

論文 各種セメントを用いたコンクリートの力学特性に関する一考察

井上 量介*1・網島 隆将*2・皆本 晃*3・溝渕 利明*4

要旨: 本研究では、新しく提案した直接引張試験装置を用いてセメント種別および養生条件を変化させた場合の強度特性および変形特性について検討を行った。その結果、高炉スラグセメントを用いたコンクリートは養生条件の影響を大きく受け、特に低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いる場合は初期養生を十分行わないと強度低下、特に引張強度が大きく低下することが明らかとなった。また、引張ヤング係数と圧縮ヤング係数は、水中養生とした場合、本研究の範囲内においてはほぼ同等であった。

キーワード: 直接引張強度試験, 引張強度, 引張ヤング係数, 高炉スラグセメント

1. はじめに

コンクリート構造物に発生するひび割れは、塩害や中性化等の劣化の進行を促進し、耐久性に大きな影響を与える場合があることから、コンクリート構造物のひび割れを予測・制御することは耐久性上重要な課題のひとつといえる。セメントの水和に伴う体積変化によって生じるひび割れは理論上、コンクリートの引張応力が引張強度を超えると発生する。したがって、体積変化に伴う収縮ひび割れの発生を予測するためにはコンクリートの引張強度等の力学特性をできるだけ精度よく把握する必要がある。

コンクリートの引張強度を求める試験法としては、割裂引張試験および直接引張試験がある。割裂引張試験は、試験法として容易であり、供試体作製に関しても既往のものを適用できる利点がある。ただし、割裂引張強度試験はセメントと骨材の界面の付着強度の影響を十分に考慮しているとは言えないことや¹⁾、載荷点近傍で発生する圧縮応力の影響を受けるとの報告もある²⁾。

直接引張試験は、コンクリートの引張強度を直接得られる利点はあるものの、供試体への引張力の伝達が難しく、試験結果の安定性・再現性などに問題点がある。供試体形状についても、角柱、円柱、ドッグボーン型などがあり、統一された試験方法は未だ確立されていないのが現状である。既往の研究では、直接引張強度の方が大きいとするもの^{2), 3)}や、割裂引張強度の方が大きいとするもの⁴⁾、直接引張強度と割裂引張強度は一定範囲内ではほぼ同等とするもの¹⁾とがあり、現状として統一的な見解が得られているとはいえない。また、ヤング係数については引張ヤング係数と圧縮ヤング係数の両者はほぼ同等とする見解が主流ではあるが、引張ヤング係数の方が幾分小さいとする研究成果⁵⁾もある。

一方、近年一般に用いられている普通ポルトランドセメントに加え、高炉スラグを混合し耐海水性やアルカリ骨材反応の抑制対策として、さらには環境負荷低減を目的として高炉セメントの使用が増加している。しかしながら、初期強度を普通ポルトランドセメントと同等にするために高炉スラグ微粉末の粉末度を大きくしたことなどにより、暑中時においては普通ポルトランドセメントよりも温度上昇量が大きくなり、従来利点のひとつとして言われていた低発熱性が十分発揮できていなくなっている場合がある。それらの問題点を改善するために、高炉スラグ微粉末の粉末度を粗くし、スラグ混合率を規格内上限に近くするなどして、セメントの水和熱を抑制し、自己収縮を小さくした低発熱・収縮抑制型高炉セメントが開発され、適用されるようになってきており、その効果が評価されるようになってきている⁶⁾。ただし、低発熱・収縮抑制型高炉セメントは、表-1に示すように粉末度を粗くし、スラグ混入量を大きくしたために⁷⁾、初期強度発現が小さいことや初期養生を十分行わないと長期強度の発現が低下することが懸念される。

本研究では、以上の点を踏まえて高炉スラグ微粉末を用いたセメントについて、養生方法がコンクリートの引張特性や変形特性にどのような影響があるのかを把握することを目的とし、新たに導入した引張強度と引張ヤ

表-1 セメントの物理的物性

セメントの種類	スラグ混入量 (%)	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)
低発熱・収縮抑制型高炉セメントB種	58	2.98	3300
高炉セメントB種	42	3.04	3890

*1 法政大学 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 法政大学 工学部都市環境デザイン工学科 (正会員)

*3 法政大学 工学部都市環境デザイン工学科

*4 法政大学 デザイン工学部都市環境デザイン工学科教授 博士(工学) (正会員)

ング係数を同時に得ることが可能な直接引張試験装置を用いて、セメント種別および養生条件を変化させた場合の引張特性について試験を行った。

2. 実験の概要

2.1 実験シリーズ

本実験は、以下に示す2つのシリーズから構成される。

シリーズ1：セメント種別および養生条件を変化させた場合の引張特性に関する実験

シリーズ2：養生条件を変化させた場合の引張ヤング係数と圧縮ヤング係数との関係に関する実験

2.2 実験の概要

(1) シリーズ1

シリーズ1では、普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種、低発熱・収縮抑制型高炉セメントB種の計3種類のセメントを用いたコンクリート供試体に対し、それぞれ気中、封かん、水中で養生することにより計9種類のケースについて直接引張試験、割裂引張試験、圧縮強度試験を行った。試験材齢は7日、28日とし、供試体本数は直接引張試験、割裂引張試験、圧縮強度試験とも各材齢3本とした。検討ケースを表-2に示す。また、実験に用いたコンクリートは、水セメント比55%、目標空気量4.5%、目標スランプを12cmとした。表-3にコンクリート配合を示す。

(2) シリーズ2

シリーズ2では、低発熱・収縮抑制型高炉セメントB種を用いたコンクリート供試体に対し、それぞれ気中、封かんで養生した計2種類のケースについて直接引張試験、圧縮強度試験を行い、併せて引張ヤング係数および圧縮ヤング係数の測定も行った。試験材齢は7日、28日とし、供試体本数は直接引張試験、圧縮強度試験とも各材齢3本とした。検討ケースを表-4に示す。また、実験に用いたコンクリートは、水セメント比50%、目標空気量4.5%、目標スランプを8cmとした。表-3にコンクリート配合を示す。

2.3 直接引張試験装置及び供試体

本研究では、写真-1、2に示す試験装置及び専用の型枠を使用した。図-1に試験装置の概要を示す。純引張強度試験に用いる供試体の寸法は100×100×840mmで、

表-2 検討ケース(シリーズ1)

セメントの種類	養生方法	記号
普通ポルトランドセメント	水中	1-普-水
	封かん	1-普-封
	気中	1-普-気
高炉セメントB種	水中	1-高-水
	封かん	1-高-封
	気中	1-高-気
低発熱・収縮抑制型高炉セメントB種	水中	1-低-水
	封かん	1-低-封
	気中	1-低-気

表-4 検討ケース(シリーズ2)

セメントの種類	養生方法	記号
低発熱・収縮抑制型高炉セメントB種	水中	2-低-水
	気中	2-低-気

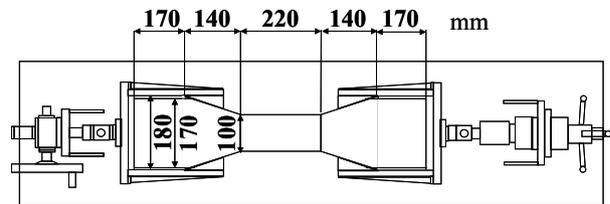


図-1 直接引張試験装置概要

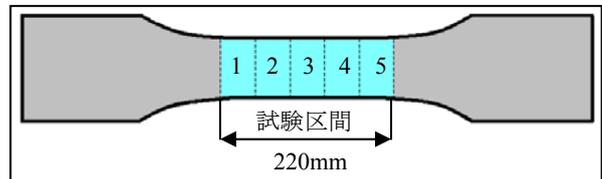
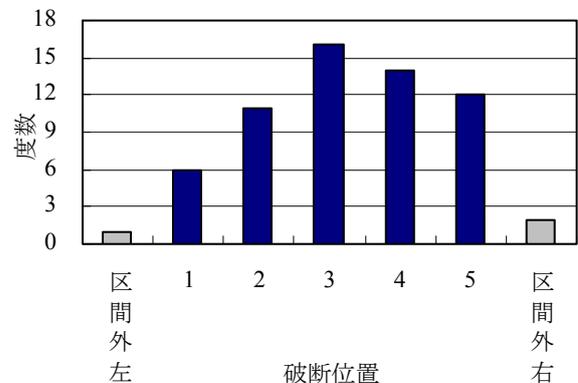


図-2 供試体破断面の分布

表-3 コンクリート配合

	セメント	細骨材率 (%)	単体量 (kg/m ³)					
			水	セメント	細骨材	粗骨材	AE剤	AE減水剤
シリーズ1	普通セメント	45.5	164	298	827	1002	0.94	0.60
	高炉セメントB種	45.5	170	309	812	982	0.12	0.93
	低発熱収縮抑制型高炉セメントB	45.5	161	295	825	1001	0.92	0.59
シリーズ2	低発熱収縮抑制型高炉セメントB	47.7	158	316	865	960	1.39	3.16

試験対象は、**図-2** に示すように拘束治具で把持されている部分を除く長さ 220mm の部分である。拘束治具で把持する部分は、供試体の引張領域での拔出しやすさを極力少なくするために、試験対象区間の幅から扇状に広げた形状にしており、試験対象区間と拘束治具との境界部分で応力集中が生じないように緩やかな曲線とした。型枠は、打込み後、試験部位が膨張により広がらないように**写真-3** の金具で試験部位中心から 100mm 以内のところを固定した。

荷重装置は、1 回転 0.3mm のスクリージャッキとし、ロードセルで荷重の測定を行った。また、引張ヤング係数測定は供試体試験部の中心部の左右にひずみゲージを貼り測定した。ジャッキ側の装置型枠はユニバーサル・ジョイントとし、荷重時に偏心が起こらないように供試体の位置を調整するようにした。また、試験装置の供試体下部が接する部分はローラーとし、極力摩擦を軽減するようにした。

2.4 その他の供試体

割裂引張強度試験は $\phi 150 \times 200$ mm の円柱供試体、圧縮強度試験は $\phi 100 \times 200$ mm の円柱供試体とした。

2.5 養生方法

養生方法は、上述したように気中、封かん、水中の 3 種類の養生があり、いずれも打込み後 1 日で脱枠した。その後、気中養生の場合は 20℃、60% の恒温室で養生、封かん養生の場合は湿布を巻きラップで密封して水分の逸散を防いだ養生とし、水中養生は水温 20℃ の水槽で養生した。

3. 試験結果および考察

3.1 直接引張供試体の破断面

直接引張試験における供試体の破断位置を**図-2** に示す。なお、破断位置は供試体の試験区間 220 mm を 5 等分にして示した。また、破断した供試体の状況を**写真-4** に示す。**図-2** から、試験区間外で破断している供試体は約 5% であった。

3.2 力学特性 (シリーズ 1)

3.2.1 直接引張強度と割裂引張強度との関係

シリーズ 1 の試験によって得られた直接引張強度と割裂引張強度との関係を、養生方法の違いで整理した結果を**図-3** に示す。なお、普通ポルトランドセメント (以後普通セメントと称す)、高炉セメント B 種 (以後高炉



写真-1 試験装置



写真-2 試験装置用型枠



写真-3 膨張防止金具



写真-4 供試体破断状況

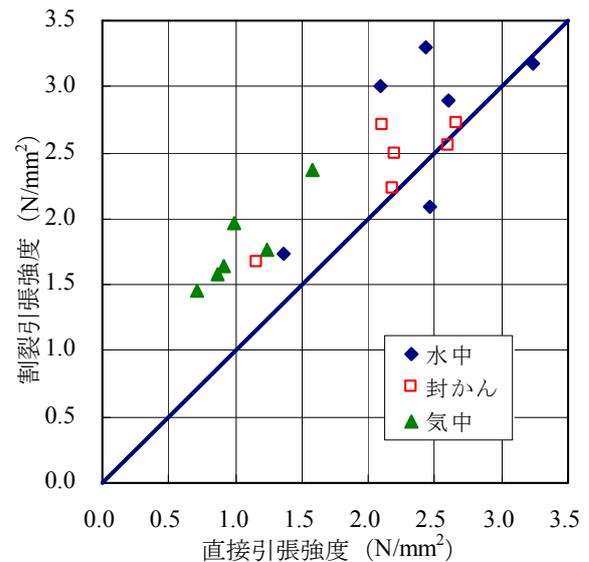


図-3 直接引張強度と割裂引張強度との関係

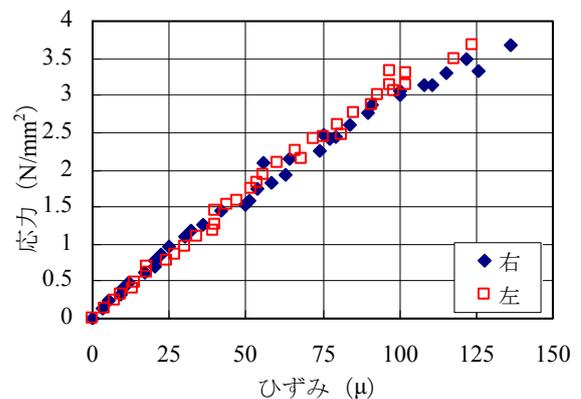


図-4 供試体左右のひずみと引張応力との関係

セメントと称す), 低発熱・収縮抑制型高炉セメント B 種 (以後低発熱セメントと称す) の計 3 種のセメントを用いた試験結果を示す。また, 図-4 に直接引張試験において供試体左右のひずみと応力の関係を示す。

図-3 より, ほとんどのケースで, 割裂引張強度のほうが直接引張強度より大きくなる結果となった。また, 図-4 より, 左右のひずみがほぼ等しいことから, 供試体に曲げが作用することなく純粋な引張力が作用していると思われる。

直接引張試験では, コンクリートの引張強度を直接得ることでセメントと骨材の界面の影響が考慮されること, 供試体に曲げが作用することなくほぼ試験区間内で破断していることなどにより, 従来の割裂引張試験よりも実際に近い引張特性を把握することが可能と思われることから, 割裂引張試験から求められた引張強度よりも小さくなると思われる。

3.2.2 養生方法の違いが強度特性に与える影響

材齢 28 日における水中養生した強度の試験結果を表-4 に示す。水中, 封かん, 気中の各養生条件が, 各種強度に及ぼす影響について検討するために, 表-4 に示す水中養生での強度を 1.0 とし, 封かん, 気中養生での圧縮強度, 割裂引張強度, 直接引張強度との比を求めた。各強度比率を図-5~図-7 に示す。

図-5 から, 普通セメントを使用し, 封かん養生した場合の圧縮強度は, 水中養生した圧縮強度とほぼ等しく, 高炉セメントを使用し, 封かん養生した場合の圧縮強度は水中養生した場合に比べて 93%, 低発熱セメントを用いた場合で 84%となり, 封かん養生すれば, 高炉セメントを用いても標準養生に比べて材齢 28 日時点で 80%以上の強度を確保できると考えられる。一方気中養生した場合には, 普通セメントで水中養生した場合の圧縮強度に比べて 78%であったものの, 高炉および低発熱セメントでは, 約半分の強度しか得られない結果となった。

図-6 から, 各セメントとも封かん養生した場合の割裂引張強度は, 水中養生した場合に比べて 80%以上であったのに対して, 気中養生した場合には, 普通セメントで 72%, 高炉セメントおよび低発熱は圧縮強度と同様に約半分の強度しか得られない結果となった。

図-7 から, 直接引張強度は封かん養生の場合, 普通セメントが水中養生した場合とほぼ等しくなるのに対して, 高炉セメントが 61%, 低発熱セメントが 84%と低下する結果となった。また, 気中養生の場合には普通セメントが 65%まで強度低下し, 高炉および低発熱セメントでは約 1/3 の強度しか得られない結果となった。このことは, 高炉セメントを用いた場合, 初期養生を十分行わないとひび割れが生じやすくなることを示すものである。したがって, 高炉セメントを用いた事前検討にお

表-4 強度試験結果 (水中養生, 28 日)

	単位	1-普-水	1-高-水	1-低-水
圧縮強度	N/mm ²	44.7	43.7	18.0
割裂引張強度	N/mm ²	3.31	3.46	1.57
直接引張強度	N/mm ²	2.43	3.43	0.87

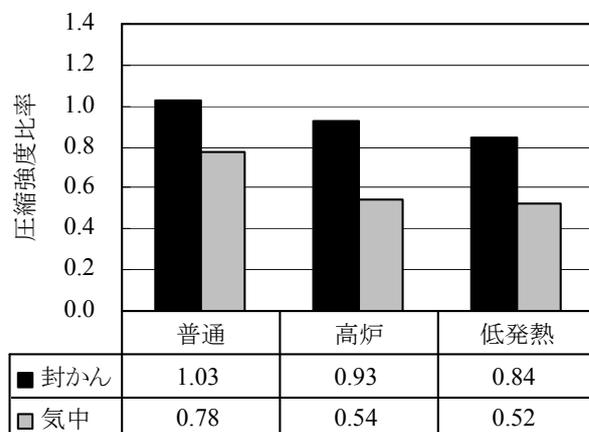


図-5 圧縮強度の比較 (28 日, 水中養生=1.0)

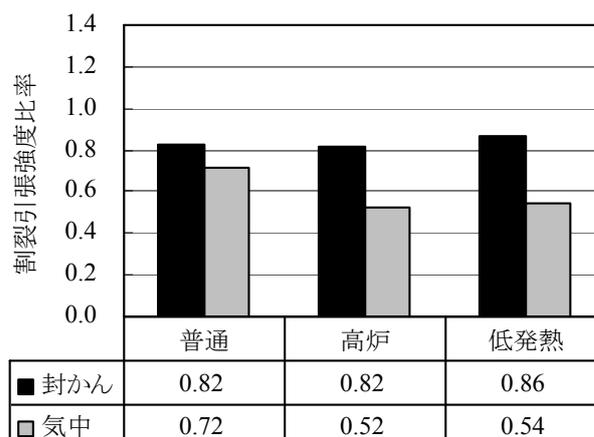


図-6 割裂引張強度の比較 (28 日, 水中養生=1.0)

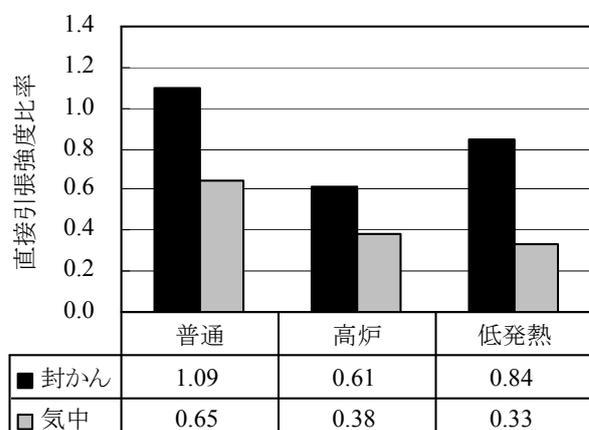


図-7 直接引張強度の比較 (28 日, 水中養生=1.0)

いて割裂引張強度を用いた場合危険側の評価を行う場合があることを示すものであり、事前検討に割裂引張強度を用いる際には、十分この点を留意して検討する必要があると思われる。

3.2.3 セメント種類の違いが強度特性に与える影響

材齢 28 日における普通セメントを用いたコンクリートの強度試験結果を表-5 に示す。普通、高炉、低発熱の各セメントが各種強度に及ぼす影響について検討するために、前節と同様に表-5 に示す普通セメントを用いたコンクリートの材齢 28 日の強度を 1.0 として、高炉、低発熱セメントを用いた場合での圧縮強度、割裂引張強度、直接引張強度との比率を図-8~図-10 に示す。

図-8 から、高炉セメントを用い、水中養生した場合の圧縮強度は、普通セメントを用いた場合の 98% となり、封かん、気中養生では 88%、68% となり、気中養生することで、普通セメントの 2/3 程度の強度しか得られない結果となった。低発熱セメントの場合には、水中養生で 77%、封かん養生で 63%、気中養生では 52% となり、約半分の強度となった。これは、低発熱セメントの強度発現が比較的遅いため、材齢 28 日では普通セメントに比べて低くなったものと思われる。このことは、初期養生を十分に行わないと、初期強度発現がさらに低下することを示すものである。

図-9 から、高炉セメントを用いた割裂引張強度は、水中および封かん養生とも普通セメントとほぼ同等であったものの、気中養生では普通セメントの約 3/4 の強度であった。低発熱セメントの場合には、水中、封かん養生とも 90% 前後の強度となったが、気中養生の場合には、約 2/3 の強度であった。

図-10 から、高炉セメントを用い、水中養生した場合の直接引張強度は、普通セメントを用いた場合の 141% となり、十分に水分を供給する養生を行えば、普通セメントよりも高い引張抵抗性を有することを示しているといえる。封かん養生の場合には、普通セメントを用いた場合の 79% であり、気中養生の場合には、84% であった。これは、高炉セメント自体普通セメントに近い引張特性を有していることを示すものである。低発熱セメントの場合には、水中養生において 107%、封かん養生において 83%、気中養生において 55% であった。このことは、低発熱セメントの場合には、高炉セメントに比べ、養生方法の影響を受けやすいことを示すものである。

3.3 ヤング係数（シリーズ 2）

引張ヤング係数と圧縮ヤング係数の試験結果を表-6 に示す。また、直接引張試験によって計測した引張応力とひずみの関係の一例を図-11 に示す。図-11 から、引張応力とひずみとの関係は、ほぼ破断に至るまで線形関係となっているのがわかる。

表-5 強度試験結果（普通セメント，28日）

	単位	1-普-水	1-普-封	1-普-気
圧縮強度	N/mm ²	44.7	46.0	34.8
割裂引張強度	N/mm ²	3.31	2.72	2.38
直接引張強度	N/mm ²	2.43	2.66	1.57

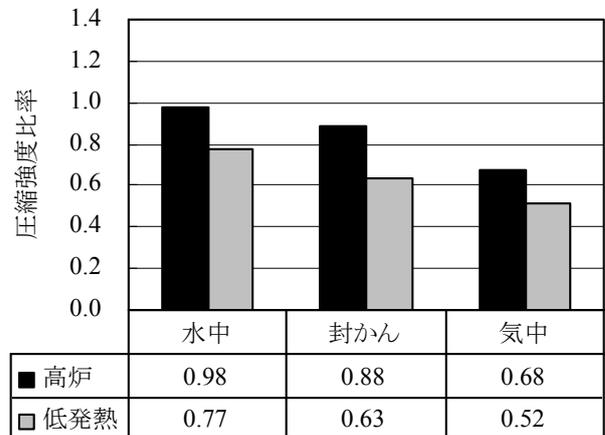


図-8 圧縮強度の比較（28日，普通セメント=1.0）

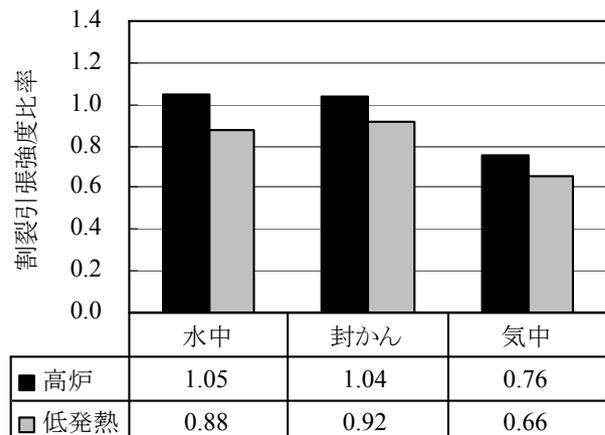


図-9 割裂引張強度の比較（28日，普通セメント=1.0）

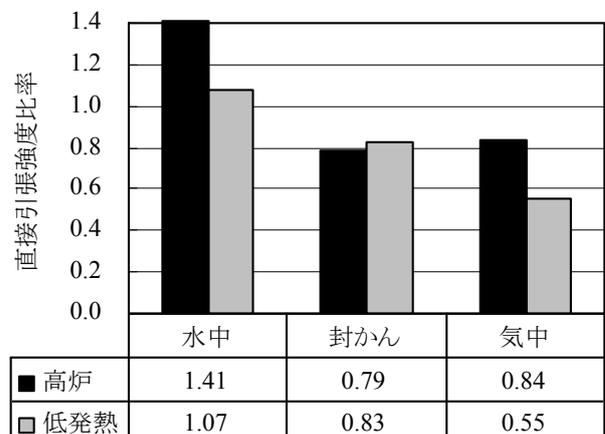


図-10 直接引張強度の比較（28日，普通セメント=1.0）

引張ヤング係数と圧縮ヤング係数との関係を図-12に示す。直接引張試験によって求めた引張ヤング係数と、圧縮強度試験によって求めたヤング係数との関係は、普通養生の場合において引張ヤング係数の方が約5%小さく、気中養生の場合において引張ヤング係数の方が約20%小さい結果となった。

以上の結果から、引張ヤング係数は圧縮ヤング係数に比べて若干小さくなる傾向を示すものの、標準養生した

表-6 試験結果 (シリーズ2)

特性	単位	養生	3日	7日	14日	28日
圧縮ヤング係数	kN/mm ²	2-低-水	22.9	26.4	29.7	32.6
		2-低-気	18.0	19.4	20.0	20.8
引張ヤング係数	kN/mm ²	2-低-水	22.1	24.1	29.8	30.9
		2-低-気	13.5	18.4	15.8	15.6

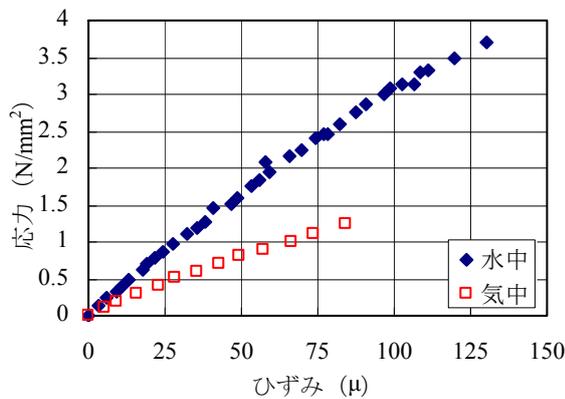


図-11 ひずみと引張応力の関係

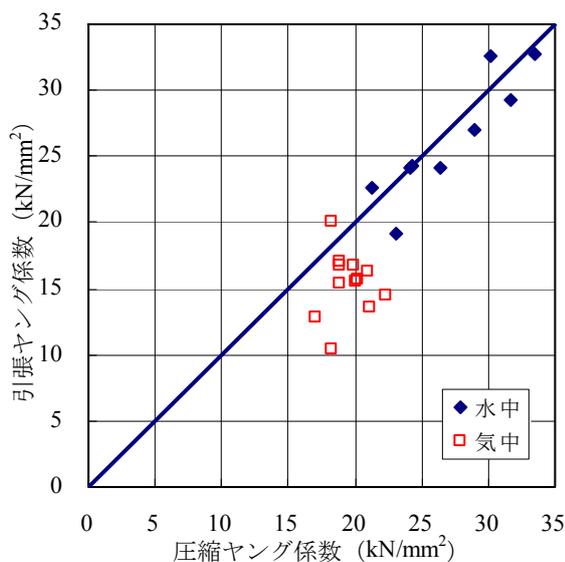


図-12 圧縮ヤング係数と引張ヤング係数の関係

場合には、引張も圧縮とほぼ同等であると思われる。

5. まとめ

本研究では、新しく提案した直接引張試験装置を用いてセメント種別および養生条件を変化させた場合の強度特性および変形特性について検討を行い、以下に示すような知見を得た。

- (1) 本検討で提案した直接引張試験装置は、比較的容易にコンクリートの引張強度を得ることが可能であると思われる。
- (2) 直接引張試験では、コンクリートの引張強度を直接得ることでセメントと骨材の界面の影響が考慮されること、供試体に曲げが作用することなくほぼ試験区間内で破断していることなどにより、従来の割裂引張試験よりも実際に近い引張特性を把握することが可能と思われる。
- (3) 高炉セメントを用い水中養生した場合の直接引張強度は、普通セメントよりも高い引張抵抗性を有する結果となった。
- (4) 高炉スラグ微粉末を用いたセメントを使用したコンクリートの圧縮強度、直接引張強度等の力学特性は、普通セメントより養生方法の相違の影響を受けやすい結果となった。
- (5) 引張ヤング係数は圧縮ヤング係数に比べ若干小さくなる傾向を示したものの、標準養生した場合には、引張も圧縮もほぼ同等であると思われる。

参考文献

- 1) 吉本彰編：コンクリートの変形と破壊，学献社，1990.7
- 2) 秋田宏ほか：コンクリートの直接引張試験方法における4つの誤解，コンクリート工学論文集，第16巻，第1号，pp.77-85，2005.1
- 3) 青木優介ほか：直接引張試験で測定したコンクリートの引張ヤング係数と引張強度，コンクリート工学年次論文集，vol.29，No.1，2007
- 4) A.M.Neville，三浦尚：ネビルのコンクリートバイブル，技報堂出版，2004.6
- 5) 竹村和夫，戸川一夫，笠原篤・庄谷征美編：建設材料，森北出版，1998.5
- 6) 高木努ほか：低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いた構造物施工における温度特性及び中性化速度の確認，土木学会第63回年次学術講演会，pp891-892，2008.9
- 7) 株式会社デイ・シイ：技術資料，2008.12