

論文 コンクリートのせん断強度に関する研究

佐藤 立美^{*1}

要旨：剪断破壊するコンクリート部材の研究において不可欠なコンクリートの剪断強度を、圧縮強度から推定するのではなく、直接剪断試験により求めるため、コンクリートの剪断強度試験方法を改良した。せん断試験の対象範囲は、Fc5 から Fc100 までとしている。剪断試験方法は4点載荷による両面せん断試験と、直接せん断試験とし、それぞれの試験方法の特徴を明確にした。さらに、圧縮、引張、曲げ強度とせん断強度の関係について調査し、比較的相関関係の高い関係式が得られる事を示した。

キーワード：せん断強度，試験方法，両面せん断試験，直接せん断試験，推定式

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材の設計式はコンクリートの圧縮強度を基本とし、その他の強度はコンクリート圧縮強度から推定する方法が一般的である。JIS 試験方法が確立している圧縮強度は生コンクリート会社により必ず試験されているが、引張強度は試験されないこともあり、曲げ試験に関してはさらに試験例は少ない現状にある。RC 部材のせん断耐力はコンクリートのせん断強度が重要となるが、コンクリートのせん断強度は JIS 試験方法がなく、圧縮強度より推定されているのが現状である。しかし、近年の高強度コンクリートの採用例は増大しており、逆に既存 RC 建築物の耐震診断の実施調査により、コンクリート強度の非常に低い既存 RC 建築物の存在が少なくないことが明らかになってきている。

RC 部材のせん断耐力式としてよく知られている荒川式においても、収集された実験資料のコンクリート強度の範囲は 15 ~ 45 N/mm² であるにもかかわらず、コンクリート強度の適用範囲を限定されずに、コンクリート強度の一次式として作成されている。

特に、低強度コンクリートについては、これらの既存 RC 建築物の耐震改修において指針となる耐震改修設計指針（2001 年版）¹⁾ では、コンクリート強度の適用下限値は Fc13.5 N/mm² であり、これ以下の場合には「慎重に検討する」との記述にとどまっている。これは、低強度コンクリートの性質および低強度コンクリートを使用した RC 部材に関する研究が少ないことから、改修時の実施設計に耐え得る知見が確立されていないことによるものといえる。

本研究は、比較的簡単に試験できるコンクリートのせん断強度試験方法を使用し、コンクリートの圧縮強度とせん断強度の関係を改めて確認する事を目的としたものである。同時に、コンクリートの基本的性質（ $t \cdot$

$b \cdot s \cdot E_c$ ）についても、従前の関係式の適合性を検証することを目的としたものである。

2. 試験方法

コンクリートの圧縮試験、引張試験、曲げ試験、JIS に準じて行っている。なお、圧縮強度試験時にコンプレッソメーターにより変形を計測し割線ヤング係数を測定した。圧縮、引張用供試体は 100mm × 200mm とし、曲げ試験用供試体は、JISA1106 に準じて 100mm × 100mm × 400mm としている。

せん断試験に関しては、文献^{2), 3)}を参考にして、両面せん断タイプと直接せん断タイプの2種類のせん断試験方法を採用し、それぞれ独自の試験治具及び型枠を試作した。

両面せん断タイプの試験方法は、図 - 1 に示したとおりであり、供試体は曲げ試験終了後の供試体を使用しているが、これは、新たな型枠が必要ないことと、曲げ強度の分かった供試体でせん断強度も同時に試験することができるためである。

コンクリートの曲げ試験により2つに破断した後の供試体長さが異なるため、載荷幅を変えた2種類の試験方法を採用し、短い供試体の場合は載荷幅 10mm とした A タイプを、長い供試体は載荷幅 30mm の B タイプを採用し、基本的に A・B タイプ各1回ずつ行う事とした。

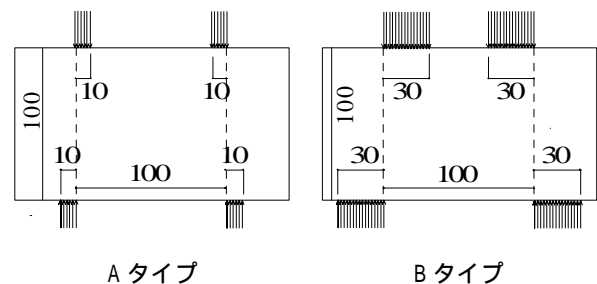


図 - 1 両面せん断試験方法

*1 広島工業大学 工学部建築工学科教授 工博 (正会員)

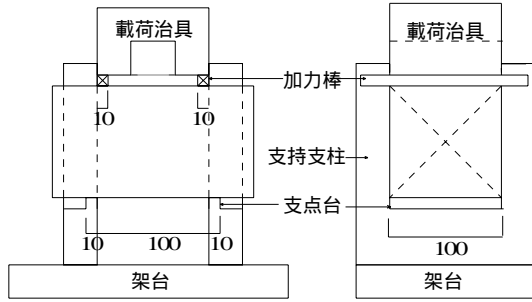


図 - 2 Aタイプの試験治具

図 - 2 に A タイプの両面せん断試験治具を示す。両面せん断試験供試体の高さとし、試験治具は図 2 に示すように、鋼製架台に 100mm×100mm の供試体が支持台に直接設置できるように、厚さ 30mm の U 字型の支持支柱を間隔 100mm で 2 本並列に固定したものである。

曲げ試験後にほぼ中央付近で割れた供試体を設置し、上部の加力には一辺 10mm (供試体高さの 1/10) の正方形の鋼棒を支持支柱に接して設置した後にコの字型の加力治具で載荷する方法を A タイプと称している。

載荷治具は上下逆転して使用すると、上面の載荷面 100mm に等分布荷重を作用させる事を想定して制作したが、供試体のゆがみ等で片面せん断破壊、または時には曲げ破壊が生じることが判明したため、鋼棒を用いずコの字型加力治具の 30mm 部分で載にする場合を B タイプとしている。

写真 - 1 に示すように、A・B タイプともに両面せん断となるが、片面のみのせん断破壊となる供試体は A タイプで約 15% , B タイプでは約 25% 程度の確率で存在している。

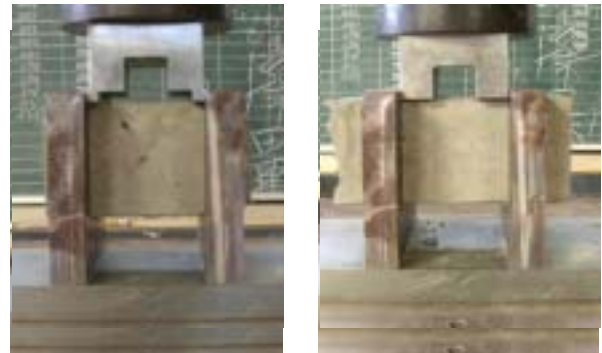
直接せん断タイプの供試体は、独自に設計製作した 100×100×200mm の大きさの型枠を使用しており、直接せん断面は 100mm×60mm である。供試体の形状から、以下 S タイプと称している。直接せん断型枠の形状を図 - 3 に示す。

S タイプのせん断試験は上下面中央部に設置した 10mm 角の鋼棒により圧縮荷重を載荷し、直接せん断強度を求める方法としたが、供試体の形状に基づく垂直部分の偏心による曲げモーメントの影響により、写真 4 に示すような曲げ破壊が生じる可能性がきわめて高い確率で生じる事が判った。

そのため、図 - 4 に示すように、引張応力が生じる位置にそれぞれ 2-D6 の曲げ補強筋を配置することにしたが、この結果、曲げ補強した全ての供試体で直接せん断強度を求めることが可能となった。

さらにこの補強により、上下部の鋼棒を使用せず上下面全面に直接載荷しても直接剪破壊となることが判っ

ため、本論の直接せん断試験結果は全て、写真 - 3 に示す方法で載荷したものを使用している。



A タイプ B タイプ
写真 - 1 両面せん断試験治具

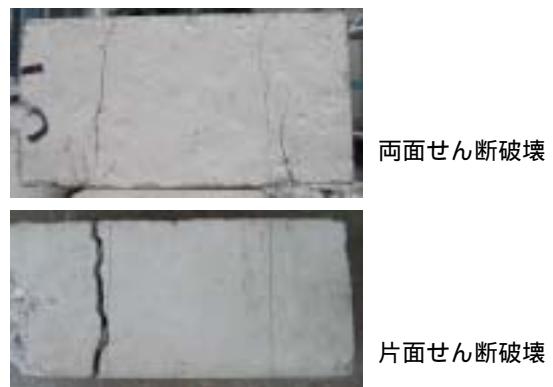


写真 - 2 破壊状態

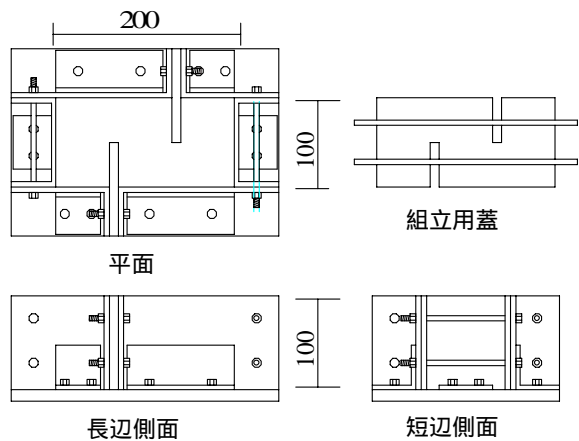


図 - 3 直接せん断 S タイプ供試体用型枠

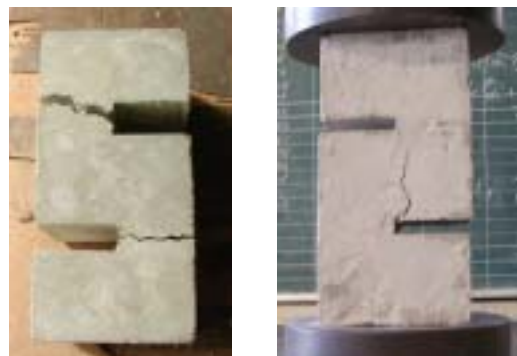


写真 - 3 曲げ破壊 写真 - 4 直接せん断破壊

3. 供試体の種類

本論の供試体のコンクリートは3種類に分類されるが、使用セメントは全て普通ポルトランドセメントである。

基本となる第1グループの普通コンクリートは、生コンクリート会社2社で実際に調合納入されたコンクリートで、呼び強度は18N/mm²～45N/mm²の範囲であり、標準養生したものである。

第2グループは、当研究室で行った構造実験に使用した高強度コンクリートで、呼び強度は60N/mm²～100N/mm²で、数時間の蒸気養生したのち現場養生としたものである。

第3のグループは、JCI 中国支店の低強度コンクリート研究委員会の一環として、2006年度に行った低強度コンクリートの製造に関する研究の結果を参考にして調合した低強度コンクリートである。

低強度コンクリートの製造には、見かけのセメント強度を低下させる目的で、セメントの一部を、表-1に示す物理的特性を持つ石粉で代替して使用した。

この石粉は砕石製造時に発生する粉塵を収集したものであり、密度、比表面積、メレンプル吸収量はTRA0015「コンクリート用砕石粉」の規定値を満足しているが、75ミクロン残分は規格値を外れている。

低強度コンクリートの調合では、スランブ20cmを目標にして、単位水量は200kg/m³、水セメント比は80%の調合表を参考にし、セメントに対する石粉の代替量を30, 60, 90, 120 kg/m³の4種類に変化させて予備実験調合表を作成した。

実際の予備実験調合表では、石粉の比重の影響等で、セメント+石粉の重量に対する水の重量比は、69.5%～80.9%、水セメント比は、77.5%～155%となっている。

予備実験での4種類の調合表と、実測スランブ、4週圧縮強度、引張強度の実験値を表-2に示す。

4週圧縮強度試験結果は、標準養生と封緘養生の違いによる圧縮強度の差異は、ほとんど見られず、図-5に示すように、圧縮強度とセメント水比の関係は良好な直線関係が得られた。

以上の予備実験結果に基づき、本論の実験に使用するFc=5～Fc15を目標圧縮強度とする水セメント比の異なる調合表を決定し、材令4週で各種強度試験を行った。

ただし、本論の実験に用いた細骨材は砕砂とし、粗骨材は2005に変更している。

なお、本実験の低強度コンクリートの供試体は、打設後1週での脱型直後に散水した後は、実験室内での現場養生としている。

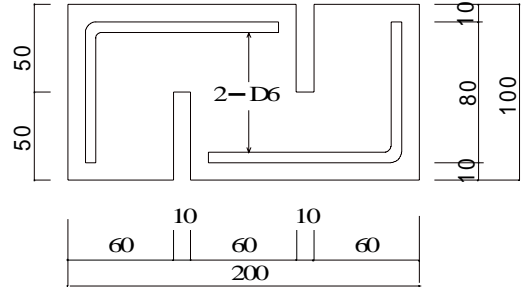


図-4 補強筋の配置

表-1 石粉の物理試験結果

項目	単位	石粉良	石粉不良	規格値	試験方法
密度	g/cm ³	2.74	2.73	2.50以上	JIS-R5201-6
比表面積	cm ² /g	3280	4080	—	JIS-R5201-7.1
75μmふるい残量	%	23.7	13.3	5以下	JIS-R5201-7.2
メレンプル吸収量	mg/g	4.8	508	10.0以下	TRA0015

表-2 予備実験の調合表および4週強度試験結果

材料	単位	N01	N01加水	N02	N03	N04
セメント		262	236	217	173	131
水		203	181	203	203	203
加工砂		749	815	749	830	764
石粉	kg/m ³	30	30	60	90	120
粗骨材1		636	636	636	636	636
粗骨材2		350	350	343	343	343
202A		1.16	1.06	1.10	1.06	1.00
W/B(%)	%	69.5	68.0	73.3	77.2	80.9
W/C(%)	%	77.5	76.7	93.5	117.3	155.0
スランブ	cm	20.5	8.0(18.0)	20.5	18.5	20
σ _B (標準)	N/mm ²	14.3	14	10.8	6.14	3.55
σ _B (封緘)	N/mm ²	14.3	15.9	10.5	6.44	4.03
σ _t (標準)		1.58	1.55	1.17	0.83	0.55

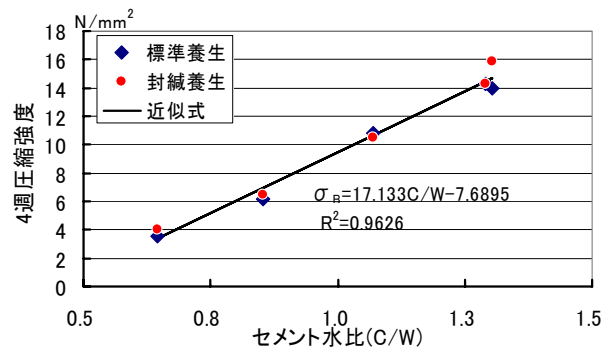


図-5 セメント水比と圧縮強度の関係

4. 実験結果

最初に基本的な関係として、図-6に全ての供試体の圧縮強度(σ_B)とヤング係数(E_c)の関係を示す。低強度コンクリート、普通コンクリートともに、全体的には、現行の日本建築学会鉄筋コンクリート構造計算規準式⁴⁾の、単位体積重量の項を1.0として求めたσ_B-E_c関係の式(1)と非常に良く一致した式(2)の関係が得られている。

$$RC \text{ 規準式 } E_c = 0.8558 \sigma_B^{0.333} \quad (1)$$

$$E_c = 0.819 \sigma_B^{0.344} \quad R^2 = 0.921 \quad (2)$$

ただし、供試体グループ別に見ると、それぞれ以下の関係式となっている。

低強度コンクリート： $E_c = 0.814 \sigma_B^{0.342}$ (3)

普通コンクリート： $E_c = 0.984 \sigma_B^{0.301}$ (4)

高強度コンクリート： $E_c = 0.476 \sigma_B^{0.452}$ (5)

低強度コンクリートの場合、ヤング係数の小さい方向にばらつきが見られる傾向が顕著であるが、式(2)とほぼ等しい関係式となっている。

高強度コンクリートの $\sigma_B - E_c$ 関係は現行 RC 規準式に比べ、ヤング係数は小さくなる傾向が見られている。

図 - 7 に、圧縮強度 (σ_B) と割裂試験による引張強度 (σ_t) の関係を示す。この場合、圧縮、引張強度とも各 3 体の平均値を使用している。

ここでは、 $\sigma_t - \sigma_B$ 関係は、セメント水比 $C/W = 0.39 \sim 1.15$ で碎石を用いた赤沢式⁵⁾ ($\sigma_t = 0.396 \sigma_B^{0.73}$, 図7中の鎖線参照) と比較するために、式(6)の累乗式で評価すると、赤沢式に比べて、やや小さい値となっている。

$$\sigma_t = 0.254 \sigma_B^{0.71} \quad (6)$$

但し、コンクリートの種類別に見ると、

低強度コンクリート： $\sigma_t = 0.189 \sigma_B^{0.823}$ (7)

普通コンクリート： $\sigma_t = 0.221 \sigma_B^{0.737}$ (8)

高強度コンクリート： $E_c = 0.396 \sigma_B^{0.597}$ (9)

となっており、ここでも高強度コンクリートの $\sigma_t - \sigma_B$ 関係は普通強度の $\sigma_t - \sigma_B$ 関係と明らかに異なり、ばらつきも大きいことが判る。これは、供試体数が少ないことも要因の一つと考えている。

図 - 8 は、圧縮強度 (σ_B) と曲げ強度 (σ_b) の関係である。 $\sigma_b - \sigma_B$ 関係は、供試体グループ毎に異なった傾向を持つと考える必要があるが、全資料の関係式として比較的相関係数の高い式 (10) の累乗式による関係式が得られた。

$$\sigma_b = 0.389 \sigma_B^{0.706} \quad R^2 = 0.918 \quad (10)$$

しかし、コンクリートの種類毎にみると、それぞれ勾配の異なる直線式で相関係数の比較的高い以下の関係式が得られており、コンクリートの種類による差も顕著であることが判る。特に高強度コンクリートでは圧縮強度の増大による曲げ強度の上昇はほとんど見られていない。

低強度コンクリート： $\sigma_b = 0.101 \sigma_B + 0.242$ (11)

普通コンクリート： $\sigma_b = 0.066 \sigma_B + 0.937$ (12)

高強度コンクリート： $\sigma_b = 0.043 \sigma_B + 1.977$ (13)

なお、日本建築学会鉄筋コンクリート構造計算規準の曲げひび割れ強度式の平均値、 $\sigma_b = 0.56 \sigma_B^{0.5}$ と比較すると、低強度コンクリートではほぼ安全側に評価できるが、普通強度、高強度の場合には、同規準の上限値である、 $\sigma_b = 0.76 \sigma_B^{0.5}$ でも安全側の評価となることが判る。

図 - 9 は、提案した前述の 3 種類の試験方法別に得られた圧縮強度 (σ_B) とせん断強度 (σ_s) の関係である。

せん断試験方法毎に、得られたせん断強度のばらつき

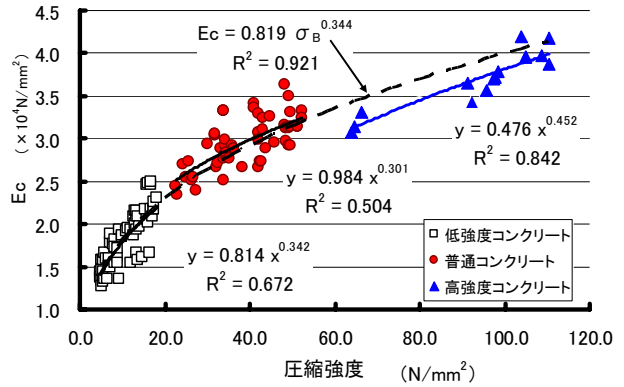


図 - 6 圧縮強度とヤング係数の関係

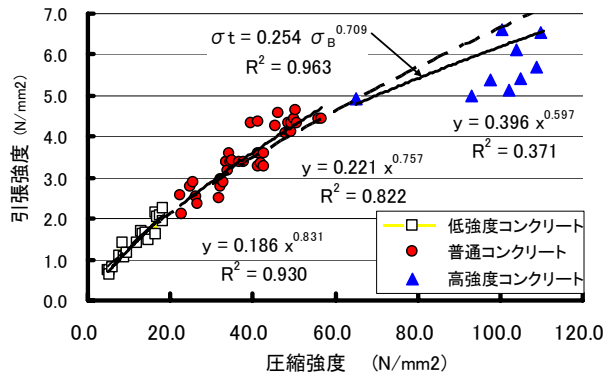


図 - 7 圧縮強度と引張強度の関係

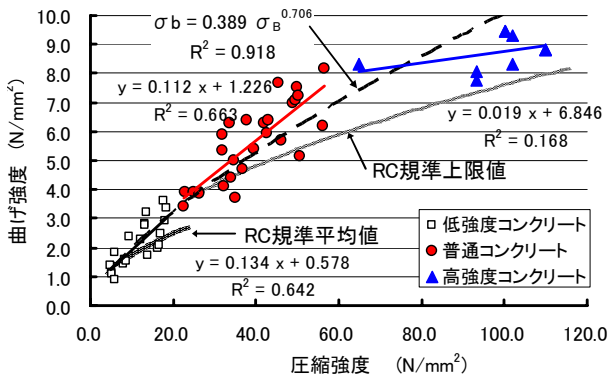


図 - 8 圧縮強度と曲げ強度の関係

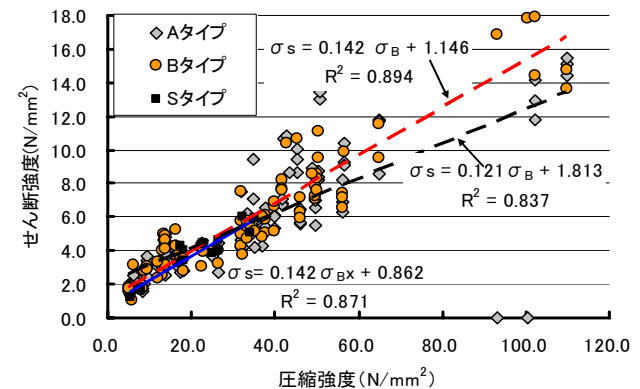


図 - 9 試験方法別の圧縮強度とせん断強度の関係

が異なるため、それぞれの試験方法別に $\sigma_B - \sigma_s$ の関係式を求めると以下ようになる。

$$A \text{ タイプ } \quad \sigma_s = 0.121 \sigma_B + 0.862 \quad R^2 = 0.871 \quad (14)$$

$$B \text{ タイプ } \quad \sigma_s = 0.541 \sigma_B + 1.146 \quad R^2 = 0.895 \quad (15)$$

$$S \text{ タイプ } \quad \sigma_s = 0.327 \sigma_B + 0.862 \quad R^2 = 0.937 \quad (16)$$

図 - 9 に示すように、A, B タイプの関係式の差異は少ないが、B タイプの試験方法では、支圧面積が大きいことが原因と考えられる。特に、高強度コンクリートの場合、ややせん断強度実験値が大きくなる傾向があることが判る。

S タイプの直接せん断強度試験は、前述したように補強筋の配筋以前では曲げ破壊が多かったため、高強度コンクリートのデータがなくデータ数も少ないが、S タイプの結果は最も相関係数の高く、かつ直線関係に近い結果が得られている。但し、A, B タイプと大きな差異はなく、試験の簡便性を考えると A タイプが実用性では最も優れているといえる。

前述したように両面せん断試験の場合、A タイプで約 25%, B タイプで約 35% の割合で片面のみのせん断破壊となっている。片面せん断破壊の場合、せん断強度実験値は小さくなることは当然であるが、破壊形式の違いによる圧縮強度とせん断強度の関係を図 - 10 に示す。

図 - 10 に示すように、平均 20% 程度の強度の差異があることが判るため、実際のせん断強度は両面せん断した供試体による値を採用するのが良いと考えられる。

図 - 11 は、両面せん断破壊となった供試体の圧縮強度とせん断強度の関係であり、コンクリート種類ごとの関係式は以下のようにになっている。

$$\text{低強度コンクリート: } \sigma_s = 0.533 + 0.231 \sigma_B \quad (17)$$

$$\text{普通コンクリート: } \sigma_s = 0.560 + 0.164 \sigma_B \quad (18)$$

$$\text{高強度コンクリート: } \sigma_s = 2.593 + 0.136 \sigma_B \quad (19)$$

この結果は、コンクリート強度が大きいほど勾配が小さくなる傾向が明らかであり、コンクリート種類による $\sigma_s - \sigma_B$ 関係は異なると考えることができる。しかし、全供試体の $\sigma_s - \sigma_B$ 関係は、式(20)の累乗式で比較的良好一致する関係式となっている事が判る。

$$\sigma_s = 0.502 \sigma_B^{0.74} \quad R^2 = 0.914 \quad (20)$$

図 - 12 に曲げ強度 (σ_b) せん断強度 (σ_s) の関係を示したが、比較的良好な相関関係で曲げ強度からせん断強度を推定することが可能と言える。このことにより、曲げ試験後の供試体を利用した両面せん断試験の有効性が非常に高いと考えられる。

図 - 13 は、引張強度とせん断強度の関係である。ここでも有意な相関関係を見ることができ、引張強度の上昇とともにせん断強度は指数関数的に上昇する傾向が顕著である。

全ての供試体データによる $\sigma_s - \sigma_t$ 関係は

$$\sigma_s = 1.566 e^{0.376 \sigma_t} \quad (20)$$

となっているが、コンクリートの種類別の相関関係は必

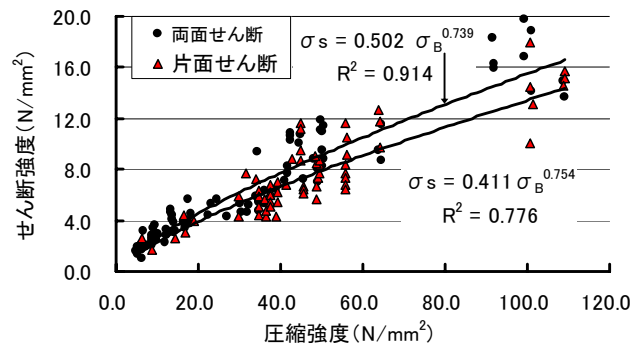


図 - 10 破壊系識別の圧縮強度とせん断強度の関係

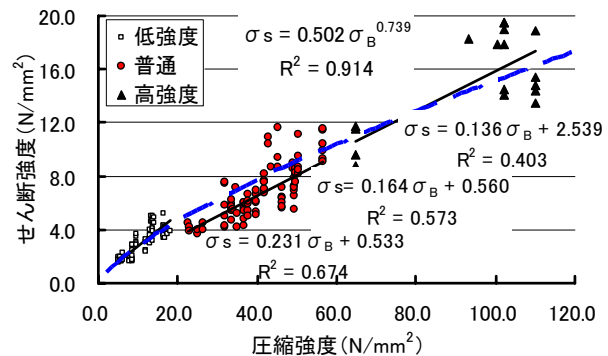


図 - 11 種類別圧縮強度とせん断強度の関係

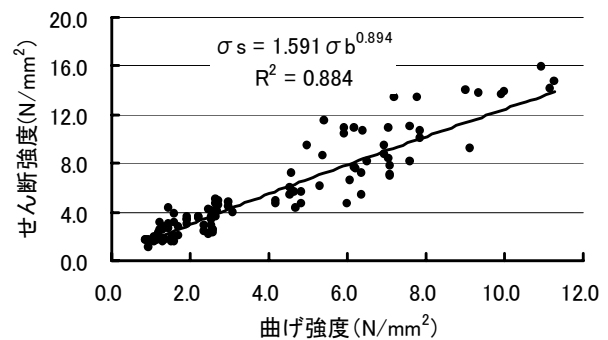


図 - 12 曲げ強度とせん断強度の関係

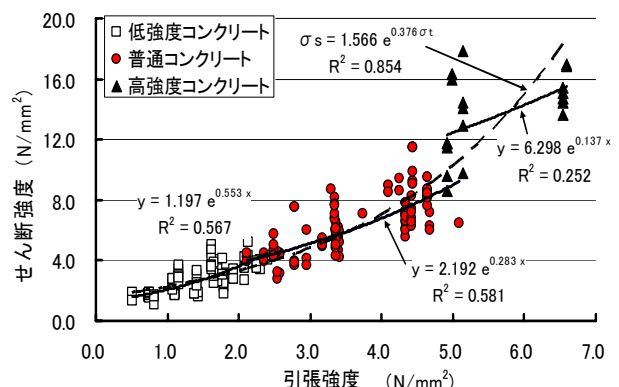


図 - 13 引張強度とせん断強度の関係

ずしも高いとは言えない。特に、高強度コンクリートの $\sigma_s - \sigma_t$ 関係は非常にばらつきが大きくなっており、有意な相関性を得るに至っていない。

今後、さらに多くのデータの蓄積が必要な問題であると考えている。

せん断強度の推定式としてよく知られているモールの破壊円理論⁶⁾に基づく式(21)がある。

$$\sigma_s = 0.5 \times \sqrt{\sigma_B \cdot \sigma_t} \quad (21)$$

図-14は、本実験の整合性の確認のため、モールの破壊円との比較を示したものである。

式(21)の値は図-14中の点線で示したが、本論のデータの場合は、全体的にも各コンクリート種別でも、勾配はほぼ0.5に近い値となっており、全体式は図中に示すように以下の式となる。

$$\sigma_s = 0.54 \times \sqrt{\sigma_B \cdot \sigma_t} + 0.354 \quad (22)$$

これはモールの理論による式(21)とほぼ一致した結果であり、モールの破壊理論とほぼ適合していると言えるが、せん断強度実験値に対しては、相関関係が十分に高いとは言えない。また、高強度になるほど安全率が高くなる傾向が顕著である。

5. 結論

以上、提案したコンクリートのせん断試験方法とコンクリートの諸性質について、以下のように纏める。

1. 低強度コンクリートの製造は、石粉のセメント代替量と水セメント比により、所定の強度のコンクリートが作成できる。
2. 低強度コンクリートおよび普通コンクリートのヤング係数、引張強度、曲げ強度は現行の日本建築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準式でほぼ推定可能である。
3. せん断強度試験方法として、両面せん断試験法及び直接せん断試験法を提案し、いずれも実用性が高くかつ整合性の高い試験方法であることを確認した。

特に両面せん断した供試体のデータのばらつきは小さく信頼性が高いといえる。

4. 高強度コンクリートの圧縮強度以外の各種強度は、普通コンクリートの場合と非常に異なる結果となったが、これは供試体数の少ないことに起因するものであり、今後もデータを収集する必要がある。

5. コンクリートのせん断強度は、せん断試験により求めることが望ましいが、せん断試験を行わず推定する場合は、圧縮試験のみでなく、引張、曲げ強度試験結果からも推定することが可能である。

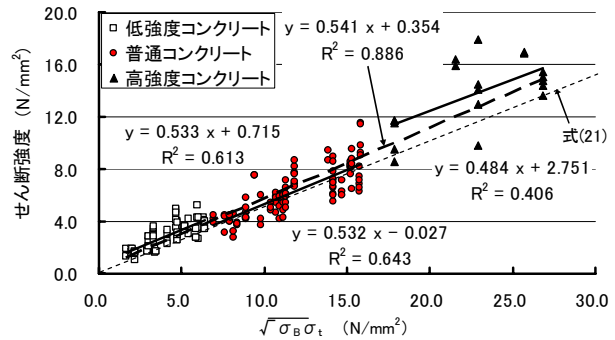


図 14 せん断強度のモールの破壊式との関係

謝辞

低強度の製造に関しては、(株)まるせのご協力をいただきました。さらに、普通コンクリートの曲げ試験供試体、および4週強度試験結果は(株)まるせ、および(株)中国生コンクリートからご提供いただきました。

また、せん断試験治具の製作は(株)丸井産業に、型枠の製作に関しては(株)栗本鐵工所の多大な協力を得ました。ここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断規準・同解説，2001
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリート技術の要点 '07，2007
- 3) 岡田清，六車熙編：コンクリート・ハンドブック，朝倉書店，1981
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説 - 許容応力度設計法 - ，1999
- 5) 赤沢常雄：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って)，土木学会誌，29 - 11，昭 18.11
- 6) B.R.Sen & A.L.Bharara：A New Indirect Tensile Test for Concrete，Indian Concrete J.35 - 3，Mar.1961，p.85.