

論文 各種セメントを用いたコンクリートの引張特性

網島 隆将*1・井上 量介*2・満木 泰郎*3・溝淵 利明*4

要旨：本研究では、ドックボーン型の直接引張試験装置を用いて、各種セメントの引張特性及び変形特性について検討を行った。その結果、高炉セメント B 種は、初期乾燥を受けることにより、直接引張強度および引張ヤング係数の発現が著しく低下することが明らかとなった。また直接引張試験より、セメントの種類によっては、引張強度よりも低い応力で、ひび割れが発生する可能性があることがわかった。

キーワード：直接引張試験, 引張強度, 引張ヤング係数, 高炉セメント, 伸び能力

1. はじめに

コンクリート構造物に発生する収縮ひび割れは、誘発要因が大きい程、また抵抗要因が小さい程生じやすい。誘発要因としては、水和熱や熱膨張係数、自己収縮や乾燥収縮等に起因する収縮ひずみ、ヤング係数などが挙げられ、抵抗要因としては、引張強度や伸び能力、破壊エネルギーなどが挙げられる。

これらのコンクリートの特性値は、ひび割れ発生やひび割れ幅の検討を行う上で欠かすことのできない重要なパラメーターであり、精度よい推定を行うことが、収縮ひび割れの予測・制御を行う上での重要な鍵といえる。

本研究では、収縮ひび割れの予測技術の発展に資することを目的とし、若材齢コンクリートの特性値、とりわけ引張特性、ならびに変形特性の傾向を正しく把握することを試みたものである。

コンクリートの引張強度は、一般に $\phi 150\text{mm}$ の円柱供試体を用いた割裂引張試験によって、間接的に求められる。しかし、割裂引張試験は円柱供試体を横に置いて上下より圧縮荷重を加えているため、載荷点付近で圧縮応力が作用し、一様な引張応力が生じない場合があり、粗骨材とモルタルマトリックスとの遷移領域における付着力を十分に考慮していないといった問題点がある。また、割裂引張試験は引張変形を測定できないため、引張ヤング係数や伸び能力の限界値を得ることはできない。

それに対し、直接引張試験は、引張強度と引張変形を同時に得られるという利点があるものの、試験方法は各種提案されており¹⁾、統一された試験方法は未だに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や²⁾、割裂引張強度の方が大きいとするもの^{3), 4)}、直接引張強度は割裂引張強度とほぼ同等とするもの⁵⁾とがあり、統一的な見解が得られていないと判断される。

一方、最近深刻化しつつある地球環境問題に対応すべく、持続的な経済発展を可能とする循環型社会の形成が、世界的な課題として認識されつつある中で、1980年代以降、高炉セメントの需要が増加している。とりわけスラグ混入量が30%から60%の高炉セメント B 種は、セメント製造時の燃料原単位が普通セメントに比べて約45%、電力の消費量も約15%少なく、環境負荷低減が期待できる。しかしながら、高炉セメントは初期強度の改善を行ったことにより、コンクリートの断熱温度上昇量および自己収縮が大きくなることが知られており、施工条件等によっては、収縮ひび割れの危険性が大きくなる場合がある。このような高炉セメントの問題点を改善し、ひび割れ抵抗性を高めるべく、高炉セメントの比表面積、高炉スラグ微粉末の置換率および石膏の量を JIS の範囲内で調整した低発熱・収縮抑制型高炉セメント B 種(以後 MKCⅢと称す)が開発され実構造物への評価が行われるようになってきている⁶⁾。今後、こういった高炉スラグセメントを利用する際には、その諸特性を十分理解した上で、設計・施工が行われる必要がある。これまでに、高炉スラグセメントの諸特性として、発熱特性や自己収縮特性、強度特性に関する評価が行われている^{6), 7)}。しかし、強度特性に関する試験では圧縮強度試験が検討されている場合が多く、引張強度試験を行う場合であっても、割裂引張試験のみを行うことが多い。

以上のような背景を踏まえ、本研究ではドックボーン型の直接引張試験装置を導入し、各種セメントの若材齢時コンクリートにおける引張特性及び変形特性について実験的検討を行った。

2. 実験の概要

2.1 実験計画

本研究では、コンクリートの力学特性を正しく評価す

*1 法政大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 法政大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

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

*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)

ることを目的として、各検討ケースに対し、直接引張試験、割裂引張試験、圧縮強度試験を行った。これらの試験を行う際、材料特性に影響を及ぼす因子としては、以下が挙げられる。

- a) コンクリートの使用材料および配合の違い
- b) 養生方法の違い(乾燥の影響)
- c) 載荷速度の違い

これらに対し、本研究では主として a) について検討を行うこととし、高炉セメントについてのみ b) の検討も行った。

a) に対する検討は、普通セメント、早強セメント、MKCⅢ、高炉セメント B 種の計 4 種類のセメントを用いたコンクリートに対し、水セメント比 60%、50%、40%、30% の 4 水準について実験を行った。なお、養生はすべて水中養生とした。また、b) に対する検討は、前述の高炉セメント B 種について、同一配合にて気温 20℃、湿度 60%の気中養生を加えて行った。検討ケースを表-1 に示す。なお、試験材齢はいずれのケースにおいても 3 日、7 日、14 日、28 日とした。

2.2 使用材料および配合

本実験で使用したセメントおよび骨材の物性を表-2 に示す。なお、MKCⅢは既に述べたように高炉セメント B 種の規格内で比表面積を小さくし、高炉スラグ量および SO₃ 量を増加させた低発熱・収縮抑制型の高炉セメント B 種である。また、対象としたコンクリートは、スランブ 8cm、目標空気量 4.5%とした。表-3 に、水セメント比 50%におけるコンクリートの配合を示す。AE 減水剤については、標準型のポゾリス No.70 を使用した。なお、水セメント比 30%のものについては、所定のスランブを得るために、JIS A 6204 の高性能 AE 減水剤 標準形(I 種)規定に適合するレオビルド SP8N を使用した。

2.3 試験方法

直接引張試験は、写真-1、2 に示す試験装置およびドックボーン型の型枠を使用した。図-1 に試験装置の概要を示す。直接引張試験に用いる供試体の寸法は 100×100×840mm であり、供試体中央部の試験区間(220mm)に破断を誘導するため、断面積を他の部分よりも小さくしている。また、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曲線は緩やかにしている。

載荷装置は、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の中心部の左右に 60mm の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、載荷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。

割裂引張強度試験は、φ150×200mm の円柱供試体、圧縮強度試験は φ100×200mm の円柱供試体を用いた。

表-1 検討ケース

セメント	養生	水セメント比(%)	略称
普通セメント	水中	30,40,50,60	普通
早強セメント	水中	30,40,50,60	早強
MKCⅢ	水中	30,40,50,60	MKCⅢ
高炉セメントB種	水中	30,40,50,60	高炉
	気中	30,40,50,60	高炉・気

表-2 使用セメントおよび骨材

セメント	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	圧縮強さ (28d)	SO ₃ (%)
普通セメント	3.15	3480	62.8	1.98
早強セメント	3.13	4630	67.0	2.86
MKCⅢ	2.98	3250	42.8	3.78
高炉セメントB種	3.04	4180	63.8	2.40

骨材と産地	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率
陸砂(大井川水系)	2.58	2.34	2.63
硬質砂岩碎石(青梅産)	2.66	0.50	6.75

表-3 コンクリート配合(水セメント比 50%)

セメント	s/a (%)	単位量(kg/m ³)			
		W	C	S	G
普通セメント	41	156	312	740	1094
早強セメント	41	156	312	740	1094
MKCⅢ	44	150	300	800	1048
高炉セメントB種	41	160	320	730	1079



写真-1 直接引張試験装置



写真-2 試験専用型枠

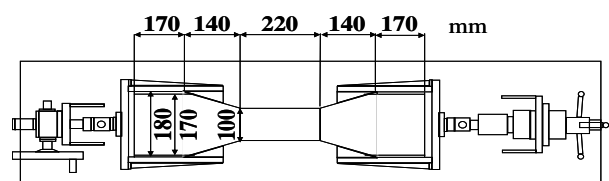


図-1 直接引張試験装置概要

3. 実験結果および考察

3.1 直接引張供試体の破断性状

直接引張試験における破断位置の例を写真-3 に示すとともに、破断面の例を写真-4 に示す。

破断位置に関しては、図-2 に示すように、供試体全 203 本のうち、192 本が試験区間内で破断し、区間外で破断するのは約 4% という結果となった。なお、破断位置は供試体の試験区間 220mm を 5 等分にして評価を行った。

3.2 引張強度

各種セメントの直接引張強度と割裂引張強度の関係を図-3 に示す。また、圧縮強度と割裂引張強度および直接引張強度との関係を、に図-4～図-8 に示す。なお、図中のひび割れ制御 08 は、日本コンクリート工学協会ひび割れ制御指針 2008 の算定式⁸⁾を用いた。

図-3 より、水中養生した場合、割裂引張強度は直接引張試験よりも約 8%、気中養生した場合は約 67%、全体としては約 12% 大きくなる結果となった。これは、青木²⁾らが行った円柱型の直接引張試験における測定結果である、割裂引張強度は直接引張強度よりも 14～24% 小さいとの報告とは異なる結果となった。

割裂引張強度が直接引張強度よりも大きくなる理由としては、粗骨材とモルタルマトリクスとの遷移帯領域の影響が考えられる。これは、コンクリート中に様な引張力が作用している状況下において、粗骨材とモルタルマトリクスとの遷移帯領域が最弱点であると仮定するならば、割裂引張試験では、境界面での付着力を十分に考慮することができないためである。つまり、割裂引張試験では、ひび割れが生じる断面がある程度限定されているのに対し、直接引張試験では、一番弱い断面を選択し得る自由度を有していることが原因であると考えられる。今後は、コンクリート供試体のひび割れ断面における、粗骨材の面積が引張強度に及ぼす影響についても検討すると共に、コンクリート供試体とモルタル供試体での比較検討を行っていく必要があるのではないかと考えられる。

図-4 より、普通セメントを用いた場合には、割裂引張強度は直接引張強度より約 8% 大きく、圧縮強度の発現に伴う割裂引張強度の増加はひび割れ制御指針 08 とほぼ同等であった。

図-5 より、早強セメントを用いた場合には、割裂引張強度は直接引張強度より約 14% 大きく、圧縮強度の発現に伴う引張強度の増加傾向が、直接引張では小さいことから、早強セメントの引張強度は、材齢初期に強度が発現すると、その後ほとんど増加しないと考えられる。

図-6 より、MKCⅢを用いた場合には、割裂引張強度と直接引張強度はほぼ同等であり、両者ともひび割れ制



写真-3 供試体破断状況

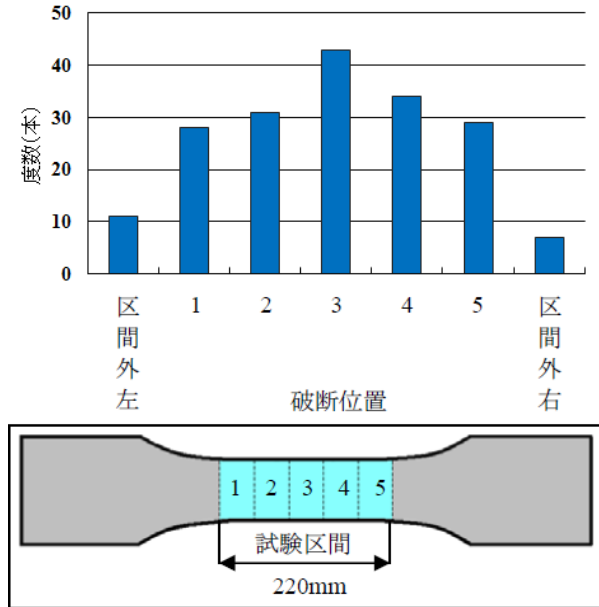


図-2 供試体破断位置の分布



写真-4 供試体破断面

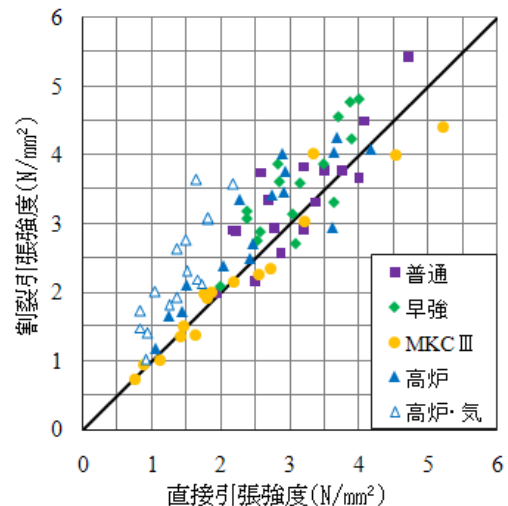


図-3 割裂引張強度と直接引張強度の関係

御指針 08 にきわめて近い結果となった。

図-7 より、高炉セメント B 種を用い水中養生した場合には、割裂引張強度は直接引張強度より約 13%大きく、圧縮強度の発現に伴う引張強度の増加傾向は両者ともにほぼ線形に近い結果となった。また、割裂引張強度はひび割れ制御指針 08 にきわめて近い結果となった。

図-8 より、高炉セメント B 種を用い気中養生した場合には、水中養生した場合と比べ、引張強度の進展が低下する結果となった。高炉スラグ微粉末は潜在水硬性があり、セメントの一部を高炉スラグ微粉末で置換したコンクリートは、養生期間を長くするとともに、養生を念入りに行う必要があることが一般に知られており、試験結果も同様の傾向を示していると考えられる。しかし、同じ水中養生した場合であっても、割裂引張強度と直接引張強度の強度発現には著しい差が見られ、圧縮強度が 60(N/mm²)に達したときの引張強度は約 50%の強度差が生じる結果となった。このことは、高炉セメント B 種を用いた場合、初期養生を十分に行わないと、強度増進が期待できないことを示すものであり、引張強度として割裂引張試験の実験値を用いる際には、許容値・設計値の定め方に十分注意する必要があると思われる。また、圧縮強度の増進に伴って、割裂引張強度と直接引張強度の差が顕著になった理由としては、気中養生することにより、供試体の表面から水分が蒸発し、表面部における引張強度の低下が大きくなるからではないかと考えられる。つまり、割裂引張試験は乾燥の影響を受ける円柱供試体の表面から離れた位置でひび割れが起こるのに対し、直接引張試験は、乾燥の影響を受ける供試体表面の中で、ひび割れの生じる断面位置の自由度が高いため、強度差が顕著に現れたと考えられる。

3.3 ヤング係数

各種セメントの直接引張試験によって得られた接線引張ヤング係数と圧縮強度試験により得られた割線圧縮ヤング係数の関係を図-9 に示す。また、直接引張試験によって得られた接線引張ヤング係数と圧縮強度との関係を図-10~図-14 に示す。

図-9 より、水中養生した場合のヤング係数は、MKC IIIセメントで多少のバラツキがあるものの、圧縮ヤング係数と引張ヤング係数はほぼ等しい結果となった。

図-10 より、普通セメントを用いた場合には、圧縮ヤング係数は、引張ヤング係数よりも約 7%大きい結果となった。

図-11 より、早強セメントを用いた場合には、圧縮ヤング係数は、引張ヤング係数よりも約 4%大きく、ヤング係数の増加割合は両者とも、土木学会式⁹⁾によるヤング係数の増加割合よりも小さい結果となった。

図-12 より、MKCIIIを用いた場合には、圧縮ヤング

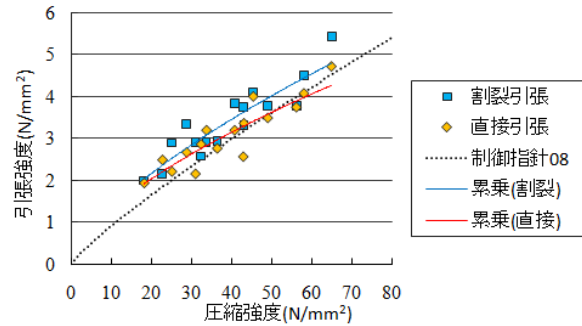


図-4 引張強度と圧縮強度(普通セメント)

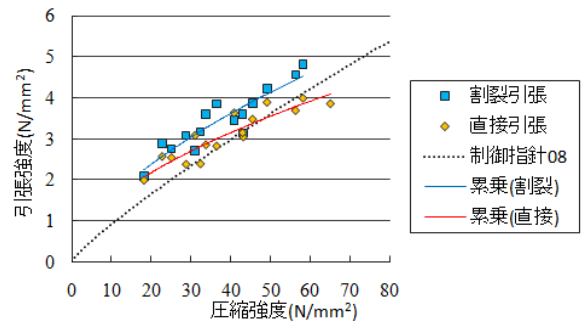


図-5 引張強度と圧縮強度(早強セメント)

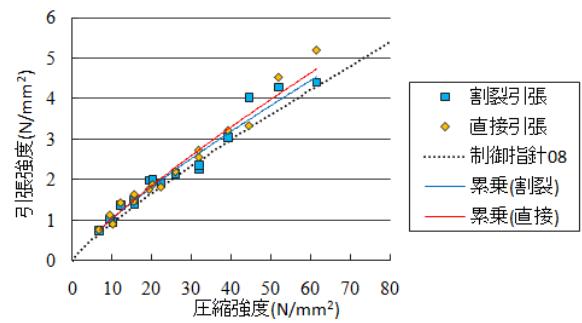


図-6 引張強度と圧縮強度(MKCIII)

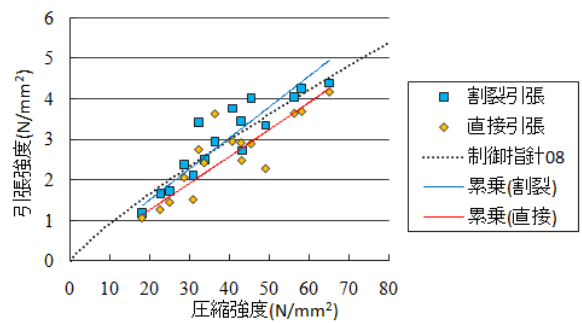


図-7 引張強度と圧縮強度(高炉セメント)

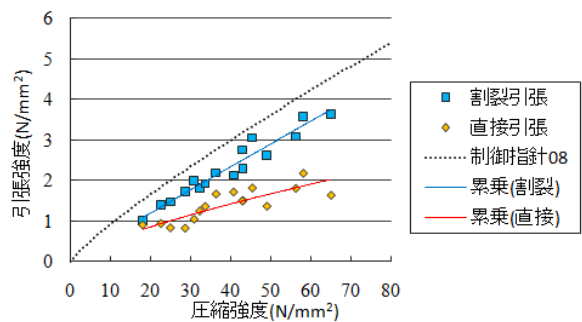


図-8 引張強度と圧縮強度(高炉セメント・気中)

係数と引張ヤング係数はほぼ同等であり、ヤング係数の増加割合は、土木学会式によるヤング係数の増加割合にきわめて近い結果となった。

図-13より、高炉セメントを用いた場合には、圧縮ヤング係数と引張ヤング係数はほぼ等しい結果となった。ヤング係数の算定方法が、引張ヤング係数と圧縮ヤング係数で異なることによる影響や、ヤング係数を算定する際の応力レベルが異なることによる影響は明らかでないが、現状では、養生を十分に行った場合であれば、収縮応力を予測する際に、圧縮ヤング係数を用いても問題はないと考えられる¹⁰⁾。

また、図-13および図-14より、気中養生した場合の高炉セメントのヤング係数は、水中養生したときに比べ圧縮ヤング係数がわずかに小さくなっているのに対し、引張ヤング係数は著しく低下している。さらに、圧縮強度レベルが高くなっても、引張ヤング係数がほぼ一定となる結果となった。

養生条件が引張ヤング係数に大きな影響を及ぼした理由としては、引張強度と同様に、遷移帯領域の影響が考えられる。コンクリートのヤング係数に影響する因子として骨材、モルタルマトリックス、遷移帯領域の三相材料としてのモデル化が適切であると仮定するならば、他の相よりも脆弱である遷移帯領域が、乾燥の影響を大きく受けたことにより、養生条件が引張ヤング係数に影響を及ぼしたものと考えられる。

また、圧縮強度レベルが高くなっても、引張ヤング係数がほぼ一定となることについては、低下の違いはあるものの、下村¹¹⁾らが行った角柱型一軸直接引張の試験結果において、引張ヤング係数が乾燥開始1.6日で10%程度低下し、それ以上乾燥を継続させても低下率は増大しないとする報告と同じ傾向であった。収縮拘束応力等を予測する際に、ヤング係数を使用する場合には、養生条件に注意する必要があると思われる。

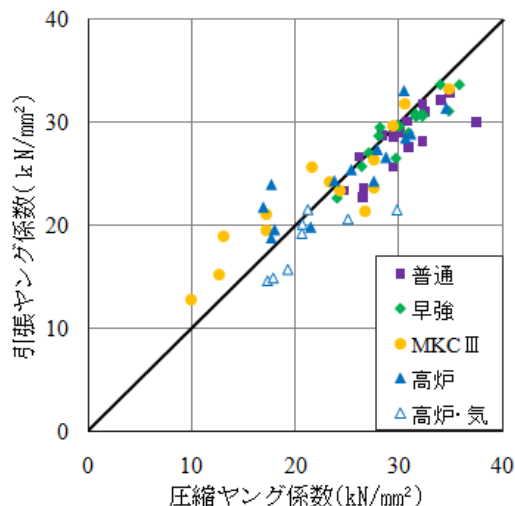


図-9 圧縮ヤング係数と引張ヤング係数の関係

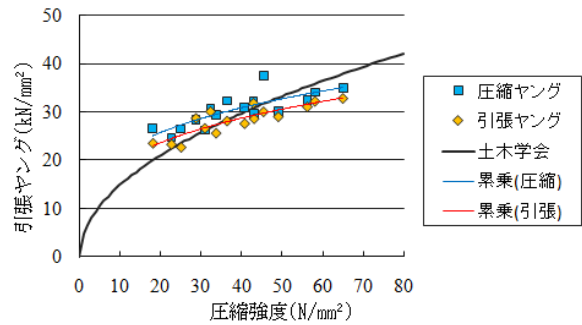


図-10 圧縮強度と引張ヤング(普通セメント)

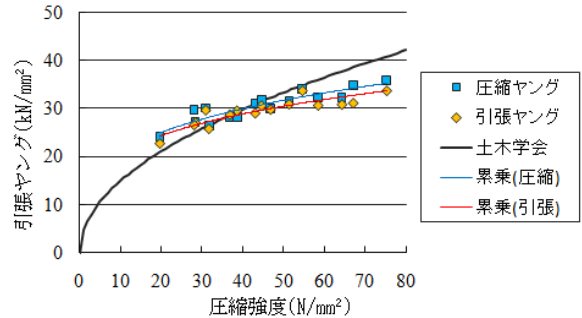


図-11 圧縮強度と引張ヤング(早強セメント)

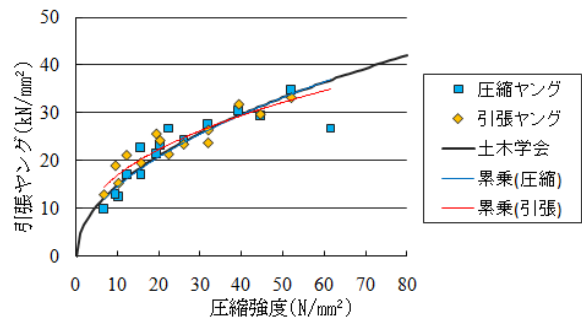


図-12 圧縮強度と引張ヤング(MKCⅢ)

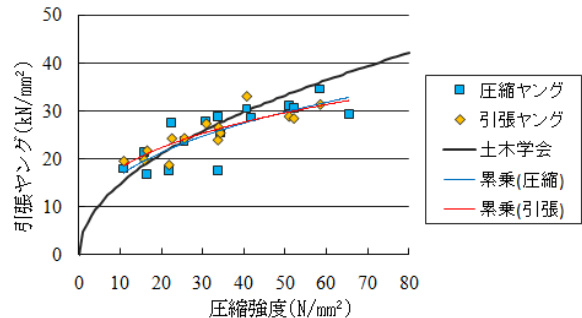


図-13 圧縮強度と引張ヤング(高炉セメント)

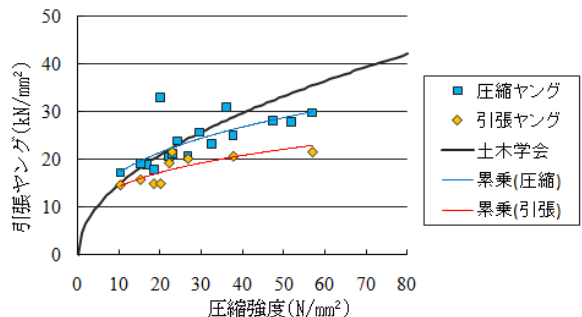


図-14 圧縮強度と引張ヤング(高炉セメント・気中)

3.4 ひび割れ発生限界

直接引張試験における破壊時の引張ひずみと引張強度との関係を図-15に示す。

図-15より、早強セメントおよび高炉B種セメントにおいては、引張ひずみが130 μ 前後に達すると、引張強度の増進に伴う引張ひずみの増進が小さくなる結果となった。このことは、コンクリートの破断が引張強度よりも低い応力で発生する可能性があることを示すものであり、静的な短時間強度試験下においてよく適用されている引張応力が引張強度を超えた場合にひび割れ発生が生じるというだけで、ひび割れ発生基準とするのではなく、破壊時のひずみも考慮して、ひび割れ発生の評価を行う必要があると思われる。

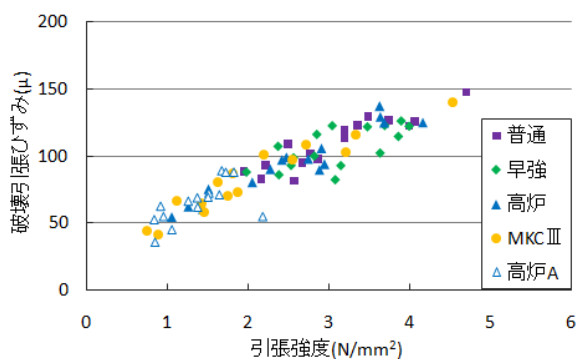


図-15 引張強度と破壊ひずみの関係

4. 結論

本研究では、若材齢コンクリートの引張特性および、ひび割れ発生条件について、主として直接引張試験装置を用いて実験的検討を行った。検討を行う際には、使用するセメントの種類、養生条件、圧縮強度レベルの影響に着目した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 水中養生したコンクリートの割裂引張強度は直接引張強度より約5%大きい。
- (2) 高炉セメントは初期乾燥を受けることにより、直接引張強度の発現が著しく低下し、圧縮強度40N/mm²以上の領域では、水中養生した場合と比べ、50%程度の強度しか出ない結果となった。
- (3) 気中養生した場合の高炉セメントの引張強度発現は、割裂引張強度と直接引張強度で著しい差が見られ、圧縮強度60N/mm²に達したときには、約50%の強度差が生じる結果となった。
- (4) 水中養生をした場合のヤング係数は、圧縮強度70N/mm²以下の範囲内であれば、引張ヤング係数と圧縮ヤング係数はほぼ同等である。

- (5) 初期乾燥を受けた高炉セメントは、引張ヤング係数が低下し、その後、圧縮強度が増進してもほぼ一定である。
- (6) セメントの種別によっては、引張強度に達する前に伸び能力の限界に達する可能性があり、ひび割れ発生条件の取扱いには注意する必要がある。

参考文献

- 1) 秋田宏, 小出英夫, 外門正直: コンクリートの直接引張試験における実験的方法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.643-648, 1999
- 2) 青木優介, 平野雄大, 鈴木孝治, 嶋野慶次: 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報告集, Vol.29, No.1, pp.531-536, 2007
- 3) 井上量介, 網島隆将, 皆本晃, 溝渕利明: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.31, No.1, pp.421-426, 2009
- 4) A.M.Neville, 三浦尚: ネビルのコンクリートパイプ, 技報堂出版, 2004.6
- 5) 吉本彰編: コンクリートの変形と破壊, 学献社, 1990.7
- 6) 大友健, 府川徹, 安藤公一, 柳栄治, 廣島明男, 宮澤伸吾: 収縮を抑制した高炉セメントB種を用いた低発熱コンクリートの特性と実構造物への適用, 大成建設技術センター報, 第38号, pp.26-1-26-10, 2005
- 7) 富山悟, 二戸信和, 鈴木章市, 神崎隆男, 久保田賢: 低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いたコンクリートの基礎的性質, 日本建築学会学術講演概要集(九州), 2007.8
- 8) 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひび割れ制御指針2008, 2008.11
- 9) 土木学会: コンクリート標準示方書[施工編](2002年制定), 2002.3
- 10) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 2006.2
- 11) 青木優介, 下村匠: 乾燥収縮ひび割れ抵抗性評価のためのコンクリートの引張変形特性およびひび割れ発生条件に関する検討, 土木学会論文集, Vol-59, pp.135-148, 2003.5