

論文 若材齢コンクリートの割裂引張強度に与える膨張材の影響

吉岡 国和^{*1}・吉武 勇^{*2}・蛭谷 祐至^{*3}・浜田 純夫^{*4}

要旨：本研究は，若材齢期にある膨張コンクリートの強度特性を実験的に求めることを目的とした。特に，膨張材量が(割裂)引張強度に与える影響を調べるため，膨張材量を 0, 10, 20, 30kg/m³とした膨張コンクリートを用いて，材齢 1, 3, 7 日における圧縮・割裂引張強度試験を行った。実験結果より，膨張コンクリートでは膨張材量によらず圧縮強度は同程度であったが，割裂引張強度は膨張材添加に応じて強度の向上がみられた。

キーワード：膨張コンクリート，若材齢，膨張材量，割裂引張強度，モデル骨材

1 はじめに

コンクリートに生じる初期ひび割れは，その後の耐久性に重大な影響を及ぼす。この初期ひび割れ対策として，膨張コンクリートが従来利用されてきたが，低添加型膨張材の開発により利用性が向上したことも相まって，近年では膨張コンクリートが各種構造物にしばしば利用されてきている。

膨張コンクリートの強度性状は，一般的なコンクリートと様相が異なり，曲げや引張といった引張応力場においてはその傾向が強い¹⁾。特に初期ひび割れの抵抗性を表す若材齢コンクリートの引張強度特性について，膨張材の添加が及ぼす影響は，未だ十分に定量化されていない現状にある。

一般的にコンクリートの引張強度は，圧縮強度との関係式(引張強度予測式)を用いて推定される。しかしながら，これらの関係式は主に普通コンクリートの膨大な実験データに基づき構築されたものであり，膨張コンクリートに直ちに準用できるものではない。膨張コンクリートでは配合条件等によっても強度特性が異なるため，膨張材添加がもたらす引張強度への影響評価は不可欠な課題と考えられる。

本研究では，膨張コンクリートの引張強度特性について，特に膨張材量が及ぼす影響を実験的に調べることを目的とした。この基礎的データを示すことにより，膨張コンクリートを用いた初期ひび割れ制御設計の一助になるものと考えている。

2 実験方法

2.1 実験概要

コンクリートは W/C が一定であっても粗骨材によって強度性状が異なるものであるが，特に引張応力場においてその傾向が著しい。例えば図-1に示すように，膨張コンクリートの割裂引張強度が，粗骨材量に応じて顕著な強度増加となるように，膨張コンクリートにおける粗骨材の影響は比較的大きいものである。

本研究の主な目的は，膨張コンクリートの引張強度に対する膨張材量の影響を実験的に求めることである。そこで，先ず粗骨材の影響(量や粒度)をできるだけ小さくし，膨張材添加がもたらす割裂引張強度への影響を調べることにした。すなわち，図-2のようにモデル骨材(φ50×100mm)をシリンダー状の型枠(φ100×100mm)の中心に据付け，表-1の i~iv に示す 4 水準の

*1 萩森興産株式会社 技術部 (山口大学大学院 博士後期課程 所属) (正会員)

*2 山口大学 工学部 社会建設工学科 助教授 博(工) (正会員)

*3 前田建設工業株式会社 東北支店 修(工) (正会員)

*4 山口大学 工学部 社会建設工学科 教授 Ph.D. (正会員)

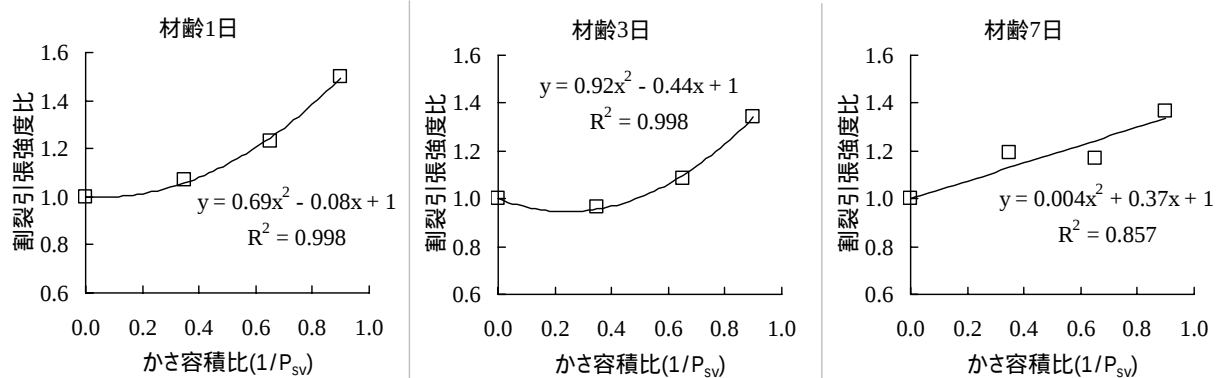


図-1 モルタルに対する割裂引張強度の比(膨張材量 20kg/m³) 粗骨材実積率 Psv=59%

表-1 モルタルおよびコンクリートの配合

	記号	種別	W / (C+Ex)	粗骨材か さ容積	単位量 (kg/m ³)					
					水 W	セメント C	膨張材 Ex	細骨材 S	粗骨材 G	減水剤 Ad
i	E00M	モルタル	55%	0 (m ³ /m ³)	276	502	0	1360	---	5.02
ii	E10M					485	17		---	4.85
iii	E20M					468	33		---	4.68
iv	E30M					453	49		---	4.53
I	E00C	コン ク リ ー ト		0.65 (m ³ /m ³)	166	301	0	816	1043	3.01
II	E10C					291	10		1043	2.91
III	E20C					281	20		1043	2.81
IV	E30C					272	30		1043	2.72

モルタルを打設した供試体(以下、モデル供試体)について割裂引張強度試験を行った(写真-1参照)。

次に表-1に示すように 膨張材量 0 ~ 30 kg/m³ と変えたコンクリート，およびそのモルタルマトリックス成分(膨張材量 0 ~ 49 kg/m³)について，それぞれ圧縮・割裂引張強度試験を実施した。なお，本研究における各強度試験は，材齢 1, 3, 7 日の若材齢期に行ったものである。

2.2 実験条件

本研究のコンクリートに用いた全材料は，予め 20 ± 2 の試験室に保管し，同室内で練混ぜや供試体作製を行うことで打設時の温度の影響を小さくしている。さらに同室内で材齢 1 日まで気中養生を施し，以降 20 水中養生を行っているため，本論文で表す材齢は積算温度に基づく有効材齢とほぼ同義である。

本研究のコンクリートには，普通ポルトランドセメント(密度：3.16g/cm³)を用い，これにセメント質量に対して 1%のリグニン系の減水剤

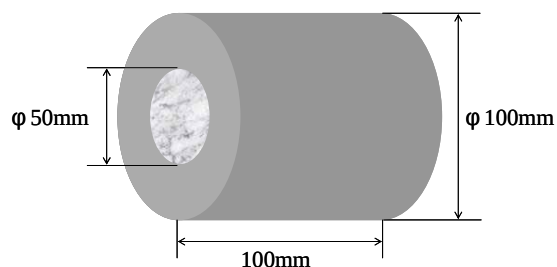


図-2 モデル供試体



写真-1 モデル供試体の割裂引張破壊

を添加した。膨張コンクリートには，標準使用量 20kg/m³ の低添加型石灰系膨張材(密度：

表- 2 骨材の物理的品質

骨材区分	骨材名	寸法(mm)	密度 (g/cm ³)	吸水率(%)	実積率(%)	粗粒率
細骨材	砕砂	5 以下	2.62	2.38	---	3.76
	海砂	2.5 以下	2.60	1.36	---	1.77
粗骨材	砕石	5 ~ 20	2.73	0.48	59	6.63

表面乾燥飽水状態

表- 3 圧縮・割裂引張強度の一覧

-	種類	モデル供試体	モルタル		コンクリート	
材齢 (日)	膨張材混入量 (kg/m ³)	f_t (N/mm ²)	f'_c (N/mm ²)	f_t (N/mm ²)	f'_c (N/mm ²)	f_t (N/mm ²)
1	0	0.50	4.38	0.48	4.64	0.61
	10	0.67	5.74	0.69	6.45	0.71
	20	0.68	9.36	1.00	9.85	0.95
	30	0.48	7.31	0.72	7.11	0.86
3	0	1.90	25.3	2.27	24.5	2.52
	10	1.92	22.5	2.39	25.0	2.42
	20	1.82	24.2	2.63	25.0	2.83
	30	1.27	22.4	2.35	23.8	2.48
7	0	2.61	34.2	3.12	32.2	2.60
	10	2.38	31.3	3.10	34.3	2.89
	20	2.33	35.4	3.52	35.4	3.42
	30	1.61	31.4	3.12	33.0	2.91

(注) f'_c = 「圧縮強度」 , f_t = 「割裂引張強度」を表す

3.17g/cm³)を添加した。細骨材は表- 2 に示す海砂と砕砂を質量比 55 : 45 で混合して用いた。また、表- 1 のⅠ~Ⅳのコンクリートに用いた粗骨材は、表- 2 に示す砕石(硬質砂岩)である。

なお、表- 1 に示す記号のうち数字は膨張材の添加量(kg/m³)を示し、末尾の M, C はそれぞれモルタルおよびコンクリートを意味している。

2.3 実験方法

本研究では、モルタルとコンクリート中におけるモルタルマトリックスの強度を一定とするため、ⅰ~ⅳのモルタルを先行打設し、同時に作製したモルタルに所定量の粗骨材を混合することでⅠ~Ⅳのコンクリートを作製した。

本研究で作製したコンクリート供試体は、圧縮強度試験用にφ100×200mm、割裂引張強度試験用にはφ100×150mmを採用した。なお、各強度試験には供試体間のバラツキの影響をなるべく小さくするため、各3本の強度試験を行った。

本研究で行ったモデル供試体、モルタルおよびコンクリートの圧縮・割裂引張強度の一覧を表- 3 に示す。

3 実験結果および考察

3.1 モデル供試体における膨張材量の影響

本研究のモデル供試体を用いた実験では、いずれのモデル骨材にも破損・ひび割れは生じず、写真- 1 のようにモデル骨材とモルタルマトリックス間の剥離が進行することによる破壊状態となった。

モデル供試体の割裂引張強度は、材齢3, 7日において膨張材量 20kg/m³ まではほぼ同程度であるが、30kg/m³ では低下傾向を示した(図- 3 参照)。これは、モデル骨材外周にある膨張モルタルマトリックスの過度な膨張が原因のひとつとして考えられる。しかしながら、材齢1日においては膨張材量による差異はほとんどなかった。このことは、型枠によるケミカルプレストレス効果(外的拘束力)と膨張作用による緩みが相互に影響した結果と推察される。

3.2 圧縮強度に対する膨張材量の影響

図- 4 に膨張材量の異なるモルタルおよびコンクリートの圧縮強度比を示す。なお、これらの図では、膨張材量 0kg/m³ のモルタル(E00M)

およびコンクリート(E00C)の圧縮強度を基準としている。

この結果より，材齢 1 日では膨張材を添加することで圧縮強度が向上し，膨張材量 20kg/m^3 において最も高い強度を示した。また，材齢 3，7 日では膨張材量と圧縮強度間に有意な差異が認められず，ほぼ同程度の圧縮強度を示した。

本研究では，材齢 1 日にて脱枠を行っていることから，材齢 1 日の強度には型枠によるケミカルプレストレス効果(外的拘束力)が寄与したものと推察される。しかしながら型枠による外的拘束力の影響が小さくなる材齢 3，7 日においては，膨張材量に応じて組織の緩みは増加する。

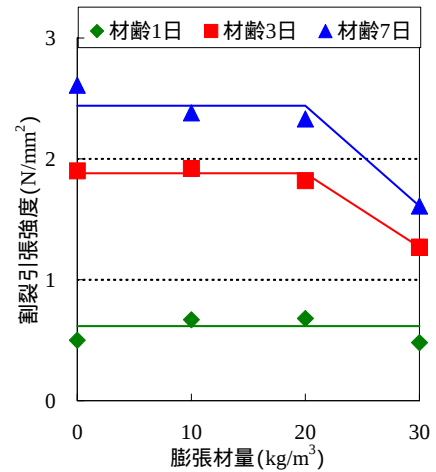
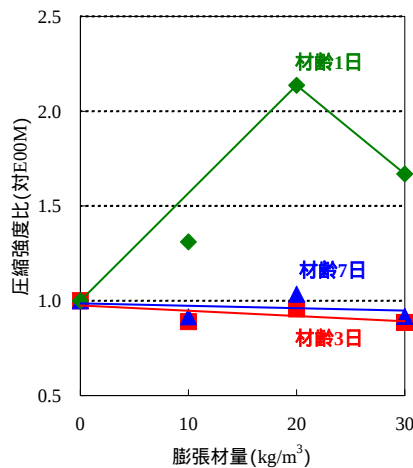
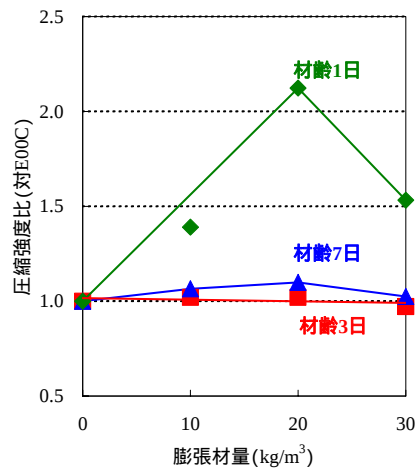


図-3 割裂引張強度(モデル供試体)

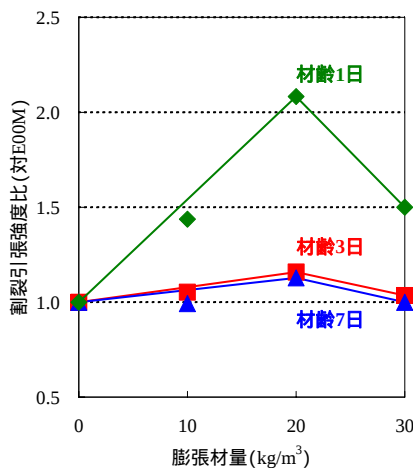


a) モルタル

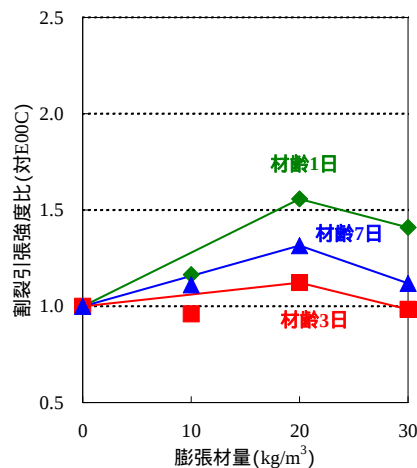


b) コンクリート

図-4 膨張材量 - 圧縮強度比(基準：E00M，E00C)



a) モルタル



b) コンクリート

図-5 膨張材量 - 割裂引張強度比(基準：E00M，E00C)

圧縮応力場では、モルタルマトリックス中のひび割れの発生や進展に多くのエネルギーが必要となるため²⁾、膨張材添加によるモルタルマトリックスの組織構造の影響があまり表れなかったものと推察される。

3.3 割裂引張強度に対する膨張材量の影響

図-5 に膨張材量の異なるモルタルおよびコンクリートの割裂引張強度比を示す。ここに示すモルタルの結果より、材齢 1 日では膨張材を添加することで強度が向上し、膨張材量 20kg/m^3 において最も高い割裂引張強度を示した。同様に、材齢 3, 7 日においても、材齢 1 日ほど顕著な傾向はみられないが、膨張材量 20kg/m^3 において最も高い割裂引張強度を示す傾向が認められた。これは水和反応に伴い形成する組織構造が強固となることで、モルタル自身の内的拘束効果が寄与したものと推察される。

この影響を確認するため、別途大型モルタル版を用いて実験検証を試みた。この大型モルタル版($2000 \times 2000 \times 100\text{mm}$)は、前述までの膨張モルタル(E20M)と同配合で作製したものである。図-6 に示す箇所より材齢 7 日において $\phi 100 \times 100\text{mm}$ のコアを採取し、直ちに割裂引張強度試験に供した。なお、この大型モルタル版の作製にあたり、底版はグリスとビニールシートを用いて縁切りを施すとともに、外周枠は低剛性のベニア板(材齢 1 日にて完全撤去)を用いることで、できるだけ外的拘束効果が小さくなるよう配慮した。

図-7 に大型モルタル版(材齢 7 日)におけるコア供試体の割裂引張強度分布(部位平均)を示す。これによれば、大型モルタル版の中心部は、外周部に近い部位に比べ高い割裂引張強度を示している。このことから膨張モルタルにおいては、型枠による外的拘束効果のみならず、内的にも拘束効果をもたらすことで割裂引張強度が向上するものと思われる。

また、図-5 に示すコンクリートの割裂引張強度比においても、モルタル同様に全ての材齢において膨張材量 20kg/m^3 で最も高い割裂引張強

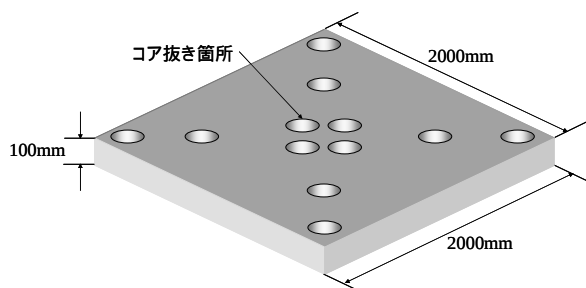


図-6 大型モルタル版

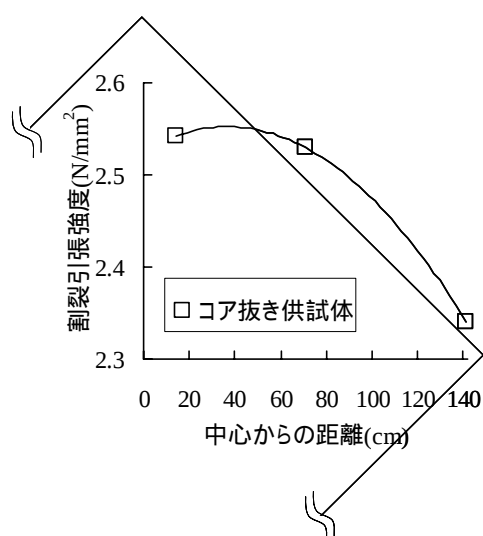


図-7 大型モルタル版中の割裂引張強度分布

度を示した。膨張材量 30kg/m^3 のモデル供試体(E30M)では、同 0kg/m^3 (E00M)より低い割裂引張強度を示したが、内部で粗骨材が分散するコンクリート(E30C)の場合には、同 0kg/m^3 (E00C)と同等以上の強度を示した。これは前述のモルタルマトリックスの組織構造の形成による内的拘束効果に加え、コンクリート中に内在する粗骨材によりケミカルプレストレス効果が付加したためと考えられる。すなわち、粗骨材間にある膨張モルタルマトリックスの膨張作用を粗骨材が一部拘束することで、副次的なケミカルプレストレス効果をもたらしたものと考えられる。このことは、図-1 に示す粗骨材量の増加に応じて割裂引張強度が向上したことからも窺える現象である。

これらの実験的知見より、図-8 の模式図に示すように、適切な膨張材量を添加した膨張コンクリートでは、鉄筋などの拘束材を用いない場合においても、コンクリート内部でエネルギー

バランスを保つため、内的なプレストレス効果が作用しているものと推察される。

3.4 膨張コンクリートの引張強度の予測

3.2 に示したように、膨張コンクリートの圧縮強度は膨張材量によらず同程度であった。これに対して、3.3 に示した膨張コンクリートの割裂引張強度は、膨張材量 20kg/m^3 において極大となるような強度増加傾向がみられた。このことは、若材齢期にある膨張コンクリートの場合、一般的なコンクリートの強度特性の指標である圧縮強度から、引張強度などの各強度を予測することに限界があるものと推察される。そこで、式(1)に示すマスコンクリートの温度応力解析にしばしば用いられる引張強度予測式(圧縮強度の関数)を用い、引張強度予測値に対する実験値の比(以下、実験値/予測値)について膨張材量で整理した結果を図-9 に示す。

$$f_t = 0.44\sqrt{f'_c} \quad (1)$$

この結果より、膨張材量 0kg/m^3 のコンクリートでは、材齢 7 日において実験値/予測値が概ね 1(実験値 = 予測値)であるのに対し、膨張材量の増加により実験値/予測値が 1 よりも大きくなっていることが分かる。特に膨張材量 20kg/m^3 の場合、実験値は予測値に比べ 30%ほど高く、一般的な引張強度予測式を準用すると、(初期)ひび割れ抵抗性の指標となる引張強度を小さく推定することになる。膨張コンクリートの力学的性能を十分に活用するには、このような引張強度性状を考慮した十分な検討が今後必要と考えられる。

4 まとめ

本研究は、若材齢期にある膨張コンクリートの引張強度に対して、膨張材量が及ぼす影響を実験的に求めたものである。本研究の範囲内で得られた知見を以下に要約する。

- (1) モデル供試体では、膨張材量 20kg/m^3 (標準使用量) まで添加しても割裂引張強度への影響は大きくないが、 30kg/m^3 を添加すると

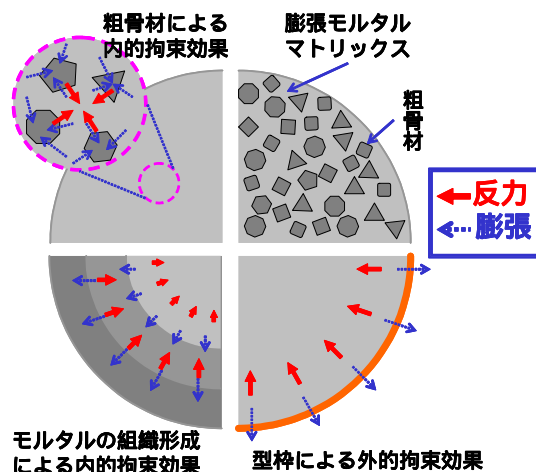


図-8 膨張コンクリートの拘束効果の概念図

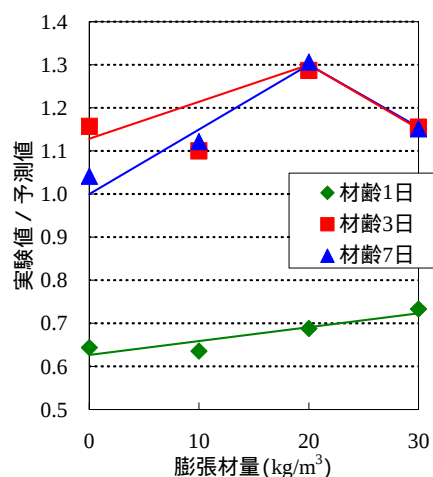


図-9 膨張材量 - 実験値/予測値

顕著な強度低下を示した。

- (2) 膨張モルタルや膨張コンクリートの圧縮強度に及ぼす膨張材量の影響はほとんどみられないが、割裂引張強度においては、膨張材量の影響が比較的大きい。
- (3) 膨張コンクリートは、内部でエネルギーバランスを保つことで内的なプレストレス効果が作用し、引張強度の向上をもたらす。

参考文献

- 1) 細田 暁, 岸利治: 膨張モルタルの非線形挙動ひび割れ抵抗性の機構について, 土木学会論文集, No.683/V-52, pp.13-29, 2001.8.
- 2) Mehta, P.K. and Monteiro, P., J., M: コンクリート工学, 技報堂出版, 2000.