

構造体コンクリートの割裂引張強度

荒木 秀夫*・山手 滉*

(平成29年10月24日受付)

Splitting Tensile Strength of Concrete Obtained by Core Boring

Hideo ARAKI and Akira YAMATE

(Received Oct. 24, 2017)

Abstract

Tensile strength of concrete is directly related to the strength of the shear cracking, which influences the stiffness degradation of the RC member. Furthermore, the tensile strength affects the pull-out strength of the post installed anchor bolts in the retrofitting process. The tensile strength is estimated by the equation with the compressive strength. However, the previous study on the tensile strength of concrete of the existing buildings is not sufficient, therefore it is not clear that the current equations are applicable to those concrete. As such, the splitting test was conducted using a test specimen obtained from the same RC member, from which the test specimen for the compressive test was obtained. Splitting tensile tests were conducted with core cylinder. Variation of tensile strength obtained from the splitting test without supporting strips is considered. However, those strips in the splitting tests are not required in Japanese Industrial Standard, considering that the tensile strength from the splitting test without bearing strips is lower than the theoretical value.

Key Words: tensile strength, existing building, splitting test, bearing strip, compressive test

1. はじめに

コンクリートの引張強度は鉄筋コンクリート構造（以下RC構造）の許容応力度設計¹⁾では使われることはあまりない。一方、限界状態を想定したRC構造の靱性設計²⁾などでは部材のせん断ひび割れ強度の推定に用いられている。さらに精密な応力解析が必要な設計ではコンクリートの構成則中で使用される³⁾。現在のところ、この引張強度を推定するには実験値の回帰分析による方法が取られるが、試験方法としては大別して直接引張試験、割裂引張試験、曲げ引張試験が行われている。この試験方法のなかで直接引張試験は載荷方法が難しいとされ、略算値であるが試験が簡易であり汎用性の高い割裂引張試験方法が最も多く採用されている。この割裂引張試験方法はJIS（日本工業規格）

A1113⁴⁾に示されているが、その供試体はJIS A 1132によって作成するコンクリート円柱としか表現されておらず、コアボーリングしたコンクリートにも適用されるかどうかの記述はない。従って、厳密に言えばコアボーリングしたコンクリートにはJISの割裂引張試験法は適用できないことになる。また、JIS A1113に示される試験方法は欧米の試験方法^{5),6)}と異なり、供試体と加圧治具間に緩衝材（bearing strip or packing strip）を入れないこととしている。この緩衝材の影響については町田⁷⁾、小阪⁸⁾等の研究があり、緩衝材の剛性が引張強度に影響を与えることが示されている。これらの研究では緩衝材無しに比べ引張強度が上昇すること、ばらつきについては大きな相違はないことが述べられている。JISに示される試験方法は下限値を与えるものと考えられるならば、JISによる方法では引張強度の中央値や分散

* 広島工業大学工学部建築工学科

の把握ができず、RC構造の基本的性能に影響を与える有効な引張強度が得られないと考えられる。また、FEM解析が必要とされるような施設のせん断ひび割れや既存RC建物の斜張力破壊においては引張強度の正確な推定がより重要な課題と考えられる。本論文ではコンクリートの引張強度に関する基礎的知見を得ることを目的として、以下の2点について新設コンクリートと打設後長年月を経たコンクリートを用いて実験的に検討を加えた。

1) 現行JIS A1113による方法をコアボーリングしたコンクリートに適用することの妥当性

2) 割裂試験における緩衝材の有無による影響、既往の引張強度推定式との整合性

2. 既往の推定式

既往の研究や基準で提案されている割裂引張強度推定式を以下に例示する。いずれもコンクリートの圧縮強度 σ_B に関連付けられるもので次の式のように表されるものである。

$$\sigma_{st} = a \times (\sigma_B)^b \quad (1)$$

σ_B : 圧縮強度 (N/mm²)

その適用範囲は提案式により異なり、例えば Arioglu⁹⁾ の適用範囲は 4 MPa~120 MPa と広いものであり、供試体の調合、使用材料、材令などに影響されないとしている。我が国の提案式では明確な適用範囲は示されていない。以下に我が国及び諸外国で提案された割裂引張強度の推定式を列記する。

$$\text{日本建築学会}^2) \quad \sigma_{st} = 0.33 \times (\sigma_B)^{0.5} \quad (2)$$

$$\text{日本土木学会}^{10)} \quad \sigma_{st} = 0.23 \times (\sigma_B)^{0.667} \quad (3)$$

$$\text{ACI}^{11)} \quad \sigma_{st} = 0.56 \times (\sigma_B)^{0.5} \quad (4)$$

$$\text{CEB-FIB}^{12)} \quad \sigma_{st} = 0.3 \times (\sigma_B)^{0.667} \quad \sigma_B \leq 83 \quad (5)$$

$$\text{Arioglu}^9) \quad \sigma_{st} = 0.378 \times (\sigma_B)^{0.63} \quad 4 \leq \sigma_B \leq 120 \quad (6)$$

$$\text{Raphael}^{13)} \quad \sigma_{st} = 0.313 \times (\sigma_B)^{0.667} \quad \sigma_B \leq 40 \quad (7)$$

図1に上記の式を図示する。

JIS A1113 に基づいている我が国の日本建築学会 (AIJ) および日本土木学会 (JSCE) の推定式は他国の推定式と比較すると明らかに低くなっている。これは既往の文献に示される緩衝材の有無の影響と考えられる。

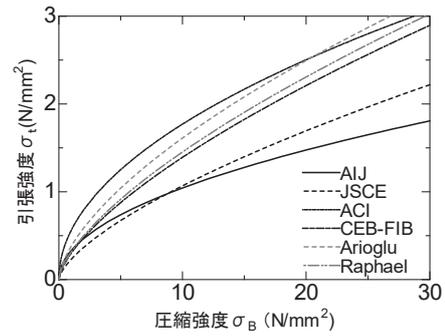


図1 割裂引張強度と圧縮強度の関係

3. 実験方法

3.1 割裂引張試験方法

コンクリートの割裂試験方法は昭和18年に赤澤博士が提案¹⁴⁾したものが現在の世界標準となっている。試験方法は圧縮用のコンクリート円柱供試体を試験機中に横において圧縮力を加えるもので、最大荷重と供試体寸法を用い(8)式によって、簡易に引張強度を求めるものである。

$$\sigma_{st} = \frac{2P}{\pi DL} \quad (8)$$

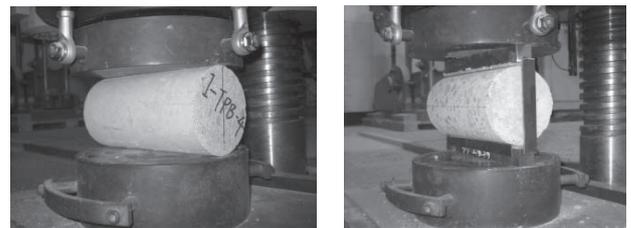
σ_{st} : 割裂引張強度 (N/mm²)

P : 最大荷重 (N)

D : 供試体直径 (mm)

L : 供試体長さ (mm)

序でも述べたように JIS A1113 では供試体と加圧版間には何にも設置せずに加力される。一方、欧米の試験方法^{5), 6)}では緩衝材 (Bearing strip or Packing strip) を挿入することが規定されている。我が国の既往の文献^{7), 8)}ではこの緩衝材の材質によって割裂引張強度は影響を受けるとされているが、欧米の試験方法は緩衝材の材質に関して明確な規定は見当たらない。本研究では文献⁶⁾に示される合成木材 (Thin plywood bearing strips) に最も近いものとして厚さ 3.2 mm、幅 20 mm、長さ供試体長さ+20 mm のベニヤ板を用いることとした。また欧米の規準に示される試験方法では緩衝材に加えて加圧鋼棒 (bearing bar or plate or steel loading pieces) が通常用いられている。そこで本実験では



JISA1113

British Standard

図2 割裂引張試験

20 mm角，長さ 220 mmの角型鋼材を使用した。図2にJISに基づく割裂試験および British Standard に基づいた試験を示す。

3.2 圧縮試験方法

現行の割裂引張強度推定式を適用するためには同バッチで打設されたコンクリートの圧縮強度が必要となる。圧縮試験方法は JIS A1108 によっている。加力は200トン圧縮試験機を用い，ひずみ測定の際はコンプレッソメータ（以下 C.M.）と検長 60 mm のひずみゲージ（以下 S.G.）を併用して行った。

4. 供試体

本論文では新しく打設したコンクリートと竣工後長年月を経た既存建物から採取したコンクリートに対して割裂引張試験を実施した。

4.1 新設コンクリート

梁を模擬した $t \times D \times L = 200 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 760 \text{ mm}$ コンクリート直方体を作成し，コンクリートの打設面を上面とし，上中下段からそれぞれ6本ずつコアボーリングした。抜き取り方向は打設方向に直交である。供試体（CC: Core Cylinder）数は合計18本である。抜き取りを行った供試体形状は直径 100 mm，長さ 200 mm としている。コア抜き位置およびコア抜きの様子を図3および図4に示す。また，JIS A1132に基づいて，モールドを用いて作成した供試体（TP: Test Piece）は12本である。供試体一覧を表1に示す。CC 供試体加力の前後にそれぞれ6本ずつ載荷することと

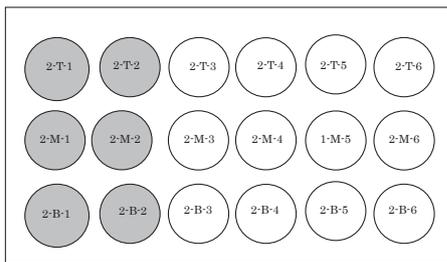


図3 コア抜き位置



図4 コア抜きの様子

表1 新設コンクリート供試体一覧

供試体	圧縮	割 裂		合計
		緩衝材無	緩衝材有	
TP (前)	2	2	2	6
CC (上段)	2	2	2	6
CC (中段)	2	2	2	6
CC (下段)	2	2	2	6
TP (後)	2	2	2	6
合 計	10	10	10	30

表2 コンクリートの配合表 (kg/m³)

セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
267	183	984	860	2.60

した。表1に示すように6本のうち2本を圧縮試験用とした。残る4本は割裂用とし，内2本を緩衝材無しのJIS 載荷，残る2本を緩衝材有りのBS (British Standard) 載荷とした。コンクリートの呼び強度は 18 N/mm^2 とし水セメント比68.5%，細骨材率53.9%である。粗骨材の最大粒径は 20 mm である。その調合を表2に示す。

4.2 既存コンクリート

既存建物は1971年竣工の2階建て住宅用建物である。構造図面にある設計基準強度は 17.6 N/mm^2 (180 kg/cm^2) である。大梁，小梁，耐震壁および袖壁からコア抜きしている。新設コンクリートと同様に割裂引張強度と圧縮強度の関係について調べるため，各部材から圧縮用と割裂用のコアシリンダーを隣接してコアボーリングした。図5に既存建物



既存建物



コアボーリング



大梁と耐震壁



小梁

図5 既存建物からのボーリング

表3 既存コンクリート供試体一覧

部 材	箇所数	圧 縮	割 裂	合 計
大 梁	4	8	8	16
小 梁	1	2	2	4
耐震壁	2	4	4	8
袖 壁	1	2	2	4
合 計	9	16	16	32

およびコアボーリングの様子を示す。また、通常の耐震診断では腰壁などの抜きやすい部材から採取するため圧縮強度などがばらつく傾向にあるとされているため、本研究では主として構造部材からコアボーリングしている。コア径は100mmであり、大梁、小梁から採取したコアシリンダーについては両端部を切断し、長さ200mmに整形した。壁から採取したコアシリンダーについては部材厚さが200mmに満たないため、モルタル仕上げを除去し整形した。長さが200mmに満たない供試体の圧縮強度はJISA1108に基づいて補正を行っている。供試体一覧を表3に示す。

5. 実験結果

5.1 新設コンクリート

①実験結果概要

表4に得られた圧縮強度、ヤング係数、JISA1113に基づく割裂引張強度および緩衝材を用いたBritish Standardに基づく割裂引張強度の実験結果一覧を示す。新設コンクリートの圧縮強度 σ_B は最大値33.5 N/mm²、最小値21.4 N/mm²であり、その平均値は27.6 N/mm²であった。実験値がばらついているのはコア抜きタイプが直方体コンクリートの上下位置で採取しているためである。上中下段から2本ずつ採取した供試体の平均圧縮強度はそれぞれ28.8 N/mm²、26.6 N/mm²、31.4 N/mm²となった。また、平均圧縮強度が高いのは実験が打設後88日後に行われたものであり、材令により強度が上昇したものと考えられる。また、ヤング係数の平均値は24.5 kN/mm²である。

表4 新設コンクリートの力学的特性一覧

	σ_B (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	σ_{st} (JIS) (N/mm ²)	σ_{st} (BS) (N/mm ²)
個 数	10	10	10	10
平 均	27.6	24.5	2.43	3.40
最大値	33.5	26.6	3.06	4.70
最小値	21.4	22.2	1.71	2.63
標準偏差	3.05	1.328	0.38	0.53
変動係数	0.110	0.054	0.157	0.155

$$E_c = 21 \times \left(\frac{\gamma}{23}\right)^{1.5} \times \left(\frac{\sigma_B}{20}\right)^{0.5} \quad (9)$$

γ : 単位体積重量 (kN/m³)

比較的低い強度に対して適合性に優れているとされるRC規準1991年版¹⁾に示される(9)式を用いた推定値は23.7 kN/mm²とほぼ同等の結果がえられた。引張強度については緩衝材の有無による違いが明確に表れている。JIS規格に基づく割裂引張強度の平均値は2.43 N/mm²であり、British Standardに基づく割裂引張強度の平均値は3.40 N/mm²となり、JIS規格に対して1.4倍程度の値となった。小坂等⁸⁾の実験における緩衝材を合板とした場合の比率は1.5倍を中心に分布していることから、本実験でもほぼ同等の結果が得られていることが分かる。標準偏差はBritish Standardによる引張強度が大きいものの変動係数はほぼ同じ値である。British Standardによる割裂引張強度の標準偏差が大きくなっているのは、実験値の一つが4.7 N/mm²という他に比べ極端に高い値が記録されているためと考えられる。

②割裂引張強度と圧縮強度の関係

割裂引張強度と圧縮強度の関係を図6に示す。同図中に推定式中最も低い引張強度となる日本建築学会(AIJ)による(2)式、最も高い引張強度の式としてAmerican Concrete Institute(ACI)による(4)式を挿入している。横軸の圧縮強度としては当該割裂試験用の2本の圧縮強度の平均値を使用している。

最初にTPとCCの比較をJIS規格による載荷とBS規格

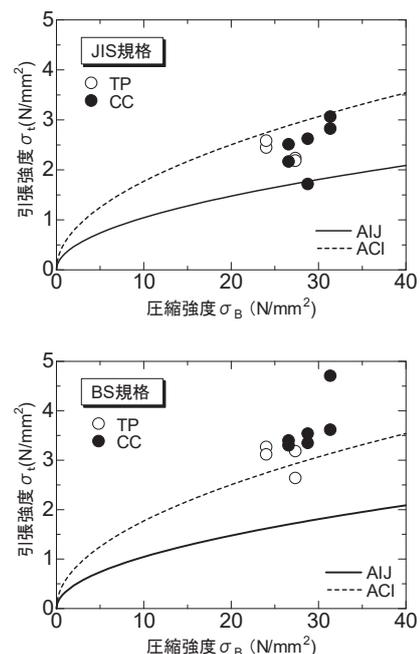


図6 割裂引張強度と推定式の関係

による荷重を分けて示す。いずれも圧縮強度の上昇に伴い、割裂引張強度も上昇する傾向を示している。全体的にTPよりもCCの圧縮強度が高いがこれは打設方向及びコア抜き位置より上のコンクリートによる締め固めの影響を受けていると考えられる。JIS規格による割裂引張強度はAIJの推定値より高く、ACIの推定値より低い。一方、BS規格による割裂引張強度は1供試体を除いてACI推定値よりも高くなっている。また、 4.7 N/mm^2 という高い引張強度も記録している。AIJによる(2)式およびACIによる(4)式推定値に対するJIS規格による割裂引張強度の割合を回帰分析するとそれぞれ1.40および0.89となる。一方、同推定値に対するBS規格による割裂引張強度は1.89および1.16となっている。AIJ式は実験値を推定できず、ACI式はほぼ下限値となっていることが分かる。

5.2 既存コンクリート

既存コンクリートの割裂引張強度は耐震診断や補強設計に直接関係するものではないが、既存RC建物はもともとせん断補強筋が少なく、せん断ひび割れに起因する斜張力破壊が発生する恐れがあり割裂引張強度の実態把握は重要な課題と考えられる。JIS A1113ではコア抜き供試体の規定がないため当該試験の位置付けおよび既往の推定式との関係を明確にしておく必要があると考えられる。なお、本建物の割裂引張試験はBS規格で行っている。

①実験結果概要

本既存建物の力学的特性一覧を表5に示す。圧縮強度の平均値は 13.4 N/mm^2 である。最大値は 22.1 N/mm^2 、最小値は 7.30 N/mm^2 であり、極低強度コンクリートを含むものであった。同様にヤング係数も低いものであり、その平均値は 11.9 kN/mm^2 となっている。(9)式による推定値は 15.0 kN/mm^2 であり、既存コンクリートのヤング係数は(9)式では高めに推定されることをしてきた既往の文献¹⁵⁾と同様な結果となった。割裂引張強度の平均値は 1.67 N/mm^2 であり、最小値は 1.13 N/mm^2 、最大値は 2.67 N/mm^2 であった。標準偏差は前節で示した新設コンクリートより低いものの変動係数は逆に大きくなっている。変動係

表5 既存コンクリートの力学的特性一覧

	σ_B (N/mm^2)	E_c (kN/mm^2)	σ_{st} (BS) (N/mm^2)
個数	16	16	16
平均	13.4	11.9	1.67
最大	22.1	16.0	2.67
最小	7.30	5.45	1.13
標準偏差	5.02	2.88	0.444
変動係数	0.374	0.242	0.266

数が大きくなる原因は既存コンクリートの割裂引張強度の平均値が新設コンクリートの半分以下となっているためである。筆者等はこれまでも既存建物のコンクリートについて調査検討を行い、文献^{16),17)}で報告している。これらの割裂引張試験においてはJIS規格のみで実施しているが変動係数はそれぞれ0.281, 0.254となり、本建物の0.266と大きな差は見られない。

②割裂引張強度と圧縮強度の関係

図7に過去の調査も含めて割裂引張強度と圧縮強度の関係を示す。図中に挿入したAIJの推定式(2)との割合は文献¹⁶⁾で0.858, 文献¹⁷⁾で0.890となっており、実験値はいずれもAIJの推定値を下回る結果となっている。一方、本論文で対象とする既存コンクリートの割裂引張試験はBS規格による方法で実施しており、本論文のAIJ推定値に対する割合は1.39となった。ただし、AIJ推定値を大幅に上回るもののACI推定式に対する割合は0.819という結果であった。

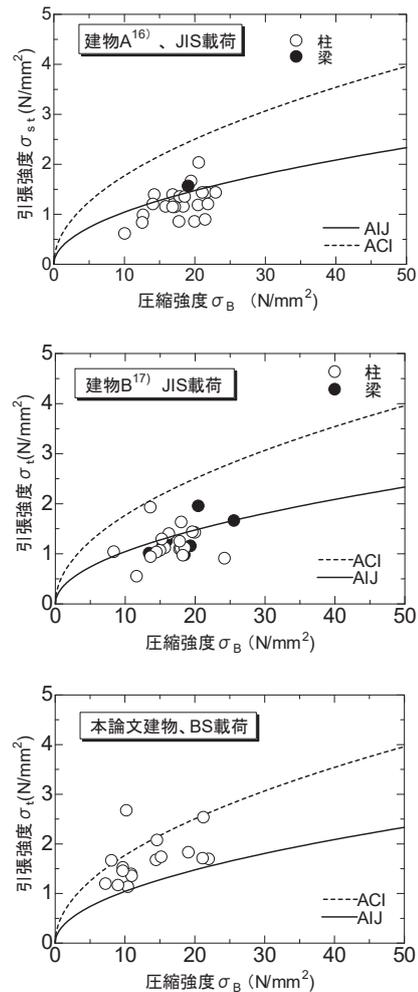


図7 割裂引張強度と推定式の関係

6. まとめ

コンクリートの割裂引張強度について新設コンクリートおよび打設後長年月を経たコンクリートについて実験的に検討を行った。本論文の範囲で得られた知見を以下に示す。

- 1) モールドを用いて作成した供試体とコアボーリングによって得られた供試体で顕著な相違はなく、コアボーリングした構造体コンクリートに対し JIS A1113 に示される割裂引張試験を適用できる。
- 2) 割裂引張試験における緩衝材の使用は割裂引張強度に大きな影響を与える。
- 3) 新設コンクリートの JIS 規格による割裂引張強度は日本建築学会の推定式より1.4倍程度大きく、同式は下限値を与えるものと考えられる。
- 4) 新設コンクリートに対して緩衝材を有する BS 規格による割裂引張強度は JIS 規格によるものより1.3倍程度大きな値となる。
- 5) 既存コンクリートの JIS 規格による割裂引張強度に対し、AIJ 推定式はほぼ上限値を与えるのに対し、BS 規格による割裂引張強度は AIJ 推定式の約1.4倍であった。

割裂引張強度は圧縮強度に大きく依存しており、新設コンクリートの更なるデータの蓄積が必要と考えられる。

謝 辞

本研究の実施にあたり平成28年度科学研究費補助金（基盤研究（B）課題番号：16H04458 代表：広島工業大学・荒木秀夫）の助成を受けた。実験実施にあたっては平成29年度卒論生に協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 2010, 1999
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999
- 3) たとえば, 三橋博三, 破壊力学と鉄筋コンクリート構造, コンクリート工学, Vol. 34, pp. 25-28, No. 9, 1996
- 4) JIS A1113 コンクリートの割裂引張強度試験方法, JIS A1132 コンクリートの強度試験用供試体の作り方
- 5) ASTM International, C496, Standard Test Method for

Splitting tensile Strength for Cylindrical Concrete Specimens

- 6) British Standard 1881, Testing Concrete, Part 117. Method for determination of tensile splitting strength
- 7) 町田篤彦：コンクリートの圧裂試験関する基礎研究, 土木学会論文報告集, 第297号, pp. 99-112, 1978
- 8) 小坂義夫, 谷川恭雄：コンクリートの割裂引張り強度とパッドの品質との関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 75-76, 1970
- 9) Nihal Ariolu, et al., "Evaluation of between Splitting Tensile Strength and Compressive Strength for Concretes up to 120 MPa and its Application in Strength Criterion," ACI Materials Journal/January-February 2006, Vol. 103, No. 1, pp. 18-24
- 10) (社) 土木学会：平成 8 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 1996
- 11) ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-99) and Commentary (318-R99)," American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1999, pp. 391
- 12) CEB-FIP Model Code for Concrete Structures 1990, "Evaluation of the Time Dependent Behavior of Concrete," Bulletin d' Information No. 199, Comite European du Beton/Federation Internationale de la Precontrainte, Lausanne, 1991, pp. 201
- 13) Rahpael, J. M., "Tensile Strength of Concrete," ACI Journal/March-April 1984, Vol. 81, No. 2, pp. 156-165
- 14) 赤澤常雄, コンクリートの圧縮による内部応力を求める新試験法：(圧裂強度試験法に就いて) (其の一), 土木学会誌, 第29巻, 第11号, pp. 777-787, 1943
- 15) 榊田佳寛, 友澤史紀, 矢島善磨：実際の RC 造建築物におけるコンクリート品質, その 1 主として建物別圧縮強度について, 日本建築学会論文報告集, No. 311, pp. 153-162, 1982.1
- 16) 荒木秀夫：1964年に建設された RC 建物から採取したコンクリートの物性, 日本建築学会技術報告集, 第23巻, 第53号, pp. 135-140, 2017
- 17) 瀬川優斗, 荒木秀夫：1963年に建設された建物から採取されたコンクリートの力学的特性, 広島工業大学紀要, 研究編, 第51巻, pp. 61-68, 平成29年 2 月