

報告 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

青木 優介^{*1}・平野 雄大^{*2}・鈴木 孝治^{*2}・嶋野 慶次^{*3}

要旨：簡易型直接引張試験方法を用いてコンクリートの引張ヤング係数と圧縮ヤング係数、直接引張強度と割裂引張強度を比較した。その結果、割線引張ヤング係数は割線圧縮ヤング係数よりも 9～12%大きかった。直接引張強度は割裂引張強度よりも 14～24%大きかった。割線圧縮ヤング係数が小さくなる理由は、これを算出する際の実験値の応力レベルが割線引張ヤング係数の場合よりも高いためであり、圧縮ヤング係数と引張ヤング係数は本来同等だと考察した。一方、割裂引張強度が小さくなる理由は、別報の指摘どおり、供試体の載荷面の側方より生じる圧縮応力が本来の引張強度を低下させるためだと考察した。

キーワード：引張ヤング係数, 引張強度, 直接引張試験, ひび割れ

1. はじめに

コンクリート部材に導入される収縮拘束応力を予測する場合、コンクリートのヤング係数が必要となる。また、併せてひび割れの発生を予測する場合、コンクリートの引張強度（伸び能力なども考えられる）が必要となる。

この際のヤング係数には、現象の機構から考えて、引張ヤング係数が用いられるべきである。また、引張強度には直接引張強度が用いられるべきである。しかし現状では、引張ヤング係数や直接引張強度については研究例が少なく明確になっていないため、引張ヤング係数は圧縮ヤング係数により、直接引張強度は割裂引張強度により代用されている¹⁾。

従来、引張ヤング係数は圧縮ヤング係数と同等、直接引張強度は割裂引張強度と同等と取り扱われてきたが、その真偽性について統一した見解は得られていない。本報告では、著者らが開発中の簡易型直接引張試験方法を用いて直接引張試験を行い、同時に行う圧縮試験、割裂引張試験の結果と合わせて、引張ヤング係数と圧縮ヤング係数の関係、直接引張強度と割裂引張強度の関係について検討する。

2. 既往の見解と現状の課題

2.1 引張ヤング係数と圧縮ヤング係数の関係

引張ヤング係数と圧縮ヤング係数の関係に関する既往の見解を表-1にまとめる。ここでは、土木学会については土木分野全般、建築学会については建築分野全般、Nevilleの見解については国外の見解の代表例として扱っている。

表-1より、コンクリートの引張ヤング係数と圧縮ヤング係数については、同等として取り扱うことができるものの、その真偽性については、統一した見解が得られていないと判断される。

表-1 引張ヤング係数と圧縮ヤング係数の関係に関する既往の見解

報告	見解
土木学会 ²⁾	引張応力に対する弾性係数は圧縮応力に対するものより幾分小さいが、簡単のためにほぼ等しいとする。
建築学会 ¹⁾	(収縮応力予測には)本来、引張ヤング係数を用いるべきだが、研究例が少なく明確でないので、圧縮ヤング係数で代用する。
Neville ³⁾	圧縮ヤング係数と引張ヤング係数の両者は同等。

*1 木更津工業高等専門学校 環境都市工学科講師 工博 (正会員)

*2 木更津工業高等専門学校専攻科 環境建設工学専攻

*3 木更津工業高等専門学校 技術教育支援センター (正会員)

2.2 直接引張強度と割裂引張強度の関係

直接引張強度と割裂引張強度の関係に関する既往の見解を表-2にまとめる。これについては、土木学会の示方書や建築学会の指針に該当する見解が記されていないため、既往の文献より抜粋した見解を示している。

表-2より、コンクリートの直接引張強度と割裂引張強度については、引張ヤング係数と圧縮ヤング係数の関係以上に、統一的な見解が得られていないと判断される。

2.3 統一的な見解を得るための課題

引張ヤング係数と圧縮ヤング係数の関係、また直接引張強度と割裂引張強度の関係について統一的な見解を得るためには、以下の課題をクリアしなければならない。

- ① 理想的な直接引張試験方法を確立する。
- ② 様々な条件下で多数の試験結果を得る。
- ③ 供試体の乾燥条件やコンクリートの打設方向などに注意して実験を行う。

最大の課題は、①に挙げた、理想的な直接引張試験方法を確立することである。理想的な直接引張試験方法とは、载荷中の供試体に一切偏心が生じず、破断は必ず試験区間内において生じるような試験方法を指す。本来、このような試験方法が確立されてから②の課題に取り組むべきである。しかし、理想的な直接引張試験を行おうとすれば、装置や作業は複雑化し、多数本の試験は困難になる。よって現状では、偏心や試験区間外での破断を最小限に留めることのできる簡易な試験方法を用いて実験結果を蓄積し、併せて試験方法を改善していくことが現実的な選択だと考えられる。③は、実験を行う際の注意点である。乾燥を受けた直接引張供試体の引張ヤング係数は5~10%、直接引張強度は20~30%低下する⁶⁾。また、载荷方向と平行に打設したコンクリートの直接引張強度は、垂直に打設した場合に比べて20%程度低下すると指摘されている⁴⁾。それぞれの実験値を比較しようとするなら、これらの注意点を意識して実験を行わなければならない。

表-2 直接引張強度と割裂引張強度の関係に関する既往の見解

報告	見解
吉本ら ⁴⁾	コンクリートの直接引張強度と割裂引張強度は、2.0~5.0MPaの範囲ではほぼ同等である。
秋田ら ⁵⁾	割裂引張強度は直接引張強度よりも9%あるいは13%程度小さい。
NeVile ³⁾	割裂引張強度の方が直接引張強度よりも5~12%大きい。

3. 実験の概要

3.1 実験目的と実験構成

本実験の目的は、2.3節に挙げた課題を意識しながら直接引張試験、圧縮試験、割裂引張試験を行い、引張ヤング係数と圧縮ヤング係数の関係、および直接引張強度と割裂引張強度の関係について見解を加えることである。本実験は、以下の3項目から構成される。

- ① 簡易型直接引張試験による引張ヤング係数と直接引張強度の測定
 - ② 圧縮試験による圧縮ヤング係数、割裂引張試験による割裂引張強度の測定
 - ③ 打設方向の異なるコンクリートの圧縮ヤング係数の測定
- ①と②が本実験の主となる。③は直接引張試験と圧縮試験の間でコンクリートの打設方向が異なることへの対策である。

3.2 各実験項目の概要

(1) 簡易型直接引張試験による引張ヤング係数と直接引張強度の測定

本実験項目の実験シリーズ、供試体の本数、養生条件、試験材齢を表-3に示す。また、実験に用いたコンクリートの配合を表-4に示す。

実験はシリーズIとシリーズIIに分かれる。これは、双方のシリーズで用いた直接引張試験方法が異なるためである。シリーズIの実験に用いた直接引張供試体の概要、载荷治具、最も多かった破断状況をそれぞれ図-1(a)(b)(c)に

示す。また、シリーズⅡの実験に用いた直接引張供試体の概要、荷重治具、最も多かった破断状況をそれぞれ図-2(a)(b)(c)に示す。シリーズⅠの供試体に対して、シリーズⅡの供試体の変更点は、

- ① 供試体の上下外周にエポキシ系接着剤で接着していた硬質塩化ビニル管(内径100mm, 厚さ7mm)を取り外した。
- ② 荷重伝達のためにコンクリートに埋め込む荷重治具付属の寸切りボルトを3本から4本に増やした。
- ③ 荷重治具付属の寸切りボルトの先端を尖らせ、その部分に溝を彫りこんだ⁷⁾。

ことである。詳細な説明は割愛するが、これらの変更により、シリーズⅠでは20%だった供試体の試験区間内での破断確率をシリーズⅡでは60%まで改善することができた。(試験区間で破断した場合でも直接引張強度に差は現れない。後述の表-8では、試験区間以外で破断した供試体の直接引張強度も同格に扱っている)

一方、Ⅰ・Ⅱシリーズ共通の供試体型枠の様子を写真-1に示す。コンクリートの打設方向が荷重方向と直交するように、硬質塩化ビニル管の型枠に空けた溝(幅30mm)からコンクリートを打設する形になっている。このことにより、打設方向と荷重方向が直交する割裂引張供試体との直接比較が可能となる。一方、圧縮供試体の打設方向は荷重方向と平行なので、引張ヤング係数と圧縮ヤング係数を比較する場合には、後述の本節(3)に示す対策が必要となる。なお、本型枠では、断面が真円とならない、あるいは底部に粗骨材が集中し上部にはエントラップドエアが集中すると懸念される。そこで試験終了後の供試体破断面を確認した。シリーズⅠ・Ⅱの供試体の破断面例を写真-2に示す。断面は真円と扱って問題ない。粗骨材も均等に分布している。エントラップドエアの集中は生じるが、変形や破断への影響は確認されなかった。

荷重中の測定項目は、リアルタイムな荷重と供試体試験区間の引張ひずみである。荷重は、

表-3 実験項目(1)の構成

実験シリーズ	I	II
直接引張試験	写真-1	写真-2
供試体本数	10本	10本
養生条件	室温20±1.0℃, 封かん養生	
試験材齢	7日	

表-4 コンクリートの配合

シリーズ	単位量(kg/m ³)					圧縮強度(N/mm ²)
	W	C	S	G	AE剤	
I	170	340	705	1071	0.017	22.7
II						26.3

※圧縮強度は圧縮ヤング係数と同時に測定

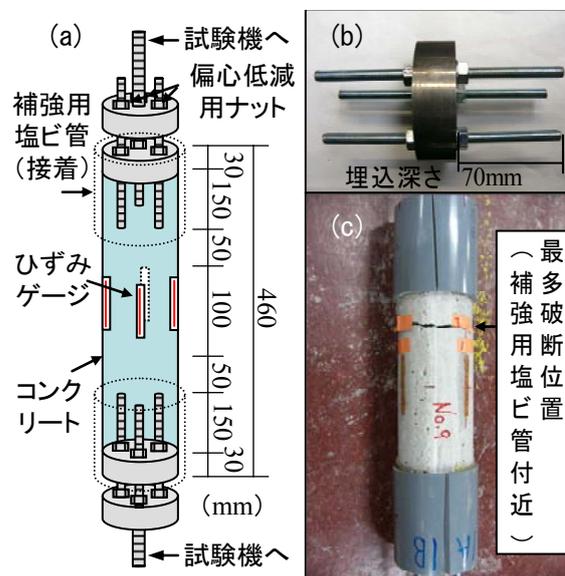


図-1 シリーズⅠの直接引張試験供試体

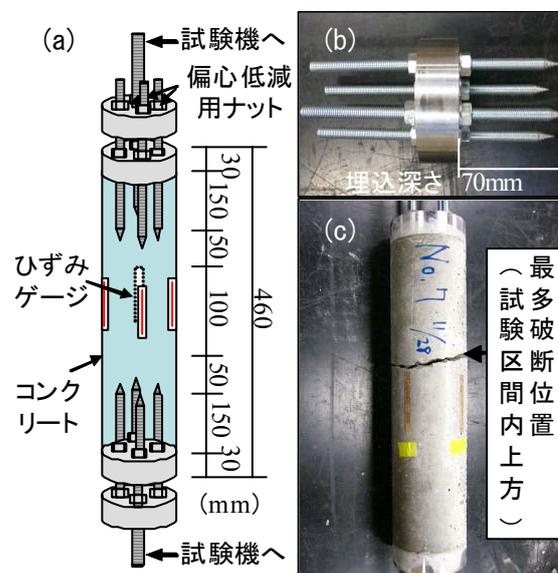


図-2 シリーズⅡの直接引張試験供試体

載荷試験機付属の荷重計により測定した。一方、試験区間の引張ひずみは、4方向(90°ごと)に長軸方向に貼り付けた計4枚のひずみゲージ(測定長60mm)により測定した。なお、この4方向のひずみ値が、荷重の偏心の状況を示すパラメータとなる。載荷中、4方向のひずみ値の差が開いてきたと確認すると、荷重伝達用の寸切りボルト(シリーズIは3本、シリーズIIは4本)を固定するナットを微妙に回転させ、全てのひずみ値が揃うようにして、偏心を低減させる。例として、シリーズIIの供試体における引張応力-ひずみ関係の典型例を図-3に示す。載荷中にひずみ値が揃えられ、偏心が低減されている様子が見える。

載荷は荷重制御とし、割裂引張試験と同等になるよう、毎分0.4~0.5N/mm²となる応力速度で載荷した。なお、偏心低減のための作業中は載荷をストップさせるので、その間1分程度のタイムラグが生じる。

(2) 圧縮試験による圧縮ヤング係数、割裂引張試験による割裂引張強度の測定

本実験項目の実験シリーズ、供試体の本数、養生条件、試験材齢を表-5に示す。I・IIのシリーズとも、直接引張試験I・IIのシリーズと同時並行しており、用いたコンクリートの配合も表-4と同じである。

(3) 打設方向の異なるコンクリートの圧縮ヤング係数の測定

前述のとおり、本実験の直接引張供試体と圧縮供試体では型枠へのコンクリートの打設方向が異なる。そのため、双方の試験から得られるヤング係数を比較するためには、打設方向の違いがヤング係数に与える影響を調べておく必要がある。ここでは、載荷方向と平行に打設する通常の圧縮供試体と、写真-3に示す型枠を用いて直交に打設する圧縮供試体を5本ずつ作製し、それぞれの圧縮ヤング係数を測定することで、打設方向の違いによる影響を調べることにした。養生条件、試験材齢は表-5と同じとした。用いたコンクリートの配合は表-4と同じとした。



写真-1 直接引張試験供試体の型枠



写真-2 直接引張試験供試体の破断面

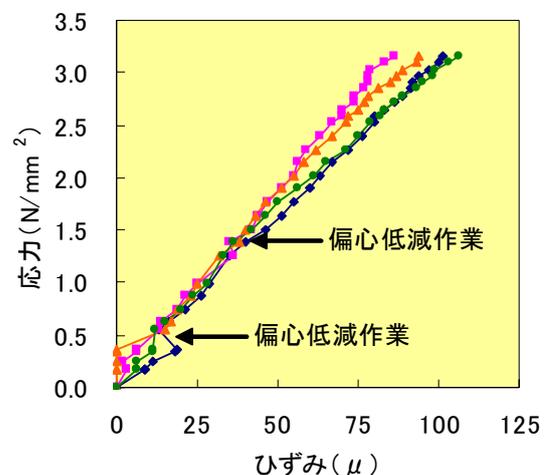


図-3 引張応力-ひずみ関係の例

表-5 実験項目(2)の実験構成

実験シリーズ	I	II
圧縮試験 φ100*200mm	JIS A 1149 コンクリートの静弾性係数試験方法	
割裂引張試験 φ100*100mm	JIS A 1113 コンクリートの割裂引張試験方法	
供試体本数	各10本	各10本
養生条件	室温20±1.0℃, 封かん養生	
試験材齢	7日	

写真-3 載荷と直交方向に打設する型枠



4. 実験結果および考察

4.1 引張ヤング係数と圧縮ヤング係数の関係

最初に、コンクリートの打設方向の違いが供試体の圧縮ヤング係数に与える影響について確認する。3.2 節(3)の実験結果を表-6 に示す。表中の割線圧縮ヤング係数 = (圧縮強度の 1/3 点の応力 - 圧縮ひずみ 50μ 時点の応力) / (圧縮強度の 1/3 点のひずみ - 50μ) である。表より、各 5 本の平均値は同等であり、本実験の範囲内では、打設方向の違いによる圧縮ヤング係数の相違は生じないと判断される。

この結果から、直接引張試験により得られた引張ヤング係数と圧縮試験により得られた圧縮ヤング係数を直接比較することができる。シリーズ I・II の試験で得られた引張ヤング係数と圧縮ヤング係数を表-7 に示す。なお、表中の割線引張ヤング係数 = (引張強度の 1/3 点の応力 - 引張ひずみ 10μ 時点の応力) / (引張強度の 1/3 点のひずみ - 10μ) である。直接引張試験により得られた割線引張ヤング係数は、圧縮試験で得られた割線圧縮ヤング係数よりもシリーズ I で約 12%、シリーズ II で約 9% 大きかった。

従来同等と扱われてきた割線圧縮ヤング係数が割線引張ヤング係数よりも 10% 程度小さくなった理由について、割線圧縮ヤング係数の算出に用いる実験値の応力レベルの面から考察した。

表-6 打設方向の異なるコンクリートの圧縮ヤング係数の比較

打設方向	供試体 No.	割線圧縮ヤング係数(N/mm ²)	平均圧縮ヤング係数(N/mm ²)
載荷方向に平行	1	35,951	34,806
	2	32,988	
	3	33,970	
	4	35,033	
	5	36,089	
載荷方向に直交	1	36,569	34,709
	2	33,795	
	3	33,308	
	4	34,728	
	5	35,147	

表-7 には、圧縮試験における初期圧縮ヤング係数 (= 応力が約 1.3N/mm^2 に達した時点での応力 / その時点のひずみ) も示している。これと割線引張ヤング係数を比較すると、初期圧縮ヤング係数の方が若干小さいものの、両者の値はほぼ同等になる。このことから、圧縮と引張の違いはあっても、同じ応力レベルの実験値から算出したヤング係数は一致する。すなわち、コンクリートの圧縮ヤング係数と引張ヤング係数は、本来同等であるといえる。割線圧縮ヤング係数が 10% 程度小さくなる理由は、その算出に際し、割線引張ヤング係数よりも高い応力レベルの実験値を用いているためだと考察される。

表-7 引張ヤング係数と圧縮ヤング係数の比較

供試体 No.	シリーズ I			シリーズ II		
	割線引張ヤング係数(N/mm ²)	割線圧縮ヤング係数(N/mm ²)	初期圧縮ヤング係数(N/mm ²)	割線引張ヤング係数(N/mm ²)	割線圧縮ヤング係数(N/mm ²)	初期圧縮ヤング係数(N/mm ²)
1	32,634	28,571	31,003	35,789	31,023	30,004
2	32,971	28,276	31,847	32,384	32,283	35,828
3	33,291	28,738	29,241	31,556	31,946	36,324
4	29,625	28,380	33,741	35,740	30,686	36,821
5	30,882	26,976	27,693	37,570	33,876	30,560
6	33,076	27,541	31,529	37,242	37,901	37,715
7	30,797	28,775	31,768	33,590	32,177	31,288
8	31,706	29,412	32,337	37,976	32,095	29,819
9	29,654	27,810	29,033	34,590	31,219	36,710
10	34,297	29,507	30,449	32,639	28,449	29,797
平均	31,893	28,399	30,864	34,908	32,166	33,487

4.2 直接引張強度と割裂引張強度の関係

シリーズⅠ・Ⅱの直接引張試験により得られた直接引張強度と割裂引張強度の比較を表-8に示す。表中の直接引張強度は供試体破断時までに経験した最大応力を破断面の断面積で除した値である。直接引張試験により得られた直接引張強度は、割裂引張強度よりもシリーズⅠで約14%、シリーズⅡで約24%大きかった。直接引張強度が割裂引張強度よりも大きくなる理由について、例えば吉本は、割裂引張供試体の載荷面に側方より生じる圧縮応力が、本来の引張強度を低下させると指摘している⁴⁾。

5. まとめ

本報告内で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 載荷方向に平行・直交にコンクリートを打設した供試体の圧縮ヤング係数は同等であり、打設方向の違いによる圧縮ヤング係数の相違は生じなかった。
- (2) 簡易型直接引張試験により測定したコンクリートの割線引張ヤング係数は、圧縮試験により測定した割線圧縮ヤング係数よりも、シリーズⅠで約12%、シリーズⅡで約9%大きかった。
- (3) 割線引張ヤング係数は、圧縮試験における初期圧縮ヤング係数とほぼ等しかった。このことから、割線圧縮ヤング係数が10%程度小さくなる理由は、その算出に際し、割線引張ヤング係数よりも高い応力レベルの実験値を用いているためである。コンクリートの圧縮ヤング係数と引張ヤング係数は本来同等であると考察した。
- (4) 簡易型直接引張試験により測定したコンクリートの直接引張強度は、割裂引張強度よりも、シリーズⅠで約14%、シリーズⅡで約24%大きかった。この理由として、吉本が指摘するように、割裂引張供試体の載荷面に側方より生じる圧縮応力が、本来の引張強度を低下させることが考えられる。

表-8 直接引張強度と割裂引張強度の比較

供試体 No.	シリーズⅠ		シリーズⅡ	
	直接引張強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	直接引張強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)
1	2.89	2.58	3.18	2.42
2	2.90	2.55	2.87	2.52
3	2.89	2.51	3.36	2.74
4	2.59	2.11	3.16	2.72
5	3.01	2.64	3.04	2.50
6	2.94	2.45	3.16	2.68
7	2.68	2.63	3.04	2.49
8	2.75	2.45	3.16	2.59
9	3.06	2.40	3.22	2.37
10	2.64	2.53	3.17	2.34
平均	2.84	2.49	3.14	2.54

※網掛けの数字は試験区間外で破断した供試体

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金（若手研究(B)17760366）にもとづいて行われています。

参考文献

- 1) 日本建築学会編：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御指針・施工指針（案）・同解説，日本建築学会，2006.2
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 吉本彰編：コンクリートの変形と破壊，学献社，1990.7
- 5) 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
- 6) 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，No.732/V-59，pp.135-148，2003.5
- 7) 吉本 彰ほか：純引張試験用コンクリート供試体に関する研究，セメント技術年報，Vol.32，pp.231-234，1978