

超高強度コンクリートの爆裂破壊の予知に関する研究

浅野工学専門学校 正会員 ○殿廣 泰史  
 浅野工学専門学校 正会員 加藤 直樹  
 防衛大学校 加藤 清志

1. ま え が き

近年、100 N/mm<sup>2</sup>以上の高強度コンクリートに大きな関心もたれ、特殊な混和材(剤)との併用により比較的容易に製造可能となっており、コンクリート技術の革命といえる。かくして、構造材の高強度・高耐久化が可能となっているが、一つの大きな弱点としては、終局耐力が先駆現象なしに爆裂(Bursting)する点にある。普通コンクリートには流動応力(Flow stress)が耐力点の約5%早期に発生する。高強度の場合には主筋およびフープ筋による格子効果にもかかわらずデブリの飛散が高速度カメラで確認されている。施工法的にはポリプロピレン(Polypropylene)繊維の使用は有効である<sup>1)</sup>。

2. 超高強度コンクリートの変形特異点と耐力予知

いま、コンクリート強度(N/mm<sup>2</sup>)を15 ≤ (普通) ≤ 60 (高強度) < 100 (超高強度) ≤ 140 (特別高強度) へとイメージし、普通ポルトランドセメントを用い、質量配合比を1:1:2, 1:1.5:3, 1:2:4, 1:3:6の4種、各に対しスランプを3 cm, 15 cmの2種とした。養生方法は、シリーズⅠ:1日湿空, 27日水中養生;シリーズⅡ:1日湿空, 6日水中, 21日気乾養生;シリーズⅢ:28日気乾養生 等の3条件とした。

供試体は超音波伝播速度測定上、100×100×200 mm角柱とした。以上から、強度範囲15~60 N/mm<sup>2</sup>が求められた<sup>2)</sup>。Fig.1は圧縮荷に伴う縦ひずみ(ε<sub>c</sub>), 横ひずみ(ε<sub>T</sub>), 体積ひずみ(ε<sub>v</sub>), ポアソン比(μ)の変動曲線をそれぞれ示す。比例限度(μ)はε<sub>c</sub>曲線の直線部からの離脱点, 臨界応力度<sup>\*1</sup>は最小体積応力度で, 持続荷重に対するクリープ限度と等価の時前評価のための重要な特異点の一つである。さらに荷が進むとコンクリートの内部ひび割れが, あたかも増殖するかのよう機能し, 見掛けの体積が増大しつつ, 初期の原体積V<sub>0</sub>に復帰する<sup>\*2</sup>。この特異点を“流動応力”σ<sub>FL</sub>と呼ぶ<sup>3)</sup>。なお, Fig.1(b)に示すポアソン比(ν)曲線でν=0.5までは, 弾性論は実用的に拡張使用されている。

Fig.1(a), (b)中の小円は流動応力該当点である。Fig.2は設計圧縮強度(σ<sub>u</sub>)範囲15~60 N/mm<sup>2</sup>, 供試体数113体から得られたデータであり, 図中の強度に対応する臨界応力度(σ<sub>CR</sub>)・流動応力(σ<sub>FL</sub>)との相関式を実線{式①・②}で, 各の強度比1.00に関する推定線は破線で示した。

$$\text{臨界応力度比} : \sigma_{CR} / \sigma_u = 0.287 \times 10^{-2} \sigma_u + 0.722 \dots \text{①}$$

$$\text{流動応力度比} : \sigma_{FL} / \sigma_u = 0.123 \sigma_u + 0.904 \dots \text{②}$$

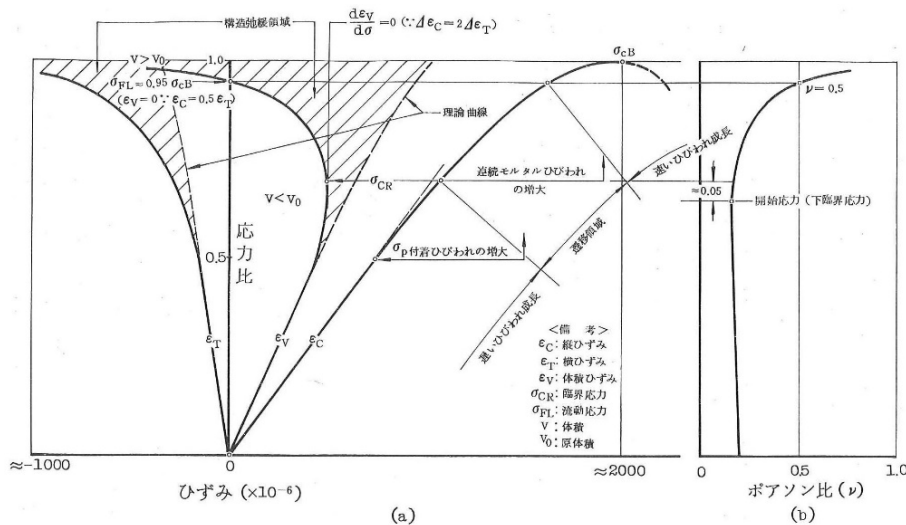


Fig.1 Relationships between Fracture Mechanism and Internal Cracking under Short-term Loading of Plain Concrete.

キーワード 超高強度コンクリート, 爆裂破壊, 先行予知, 臨界応力度, 流動応力度, 動ひずみ特性  
 連絡先 〒220-0073 横浜市神奈川区子安台 1-3-1 浅野工学専門学校 TEL:045-421-0403 FAX:045-431-9724

式①, ②で推定される破壊予知点は, 高強度コンクリートほど弾性的挙動範囲は広がること, すなわちガラス化し, 爆裂と終局強度とが一致する特性を示す。式①・②で右辺を 1.00 として求めた強度は次のようである。

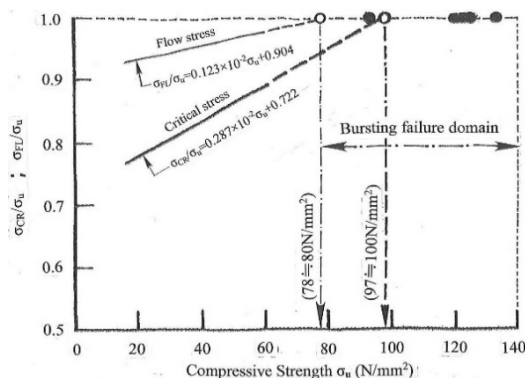


Fig.2 Flow or Critical Stress vs. Compressive Strength.

式①より臨界応力度:  $\sigma_{CR} \equiv \sigma_u = 96.9$   
 $\approx 100 \text{ (N/mm}^2\text{)}$

式②より流動応力度:  $\sigma_{FL} \equiv \sigma_u = 78.0$   
 $\approx 80 \text{ (N/mm}^2\text{)}$

すなわち, 高強度コンクリート 80 N/mm<sup>2</sup> 以上では流動応力点が発生し爆裂する。したがって, この特異点が破壊予知点となり得る。しかしながら, 臨界応力度 100 N/mm<sup>2</sup> 以上の超高強度では体積縮小から緩やかながら膨張へ転じ, 流動応力点に達する以前に爆裂する場合もある。理論的には  $\sigma_{CR} > \sigma_{FL}$  であり, 限界値は式① = 式②から  $\sigma_u \approx 110 \text{ N/mm}^2$  が求まり, 参考文献\*1 に示すようにし超高強度コンクリートの破壊予知点となり得るといえる。

3. 超高強度コンクリートの構成

粗骨材は密度 2.65 g/cm<sup>3</sup> の品質良好な硬質砂岩碎石 (2005) で, 配合は W/C = 13 %, s/a = 40 % ; 単位量は W = 152.6 kg, C = 1,174 kg, S = 434.7 kg, G = 655.0 kg, 超高強度用高性能減水剤 (主成分: ポリカルボン酸エーテル化合物) は B 社製で 16.436 kg, 特殊セメントは D 社製超高強度 (普通ポルト, 高炉石こう系混和材, シリカフュームのプレミックスタイプ) を使用した。スランプフローは平均 684 mm, 空気量は 6.3 %, コンクリート密度は 3.12 kg/l である。

4. 実験的考察と結論

Fig.2 に示した強度と特異点との相関関係から推定される流動応力点  $\sigma_{FL}$  は, 圧縮強度  $78 \approx 80 \text{ N/mm}^2$  で発生し得るので強度の約 5 % 以下で発生するので,

破壊予知として有効である。さらに, 先端予知として臨界応力度を採用すると, さらに 5.4 % 早やめ pre-forecast として利用できることが判明した。Fig.3 は流動応力点と臨界応力度との相対的關係を示す。前述式①と同②との交点以上の超高強度コンクリートの

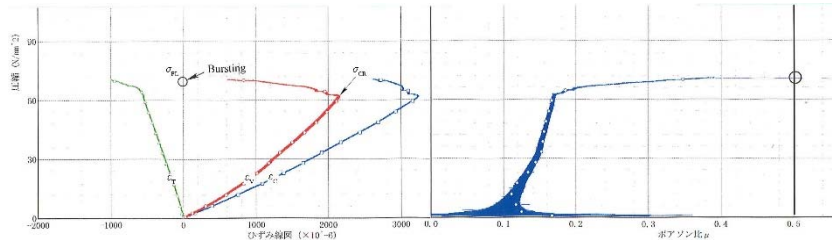


Fig.3 Bursting Forecast by Flow Stress-level in Case of High Strength Concrete.

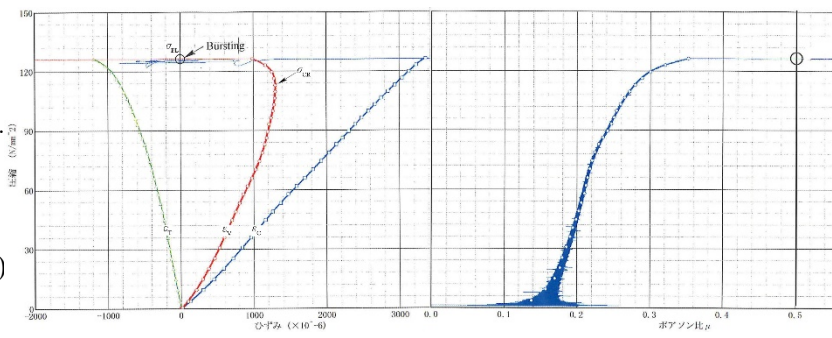


Fig.4 Bursting Forecast by Critical Stress-level in Case of Ultrahigh Strength Concrete.

圧縮応力優先のドメインをもつ躯体の下限值が考えられ, よって  $\sigma_u \approx 110 \text{ N/mm}^2$  が求まる。以上から超高強度コンクリートの一例 ( $\sigma_u = 126 \text{ N/mm}^2$ ) を Fig.4 に示す。図より臨界応力度は  $\sigma_{CR} = 112 \text{ N/mm}^2$  と明瞭に現われ, 約 10% 前の破壊予知点としてきわめて有効である。なお, 本実験には T 社製高速動ひずみレコーダー (サンプル間隔 20  $\mu\text{s}$ ) を使用したが, 本研究のような高速破壊現象追跡にきわめて有効であった。Fig.3 は流動応力点と最大耐力点 70 N/mm<sup>2</sup> とが, 一致していること, Fig.4 は臨界応力度が爆裂先行予知点であり, かつ最大耐力-流動応力点-ポアソン比 0.50 が同一線上で一致し, 力学理論の整合性をあきらかにした。

参考文献と補足事項

- 1) 殿廣泰史・加藤直樹・木田哲量・近藤 勉・今野 誠・須藤 誠・清水健介・高野真希子・若松勝豊・加藤清志: 超高強度コンクリート構造部材の高耐力下での爆裂現象とその対策に関する研究, 日本大学生産工学部第 50 回学術講演会講演概要, (2017.12.2) pp.63-66.
- 2) 加藤清志: プレーンコンクリートの微小ひびわれと物性評価, 土木学会論文報告集 208, pp.121-136 (1972.12).
- \*1 一般に物体は最小体積で真の物性を示すことがわかっている。直交する 2 方向横ひずみ  $\epsilon_{T1}, \epsilon_{T2}$  から  $\epsilon_T = (\epsilon_{T1} + \epsilon_{T2}) / 2$  とすると, 体積ひずみ  $\epsilon_V \approx \epsilon_C - 2\epsilon_T$   
 $\frac{\partial \epsilon_V}{\partial \sigma} = \frac{\partial \epsilon_C}{\partial \sigma} - 2 \frac{\partial \epsilon_T}{\partial \sigma} \equiv 0 \quad \therefore 4\epsilon_C \approx 24\epsilon_T$   
 この特異点では, 縦ひずみの増分は横ひずみの増分の 2 倍に等しい。
- \*2  $\epsilon_V \approx \epsilon_C - 2\epsilon_T \equiv 0 \quad \epsilon_T / \epsilon_C = 0.5 \equiv \mu$  すなわち, 体積変化 0 となり, 原体積に復帰することを意味する。理論的には材料が非圧縮体, すなわち流動化状態を示す。よって, この応力点を流動応力 (Flow stress)  $\sigma_{FL}$  と呼ぶ。
- 3) 加藤清志: コンクリートの真の強度に関する研究, 研究開発四季報⑤土木建築・環境編, 日本ビジネスレポート (1980.9), pp.22-29.