโลยี จำกัด
SOILCRETE TECHNOLOGY CO.,LTD.
12/90 หมู่ 6 อาคารเดอะเสริเซ็นเตอร์ ชั้น 4 ห้อง 455 ถนนศรีนครินทร์ แขวงหนองบอน เขตประเวศ กทม. 10260
The Seri Center Building 4th Floor, Room 455, Srinakharin Rd., Nongbon, Praves,
Bangkok 10260, THAILAND. Tel. (662) 746-0851-4 Fax. (662) 746-0855

ทางแก้ปัญหาการทรุดตัวของถนนที่สร้างบนชั้นดินอ่อน

แนวคิด - ถ้าทำให้ชั้นดินอ่อนเปลี่ยนคุณสมบัติจาก very soft to soft clay ไปเป็น stiff to very stiff clay มวลดินที่ปรับปรุงคุณสมบัติแล้วจะมีค่าการยุบตัว (compressibility) ต่ำลง และค่ากำลังต้านรับแรงเฉือนสูงขึ้น ชั้นดินที่ปรับปรุงแล้วนี้จะสามารถแบกรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงขึ้น ผลรวมของการทรุดตัวน้อยลงเนื่องจากองค์ประกอบที่ก่อให้เกิดการทรุดตัวทั้ง 4 ประเภท ได้ถูกลดทอนลงเกือบทั้งหมด นอกจากนั้นยังทำให้ความมั่นคงปลอดภัยต่อการพังทลายของคันทางเพิ่มขึ้นด้วย

วิธีการ - วิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เพื่อป้องกันหรือแก้ไขปัญหานี้คือ วิธี Jet Grouting ซึ่งลักษณะการทำงานโดยสรุปคือ เจาะหลุมลงไปในชั้นดินอ่อน แล้วใช้ความดันสูงในระดับ 200 ถึง 400 bar ฉีดน้ำปูนซีเมนต์ที่มีความเข้มข้นพอเหมาะเข้าไปผสมกับดินอ่อนในส่วนที่รองรับคันดินถม โดยฉีดผ่านรูเล็ก ๆ ที่เจาะไว้ในแนวนอนใกล้ปลายล่างของก้านเจาะในขณะที่หมุนก้านเจาะขึ้นช้า ๆ เพื่อทำให้การกวนผสมน้ำปูนกับดินเกิดขึ้นได้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งขั้นตอนการทำงานได้แสดงไว้ในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ลำดับขั้นตอนการทำงานเจาะฉีดน้ำปูนซีเมนต์เพื่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ ขึ้นในงานถนาม

- เวลาและความดันในการฉีดน้ำปูนแต่ละจุด ตลอดจนการจัดเว้นระยะห่างระหว่างจุดฉีดน้ำปูนสามารถเปลี่ยนแปลงการผสมผสานได้หลายอย่างขึ้นอยู่กับชนิด สภาพของชั้นดินในแต่ละท้องที่และเป้าหมายที่ต้องการในแต่ละงาน การจัดเว้นระยะและลักษณะการวางตำแหน่งเจาะฉีดน้ำปูนเพื่อรองรับคันทางบนชั้นดินอ่อน ได้แสดงตัวอย่างไว้ในรูปที่ 4

<u>พฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ</u>

- ปฏิกิริยาเคมี Hydration ระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ นอกจากจะทำให้เกิดสารเคมีชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะสูงชื่อ แคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรท (CSH) ซึ่งสามารถเชื่อมเกาะเม็ดดินเข้าด้วยกันแล้ว ยังทำให้เกิดสารเคมีอีกชนิดหนึ่งชื่อ แคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ซึ่งสามารถเข้าทำปฏิกิริยาเคมีกับเม็ดดินบางส่วนที่มีสารจำพวกซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบได้ต่อไปอีก ปฏิกิริยาเคมีส่วนหลังนี้เรียกว่า pozzolanic reaction จะเกิดขึ้นช้า ๆ และมีผลทำให้เกิดสารซึ่งมีคุณสมบัติเชื่อมเกาะเม็ดดินเพิ่มขึ้นอีกส่วนหนึ่งชื่อ แคลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรท (CSH) และแคลเซี่ยมอะลูมิเนต-ไฮเดรท (CAH) ซึ่งสาร 2 ตัวนี้จะช่วยเพิ่มคุณสมบัติเชื่อมเกาะระหว่างเม็ดดินให้สูงยิ่งขึ้น (จากผลงานวิจัยของ HERZOG, A. และ MITCHEL.T.K. (1963))

<u>hydration of cement</u> (tricalcium silicate, $3CaO.SiO_2$)

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2$$

<u>pozzolanic reaction</u>

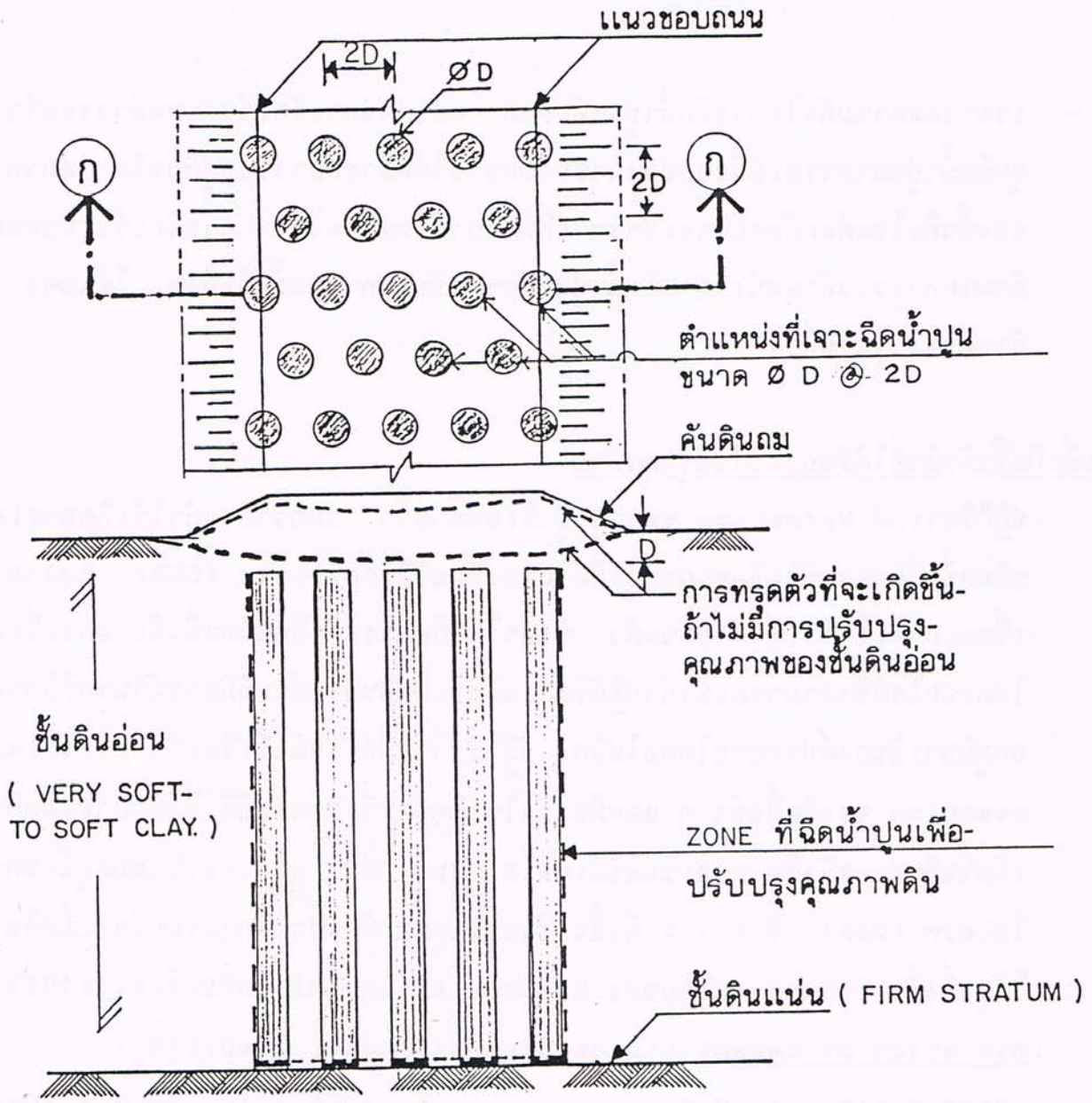
$$3Ca(OH)_2 + 2SiO_2 \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O$$

$$3Ca(OH)_2 + Al_2O_3 + 3H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.6H_2O$$

CSH = $3CaO.2SiO_2.3H_2O$

CAH = $3CaO.Al_2O_3.6H_2O$

- มวลดินอ่อนที่อนุภาคของดินมีการจับยึดกันน้อย จะเปลี่ยนสภาพมาเป็นมวลดินแข็งซึ่งอนุภาคของมวลดินจับยึดตัวกันแข็งแรงยิ่งขึ้นภายในเวลาเพียง 2-4 สัปดาห์



รูปตัด ก-ก

รูปที่ 4. การเสริมความมั่นคงให้คันถนนโดยวิธีการ
ปรับปรุงคุณภาพชั้นดินอ่อนด้วยวิธี JET GROUTING

- ลดภาระในการบำรุงรักษาถนนในระยะยาวลงได้มาก เพราะไม่ต้องเสริมดินคันทางเพิ่มขึ้นเพื่อชดเชยการยุบตัวของถนนเป็นระยะ ๆ ในระหว่างใช้งาน เพราะได้ปรับปรุงคุณภาพชั้นดินอ่อนใต้คันดินถมซึ่งเป็นต้นเหตุใหญ่ที่ทำให้เกิดการทรุดตัวของถนนไปแล้ว
- ยืดระยะเวลาระหว่างช่วงการซ่อมบำรุงผิวจราจรที่อาจเกิดการแตกร้าวขึ้นบ้างจากสาเหตุการทรุดตัวไม่สม่ำเสมอกันของคันดินถมที่รองรับถนน

<u>แนวทางแก้ไขการทรุดตัวแตกต่างกันที่บริเวณคอสะพาน</u>

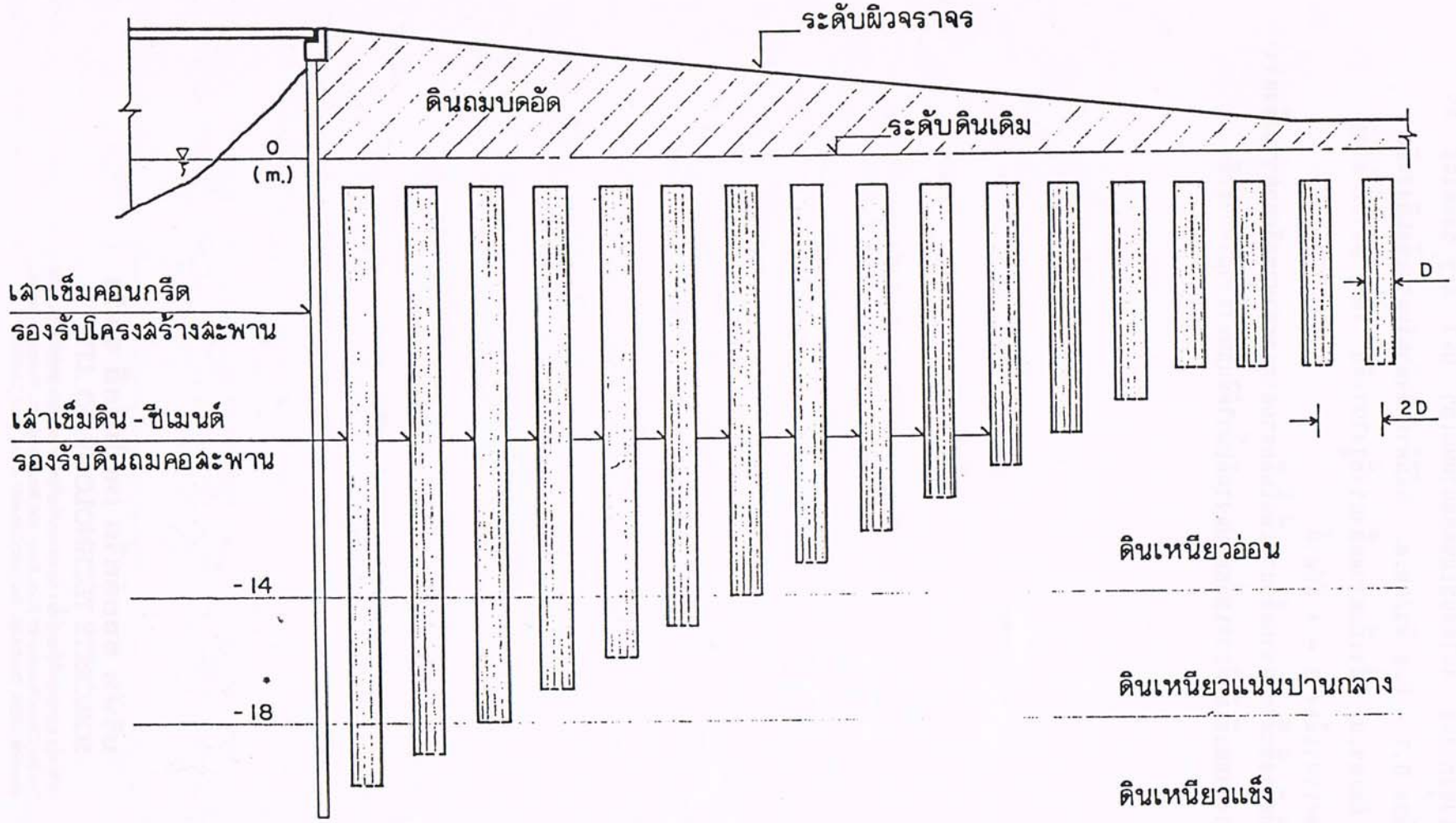
- สร้างกลุ่มเสาเข็มดินซีเมนต์รองรับดินถมคอสะพานโดยจัดให้เสาเข็มชุดที่วางขวางถนนในสองแถวแรกซึ่งประชิดกับโครงสร้างของสะพานควรมีความยาวหยั่งเข้าไปในชั้นดินแข็ง (stiff to very stiff clay) ไม่น้อยกว่าหนึ่งเมตร ส่วนแถวที่เรียงถัด จากนั้นออกมาควรมีความยาวลดหลั่นกันลงไปประมาณแถวละหนึ่งเมตร จนกระทั่งเสาเข็มดินซีเมนต์มีความยาวเท่ากับเสาเข็มที่รองรับคันดินถมในบริเวณที่ต่อเนื่องกันออกไปของคันทาง (ดูรูปที่ 5)

<u>ข้อดีของการใช้วิธี Jet Grouting กับงานปรับปรุงชั้นดินอ่อนใต้คันทางทั้งในช่วงก่อสร้างและซ่อมบำรุง</u>

- ทำงานได้รวดเร็ว และใช้เนื้อที่ในการทำงานน้อย ดังนั้นหากใช้ในงานปรับปรุงคุณภาพถนน จะสามารถทำได้โดยปิดช่องการจราจรของถนนเพียงคราวละช่องเดียวในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ เท่านั้น
- หากใช้วิธีซ่อมปรับปรุงแบบดั้งเดิมมักจะต้องมีภาระรื้อคันทางเดิมออกก่อนและถมกลับในภายหลัง ภาระเหล่านี้จะลดลงไปมากเมื่อใช้วิธี Jet grouting ช่วยในงานเสริมความมั่นคงของถนน นอกจากนั้นการเจาะฉีดน้ำปูนเพื่อปรับปรุงชั้นดินอ่อนนี้ยังสามารถควบคุมให้ปราศจากร่องรอยความเปรอะเปื้อนบนผิวจราจรหลังการทำงานได้ง่าย จึงไม่ก่อความสกปรกรำคาญตาต่อทัศนวิสัยของผู้ใช้รถใช้ถนนโดยทั่วไป

<u>ดินที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วจะไม่ก่อปัญหาการทรุดตัวของถนน</u>

- เมื่อฉีดน้ำปูนเข้าไปในดิน นอกจากจะเพิ่มความแข็งแรงให้กับชั้นดินอ่อนที่รองรับใต้คันทางแล้ว ยังสามารถเพิ่มปริมาตรให้มวลดินส่วนรวมได้อีก 6% โดยประมาณด้วย (เมื่อควบคุมให้ระยะห่างระหว่างจุดที่ฉีดน้ำปูนเป็น 2 เท่าของขนาดเสาเข็มดิน-ซีเมนต์) ปริมาตรส่วนที่เพิ่มนี้ถ้าหากไม่ต้องการกำจัดทิ้งไปจะสามารถใช้ประโยชน์ยกผิวดินในบริเวณที่ได้รับการปรับปรุงได้อีกอย่างน้อย 6 % ของความหนาของชั้นดินที่ปรับปรุงคุณภาพ เช่น ถ้าปรับปรุงคุณภาพชั้นดินอ่อนหนาประมาณ 12 ม. จะยกผิวดินได้สูงขึ้นมาอีกอย่างน้อย 72 ซม. ซึ่งทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในงานถมดินยกระดับถนนลงไปได้อีกมาก
- ค่ากำลังต้านรับแรงเฉือนของชั้นดินอ่อนข้างใต้คันถนนได้รับการปรับปรุงให้สูงขึ้นถึงระดับดินเหนียวปานกลางถึงแข็ง จึงช่วยเพิ่มความมั่นคงของเชิงลาดต่อการวิบัติของไหล่ถนนเนื่องจากมีชั้นดินอ่อนใต้ฐานรากขึ้นอีกมาก
- น้ำหนักของมวลดินซีเมนต์ที่ได้รับการปรับปรุงสภาพขึ้นนี้ จะเบากว่าน้ำหนักของดินก่อนการปรับปรุงประมาณ 10 % จึงมีผลให้น้ำหนักกดทับต่อชั้นดินใต้ส่วนที่ปรับปรุงคุณภาพมีปริมาณต่ำกว่ากรณีที่ถมดินเพื่อยกระดับคันทางตามวิธีการก่อสร้างแบบดั้งเดิม นอกจากนั้นตัวเสาเข็มดินซีเมนต์ซึ่งแข็งแรงกว่าจะแบ่งรับแรงกดทับไว้เป็นส่วนใหญ่และมีการยุบตัวน้อย ส่วนดินอ่อนที่อยู่ระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์จะรับแรงแต่เพียงส่วนน้อยจึงเกิดการยุบตัวน้อย ดังนั้นปริมาณการยุบตัวของมวลดินโดยรวมในกรอบที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วจึงเกิดขึ้นน้อย ด้วยเหตุที่มวลดินในส่วนที่ได้รับการปรับปรุงมีน้ำหนักเบาและมีคุณสมบัติการยุบตัวต่ำเมื่อได้รับแรงกระทำจึงส่งผลให้การทรุดตัวโดยรวมของคันดินถมคอสะพานมีโอกาสเกิดขึ้นได้ในปริมาณที่น้อยมาก โอกาสที่จะเกิดความเสียหายแก่ถนนเนื่องจากการทรุดตัวแตกต่างกันในระยะยาวจึงลดลงมาก
- เมื่อถนนไม่ทรุดตัว ปัญหาการเป็นคลื่นหรือแตกร้าวของผิวจราจรก็จะลดลงไปด้วย จึงส่งผลให้ถนนสามารถเปิดใช้เพื่อการจราจรอย่างต่อเนื่องได้ราบรื่นเป็นเวลายาวนาน นับเป็นการส่งเสริมให้สามารถใช้งานถนนได้อย่างเต็มประสิทธิภาพสมดังเจตนารมณ์ดั้งเดิมของผู้ออกแบบ



รูปที่ 5. การเสริมความแข็งแรงให้ชั้นดินอ่อนด้วยเสาเข็ม ดิน-ซีเมนต์ เพื่อลดการทรุดตัว-ของคันดินถมคอละพาน ด้วยวิธี JET GROUTING

- ผลงานในขั้นสุดท้ายคือ จะได้ดินซีเมนต์ที่มีน้ำหนักเบา มีค่า dry density ต่ำในระดับเพียง 0.7 - 0.8 ตัน/ลบ.ม. แต่มีค่ากำลังต้านรับแรงเฉือนถึงระดับ 10 - 30 ตัน/ตร.ม. ซึ่งเป็นความแข็งแรงที่สูงในระดับ very stiff clay ภายในระยะเวลาเพียง 2 - 4 สัปดาห์
- ดินซีเมนต์ที่สร้างขึ้นนี้จะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอีกตามอายุและสามารถรักษาความแข็งแรงนี้ไว้ได้อย่างคงทนแม้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินขณะใช้งานในภายหลัง

บริษัท ซอยล์กรีต เทคโนโลยี จำกัด
SOILCRETE TECHNOLOGY CO.,LTD.
12/90 หมู่ 6 อาคารเดอะเสรีเซ็นเตอร์ ชั้น 4 ห้อง 455 ถนนศรีนครินทร์ แขวงหนองบอน เขตประเวศ กทม. 10260
The Seri Center Building 4th Floor, Room 455, Srinakharin Rd., Nongbon, Praves.
Bangkok 10260, THAILAND. Tel. (662) 746-0851-4 Fax. (662) 746-0855