論文 コンクリートの窒素ガス引張試験における供試体の破壊メカニズム

宇野 隆浩^{*1}・藤掛 一典^{*2}・Sidney Mindess^{*3}・佐藤 紘志^{*4}

要旨:コンクリートの引張強度を求めるために英国の Building Research Establishment に よって開発された窒素ガス引張試験においては、コンクリート供試体の破壊メカニズムが十 分に理解されているとはいい難い。そこで本研究では、窒素ガス引張試験法におけるコンク リート供試体の破壊メカニズムを考察するための基礎的データを得ることを目的として、形 状の異なる2種類の供試体(通常の円柱供試体と中空円柱供試体)を用いて窒素ガス引張試験 を行った。その結果、形状の異なる2種類の供試体の破壊時における作用ガス圧には優位な 違いはなく、それらの値はほぼコンクリートの引張強度に等しいことが明らかとなった。 キーワード:コンクリート、窒素ガス引張試験、引張強度、破壊メカニズム

1. はじめに

コンクリートの窒素ガス引張試験は、元々英 国の Building Research Establishment によって開 発された¹⁾。この試験では, Fig.1 に示すように 円柱供試体(直径 100mm 高さ 200mm)を両端が開 放された鋼製円筒型の載荷装置に設置して行い, 両端にはガスの漏出防止のために鋼製エンドリ ング(内径 103mm)とゴム製 O リングを配置して いる。圧力媒体として窒素ガスを用い、この窒 素ガス圧をゴムスリーブなどを介さずにコンク リート円柱供試体の側面に直接加える。窒素ガ ス圧を次第に増加させていくと供試体の軸方向 に直交するひび割れ面が形成される。またその 時の窒素ガス圧力は,ほぼコンクリートの引張 強度に等しいことが実験的に確認されている¹⁻³⁾。 この窒素ガス引張試験法は、既往の強度試験法 と比較して、試験装置自体が簡易で経済的であ ること、通常の強度試験で必要となる供試体の 端面処理が不要であるなど多くの利点を有して いる。

窒素ガス引張試験におけるコンクリート供試 体の破壊挙動については、いくつかの疑問点が 指摘される。例えば、供試体の両端は開放され ているにもかかわらず、何故供試体はあたかも 軸方向に引張荷重が作用したかのような破壊を 呈するのか。また、何故破壊時の窒素ガス圧力 がコンクリートの引張強度に等しくなるのか。 窒素ガス引張試験では, Fig.1 に示すように円柱 供試体は軸対称圧縮応力状態、すなわち、等二 軸圧縮応力状態にある。一般にコンクリートの 等二軸圧縮強度は、一軸圧縮強度より約 16%程 度大きくなることが知られている $^{4)}$ 。Clayton と Grimer は、コンクリート中に含まれる細孔の間 隙圧が窒素ガス圧力を受ける供試体の破壊に関 して重要な役割を果たしていると考察している。 しかしながら、この試験におけるコンクリート 供試体の破壊メカニズムは完全に解明されてい るとはいい難い。

この窒素ガス引張試験法の普及を図るために は、まずその破壊メカニズムを明らかにするこ とが重要であると考える。そこで本研究では、 窒素ガス引張試験法におけるコンクリート供試 体の破壊メカニズムを考察するための基礎的デ ータを得ることを目的として、形状の異なる 2

- *1 防衛大学校 システム工学群建設環境工学科研究科学生 (正会員)
- *2 防衛大学校 システム工学群建設環境工学科助教授 工博 (正会員)
- *3 University of British Columbia Department of Civil Engineering Professor Ph.D (非会員)
- *4 防衛大学校 システム工学群建設環境工学科教授 工博 (非会員)



Fig.1 Nitrogen gas tension test



Fig.2 Solid and hollow cylinders

種類の供試体(円柱供試体と中空円柱供試体)を 用いて窒素ガス引張試験を行った。なお、これ ら2種類の供試体は一定側圧の作用下で完全に 異なった応力状態を示すことから、窒素ガス引 張試験における供試体内部の応力状態の違いが 供試体破壊時の窒素ガス圧力にどのような影響 を及ぼすのか調べることは破壊メカニズムを解 明する上で一助となると考えた。



Fig.3 Stress state in hollow cylinder

2. 試験の概要

2.1 円柱供試体と中空円柱供試体の弾性応答

Fig.2 に示すように本試験では,直径 100mm 高さ 200mm の通常の円柱供試体と外径 100mm で壁厚 20mm,高さ 200mm の中空円柱供試体を 用いた。窒素ガス引張試験を実施する前に,円 柱供試体と中空円柱供試体の応力状態について 検討した。弾性理論によれば,**Fig.3** に示される ように中心から半径*r*の任意の点における応力



Fig.4 Calculated stress states

Designation	Cement	Silica fume	Sand	Coarse aggregate	Water
Mix-A	382	0	858	858	218
Mix-B	453	44	796	1052	139

Table 1 Mix proportions (kg/m³)

状態は次式により与えられる⁵⁾。

$$\sigma_r = \frac{p_0 R_0^2 (r^2 - R_1^2)}{r^2 (R_1^2 - R_1^2)} \tag{1}$$

$$\sigma_{t} = \frac{p_{0}R_{0}^{2}(r^{2} + R_{1}^{2})}{r^{2}(R_{0}^{2} - R_{1}^{2})}$$
(2)

ここで, σ_r :半径方向応力, σ_i :接線方向応力, R_0 :外径, R_1 :内径である。

一定側圧 p_0 が作用した場合における円柱供試体と中空円柱供試体のそれぞれの応力状態について,式(1)と(2)によって計算した結果を, Fig.4 に示す。この結果から,円柱供試体と中空円柱供試体では,明らかに異なる応力状態にあることがわかる。中空円柱供試体内における応力は半径rの関数となっているのに対し,円柱供試体内の応力は位置によらず一定である($\sigma_t = \sigma_r = p_0$)。中空円柱供試体では,半径方

向応力(σ_r)は内壁面の位置(r=30mm)で0であり, 外壁面のところ(r=50mm)で p_0 になっている。ま た,任意の点における接線方向応力(σ_r)は p_0 よ りはるかに大きいことがわかる。

2.2 供試体と試験手順

本研究では、Table 1 に示すように Mix-A 及び Mix-B の 2 種類のコンクリートを使用した。材 料には、Type10 ポルトランドセメント(ASTM Type I)、シリカフューム、最大寸法 10mm の粗 骨材(砕石)ならびに川砂を使用した。Mix-B に関 しては高性能 AE 減水剤を使用した。2 種類のコ ンクリートを使って、それぞれ 16 個の円柱供試 体と 6 個の中空円柱供試体を作製した。試験時 における Mix-A と Mix-B の圧縮強度は、それぞ れ 51.8MPa と 92.0MPa であった。窒素ガス引張 試験における、加圧力速度は 0.01MPa/sec とした。 また、窒素ガス引張試験で求まるガス引張強度 と比較するために割裂強度試験を行った。



1) Mix-A



2) Mix-B

Fig.5 Fractured specimens



1) Solid specimen



2) Hollow specimen

Fig.6 Fracture plane in Mix-A



1) Solid specimen



2) Hollow specimen

Fig.7 Fracture plane in Mix-B

3. 試験結果及び考察

3.1 供試体の破壊状況

すべての供試体において,窒素ガス圧力があ る値に達すると一瞬の間に爆裂的に供試体の軸 方向に直交するひび割れ(Fig.5)が形成された。破 壊状況については,円柱供試体と中空円柱供試 体において違いは全くなかった。Mix-A および Mix-B シリーズの供試体の破壊面の状況を, Fig.6 ならびに Fig.7 に示す。圧縮強度 51.8MPa を有する Mix-A シリーズでは骨材とモルタル間 の付着破壊が顕著であるのに対し, 圧縮強度 92.0MPa を有する Mix-B シリーズでは粗骨材自

	T (Ulti	nate strength (MPa)		
Specimen designation	lest no.	Measured value	Mean value	Standard deviation	
	1	3.85			
	2	3.72		0.275	
Solid manimum	3	4.10	4.04		
Solid specifien	4	4.02	4.04		
	5	4.53			
	6	4.04			
Hollow specimen	1	4.47		0.270	
	2	4.48			
	3	3.65	4 11		
	4	4.06	4.11	0.579	
	5	4.33			
	6	3.67			

Table 2 Nitrogen gas tension test results for Mix-A

 Table 3 Nitrogen gas tension test results for Mix-B

Spacimon designation	Test no	Ultimate strength (MPa)		a)	
specifien designation	Test no.	Measured value	Mean value	Standard deviation	
	1	5.22			
	2	4.82		0.251	
Solid anagiman	3	5.79	5 21		
Sond specimen	4	5.43	5.21	0.551	
	5	4.98			
	6	5.05	-		
	1	5.84		0.220	
	2	5.23			
Hollow specimen	3	5.86	5 74		
	4	6.24	5.74	0.339	
	5	5.54			
	6	5.72			

体の破壊が顕著にみられた。一般的に, コンク リートの引張ひび割れは, 普通強度コンクリー トの場合には粗骨材の周りに沿って進展する傾 向があるのに対し, 高強度コンクリートにおい ては粗骨材を貫通して進展することが知られて いる⁶⁾。したがって,本試験で供試体に形成され た破壊面の状況は破壊面に引張応力が作用した ことを裏付けるものと考えることができる。

3.2 窒素ガス引張試験における終局強度

Table 2~5 は窒素ガス引張試験で得られた終局強 度(供試体破壊時の窒素ガス圧力を意味する)の 結果と Mix-A と Mix-B の割裂試験の結果を示し ている。窒素ガス引張試験による円柱供試体と 中空円柱供試体の終局強度は, Table 2 と Table 3 に示すように Mix-A の場合はそれぞれ 4.04MPa と4.11MPa, Mix-Bの場合にはそれぞれ 5.21MPa と5.74MPaであり、両シリーズとも概ね等しい 値となった。したがって、試験結果の統計的な ばらつきを考慮すると、円柱供試体と中空円柱 供試体の終局強度は、基本的に等しいと考える ことができる。また、Table 4 と Table 5 に示す ように Mix-A と Mix-B の割裂強度は、それぞれ 3.70MPa と 5.17MPaであった。窒素ガス引張試 験で得られた終局強度は割裂強度とほぼ一致す るとともに、窒素ガス引張試験における標準偏 差が割裂試験におけるそれに比べて小さいとい う点は注目に値すると考える。円柱供試体と中 空円柱供試体の破壊時の終局強度が等しいこと から、次のような破壊プロセスが考えられる。 まず初めに、コンクリートの引張強度に等しい

Test no.	Tensile strength (MPa)			
	Measured value	Mean value	Standard deviation	
1	3.32		0.443	
2	3.36			
3	3.72	3.70		
4	3.47			
5	4.51			
6	3.82			

Table 4 Splitting tension test results for Mix-A

	Table 5 Splitting	tension test	results for	Mix-B
--	-------------------	--------------	-------------	-------

Test no.	Tensile strength (MPa)			
	Measured value	Mean value	Standard deviation	
1	6.05			
2	6.00		1.06	
3	4.06	5 17		
4	3.67	5.17		
5	5.28			
6	5.99			

ガス圧力で供試体の表面に微小なひび割れが形 成される。一度ひび割れが形成されると,高圧 のガスがそのひび割れに流入し,さらにひび割 れを進展させ,ほぼ一定圧力下で供試体にひび 割れ面が形成される。コンクリート材料は元々 荷重の作用を受ける前から微小なひび割れや細 孔を含んでおり,引張ひび割れは供試体表面の これらの欠陥を起点として形成されたと考えら れる。

4. 結論

本研究では、窒素ガス引張試験におけるコン クリート供試体の破壊メカニズムを解明するた めの基礎的な研究として、形状の異なる2種類 の供試体を用いた窒素ガス引張試験を行った。 その結果から得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 窒素ガス引張試験における円柱供試体と中 空円柱供試体の終局強度はほぼ等しい。
- (2) 窒素ガス引張試験における供試体の破壊プロセスは、最初にコンクリートの引張強度に等しいガス圧の下でコンクリート供試体表面に微小な引張ひび割れが形成されると、高圧の窒素ガスがひび割れに流入し、ほぼ一定

圧力の下でさらにひび割れを進展させてい くものと考えられる。

今後,より詳細な破壊プロセスやそのメカニズ ムを解明するためには,破壊力学的なアプロー チが必要であると考える。

参考文献

- Clayton, N. and Grimer, F. J., "The diphase concept, with particular reference to concrete", in "Developments in concrete technology – 1", edited by Lydon, F. D., pp.283-318, Applied Science Publishers LTD, UK, 1979.
- 2) Clayton, N., "Fluid-pressure testing of concrete cylinders", Magazine of Concrete Research, Vol.30, No.102, pp.26-30, March, 1978.
- Boyd, A. J. and Mindess, S., "The effect of sulfate attack on the tensile to compressive strength ratio of concrete", Proceedings Third International Conference on Concrete Under Severe Conditions, Edited by N. Banthia, K. Sakai and O. E. Gjørv, Volume One, pp.789-796, The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2001.
- 4) Kupfer, H., Hilsdorf, H. K., and Rusch, H., "Behavior of concrete under biaxial stresses", ACI Journal, pp.656-666, August, 1969.
- Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., "Theory of Elasticity", Third Edition, McGraw-Hill, 1984.
 Mindess, S., Young, J. F. and Darwin, D.,
- 6) Mindess, S., Young, J. F. and Darwin, D., "Concrete", Second Edition, Prentice Hall, 2003.