

点載荷圧裂試験による人工軽量骨材の強度に関する研究*

A STUDY ON THE STRENGTH OF ARTIFICIAL LIGHTWEIGHT
AGGREGATE CONCRETE UNDER SPILLING TEST SUBJECTED
TO CONCENTRATED LOADS西 林 新 蔵**・木 山 英 郎***・阪 田 憲 次****
By Shinzo Nishibayashi, Hideo Kiyama and Kenji Sakata

1. ま え が き

骨材はコンクリートの全容積の約 65~80% を占めるものであるから、その性質の良否は直接コンクリートの諸性質に大きな影響をおよぼすものと考えられる。

土木学会コンクリート標準示方書は、骨材は清浄、強硬、耐久であり、粒形が球形または立方形に近く、適当な粒度をもち、有機物、ごみ、どろなどの有害物を含んではならないと規定している。すなわち骨材そのものに対しては、強硬、耐久という術語でその性質を規定している。

骨材がもつべき主要な性質のうち強硬、すなわち骨材の強度について考えてみると、強硬な骨材を使用したコンクリートの強度は主として水セメント比に基づくセメントペーストの強さによって支配されるが、セメントペーストよりも小さい強さの骨材を用いる場合、コンクリートの強度はこれら骨材の強度に支配されることがある。骨材の強度は、BS 812、ソ連規格、アメリカ開拓局法などに規格化されている破碎試験、JIS 規定のすりへり抵抗性試験 (JIS A 1120, 1121)、さらには粗骨材中の軟石量試験 (JIS A 1126) などによって間接的に求めるか、あるいはコンクリートの強度とモルタルの強度の比から骨材強度を計算によって推定する方法¹⁾などがあるが、直接試験によって骨材強度を求める方法は今までのところ確立されていない。

一方、骨材の耐久性について考えると、コンクリート中の弱い骨材が分解する場合、あるいは温度や湿度の変化さらには凍結融解作用などによって骨材に大きな容積変化を生ずる場合には、コンクリートは浸蝕されたり破壊したりする。したがって、骨材は温度変化や乾湿の変

化等の物理的な風化作用に対して安定なものでなければならぬ。骨材の耐久性は、硫酸ナトリウムまたは硫酸マグネシウムの飽和溶液が骨材を分解する作用に対する抵抗性を検討する、骨材の安定性試験 (JIS A 1122) によって判定されている。

このように、コンクリートの強度や耐久性に直接的または間接的な影響をあたえる骨材の強度や耐久性などの力学的性質は、コンクリートに対するように容易に求めることはできないので、相対的な値を定量化してそれらの基本的性質を判断しているにすぎないのが現状であるといえる。

本研究は、赤沢²⁾によって考案され現在コンクリートの引張強度試験法として JIS 化されている圧裂試験や、岩石の引張強度を求めるために応用されている円板の圧裂試験や角板のインデンテーション試験³⁾ (一定幅均一載荷圧裂試験)、さらには木山⁴⁾によって理論的に検討された塊状試験片に対する点載荷圧裂試験法を骨材の強度試験に応用して、骨材強度を直接的に求める方法を確立するために計画した。

本文は、骨材に点載荷圧裂試験法を適用するのに先立ち、まずこれを理論的に解析した結果について述べ、次にそれに基づいて実際に骨材強度試験を実施し、その結果に対し若干の考察を加えたものである。

2. 点載荷圧裂試験の理論的考察

骨材は一般に不規則な塊状を呈しているため、その強度は、河川産骨材の場合は成因が等しいと考えられる岩石、砕石の場合は原石から切り出して整形された試験片によって判定されている。しかし、最近開発された人工軽量骨材は原料を調合し焼成されたものであるから、原料と結びつけて骨材強度を推定することは不可能である。人工軽量骨材を用いたコンクリートの強度、弾性的性質あるいは破壊の機構を解明するためには、それらと

* 本論文は土木学会第 25 回年次学術講演会にて一部発表

** 正会員 鳥取大学教授 工学部土木工学科

*** 正会員 鳥取大学助教授 同

**** 正会員 鳥取大学助手 同

密接な関係のある骨材強度を正確に推定する必要があるが、前述したように現状では間接的に（たとえば、BS 規定の破碎試験）骨材の強度を推定する方法が採られているに過ぎない。

骨材等の不規則塊状態の強度を求める試験法として、試験体をほぼ最短距離の二点ではさんで点载荷を行なう方法が考えられるが、この場合、試験体内の応力分布を解析し、実際にこの方法によって骨材強度を正確に推定できるかどうかを検討しておく必要がある。

木山らは、不規則な形の弾性体の代りに幾何学的に単純な形の球、立方体、直方体を考え、これらの中心軸を通る最短径に沿って点载荷を行なった場合の内部応力状態を三次元光弾性実験によって検討している。その結果、点载荷されたこれら試験体の内部応力状態は载荷点を結ぶ直線を直径とする球、あるいはそれに近い円体の応力状態に等しく、しかもこの直径付近の応力の大きさは試験体の形状にかかわらずほぼ等しいことを確かめた⁴⁾。これらの事実から、不規則な塊状試験体に载荷点を行なったとき、それを含む直径付近の応力は球のそれと大差はないものと考えることができる。

(1) 弾性球に点载荷したときの弾性理論解析

半径 a の弾性球の中心 O を原点として 図-1 に示すような直交座標 (x, y, z) と球座標 (r, θ, ϕ) をとり、この球の z 軸に沿って点载荷を行なった場合について考える。球内の応力成分を球座標に関連して表わ

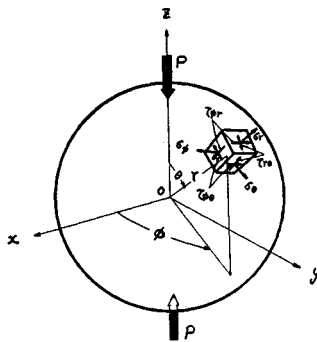


図-1 点载荷における球座標

し、かつ応力は ϕ に無関係であることを考慮すれば、応力のつりあい条件は次式で与えられる。

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{1}{r} (2\sigma_r - \sigma_\theta - \sigma_\phi + \tau_{r\theta} \cot \theta) = 0 \quad \dots\dots\dots(1-a)$$

$$\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \{(\sigma_\theta - \sigma_\phi) \cot \theta + 3\tau_{r\theta}\} = 0 \quad \dots\dots\dots(1-b)$$

$$\frac{\partial \tau_{\phi r}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \{3\tau_{r\theta} + 2\tau_{\theta\phi} \cot \theta\} = 0 \quad \dots\dots\dots(1-c)$$

次に、载荷前の球内の任意の点は载荷によって変位するが、 r, θ および ϕ の増加の方向の変位成分をそれぞれ u, v および w とすれば、これらの変位は ϕ に無

関係となる。したがって、応力と変位の関係は次のようになる。

$$\sigma_r = \frac{\lambda}{r^2 \sin \theta} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} (r^2 u \sin \theta) + \frac{\partial}{\partial \theta} (rv \sin \theta) \right\} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial r} \quad \dots\dots\dots(2-a)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\lambda}{r^2 \sin \theta} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} (r^2 u \sin \theta) + \frac{\partial}{\partial \theta} (rv \sin \theta) \right\} + 2\mu \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{u}{r} \right\} \quad \dots\dots\dots(2-b)$$

$$\sigma_\phi = \frac{\lambda}{r^2 \sin \theta} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} (r^2 u \sin \theta) + \frac{\partial}{\partial \theta} (rv \sin \theta) \right\} + 2\mu \left\{ \frac{u}{r} + \frac{v}{r} \cot \theta \right\} \quad \dots\dots\dots(2-c)$$

$$\tau_{r\theta} = \mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right\} \quad \dots\dots\dots(2-d)$$

$$\tau_{\theta\phi} = \mu \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} - \frac{w}{r} \cot \theta \right\} \quad \dots\dots\dots(2-e)$$

$$\tau_{\phi r} = \mu \left\{ \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{w}{r} \right\} \quad \dots\dots\dots(2-f)$$

この応力のつりあい式 (1) および応力と変位との関係式 (2) とから次式のような応力成分が得られる。なお、式 (3) の誘導については文献 4) を参照されたい。

$$\sigma_r = -(1 - \cos \theta_0) p - \sum_{n=1}^{\infty} \left[P_{2n}(\cos \theta) \cdot \left\{ -\frac{(4n^2 - 2n - 3)\lambda + (2n+1)(2n-2)\mu}{(4n+3)} r^{2n} + \frac{4n^2(2n+2)\lambda + 2n(4n^2 + 4n - 1)\mu}{(2n+1)(4n+3)} \cdot a^2 r^{2n-2} \right\} - \frac{(4n+3)(4n+1)\{\cos \theta_0 P_{2n}(\cos \theta_0)\}}{\{(8n^2 + 8n + 3)\lambda} - \frac{P_{2n-1}(\cos \theta_0)\}}{(8n^2 + 4n + 2)\mu} a^{2n} \cdot p \right] \quad \dots\dots\dots(3-a)$$

$$\sigma_\theta = -(1 - \cos \theta_0) p - \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left\{ P_{2n}(\cos \theta) \cdot \left(\frac{(2n+3)\lambda - (2n-2)\mu}{4n+3} r^{2n} + \frac{4n^2(2n+2)\lambda + 2n(4n^2 + n - 1)\mu}{(2n-1)(2n+1)(4n+3)} \cdot a^2 r^{2n-2} \right) + \frac{\partial^2 P_{2n}(\cos \theta)}{\partial \theta^2} \left(-\frac{(2n+3)\lambda + (2n+5)\mu}{(2n+1)(4n+3)} r^{2n} + \frac{2n(2n+2)\lambda + (4n^2 + 4n - 1)\mu}{(2n-1)(2n+1)(4n+3)} a^2 r^{2n-2} \right) \right\} - \frac{(4n+3)(4n+1)\{\cos \theta_0 P_{2n}(\cos \theta_0)\}}{\{(8n^2 + 8n + 3)\lambda} - \frac{P_{2n-1}(\cos \theta_0)\}}{(8n^2 + 4n + 2)\mu} a^{2n} \cdot p \right] \quad \dots\dots\dots(3-b)$$

$$\sigma_\phi = -(1 - \cos \theta_0) p - \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left\{ P_{2n}(\cos \theta) \cdot \left(\frac{(2n+3)\lambda - (2n-2)\mu}{(4n+3)} r^{2n} \right) \right\} \right]$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{4n^2(2n+2)\lambda + 2n(4n^2+4n-1)\mu}{(2n-1)(2n+1)(4n+3)} \cdot a^2 r^{2n-2} \\
 & + \cot \theta \frac{\partial P_{2n}(\cos \theta)}{\partial \theta} \\
 & \cdot \left(-\frac{(2n+3)\lambda + (2n+5)\mu}{(2n+1)(4n+3)} \cdot r^{2n} \right. \\
 & \left. + \frac{2n(2n+2)\lambda + (4n^2+4n-1)\mu}{(2n-1)(2n+1)(4n+3)} \cdot a^2 r^{2n-2} \right) \\
 & \cdot \frac{-(4n+3)(4n+1)\{\cos \theta_0 P_{2n}(\cos \theta_0)\}}{\{(8n^2+8n+3)\lambda} \\
 & \frac{-P_{2n-1}(\cos \theta_0)\}}{+(8n^2+4n+2)\mu\} a^{2n}} \cdot p \dots\dots\dots (3-c) \\
 \tau_{r\theta} = & -\sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\partial P_{2n}(\cos \theta)}{\partial \theta} \{-r^{2n} + a^2 r^{2n-2}\} \right. \\
 & \cdot \frac{2n(2n+2)\lambda + (4n^2+4n-1)\mu}{(2n+1)(4n+3)} \\
 & \cdot \frac{-(4n+3)(4n+1)\{\cos \theta_0 P_{2n}(\cos \theta_0)\}}{\{(8n^2+8n+3)\lambda} \\
 & \left. \frac{-P_{2n-1}(\cos \theta_0)\}}{+(8n^2+4n+2)\mu\} a^{2n}} \cdot p \right] \dots\dots\dots (3-d) \\
 \tau_{\theta\phi} = & 0 \dots\dots\dots (3-e) \\
 \tau_{\phi r} = & 0 \dots\dots\dots (3-f)
 \end{aligned}$$

ここに、 $P_n(\cos \theta)$ は第1種 Legendre 関数、 n は自然数である。

球に対する総荷重を P とすると、 p は次式で計算できる。

$$p = \frac{P}{\pi a^2 \sin^2 \theta_0} \dots\dots\dots (4)$$

球に対して点荷重するときは、式(4)を式(3)に代入して θ_0 を 0 に収束させることによって各応力成分が求まる。

(2) 応力分布 (数値計算結果)

球形試験片に点荷重したとき、荷重点を通る軸上に生ずる応力成分を、先に述べた弾性理論解析の結果に基づき、電子計算機を用いて計算した。各応力成分は、試験片のポアソン数 m 、荷重の中心角 $2\theta_0$ および球中心からの距離と球の半径との比 r/a によって変化するが、ヤング係数 E の影響は受けない。計算に当っては、 m および θ_0 をそれぞれ 3~10、5°~15° に選び、これら種々の値を組合わせた場合の応力分布を求めた。一例として、 $\theta_0=5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ の場合の応力分布を示すと図-2 のようになる。

この荷重点を通る球軸上において、これと垂直な2つの主応力 $\sigma_\theta, \sigma_\phi$ (ただし、 $\sigma_\theta = \sigma_\phi$) は $\theta_0=5^\circ \sim 15^\circ$ の範囲で引張応力となり、軸に沿うもう一つの主応力 $\sigma_r (= \sigma_z)$ はつねに圧縮応力である。また、荷重点付近では三主応力とも大きい圧縮応力が現われる。

試験片の荷重軸上に分布する圧縮応力 σ_r は m によってほとんど変化せず、球中心において最も小さく、圧

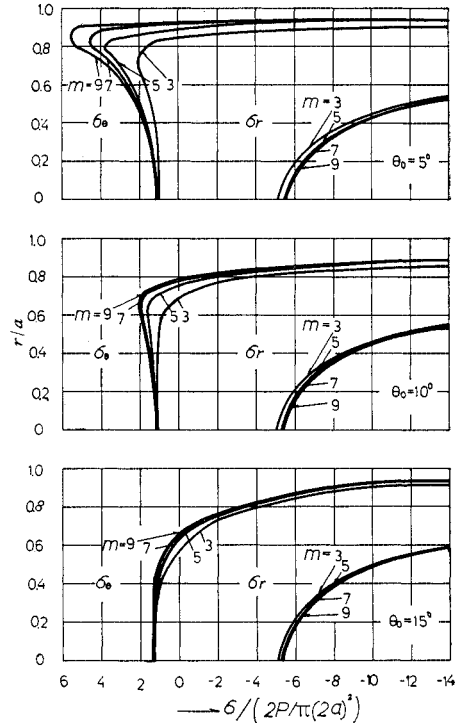


図-2 点荷重を受けた弾性球の z 軸上の σ_r, σ_θ と θ_0 および m との関係

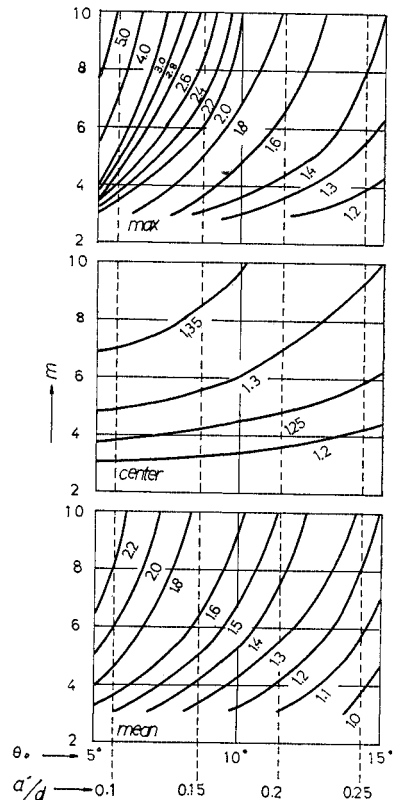


図-3 点荷重を受けた弾性球の引張応力と θ_0 および m との関係

縮と引張の応力比は θ_0 によってほとんど変わらず約5である。この σ_r は中心から載荷点に近づくに従って最初は徐々に、その後は次第に急激に増加し、 σ_0 が引張応力の範囲では各点において圧縮・引張応力の比は 5~15 となる。なお、この比は θ_0 が大きくなるとともに小さくなる。

次に、載荷軸上の引張応力について考えると、その最大値は、 θ_0 の小さいときには、 $r/a=0.9\sim 0.7$ の付近に生じ、 m が大きいほどその値は大きくなる。 θ_0 が大きくなるにつれてこのピークが現われる位置は中心方向に移動し、 m の影響が緩和され、かつその値も小さくなり、 θ_0 が 10° 以上になるとほぼ均一な分布となる。

上述した引張応力と θ_0 および m との関係を示すと図-3 のようになる。図において、上段は最大引張応力、中段は試験片中心における引張応力、下段は引張応力分布域における引張応力の平均値を示し、また図中の数字は応力を $2P/\pi(2a)^2$ で除した値である。

(3) 骨材強さの算定式

点載荷圧裂試験による骨材の強さを S_t とすると、 S_t の算定式は応力解析の結果から次式のような形となる。

$$S_t = k \frac{2P}{\pi d^2} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 P は破壊荷重、 $d(=2a)$ は骨材の最短径である。また、 k は骨材の破壊機構や試験の条件、すなわちポアソン数 m 、骨材の長径比 b/d 、載荷点のポンチの直径と骨材の最短径との比 a'/d によって決まる係数である。

いま、図-4 に示すように直径 a' のポンチで骨材のほぼ最短径 d に沿って圧縮し、その際の破壊荷重 P を求めると式 (5) から骨材の引張強度が与えられる。式 (5) の係数 k の値におよぼす b/d の影響については、木山らが行った高さや直径との比が異なる円柱体の点載荷圧裂試験の結果⁹⁾ から、 b/d が 1.0~2.0 の範囲ではこの b/d の影響はきわめて小さく実用上無視できることがわかる。

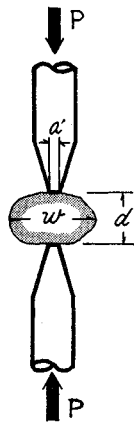


図-4 骨材の点載荷

したがって、砕石や人工軽量骨材はともに b/d がこの範囲に入るので、 b/d の k におよぼす影響は考えなくてもよいことになる。ポンチの径と d との比は k の値にかなりの影響をおよぼすことが前述した応力分布からわかる。本実験では d を 5~15 mm とみなして、 a' を 2 mm に選んだ。そこで、図-3 より種々の a'/d に対する k の値を読みとり、これをポアソン数 m をパラ

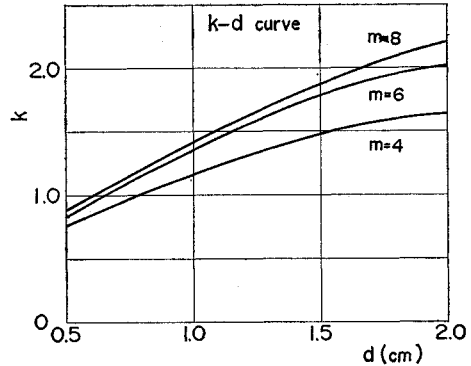


図-5 圧裂強度係数 k 、粒径 d およびポアソン数 m の関係
メーターとして画くと図-5 に示すようになる。なお、ポアソン数 m は構造用材料のうちじん性に富むものから脆性のもので対象とし、 $m=4\sim 8$ に選んだ。骨材の場合は、種々の岩石に対する実測結果とコンクリートのポアソン数から判断して、 $m=6$ を採用することにした。

3. 点載荷圧裂試験による骨材強度

前節で述べた点載荷圧裂試験法に対する理論的考察の結果に基づき、骨材、主として人工軽量骨材の圧裂強度を測定した。

本試験に供した骨材は、砕石(硬質砂岩系)1種類、造粒型人工軽量骨材4種類(うち1種類は試作品)および非造粒型人工軽量骨材4種類の合計9種類で、いずれも骨材最大寸法 10~20 mm のものである。これら供試骨材の物理的性質のうち比重および吸水率を表-1 に示す。

表-1 に示した骨材それぞれについて、絶乾状態ならびに表乾状態(5日間吸水)のものを500個ずつ選び、個々の骨材の最短径をノギスで 1/10 mm まで測定した後点載荷圧裂試験を実施し(写真)、骨材の破壊荷重を求めて式 (5) から骨材強度を算定した。なお、式 (5) 中の k の値には、図-5 においてポアソン数 $m=6$ と測定した骨材の最短径から読みとった値を採用した。結果の一例を図-6 に示すが、各粒径における測定値のばらつきはきわめて大きく、このままではくわしい考察を加えることがほとんど不可能である。そこで、骨材の加圧による破壊は本来確率統計的な現象に基づくとの観点に立って、500個の測定値を粒径 1 mm ごとに分割し、

表-1 供試骨材の物理的性質

骨材種類	造粒型人工軽量骨材				非造粒型人工軽量骨材				砕石
	B	L	Mp	N	A	Mc	S	U	
物理的性質									
比	絶乾	1.19	1.31	1.26	1.26	1.24	1.25	1.24	1.39
	OD	1.25	1.34	1.37	1.34	1.33	1.36	1.35	1.57
重	SSD								
吸水率 %	1日	5.4	2.3	12.5	6.4	7.5	9.1	10.5	13.0
	5日	7.7	2.7	15.3	15.8	19.0	13.9	19.6	17.9

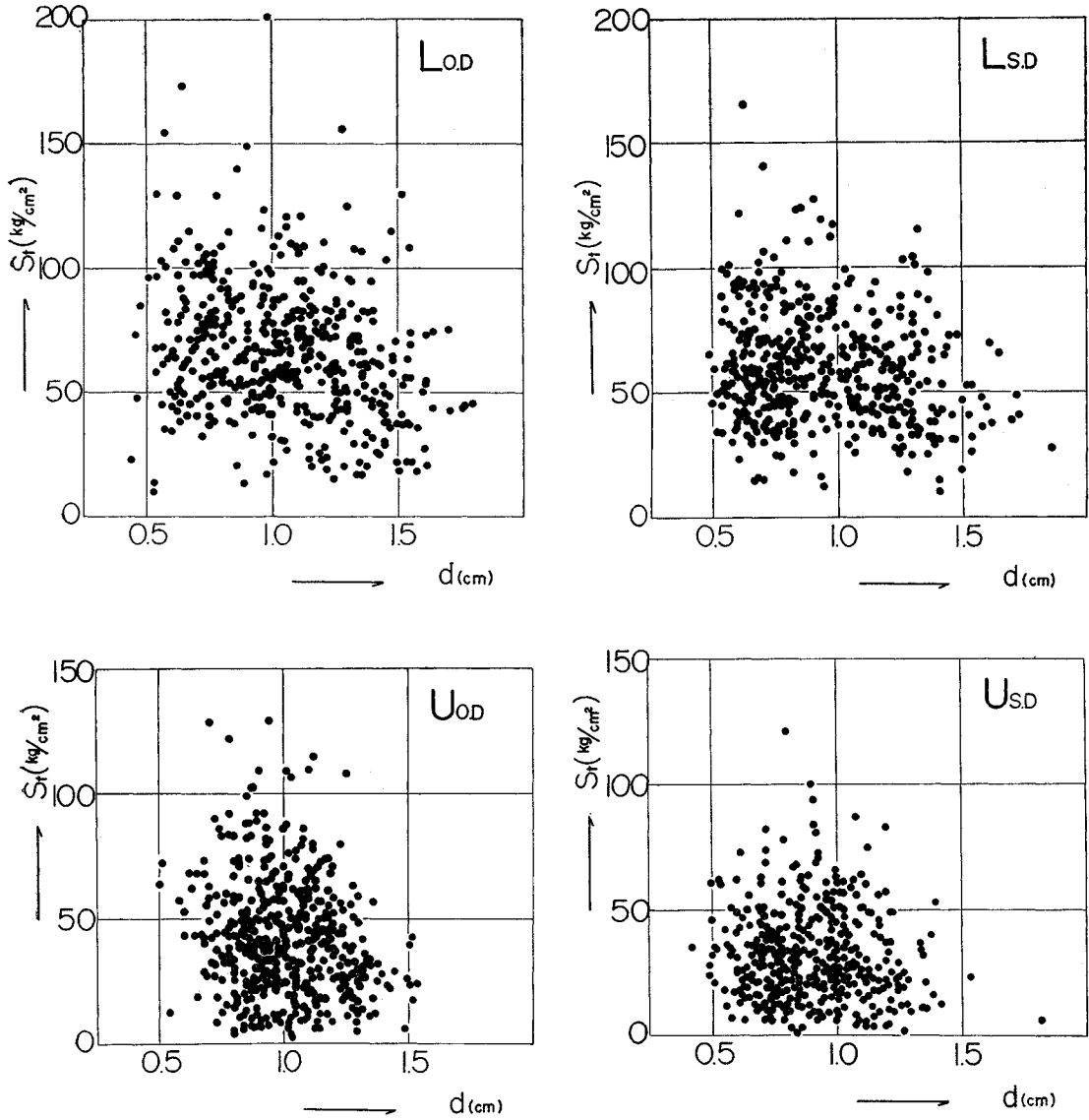


図-6 骨材の圧裂強度 S_t と粒径との関係

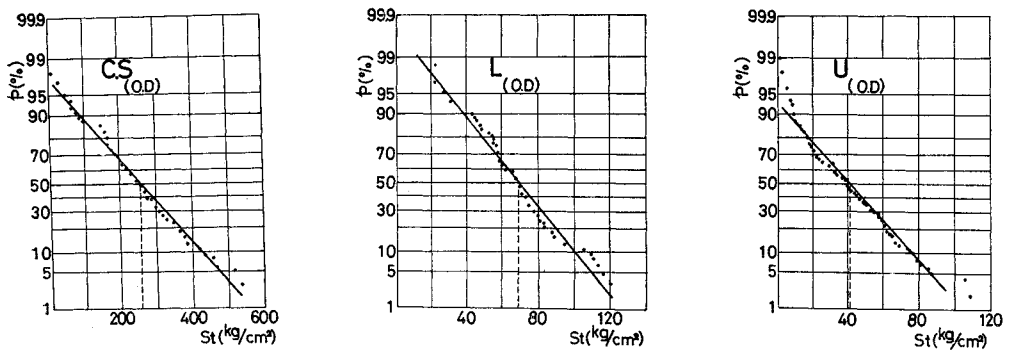


図-7 骨材の圧裂強度 S_t と確率 (p) との関係 ($d=10$ mm)

分割された各粒径における強度の確率密度分布（一例を図-7に示す）からその平均値（中央値あるいは最頻値）を求めて各粒径における平均強度とした。各骨材の粒径と統計的処理によって得られた平均強度との関係を図-8に示す。

以下、得られた試験結果に対し若干の考察を加える。

(1) 粒径と強度との関係

図-8より人工軽量骨材においては、骨材の種類さら

には骨材の乾湿の程度にかかわらず粒径が大きくなるに従って骨材強度は低下する。これを骨材別について考察すると、造粒型骨材 L と非造粒型骨材 (A.Mc.S.U) のグループと、L 以外の造粒型骨材 (B.Mp.N) のグループに分けることができ、前者の方が粒径による影響が大きく現われる傾向が見られる。いま、粒径が 10 mm 大きくなった場合の強度低下を各骨材別に考察すると、造粒型骨材 B.Mp.N では 15~20%、造粒型 L で約 35%、非造粒型骨材 A.Mc.S.U では 40~50% の強度低下とな

り、全般的に非造粒型骨材の方が強度低下の傾向が著しい。一方、碎石 (CS) においては、絶乾状態の場合粒径が大きくなって強度はほとんど変わらないのに対して、表乾状態の場合にはかなりの強度低下（粒径が 10 mm 大きくなると約 30% の強度低下となる）が見られる。

この事実より、最大寸法が 20 mm を越えるような骨材の強度はかなり小さくなるものと推測される。この粒大の骨材の強度が小さくなる現象を骨材の比重との関連において検討を加えてみる。いま、造粒型骨材 L について絶乾状態における比重と骨材強度との関係を図示すると図-9に示すようになり、これより比重 1.30 以上では比重が大きくなって骨材強度はあまり変わらないのに対して、比重が 1.30 以下になると強度はほぼ直線的に低下することがわかる。これに関連して、木村⁹⁾らは、人工骨材の種類にかかわらず表乾比重が 1.3 以下では、それをを用いたコンクリートの強度は急激に低下すると報告している。したがって、比重が小さくかつ粒径の大きい骨材を用いるとコンクリートの強度にかなりの影響をおよぼすものと推察される。

(2) 吸水した骨材の強度

図-8より、骨材の種類にかかわらず表乾状態における骨材

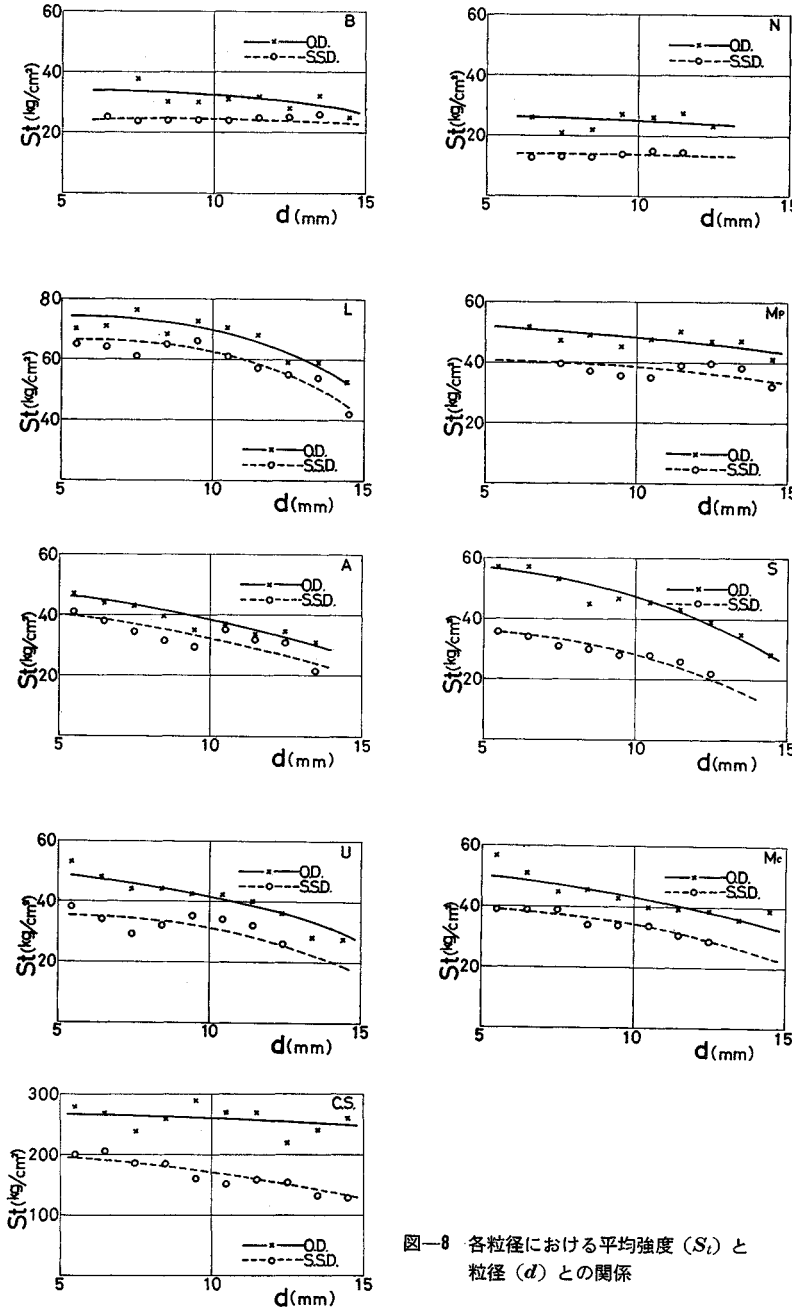


図-8 各粒径における平均強度 (S_t) と粒径 (d) との関係

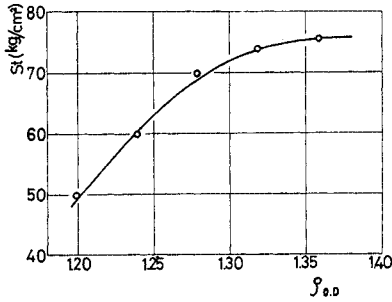


図-9 骨材の比重と強度との関係 (L)

表-2 骨材強度および吸水による強度低下率 (最短径 d=10 mm)

骨材種類	造粒型人工軽量骨材				非造粒型人工軽量骨材				砕石
	B	L	Mp	N	A	Mc	S	U	
強度	30.0	71.5	48.5	25.0	38.5	41.5	44.8	42.0	260
低下率	(11.5)	(24.5)	(17.0)	(11.5)	(13.3)	(13.0)	(18.0)	(26.0)	(90)
強度	24.0	65.5	35.3	14.5	32.5	34.0	28.0	34.5	172
低下率	(8.5)	(21.5)	(13.8)	(6.8)	(12.0)	(12.0)	(11.8)	(19.0)	(60)
吸水率(%) (5日吸水)	7.7	2.7	15.3	15.8	19.0	13.9	19.6	17.9	1.7
強度低下率 (%)	20.0	8.4	27.2	42.0	15.6	18.1	37.5	17.9	36.0

(): 標準偏差 (kg/cm²)

強度は絶乾状態のものよりもかなり低く現われ、この強度低下を絶対値で表わすと、軽量骨材で約 10 kg/cm²、砕石では約 100 kg/cm² となる。また、表-2 より、吸水による骨材強度の低下率は骨材の種類によってかなり異なり、強度低下率の最小は L で約 8%，最大は N.S で約 40% となり、さらに砕石でも約 35% の強度低下が見られる。岩石の吸水による強度低下率は凝灰岩で最大 50%，安山岩で 10% 程度といわれているので、供試骨材の吸水による強度低下率はほぼ妥当な値であるとみなすことができる。また、造粒型骨材においては、吸水率の大きいものほど吸水による強度低下率が大きく現われる傾向が見られるが、砕石あるいは非造粒型骨材では両者の関係は明確ではない。

軽量骨材を用いたコンクリートの強度や耐久性を検討した結果⁷⁾によると、コンクリートの強度は骨材の含水量の増加とともにやや低下し、耐久性、とくに凍結融解に対する抵抗性は骨材の含水量が 5% 以上になると著しく低下するなど、骨材含水量との間に密接な関係のあることが認められている。本研究で得られた骨材の吸水による強度特性とコンクリートの諸特性とを関連づけて考えると、とくに人工軽量骨材の場合、コンクリートの強度や耐久性に対してかなりの影響を与えるものと推察される。砕石の場合、吸水による強度低下はかなり大きい、表乾状態における骨材強度の絶対値そのものが人工骨材に比してはるかに大きいので、コンクリートの強度

や他の特性におよぼす影響は小さいものと考えられる。

なお、表乾状態の骨材強度の方が絶乾の場合よりも低く現われる原因として、人工骨材においては表面ガラス層あるいは骨材内部の組織が含水によって影響されることも考えられるが、これはあくまでも一面的な推測にすぎず、したがって主要因を究明するためには、焼成温度、生成鉱物組成などの面からも検討を加えなければならないと考えられる。

(3) 骨材強度の推定

図-8 に示した粒径と骨材強度との関係より、最短径 10 mm における値は骨材強度のほぼ平均値を示していることがわかる。したがって点載荷試験法を骨材に適用する際には、最短径がほぼ 10 mm (砕石や非造粒型骨材では最大寸法がこれより若干大きくなる) のものを選んで試験を行えば、かなり正確に骨材強度を推定できるものと考えられる。この場合、骨材強度の推定式は、骨材のポアソン数を 6、さらに点載荷用ポンチの径を 2 mm とすると、次式で与えられる。

$$S_t = 1.4 \frac{2P}{\pi d^2} \dots\dots\dots (6)$$

表-2 には、最短径 10 mm における骨材強度の平均値 (正規確率密度分布の中央値) と標準偏差を示す。これより、絶乾状態における骨材の平均強度は、砕石で 260 kg/cm²、人工骨材 L で 70 kg/cm²、その他の人工骨材で 25~50 kg/cm² となり、非造粒型骨材の強度差は小さく、さらに人工骨材の圧裂強度は砕石のその 1/4 ~ 1/10 程度となる。

最短径 10 mm における各骨材強度の標準偏差は、一般的に骨材強度の高いものほど大きく現われ、さらにこれをばらつき、すなわち変動係数で検討すると、N.U 以外の人工骨材および砕石で 30~40%，N で約 50%，U で約 60% となり、N.U のばらつきがとくに大きいことがわかる。ただ、この変動係数の中には骨材の寸法効果 (size effect) が含まれており、木山らの研究¹⁾による

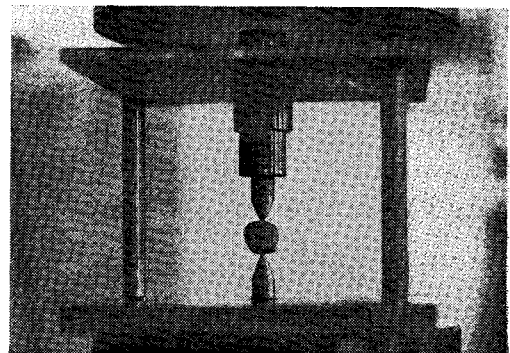


写真-1 点載荷圧裂試験の概観

と、塊状試験片の寸法効果を変動係数に換算すると20～30%になることが認められているので、実際の強度の変動係数は10～30%程度であると推定できる。いずれにしてもこのばらつきの主要因を究明するとともに、点載荷試験方法の改良を図りたいと考えている。

4. 結 語

本研究においては、骨材に点載荷圧裂試験を適用してその強度を推定するとともに、原料や製造方法の異なる人工軽量骨材の強度特性を粒径の大きさや吸水特性との関連、さらには砕石との比較において考察を加えた。本研究の範囲内で得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) 人工軽量骨材は、骨材の乾湿条件にかかわらず粒径が大きくなるとともに強度は低下し、この傾向は非造粒型骨材の方が著しい。一方、砕石(硬質砂岩系)は湿潤状態の場合、粒径が大きくなるに従って人工骨材と同程度の強度低下を示すが、絶乾状態では強度低下はほとんど見られない。

(2) 人工軽量骨材の場合、粒径が大きくなると比重が小さくなり、かつ強度も低下するので、コンクリートの強度におよぼす影響を考えると、骨材最大寸法を20mm程度に制限した方がよい。

(3) 吸水によって骨材強度はかなり低下するが、吸水率の大きさと強度低下率との間には明確な関係は認められない。

(4) 点載荷圧裂試験によって得られた骨材強度は、ほぼ同じ粒径であっても相当ばらつき、精度の点で問題はあるが、骨材強度を相対的に比較する場合には10mm程度の粒径の骨材について試験を行ない、次式を用いて強度を計算すればよい。

$$S_f \approx 1.4 \frac{2P}{\pi d^2}$$

なお、この場合得られた値をそのまま算術平均するのではなく、測定値を確率紙上にプロットしてその中央値(確率 $p=50\%$ の点)をもって平均強度とすべきであろう。

(5) 非造粒型人工骨材においては、骨材の種類によって現われる強度差は比較的小さく、その強度は砕石の約1/6であるのに対して、造粒型骨材では強度差がかなり大きく現われ、かつ砕石強度の1/4～1/10程度である。

以上、骨材の強度を直接的に求める試験法として点載荷圧裂試験を提案し、実際にこの試験法を市販の人工骨材に適用した場合の結果について述べた。今後は、測定値の精度を高めるために試験装置を改良するとともに、

B.S. 破砕試験などの間接的試験法による結果との比較検討、さらには骨材の安定性あるいは耐久性を骨材強度との関連において評価することなどの研究計画を立て、目下鋭意実験を進めている。

本研究は、文部省科学研究費による成果の一部であることを付記するとともに、研究を遂行するに当り吉川敏明技官、鍋野幹夫(現神戸大学大学院生)、堀江英男(清水建設(株))をはじめ鳥取大学工学部土木工学科材料研究室の諸氏の協力を得たことに対し、ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Bache, H.H.: Strength of Structural Lightweight Aggregate Concrete, Proc. of RILEM Symp. on Testing and Design Method of Lightweight Aggregate Concrete, March 1967.
- 2) 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, 土木学会誌, 29巻11号, 昭和18年11月.
- 3) Berenbaum, R. and I. Brodie: Measurement of Tensile Strength of Brittle Materials, British Jour. of Appl. Phys., Vol. 10, 1959.
- 4) 平松・岡・木山: 非整形試験片による岩石の引張り強さの迅速試験, 日本鉱業誌, 81巻932号, 昭和40年12月.
- 5) 木山・岡・平松: 点載荷圧裂試験によるコンクリートの引張強度の決定, 材料, 第18巻, 191号, 昭42年8月.
- 6) 木村・鈴木: 人工軽骨の品質とコンクリートの強度との関係, 材料, 第15巻, 157号, 昭41年10月.
- 7) 西林・湯本: 人工軽量骨材の吸水特性とコンクリートの性質, 土木学会コンクリートライブラリー, 第24号, 昭44年11月

付 録

Notation

- a : 球の半径
 a' : 点載荷ポンチの直径
 b : 骨材の最大径
 d : 骨材の最短径
 k : 点載荷圧裂試験による骨材強さ算定式の係数
 m : Poisson 数
 P : 総荷重, 破壊荷重
 $P_n(x)$: 第1種 Legendre 関数
 p : 等分布荷重
 (r, θ, ϕ) : 球座標
 S_f : 点載荷圧裂試験による骨材強さ
 (u, v, w) : (r, θ, ϕ) 座標で表わした変位
 λ, μ : Láme の定数
 ν : Poisson 比
 θ_0 : 載荷点の立体角の半分
 $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_\phi$: 球座標で表わした直応力
 $\tau_{\theta\phi}, \tau_{\phi r}, \tau_{r\theta}$: 球座標で表わしたせん断応力