

高圧噴射攪拌工法による 地盤改良効果の評価法の提案

三井 隆¹・池田昭彦²・吉川 正³・吉武 勇⁴・中川浩二⁵

¹正会員 工修 鹿島建設株式会社 海外事業本部 (〒163-1028 東京都新宿区西新宿 3-7-1)

²正会員 ケミカルグラウト株式会社 施工本部 (〒107-8309 東京都港区元赤坂 1-6-4)

³正会員 工修 鹿島建設株式会社 東京支店 (〒107-8477 東京都港区元赤坂 1-3-8)

⁴正会員 博(工) 山口大学助手 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

⁵フェロ会員 工博 山口大学教授 臨床トンネル工学研究所 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

高圧噴射攪拌工法(JG工法)による地盤改良効果の評価には、一般にボーリングコアの一軸圧縮強さが用いられている。しかしながら、この一軸圧縮強さは良好に改良され供試体の成型が可能であった部分の限定された代表値であり、地盤中にはある程度の応力伝達ができてもボーリングコア供試体としては成形できない部分も存在する。すなわち、従来の評価方法では改良体全体系での評価に適さない場合も多いものと考えられる。本報では、JG工法による改良体のボーリングコアの調査結果を用いて、改良体全体系で評価できるような改良効果の指標(分類)ならびにその評価方法の提案を行った。さらに同評価基準に基づいた改良体全体系での強さ推定手法の構築について検討を試みた。

Key Words : jet grouting, evaluation method, ground improvement, boring core

1. はじめに

高圧噴射攪拌(ジェットグラウト:JG)工法は、原位置攪拌混合工法の中において、比較的改良体が高強度で均質であり、信頼性の高い工法のひとつに挙げられている^{1)~3)}。JG工法の地盤改良効果を設計・施工へ適正に反映させるには、同工法による地盤改良効果の把握・評価が必要とされる。しかしながら、その判定評価には決定的な手法がなく、一般にはボーリングコアの一軸圧縮強さをその特性あるいは代用特性として評価しているのが実情である。ここで、ボーリングコアによる強度評価法は、採取したコアのうち、連続性を有する比較的良好な部位のテストピースをもって試験に供することから、必ずしも得られたデータが改良体全体の強度を表すものではないものと考えられる。逆にボーリングコアが試験体として成形できないようなケースにおいても、巨視的には改良体内部においてある程度の応力伝達は可能と推察される。

このような現状の中、以前には改良対象地盤として適当でないと評価された地盤条件においても、JG工法は近年施工実績を伸ばしてきており、改良体全体系での効果の評価法が望まれるところである。加えて、現在一般的に普及している同工法においては、言うまでもなく、改良効果の評価法はできるだけ簡

易で経済的なものでなければならない。

そこで本研究では、改良構造体の全体系について適切な評価を行い、且つ現状の技術を応用する程度の簡易性を有する評価法の確立について検討を試みた。特に本研究では、一軸圧縮試験が行えるかどうかの境界線近傍にあるようなボーリングコアについても、改良効果の評価対象に取り入れ、それを踏まえて改良構造体の全体系での改良状況の評価方法および強度推定方法の提案を行った。

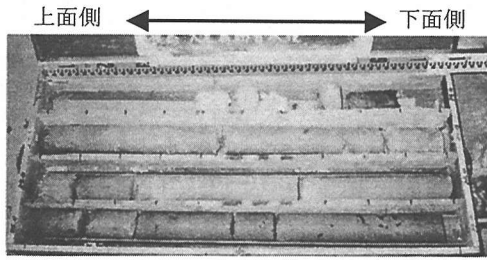
2. 改良効果の評価手法の提案

(1) 改良効果評価の現状

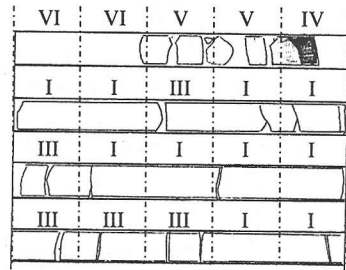
a) 一軸圧縮強さによる評価法

はじめに述べたように、JG工法における改良効果の評価法は、基本的にボーリングコアによる一軸圧縮試験に基づき行われている。この場合、必然的に一軸圧縮試験ができるような比較的良好な改良状況を示すコアが選択され、試験に供することとなる。しかしながら、この一軸圧縮強さは改良体全体系からすれば局部的なものの代表値であり、改良体全体の代表値と必ずしも一致するものではないといえる。

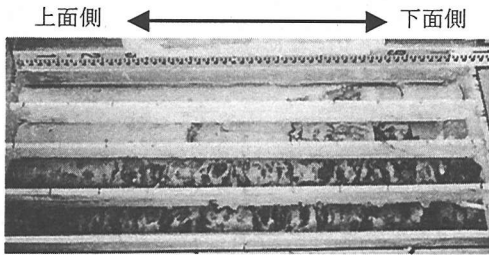
さらに、同工法の施工においては、地盤条件の不均一性に基づく改良体自身の形成状況などの変動も



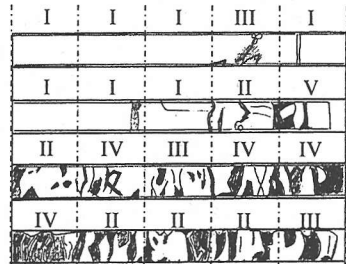
a) 改良良好(手前)と未採取コア(奥)



a) 左写真コアのスケッチ



b) 土塊が多く含まれるもの(手前)と改良良好(奥)



b) 左写真コアのスケッチ

写真-1 JG改良状況事例

図-1 改良状況スケッチ

著しく、大きなばらつきを示す改良体強度を考慮に
いれて、定量的評価を行う必要性がある。

b) 一軸圧縮強さ以外の評価法

一軸圧縮強さによる評価法以外では、RQD(Rock
Quality Designation)法を用いた事例⁴⁾が挙げられる。
RQD法は、元々岩盤の健全度評価に導入された指標
であり、採取されたコア1m中における10cm以上のコ
ア累計長を示すものである。したがって基本的には
コアの連続性をその評価の尺度としており、改良体
の耐荷力等の評価を目的とした指標に転用すること
は必ずしも適切でないものと考えられる。

(2) 提案する評価法の考え方

構造物の基礎、シールドの発進・到達防護工、立
坑の底版改良などに多用されるJG工法では、多くの
場合、外的に作用する上部工荷重や土圧・水圧等に
対する強度の比をもって安全性が評価される。

ここで一軸圧縮試験による局所的な評価に比べ、
RQD法のような評価法が、改良状況をひとつの尺度
をもって連続的且つ客観的に定量化でき、改良構造
体全体を対象とする場合には適切なものと考えら
れる。一方、RQD法の基幹となる考え方は、コア中
のクラックの介在量が評価尺度となっているが、実
際にはJG改良体内部に局所的にクラックが介在して
も、ある程度外荷重に抗することが可能と推察され
る。RQD法では、コア単体の荷重伝達性能の評価よ
りもその連続性が重用視されることから、全体系を

対象とする考え方は適当であるものの、地盤改良効
果の評価に用いるには修正が必要と考えられる。

そこで本研究では、JG改良体の耐荷力推定を前提
に改良状況をできる限り定量的に評価できるよう、
「コア改良率」という概念を導入し、JG工法による
改良状況の評価を試みた。この「コア改良率」(単
位：%)の定義は式(1)に示されるものであり、基本
的にはRQD法に準ずるものである。両者の相違は、
10cm以上のコアを対象とするRQD法に比べ、「コア
改良率」による評価では、改良が良好と評価でき
るコア(改良コア)の総延長を取り扱うことにある。
ここに、改良コアを判別・良否判定する際において、
ある一定の尺度となる評価(多くの場合、技術者の目
視評価)が必要とされる。

$$\text{コア改良率 } C_i = \frac{\text{改良良好コアの総延長}}{\text{コアの採取長}} \times 100 \quad (1)$$

判定基準を設けた上で、技術者による目視判定・
評価を行う方法は、山岳トンネル施工時における切
羽観察^{5)~7)}、あるいは震災を受けた橋脚の被害状況判
定⁸⁾など、いくつかの事例が見受けられる。JG工法に
よる改良状況を一定の尺度をもって目視観察から評
価することは、従来の一軸圧縮試験に依存していた
評価法に比べ、評価の簡易性および客観性に優れる
ものと期待できる。

表-1 JG改良状況の評価分類

ランク		I		II		III	IV		V	VI	
改良体の評価		改良良好									
コアの図	砂質土				----				----		
	粘性土			----		----		----			
目視状況	完全な形で採取。コアは固い。	完全な形で採取。コアは固い。クラックが入る。	改良体中に砂が混じる。	改良体中に粘土を取り込む。コアの形は完全。	角のない改良体が数cmの集合体で採取。	改良体が小さな単体でレキ状になる。	粘土塊に改良体を含む。	コア採取が出来ず、塊がわずかに採取。	採取出来ない。	採取出来ない。	
地中での改良体の想定	完全に置換された改良体。力の伝達のほか、引張にも抵抗がある。		砂・粘土が混ざるが、それらが水平・鉛直方向に連続せず、力の伝達が可能。			コアとして採取出来ない。広がりによって、力の伝達が不連続となる。					

(3) ボーリングコアの採取状況

JG工法におけるコア改良率の評価基準を設けるにあたり、本研究ではこれまでの施工実績に基づいてボーリングコアの採取状況を調査した。

写真-1に採取されたボーリングコアのうち、地盤改良が良好に行われているものから、土塊を多く含むもの、さらにはコアとして採取できなかったものの典型的な事例を示すとともに、図-1にはそれらのスケッチを示す。なお、ここで示す結果は、後述する事例C)におけるボーリングコアであり、砂質土と粘性土が混在する地盤である。また、図-1に示すI~VIは後述する改良状況評価の基準(ランクI~VI)に対応するものである。

(4) コア改良率による評価基準

前項の調査結果を踏まえ、「コア改良率」の評価を行うにあたり、改良状況の指標として表-1に示すような6段階の分類を行った。ここで、改良状況の評価基準I~VIの分類について以下に詳述する。なお、ランク分けを行うコアにおいて、一軸圧縮試験を想定したことから、基準長を20cmに設定した。

a) ランクI

ランクIは、最も良好な改良体であり、局所的にも土砂や粘土塊などの不純物がなく、コア表面が一樣になったものである。コアが20cm以上連続し十分な硬度を有するもの、または20cm未満でも切断面の連続性が認められ、適度な強度が得られるものである。

b) ランクII

改良する地盤条件によって異なるが、コアの出来形は円筒状で比較的良好なものを分類する。コア表面には少量の土砂や粘土塊が混入するものの、改良体全体系としては、これらの不純物が連続的に混入していないと判断される。また、コア自身で自立できる程度の硬度ならびに一体性を有し、改良体中で

十分な応力伝達ができるものを表す。

c) ランクIII

改良体のコア塊が不連続的に採取されるもので、コアとしての連続性が得られないものを分類する。しかしながら、採取コアは十分な硬度を有し、コア断面の角落ちを除けば、ほぼ円筒状を呈するものである。これらの角落ち部などは、コア採取中の削孔水により流され、あるいは脱落した可能性が高く、土砂などを補充すれば20cm程度の自立可能なコアとして成形されるものである。すなわち、コア塊だけでは20cm程度の供試体高を要する圧縮試験に供することができないものの、改良体全体系ではある程度の応力伝達が期待できるような改良状況を分類するものである。

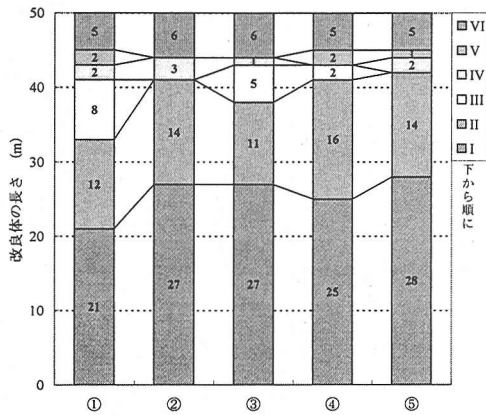
d) ランクIV

ランクII同様に、地盤条件に応じて異なるものであるが、基本的にコア中に土砂および粘土塊が占める割合が高く、改良体としての十分な応力伝達が期待できないものを分類する。当然のことながら、これらのコアは改良体として不連続であり、試験体として成形できないものである。

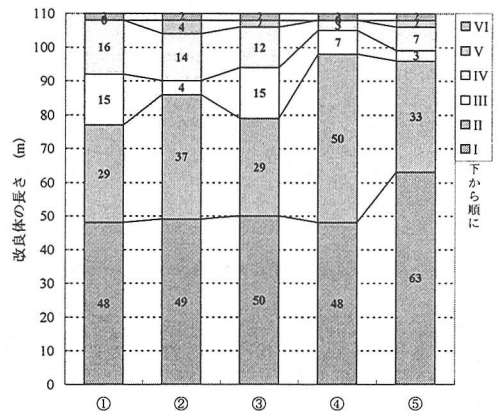
e) ランクVおよびランクVI

コア採取が事実上ほとんど不可能なものであり、採取される改良体はわずかなコア塊(ランクV)、あるいは全く採取できないようなもの(ランクVI)を分類する。このような改良状況では、ほとんど応力伝達ができないものと推察される。

ここで、問題となるのは「改良の良否」を決めるランクの境界線である。ランクIIIに分類される改良体のコアは一軸圧縮試験に供することができないまでも、地盤中においてはある程度の応力伝達が期待できるものとするところから、本研究で示す式(1)の「改良されたコア；改良良好」には、ランクI~IIIまでを含めるものと考えた。ランクIV~VIの改良体に



A) 粘性土(改良全長 50m)



B) 砂質土(改良全長 110m)

図-2 JG 改良状況の評価結果例

においては、事実上ほとんど応力伝達ができないことが予想されるため、本研究で提案する改良効果指標においては“改良不十分のコア；改良不良”に分類する。すなわち、本研究における「コア改良率」はランクI～IIIのコア含有率(C_i)の累積値によって決定されることになる。

(5) コア改良率の算出事例

本研究では、JG工法を採用した複数の地盤改良現場において、表-1に示す各ランクのコア累計長を求めた。評価における個人差を少なくするため、同工法の設計および工事に携わる評価員5名(①～⑤)で改良効果の判定を行った。

図-2に改良状況を表す各ランクのコア長を示す。ここで、図-2のA)には粘性土(有明粘土)の地盤条件におけるものでJG工法による改良全長が50mのもの、B)には洪積砂層と土丹の互層から構成される地盤条件におけるものでJG工法による改良全長が110mのものの結果を表している。

A)に示す結果に着目すると、各評価員の評価結果には多少のばらつきが認められるものの、「改良良好」と判断するランクI～IIIの累積長は41～43mと比較的安定した評価結果が得られていることが分かる。また、砂質土条件下におけるB)の結果では、評価員DおよびEが他の3者よりランクI～IIIまでを多く判定しているが、それらの差異も約10m程度と改良全長の10%程度に収まるものであった。

ここで、図-2に示した評価結果を含む4施工現場における改良効果の評価結果を表-2に示す。同表のA)およびB)はそれぞれ図-2に対応するものであり、各評価員の評価結果の平均値を用いることで「コア改良率」を求めている。また、事例C)はトンネル工

表-2 提案手法によるコア改良率算定例

上段:コア含有率 下段:良否累計	$C_i = \text{改良コア長} / \text{コア採取長} \quad (\%)$					
	I	II	III	IV	V	VI
A) 粘性土	44	32	10	2	0	12
B) 砂質土	45	28	10	17	0	0
C) 砂・粘土混合	36	22	18	12	7	5
D) 砂質土	45	11	22	20	0	2

※ A)およびB)は図-2に対応し、各平均値を採用
大数字→提案する「コア改良率」

事に伴う地盤陥没事故の復旧工事におけるものであり、砂質土と粘性土が混在する地盤条件である。事例D)はB)同様に砂質土条件下におけるものである。

表-2に示す結果より、各施工現場の「コア改良率」は76～86%の範囲にあり、比較的良好な改良効果が得られているものと推察される。しかしながら、改良良好と判断するもののその効果の不確定性を含むランクIIIに分類されたコアは、10～20%強に達するため、これらの評価によっては「コア改良率」に基づく改良効果の評価結果に影響が生じるものである。また、本研究で示した結果の範囲内では、砂質土層および粘土質層間にコア改良効果に関する有意な差異は認められないが、これはごく限られた試験条件における結果であることに注意が必要である。今後、本研究で提案した評価基準および評価方法をもって多くの施工現場に適用し、施工初期段階から設計・施工上の要求品質を確認することで、「コア改良率」による評価の妥当性を検証していく必要があると考えられる。

表-3 提案手法によるコア改良率算定例

事例	設計基準強度 C_i I, II	一軸圧縮強さ \bar{q}_u N/mm ²		C_i III	(推定)一軸圧縮強さ \bar{q}_u N/mm ²	一軸圧縮強さ \bar{q}_u		全体 強度評価 \bar{q}_u N/mm ²	設計基準強度に対する評価
		Max: 5.29 AV: 2.76	Min: 0.90			IV, V, VI	強度評価		
A)	1.00 N/mm ²	44+32 76%	Max: 5.29 Min: 0.90 AV: 2.76	10%	2.76×0.5 1.38	2+0+12 14%	≒ 0	0.76×2.76+0.10×1.38 2.24	1.00 < 2.24 満足
B)	3.00 N/mm ²	45+28 73%	Max: ---- Min: ---- AV: 4.05	10%	4.05×0.5 2.03	17+0+0 17%	≒ 0	0.73×4.05+0.10×2.03 3.16	3.00 < 3.16 満足
C)	4.10 N/mm ²	36+22 58%	Max: ---- Min: ---- AV: 6.27	18%	6.27×0.5 3.14	12+7+5 24%	≒ 0	0.58×6.27+0.18×3.14 4.20	4.10 < 4.20 満足
D)	3.00 N/mm ²	45+11 56%	Max: 7.89 Min: 3.27 AV: 4.22	22%	4.22×0.5 2.11	20+0+2 22%	≒ 0	0.56×4.22+0.22×2.11 2.83	3.00 > 2.83 不満足

3. コア改良率の利用例(強度推定法)

(1) 強度推定法の考え方

JG工法による改良体を構造体として捉えた場合、その破壊パターンは概ね圧縮破壊・せん断破壊・曲げ破壊に大別される。ここで、これらの改良体は、部分的に土砂・粘土塊が混入し不均質な材料構成、およびそれに依存した強度性状を示すため、曲げ破壊の場合、作用引張力に対して改良体の断面算定・照査には適さないものといえる。しかしながら、圧縮破壊やせん断破壊に対しては、土塊などの未改良部が部分的に存在しても影響を受けにくいと推察されるため、受圧面積によってその抵抗力を照査できるものと考えられる。すなわち、平均的にでも受圧面積を定量的に推定できるならば、一軸圧縮試験より確認される強度と改良部の占める面積比率をもって構造全体系の強度を推定・評価できるものと考えられる。

一般に地盤改良においては、設計強度の基礎データは一軸圧縮強さであることから、同試験に供することのできないランクIII～VIの影響を加味して評価する必要があると考えられる。ここで、ランクI～IIについては一軸圧縮試験が可能なため特に問題とはならない。また、ランクIV～VIについては、改良体中では若干の応力伝達は可能と考えられるが、その改良状況を鑑みて強度はないものとみなすべきであろう。

ここで強度推定に注意が必要なものは、ランクIIIに分類される改良体の取扱いと思われる。ここに分類される改良体は、テストピースとして成型は困難なものであるが、改良体中においてはある程度応力を伝達し機能を満たすことができると推定されるものである。そこで本研究においては、ランクIIIの改良体強度を推定するにあたり、ランクI～IIに分類されるコアの平均圧縮強さに対し、一定の低減係数 α

を乗じることで決定した。先述のようにランクIV～VIでは圧縮強さを0と仮定したことから、全体系の平均圧縮強さ(推定値) \bar{q}_u は、次式のように定義される。

$$\bar{q}_u = C_{i-ii} \times \bar{q}_{u-i-ii} + \alpha \times C_{i-iii} \times \bar{q}_{u-i-iii} \quad (2)$$

但し、 C_i および \bar{q}_u はそれぞれコア含有率、一軸圧縮強さを表し、続く下添字は各ランクを意味する。

(2) 改良体の強度評価

上記の強度評価の考え方に基づいて、JG工法による改良体の強度推定を試みた。先述した施工事例A)～D)における強度評価結果をまとめて表-3に示す。同表には、各工事における設計基準強度を併記するほか、ランクI～VIまでの含有率 C_i を示している。なお、実際に一軸圧縮試験ができるランクは、IおよびIIのみであり、両者はこれまで特に分類することなく同試験が実施されてきたことから、本研究においても両ランクの平均値をもって、強度評価に取り入れた。それぞれの含有率と平均圧縮強さに応じて、強度推定を行う方法も考えられ、この方法の妥当性については今後の検討課題に挙げられよう。本研究においては、できるだけ簡便な指標となすべく両ランクの累積比率と平均圧縮強さをもって、強度評価を行った結果を示す。

先述したようにランクIV～VIは、事実上応力負担が期待できないものを分類するため、強度評価の対象には取り入れていない。全体系における圧縮強さの推定を左右するランクIIIの強度は、ランクI～IIの圧縮強さよりも低いと予想されるが、その定量的な評価が困難なことから、式(2)に示すように低減係数 α を乗じることで重みづけを行った。低減係数の設定に際しては、今後のデータ蓄積が必要不可欠であるが、本報においては、JG工法の設計で一般に採用されている安全率1.5～2.0を参考に、低減係数 $\alpha=0.5$ として表-3に示す試算を行った。

従来の圧縮強さに依存した改良状況の評価では、試験のできるコアとして得られるものが少なくとも、その強度が設計基準強度を満足すれば、ほぼ改良状況は良好と判断されてきたが、本研究において示すように、各ランクのコアの含有率と平均圧縮強さをもって評価することで、改良全体系についてより現実の改良状況を反映できる評価が行えるものと考えられる。また、改良体を平面・断面位置でブロック分けして評価することにより、改良体部位ごとの改良状況評価および圧縮強さ推定が可能となる。

表-3において示した結果のうち、事例D)では、従来の圧縮強さによる評価ではランクI~IIの平均値が 4.22N/mm^2 と設計基準強度を十分満たしていたものが、重みづけを行ったランクIIIの(推定)圧縮強さも含めることで、設計基準強度を下回ったことは、これらの強度評価手法の相違にほかならない。

本研究で示した強度評価法は、これから多くの検討・議論を重ねていく必要があると考えられるが、現状の評価法に比べて、より適切に改良状況を反映できる手法のひとつと思われる。

4. あとがき

本研究は、JG 工法による改良構造体を適切に評価する手法の確立について検討を試みたものである。特に本研究では、一軸圧縮試験ができないボーリングコアについても、改良効果の評価対象に取り入れ、改良構造体の全体系での改良状況および強度推定方法について検討を試みたものである。

本研究において提案した評価基準を用いることで、改良状況を一定の尺度をもって目視観察から評

価でき、かつ「コア改良率」という定量的な指標をもって改良効果全体系を評価できるため、従来の一軸強さ試験に依存していた評価法に比べ、評価の簡易性および客観性に優れるものと考えられる。

さらに、改良体全体系における強度評価の手法として、これまで一軸圧縮試験はできずとも、ある程度応力負担が可能と考えられてきた改良体においても、その強度評価法に取り入れる考え方を示した。この強度評価手法に関しては、その評価法の妥当性について今後の評価実績の拡充が待たれるところである。

参考文献

- 1) 寺師昌明：土質工学 40 年の歩み-地盤改良-, 土と基礎, Vol.29, No.5, pp.74~77, 1989.12.
- 2) 柴崎光弘：高圧噴射注入工, 土と基礎, Vol.15, No.2, pp.29~36, 1981.5.
- 3) 柴崎光弘：ジェットグラウト工法とその施工, 土木施工, Vol.26, No.14, pp.180~185, 1985.11.
- 4) Boston Artery Tunnel Specification : JET GROUTING, Addendum, No.6, pp.1~16, 1996.7.
- 5) 鈴木昌次, 古川浩平, 井上洋司, 中川浩二：アンケートに基づくトンネル施工時の岩盤分類に関する研究, 土木学会論文集, No.435/VI-15, pp.51~60, 1991.9.
- 6) 中田雅博, 三谷浩二, 八木 弘, 西 琢郎, 西村和夫, 中川浩二：切羽観察の分析に基づく新しい切羽評価システムの提案, 土木学会論文集, No.623/VI-43, pp.131~141, 1999.6.
- 7) 赤木 渉, 佐野 理, 進士正人, 西 琢郎, 中川浩二：山岳トンネル施工支援のための切羽評価法の適用性に関する研究, 土木学会論文集, No.686/VI-52, pp.121~134, 2001.9.
- 8) (社)日本道路協会：道路耐震対策便覧(震災復旧編), pp.73~79, 1988.2.

(2002.9.17 受付)

PROPOSE OF THE EVALUATION METHOD FOR GROUND IMPROVEMENT BY JET GROUTING

Takashi MITSUI, Akihiko IKEDA, Tadashi YOSHIKAWA,
Isamu YOSHITAKE and Koji NAKAGAWA

In the evaluation of ground improvement by jet grouting, the compressive strength test is generally employed by means of the boring core specimen, which can be obtained as a test cylinder. However, the ground improvement without such improve condition is estimated to be able to support a certain extent of load. The purpose of this study is to establish the evaluating criterion of condition of jet grouting, and to propose the evaluation method for ground improvement. Furthermore, the present study discusses the estimation method for strength of whole improvement of ground.