

1. 緒言

コンクリート材料は、主として圧縮強度部材として使用され、コンクリートの様々な物性が定性的に圧縮強度と関係している等の理由で、破壊強度に関しては静的圧縮強度を中心として数多くの研究がなされてきた¹⁾。しかし、衝撃的な荷重が作用するときそれが圧縮荷重であっても応力波の反射・干渉の結果、引張り応力波が伝播し引張り応力領域が生じる場合がある。飛来物の衝突や激震時にコンクリート構造物が衝撃的な荷重を受けることを想定するとコンクリート材の衝撃引張り強度を明らかにすることは重要である²⁾。

本研究では著者らが先に提案した簡便な衝撃引張り法である反射応力波法³⁾をコンクリート材に適用し衝撃引張り強度およびひずみ速度を求め、コンクリート材のひずみ速度依存性を検討した。

2. コンクリート試験材

試験材料の重量配合比を Table 1 に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、粗骨材の粒径を最大 10mm とした。コンクリート試験材の直径は 50mm、長さ 750mm の円柱試験片で材齢は 10 カ月のものを用いた。

Table 1 Mix proportions of concrete for a cubic meter.

Material	Quantity
Water/cement ratio	0.5
Portland cement	370 kgf
Water	185 kgf
Fine aggregate	874 kgf
Coarse aggregate	874 kgf
Water-reducing admixture	0.74 kgf
Total weight per cubic meter	2303 kgf

コンクリート供試体の機械的性質を得るために静的間接引張り試験（割裂試験）、三点曲げ試験および圧縮試験を行った。得られた機械的性質を Table 2 に示す。

Table 2 Mechanical properties of concrete.

Mechanical Properties	Value
Splitting tensile strength (σ_s)	2.9 MPa
Bending strength (σ_b)	5.4 MPa
Compressive strength (σ_c)	30.5 MPa
Elastic modulus (E)	27.8 GPa
Mass density (ρ)	2314 kg/m ³
Poisson ratio (ν)	0.2
Velocity of stress wave (c_0)	3885 m/s

3. 反射応力波法による衝撃引張り試験

3・1 実験装置および方法 本実験に用いた反射引張り応力波法の実験装置の主要寸法と波動伝播模式図を Fig.1 に示す。供試コンクリート材（直径 50mm、長

さ 750mm）の中央近傍が引張り応力波の集中開始位置になるように衝撃棒には長さ 500mm、直径 20mm のステンレス（SUS306）丸棒を用い、入力伝達棒には長さ 1500mm、直径 50mm のアルミニウム合金（H4040）丸棒を用いた。また、入力伝達棒には試験片接触端面より 6d、12d（d：入力伝達棒および試験片棒の直径）の位置にそれぞれ半導体ひずみゲージが 2 枚軸対称に貼付されており、衝撃棒から入力伝達棒への入射応力と試験片端からの反射波が検出され、入力伝達棒から試験片への入射応力が 2 点ひずみゲージ法によって算出される。また、試験片内の応力波の伝播挙動を調べるため試験片棒にも両端より 5d の 2 箇所それぞれひずみゲージが 2 枚軸対称に接着されている。試験片中央にはクラックゲージが貼付されており応答から破断時間を計測した。

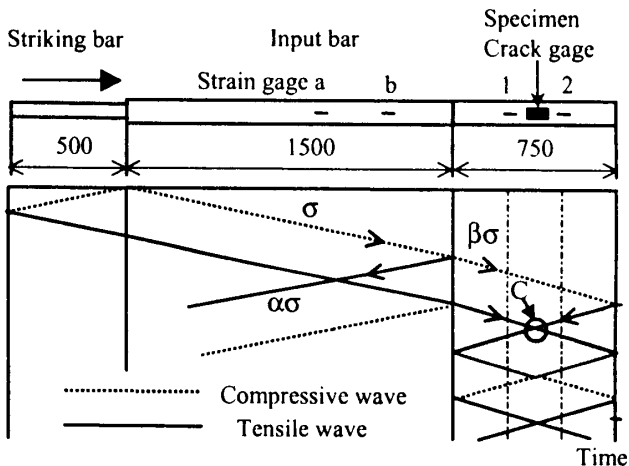


Fig.1 Stress wave propagation and superposition of tensile stress waves in a concrete specimen bar.

3・2 衝撃引張り強度 コンクリート材は極めて脆性的な破壊挙動を示し強度にばらつきを持つ。したがって、ここではワイブル分布を本実験結果に適用してコンクリート材の破壊強度を統計的に評価した。累積破壊確率 F_i はメディアンランク法を用いて算出し、またその回帰直線は最小二乗法により求めた。統計結果を Fig.2 に、またその各パラメータである試験片数 n 、形状母数 m 、尺度母数 ξ 、平均値 μ 、標準偏差 $S.d.$ を Table 3 に示す。なお、詳細は省略するが、Table 2 に示した静的割裂、曲げ、圧縮および衝撃割裂、圧縮試験の結果も付記している。供試コンクリートの衝撃引張り強度は割裂試験による静的引張り強度に比べて約 2 倍の値となっている。ただし、ここで定義される衝撃引張り強度は、静的引張り強度とは異なり、引張り破断が生ずる臨界応力を示している。したがって、さらに大きな衝撃引張り応力が作用し引張り破断するとき、

それらの応力とひずみ速度を同定する必要がある。

3・3 ひずみ速度依存性 本実験においてひずみ速度を求める場合、引張り応力発生後いつの時点で破断が起こるかを、すなわち標点距離としての引張領域を知る必要がある。ここでは引張り開始時間をコンクリート試験片棒に貼付したひずみゲージから、破断時間をクラックゲージから求めてひずみ速度を算出した。試験片に貼付したひずみゲージおよびクラックゲージの応答波形の一例を Fig.3 に示す。実線で示されている応答波形は試験片に貼付されたひずみゲージ 2 より得られた応答波形（破線）を試験片棒の破断位置における引張り開始時間に合わせるために時間軸を $34\mu\text{sec}$ 進めたものである。また、コンクリート試験片の破断開始と共にクラックが進行しクラックゲージのグリッドが切断され抵抗変化として出力されるので試験片の破断時間をクラックゲージの立ち上がり時間から求めることができる。図より試験片への圧縮応力入射後、引張り開始時間は $431\mu\text{sec}$ 、破断開始時間は $548\mu\text{sec}$ と推定できる。したがって標点距離としての引張り領域 l は中央から左右に進展していくことを考慮して $l=2c_0\Delta t=0.85\text{m}$ と求めることができる。したがって粒子速度 v と応力 σ の関係 $v=\sigma/\rho c_0$ を用いることにより、ひずみ速度は $\dot{\epsilon}=v/l=1.35\text{sec}^{-1}$ と求められる。このときの衝撃引張り応力は約 9.2MPa である。Fig.2 および Table3 に示した衝撃引張り強度およびそれを超える衝撃引張り応力を作用させて得られた実験結果について、衝撃引張り応力-ひずみ速度の関係を求めた。得られた結果を Fig.4 に示す。比較のため静的割裂、衝撃割裂試験による応力-ひずみ速度の関係を同図に付記した。図より明らかに静的試験に比べ動的試験での値が大きな値を示し、コンクリート材のひずみ速度依存性が認められる。また、反射応力波を利用した本衝撃引張り試験結果のひずみ速度効果は衝撃割裂試験の場合のそれとわずかに差異が生ずることがわかる。

4. 結言

一次元応力波の反射・重ね合わせを利用した反射引張り応力波法によって、コンクリート材の衝撃引張り強度およびひずみ速度効果について検討を行った。

試験片に貼付したひずみゲージより引張り応力集中開始時間を求め、破断時間をクラックゲージを用いて計測しひずみ速度を求めた。コンクリート材の衝撃引張り強度 ($\dot{\epsilon}=10^0\text{sec}^{-1}$) は静的割裂強度の約 2 倍となり、 $\dot{\epsilon}=10^0\sim 10^1\text{sec}^{-1}$ で大きなひずみ速度効果を示した。

参考文献

- 1) 日本コンクリート協会編, コンクリート便覧(第二版), (1996), 技報堂出版。
- 2) 野中泰二郎, 構造物の衝撃的破壊メカニズムの解明と防止, 京都大学防災研究所特定共同研究(8P-1) 報告書, (1998)。
- 3) M.Daimaruya, H.Kobayashi and T.Nonaka, Journal de Physique IV, 7, C3-253 (1997)。

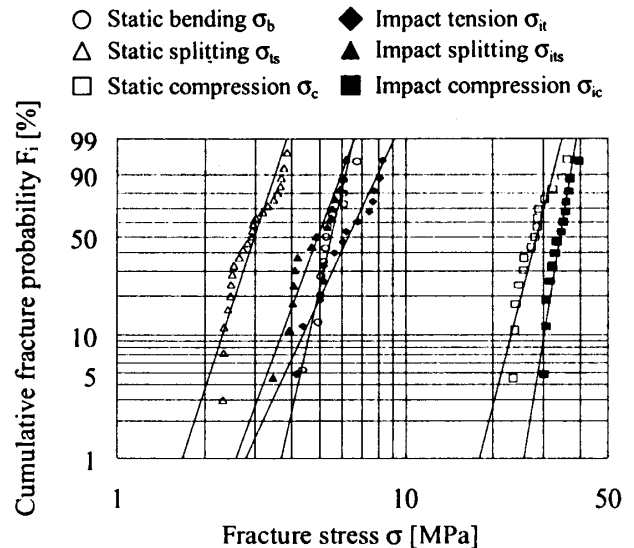


Fig.2 Weibull distribution of concrete strength.

Table 3 Result of statistical analysis.

Test		σ_b	σ_{ts}	σ_c	σ_{it}	σ_{its}	σ_{ic}
Number of samples	n	13	23	15	14	15	14
Shape parameter	m	10.6	6.3	9.8	5.2	6.5	14.6
Scale parameter [MPa]	ξ	5.7	3.1	29.3	6.8	5.2	36.9
Mean [MPa]	μ	5.4	2.9	27.8	6.2	4.9	33.7
Standard deviation [MPa]	$S.d.$	0.5	0.6	3.4	0.9	0.9	2.8

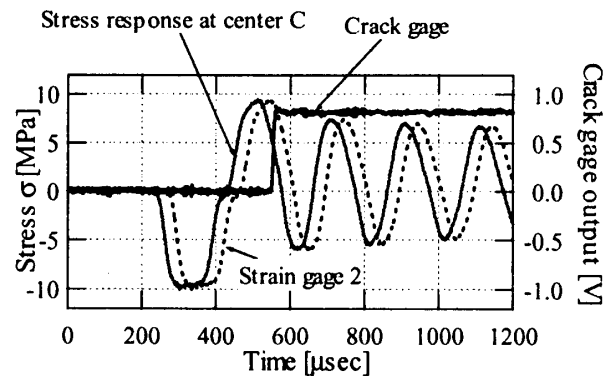


Fig.3 Responses of strain and crack gages.

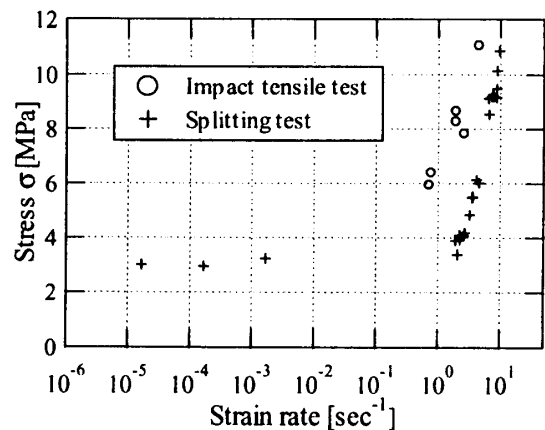


Fig.4 Strain rate effects on concrete strength.