

極低温環境下でのコンクリート強度試験

(株)大林組 正会員 ○森 麻里子, 正会員 阿久津富弘, 正会員 樋口俊一, 正会員 桜井邦昭

1. はじめに

我が国のエネルギー安全保障と地球温暖化対策として、水素をエネルギー源として利用する水素社会の実現に期待が寄せられている。水素発電が実現すれば、エネルギー源となる水素を大規模に貯蔵する必要があるが、水素は-253℃で液化し、体積が気体に比べて約 800 分の 1 となるため、液体での輸送・貯蔵が効率的である。

本検討では、コンクリート製 LNG (液化天然ガス) タンク設計・施工の技術を発展させてコンクリート製液化水素タンクを開発することを念頭に、液化水素温度 (-253℃) におけるコンクリートの強度特性を確認することを目的とした。

極低温環境下におけるコンクリート強度については、液体窒素 (-196℃) を用いた実験で常温時から圧縮強度が大幅に増加することが確認されている^{例え}ば¹⁾。また、軽量骨材を用いたコンクリートについては液化水素 (-253℃) を用いた実験で液体窒素 (-196℃) 環境下よりもさらに圧縮強度が増加するという結果が報告されている²⁾。

2. 試験装置および試験条件

液化水素温度 (-253℃) でのコンクリート強度特性を確認するため、(株)コベルコ科研が保有する 100kN 疲労試験機を使用し、液体ヘリウム (LHe, -269℃) 浸漬環境下での試験を実施した。試験は圧縮強度試験および割裂引張試験とし、それぞれ比較対象として常温 (20℃) での試験と液体窒素浸漬下 (-196℃) での試験を合わせて実施した。常温での試験は大林組技術研究所で実施している。

実施した試験の概要を表-1、液体ヘリウム浸漬試験の試験装置を図-1 に示す。

3. 試験体

コンクリート配合を表-2 に示す。予め試験練りを行い、常温にて、設定した圧縮強度 (約 27N/mm²) が得られる水セメント比を選定した。

試験体寸法は、圧縮強度試験および割裂引張試験

法を規定した JIS では $\phi 100\text{mm} \times$ 高さ 200mm であるが、既往の研究²⁾ で液体水素温度での圧縮強度が常温の 3~4 倍となることを考慮すると、LHe 浸漬試験での試験機容量不足 (100kN) が考えられる。そこで、本試験では試験体の寸法を $\phi 40\text{mm} \times$ 高さ 80mm とした。試験体サイズの違いが圧縮強度および割裂引張強度に及ぼす影響について、常温下で試験を行い比較した。圧縮強度には試験体寸法の影響がほぼないこと、割裂引張強度は $\phi 40$ の試験体で $\phi 100$ の試験体の 1.5 倍程度の強度となることを確認した。

4. 冷却方法

液体窒素試験は、試験体が液体窒素に完全に浸漬してから 15 分間静置して強度試験を行った。液体ヘリウム試験は、試験体を液体窒素で予冷したのち、液体ヘリウムに 15 分間浸漬して強度試験を行った。

表-1 コンクリート強度試験概要

試験温度	試験の種類と試験体本数	
	圧縮	割裂引張
常温 20℃	材齢7日, 35日: 各3本	材齢7日, 35日: 各3本
LN ₂ -196℃	材齢36~38日: 各1本	材齢36~38日: 各1本
LHe -269℃	材齢35, 45, 56日: 各1本	材齢42, 48, 66日: 各1本

LN₂: 液体窒素 LHe: 液体ヘリウム



図-1 極低温環境強度試験装置

表-2 コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (C×%)	
		W	C	S	G	WR	AE
70.0	46.0	175	250	845	1007	0.25	0.003 (3A)

C: 普通セメント, S: 山砂, G: 碎石 1005, WR: AE減水剤

キーワード 水素発電, 液化水素, コンクリート製タンク, 極低温環境, 圧縮強度, 割裂引張強度

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティ B 棟 (株)大林組 TEL 03-5769-1314 FAX 03-5769-1974

5. 試験結果

圧縮強度および割裂引張強度の試験結果を表-3、表-4 および図-2、図-3 に示す。ただし、圧縮試験結果のうち表に網掛けで示した4試験体は試験機の最大荷重(100kN)を載荷しても破壊に至らなかった。すなわち、表中の値は圧縮強度の下限值である。

圧縮強度、割裂引張強度に共通してばらつきは大きいものの温度が低くなるほど強度が大幅に増加する結果となった。これは、液体窒素を用いた既往の研究で得られている知見と同様の傾向が、さらに低温の液体ヘリウム温度においても同様に確認されたと言える。

割裂引張試験結果を用いて、以下の手順で試験機の最大荷重を超える結果となった圧縮強度試験結果の推定を試みた。

1. 常温での試験結果より試験体寸法の影響を補正
2. 以下に示す圧縮強度と引張強度の関係式³⁾より引張強度を逆算

$$f_{tk} = 0.23f'_{ck}{}^{2/3} \quad \text{式-1}$$

具体的には、常温での寸法効果の確認結果より低温時の割裂引張強度を1.5で除してφ100の強度に換算してから式-1にて圧縮強度の推定値を算出した。推定結果を表-5に示す。液体窒素温度では常温の約3~5倍、液体ヘリウム温度では約5倍~6倍の強度

となることがわかった。

図-4に温度と圧縮強度増加量の関係を示す。含水量7.49%として計算した既往の提案式に対して、今回の実験結果(推定値)は概ね一致する。

6. まとめ

コンクリート製液化水素タンクを想定した極低温下の強度試験結果を実施し、圧縮・引張ともに温度低下に伴う大幅な強度上昇を確認した。液体ヘリウム温度では、圧縮強度は常温の5~6倍と推定され、液体窒素下で実施された既往の研究結果と概ね一致することが確認できた。

謝辞： 本検討における実験は(株)コベルコ科研にて実施いただいた。

参考文献

- 1) 三浦, 瀬本, 早川: 液体窒素温度におけるコンクリートの性質, セメント・コンクリート論文集 No.13, pp.430~435, 1989
- 2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術(WE-NET)第二期研究開発, タスク9, 2002.3
- 3) 土木学会: 2017年制定 コンクリート標準示方書 設計編, 2018
- 4) 土木学会: 2002年制定 コンクリート標準示方書 構造性能照査編, 2002

表-3 圧縮試験結果

試験温度	試験体 No.	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²) 個々の値 平均値
常温 20℃	1	35	28.2
	2	35	29.3
	3	35	28.2
LN ₂ -196℃	1	36	37.7
	2	37	78.9
	3	38	61.8
LHe -269℃	1	35	78.8
	2	45	79.6
	3	56	78.4

LN₂: 液体窒素 LHe: 液体ヘリウム

表-4 割裂引張試験結果

試験温度	試験体 No.	材齢 (日)	割裂引張強度 (N/mm ²) 個々の値 平均値
常温 20℃	1	35	3.7
	2	35	3.4
	3	35	3.7
LN ₂ -196℃	1	36	9.5
	2	37	6.9
	3	38	7.0
LHe -269℃	1	42	11.0
	2	48	9.9
	3	66	8.2

LN₂: 液体窒素 LHe: 液体ヘリウム

表-5 推定圧縮強度

試験温度	試験体 No.	材齢 (日)	推定圧縮強度 (N/mm ²) 個々の値 平均値
常温 20℃	1	35	28.2
	2	35	29.3
	3	35	28.2
LN ₂ -196℃	1	36	144.4
	2	37	89.4
	3	38	91.5
LHe -269℃	1	35	179.9
	2	45	153.7
	3	56	116.0

LN₂: 液体窒素 LHe: 液体ヘリウム
ただし、常温は圧縮強度試験の実験値
※割裂引張強度から換算

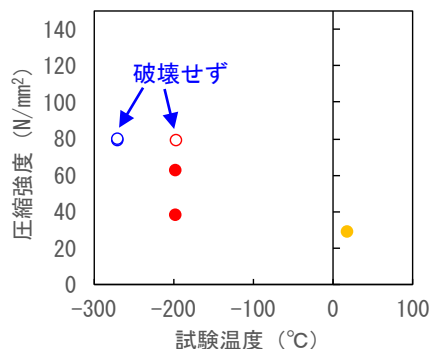


図-2 圧縮試験結果

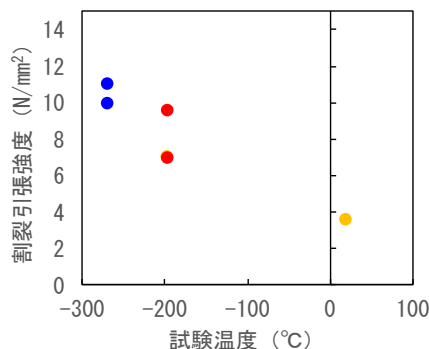


図-3 割裂引張試験結果

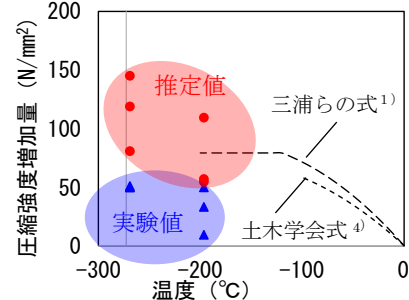


図-4 温度と圧縮強度増加量の関係