

(52) 地下大空洞における多層吹付けコンクリートの強度特性に関する一実験

清水建設株式会社 正会員 ○ 河 井 徹
 同 上 同 上 蔵 田 忠 廣
 同 上 同 上 竹 林 垂 夫
 同 上 同 上 岡 田 武 二

1. はじめに

地下発電所、地下備蓄等の地下大空洞の建設は、NATMの概念に基づき、大空間を吹付けコンクリートで永久的に支保することが考えられる。吹付けコンクリートを支保材として使用する場合、1回の吹付け作業で所定のコンクリート厚を確保するのは困難なため、数回にわたって吹付けを行なうことになる。つまり、吹付けコンクリートは打継目を有する多層構造となる。

今後、このような地下大空洞の建設に対して適切な設計および施工を行なうためには、多層吹付けコンクリートの強度特性を把握することが必要であり、また、品質、コスト、工期および安全の面からも重要である。

本文は、多層吹付けコンクリートを地下大空洞に適用するために行なった基本的な実験のうち主に圧縮強度試験結果とその考察について述べるものである。

2. 実験概要

2.1 実験目的

本実験の主な目的は、以下の項目を明らかにすることである。

- ① 打継材令（1～28日）、打継層数（1～4層）が吹付けコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響
- ② 吹付けコンクリートの薄肉化を目的とした高強度吹付けコンクリートの適用

2.2 吹付け方式とコンクリートの配合

吹付け方式は、湿式、乾式の両者の特性比較を行なった結果、吐出能力に優れ、品質のばらつきが少なく、大空洞の施工に適していると考えられる湿式方式とした。一般に湿式方式に使用されているコンクリート配合の単位セメント量は $C = 350 \sim 380 \text{ kg/m}^3$ である。そこで、コンクリートの配合は、標準的な配合として $C = 380 \text{ kg/m}^3$ のN配合、および吹付けコンクリートの高強度化を目的とした $C = 500 \text{ kg/m}^3$ のH配合の2種類とした。示方配合を表-1に示す。粗骨材の最大寸法、スランプの範囲、水セメント比、細骨材率は、湿式吹付けコンクリートの特徴を考慮して、試験練りにより決定した。H配合にはナフタリンスルホン酸塩系の高性能減水剤を使用した。急結剤は、アルミン酸塩系の液体急結剤を使用した。なお、吹付け直前にスランプ試験を実施し、スランプが目標値以下の場合には、ナフタリンスルホン酸塩系の流動化剤を添加して、スランプを調整した。

表-1 示 方 配 合

配 合	粗骨材 最大寸法 Gmax (mm)	スランプ (cm)	水セメント比		単位量 (kg/m ³)						減水率	
			W/C (%)	s/n (%)	水	セメント	粗骨材	配合材	高強度	急結剤	CX(%)	CK(%)
N配合	10	11±1	51	65	195	380	1,247	871	—	—	—	0.0
H配合	10	11±1	35	60	175	500	1,131	612	1.4	—	—	4.5

2.3 実験方法

実験の要因と水準を表-2に示す。打継材令、打継層数は極力実施工に近い状態を想定して決定した。吹付け厚は、1層供試体では16cm、多層供試体では1層の吹付け厚を8cmとした。供試体は打継目の影響を充分反映するよう立方体とした。図-1に1層～4層の供試体の形状寸法を示す。なお、供試体形状による強度比較を行なうため、1層の円柱供試体も一部使用した。また、供試体の寸法効

表-2 要因と水準

要 因	水 準
打 継 目 の 材 令	1日、3日、7日、28日
打 継 目 金 網 の 有 無	有 無
吹 付 け コ ン ク リ ー ト の 層 数	1層（打継目無）、 2～4層
吹 付 け コ ン ク リ ー ト の 配 合	N配合（普通） H配合（高強度）

果が圧縮強度に与える影響を把握するため、1辺が16、24、32cmの1層供試体も作製した。打継目の金網は $\phi 3.2 \times 75 \times 75\text{mm}$ とした。

供試体は、吹付け機アリバー280を用い、トンネル坑内に設置した供試体作製用パネルに吹付けて作製した。その後約3週間トンネル坑内で養生した後、カッターおよびコアドリルにより所定寸法に切りとり、その後は試験材令まで標準水中養生した。

多層供試体の実験の組み合わせを表-3に示す。圧縮強度試験の材令は、最終層の吹付け後28日とした。この場合、各層の強度を確認する目的で、各層の吹付け時に1層供試体も作製した。供試体数は、1回の試験につき4個とした。載荷方向は、実構造物の荷重方向と同一とするため、図-1に示すように、吹付け方向に直角とした。打継目近傍にはゲージを貼り、載荷時の挙動を調べた。

3. 実験結果と考察

3.1 供試体の形状・寸法が圧縮強度に与える影響

1回の吹付け作業で作製したパネルから切り取った1辺の長さが16、24、32cmの立方体供試体の圧縮強度試験結果を表-4に示す。供試体の寸法によらず、圧縮強度はほぼ同一値を示しており、1辺の長さが16~32cmの立方体供試体の圧縮強度では、寸法効果は認められないことが判る。

$\phi 10 \times h 20\text{cm}$ の円柱供試体と1辺の長さが16cmの立方体供試体の圧縮強度の比較を表-5に示す。円柱供試体の立方体供試体に対する圧縮強度の比 r は、平均 $r = 0.835$ であった。この値は一般のコンクリートでは $0.75 \sim 0.87^{1)2)}$ であるから、妥当な値であると言える。

3.2 吹付けられたコンクリートと標準供試体の強度比較

生コン車から採取したコンクリートの材令28日における標準供試体の圧縮強度試験結果および、その結果からJISA5308「レデミクストコンクリート」の規定に準じて算出したそのコンクリートの呼び強度を表-6に示す。NおよびH配合の呼び強度は、それぞれ $SL = 300 \text{ kg/cm}^2$ 、および 540 kg/cm^2 となる。

1層で吹付けたパネルから切り取った1辺16cmの立方体供試体の圧縮強度試験結果および、その結果に3.1で求めた供試体形状による強度比 r を考慮して、そのばらつきから土木学会RC示方書94条「配合強度」の規定に準じて算出したそのコンクリートの

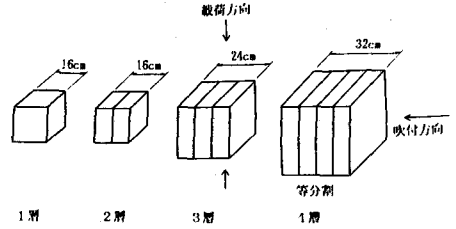


図-1 供試体の形状

表-3 多層供試体の実験の組合せ

層数	打継無	打継材令 (口)			
		1	3	7	28
1	○ ① ●	—	—	—	—
2	—	○ ① ●	○ ① ●	○ ① ●	○ ① ●
3	—	○ ①	—	—	—
4	—	○ ①	—	—	—

○ N 配合金網無し ① N 配合金網有り
● H 配合金網無し

表-5 供試体形状による圧縮強度の相違

No	圧縮強度 (kg/cm ²)		強度比 r	
	円柱 $\phi 10 \times h 20\text{cm}$	立方体 $16 \times 16 \times 16\text{cm}$	円柱 立方体	
1	232	269	0.816	0.835
	233	281		
	198	284		
	255	293		
	319	375		
2	256	350	0.853	
	266	293		
	275	288		

表-6 標準供試体の圧縮強度

配合		N 配合	H 配合
強度結果	n=12 $\bar{x}=329$ $\sqrt{V}=16.1$ CV=4.89 %	kg/cm ² SL = m K	n=5 $\bar{x}=584$ $\sqrt{V}=13.4$ CV=2.29 % kg/cm ² SL = m K
呼び強度の算出	式	SL : 呼び強度 m : 配合強度 K : JIS A5308 生コンの割り増し係数	
		m	584
		K	1.07
SL		300	540

設計基準強度を表-7に示す。NおよびH配合の設計基準強度は、それぞれ $\sigma_{ck}=225 \text{ kg/cm}^2$, 300 kg/cm^2 となる。これらの設計基準強度 σ_{ck} と標準供試体の強度結果から算出した吹付け前のコンクリートの呼び強度SLとの比は、N配合で $225/300=0.75$, H配合で $300/540=0.556$ となる。つまり、このことは、吹付けられたコンクリートは、吹付け前のコンクリートに比較して圧縮強度がかなり低減することを示している。これは、液体急結剤の添加による水セメント比の増加、はね返りによる配合変化、吹付けによる空気量（空けき率）の増加などの影響のためと考えられる。なお、吹付けられたコンクリートの圧縮強度の変動係数は、NおよびH配合でそれぞれ11.2%および10.9%であった。本実験の施工仕様であれば、湿式吹付けコンクリートの圧縮強度の変動は、一般のコンクリートよりやや大きい程度で収まることが判る。

3.3 多層吹付けコンクリートの圧縮強度

多層吹付けコンクリートおよび各層のコンクリートの圧縮強度試験結果を図-2～図-4に示す。多層供試体の試験材令は、最終層吹付け後28日、また各層の試験材令も28日としたが、吹付け層数2層、打継材令28日の供試体の第1層のみは、吹付け後56日として、多層供試体の試験日と同一とした。各層の圧縮強度とは、多層供試体の各層吹付け時に同時に吹付けたパネルから切り取った1辺16cmの立方体供試体の圧縮強度である。

2層供試体の圧縮強度は、打継材令、配合、金網の有無に拘らず、12供試体中11供試体で各層の強度の最少値あるいは最大値を上回っている。つまり、打継材令が1～28日の範囲では、2層吹付けコンクリートの圧縮強度は打継目の影響を受けないと判断できる。また、打継材令が1日の2～4層供試体の圧縮強度は、N配合の場合、金網の有無に拘らず、いずれの供試体も各層の強度の最少値あるいは最大値を上回っている。つまり、打継材令が1日で打継層数が4層以下の吹付けコンクリートの圧縮強度は、打継目の影響を受けないと判断できる。なお、N配合で金網の有無による差は、金網無しの方が約1割大きい値を示しているが、各層ごとの強度を考慮すると差は無いと考えてよい。

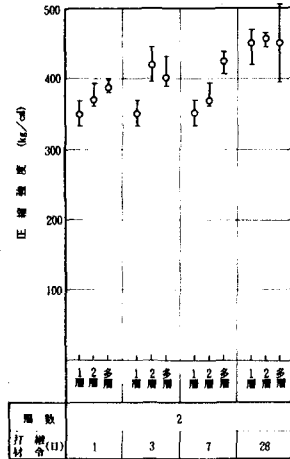


図-4 各層と多層供試体の圧縮強度 (H配合 金網無し)

表-7 1層供試体の圧縮強度

配合	N 配合	H 配合
強度結果	$n=12$ $\bar{x}=307 \text{ kg/cm}^2$ $\sqrt{V}=34.5$ $CV=11.2 \%$	$n=5$ $\bar{x}=394 \text{ kg/cm}^2$ $\sqrt{V}=43.0$ $CV=10.9 \%$
設計基準強度	$\sigma_{ck} = \frac{\sigma_r}{K}$	$\sigma_{ck} = \frac{\sigma_r}{K}$
σ_r	256	329
K	1.08	1.08
σ_{ck}	225	300
σ_{ck}/SL	0.750	0.556

r: 円柱供試体と立方体供試体との強度比 0.835

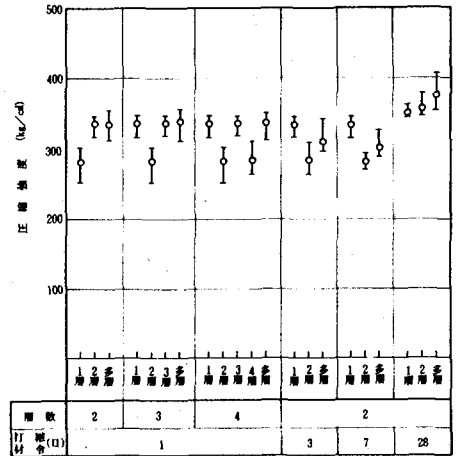


図-2 各層と多層供試体の圧縮強度 (N配合 金網無し)

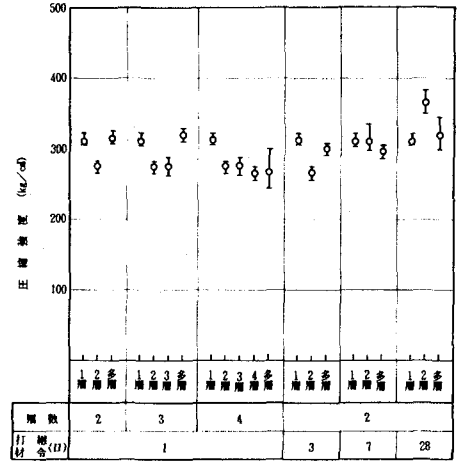


図-3 各層と多層供試体の圧縮強度 (N配合 金網有り)

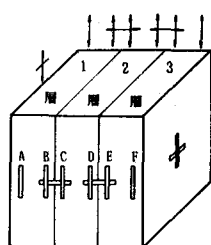


図-5 ひずみゲージの貼付状況

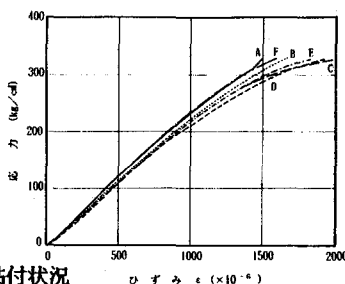


図-6 応力～ひずみ曲線の一例

図-5に示すように多層供試体にゲージを貼って求めた応力～ひずみ曲

線の1例を図-6に示す。打継目をはさんだ位置のひずみの測定値には大きな差異が認められず、破壊性状も1層供試体と同様であった。また、この傾向は金網の有無にも影響されない。

以上、本実験における試験条件下では、多層吹付けコンクリートの打継目が圧縮強度に与える影響はほとんど認められていない。これは、トンネル坑内の養生条件が温度18.2℃、湿度91.8%と良好であったため、吹付け面の1～2cmの凸凹が打継目の一体性に大きく寄与しているためと考えられる。

多層供試体の圧縮強度と静弾性係数 (E_t) との関係を図-7に示す。この弾性係数は圧縮強度の等しい一般のコンクリートの弾性係数より2～3割低い。この理由は、吹付けコンクリートでは粗骨材寸法が小さいこと、および、空気量 (空げき率) が多少大きくなることのためと考えられる。なお、コンクリートの練りませ時の空気量と供試体の単位容積重量から算定した空気量 (空げき率) の増加量は、N配合で5～7%、H配合で2～4%であった。

4. 結論

- (1) 打継材令1～28日、打継層数1～4層の多層吹付け供試体の圧縮強度特性は1層供試体のそれと同様とみなせる。
- (2) 標準供試体と比較して、材令28日における吹付けコンクリートの圧縮強度は、25～44%低減する。しかし、 $w/c = 51\%$ および $w/c = 35\%$ の配合の設計基準強度は、それぞれ $\sigma_{ck} = 225 \text{ kg/cm}^2$ および $\sigma_{ck} = 300 \text{ kg/cm}^2$ が得られる。
- (3) 吹付けコンクリートの静弾性係数は、一般のコンクリートに比較して小さい。

5. あとがき

本実験では、地下大空洞構造物に、多層吹付けコンクリートを永久支保材として適用することを目的として、その基本特性である圧縮強度に関して検討した。その結果、打継目が圧縮強度に与える影響は無視できることが判明するとともに、設計基準強度が $\sigma_{ck} = 300 \text{ kg/cm}^2$ 以上の吹付けコンクリートが得られることも判り、層数・層厚の低減の可能性も示された。なお、多層吹付けコンクリートを永久支保材として設計に取り入れるためには、乾燥収縮、圧縮クリープ性状の他、打継目が曲げ強度、せん断強度などに与える影響を十分把握することが必要であるため、それらの項目について現在研究中である。

参考文献

- 1) H.F. Gonneman: Effect of Size and Shape of Test Specimen on Compressive Strength of Concrete, Proc. of ASTM, (1925)
- 2) 坂, 松井: 表面硬度法による実施コンクリートの強度判定法, セメント技術年報IX (昭和30年)

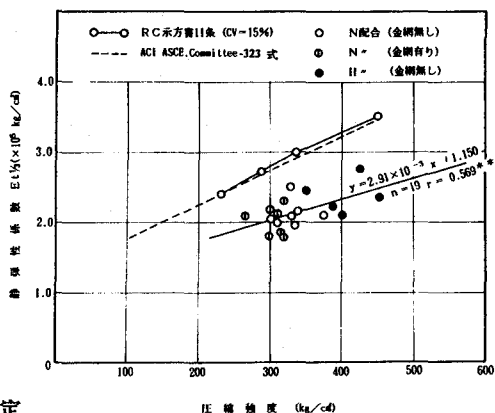


図-7 圧縮強度と静弾性係数との関係

(52) Compressive Strength of Multi-layered Shotcrete
to Support Large Underground Structure

Toru Kawai

Tadahiro Kurata

Tsuguo Takebayashi

Takeji Okada

Shimizu Construction Co., Ltd.

Abstract

It is conceivable that large underground structures could be supported with shotcrete, using the NATM concept. To obtain the required concrete thickness, a jointed, multi-sprayed construction would be needed.

To confirm the feasibility of this approach, experiments were carried out to examine its compressive strength characteristics.

Comparisons were made as to relations of the compressive strengths between standard specimen and concrete sprayed, including size and shape effects. Additionally, the effects on the compressive strength of shotcrete of varying the spraying interval from one to 28 days, the number of layers from one to four, and the mix proportions of the concrete, as well as of including wire netting at the joints, were also investigated.

A compressive strength of 300 kg/cm² was obtained with a "rich" shotcrete mixture, and the compressive strength of shotcrete is 25 to 44 percent lower than that of standard specimen. Multi-layered and single-layered shotcrete showed almost the same compressive strength characteristics, and the effect of using wire-netting at joints was found to be negligible.