

等価介在物法によるコンクリートの弾性率の解析

（株）神戸製鋼所 機械研究所 正会員 ○片岡 保人

1. まえがき

コンクリートの弾性率はコンクリート構造物の剛性評価にとって重要な因子である．通常，コンクリートの弾性率の推定には圧縮強度と密度をパラメータとした式が用いられる．しかしながら，コンクリートはセメントと骨材からなる複合材料であり，その弾性率は構成材料の物性と構成比によって影響を受ける．このため最近，骨材の弾性率と含有率を考慮した複合理論によってコンクリート弾性率を推定する研究⁽¹⁾⁽²⁾がなされている．さらに，セメントペーストと骨材界面に形成される遷移帯を考慮した研究⁽³⁾もある．本報では，樹脂系複合材料の弾性率推定に関して実績をあげている Eshelby の等価介在物法⁽⁴⁾⁽⁵⁾を用いてコンクリート弾性率の解析を試みた．

2. 解析モデル

コンクリートを図 - 1 に示すようにモルタルと粗骨材からなる複合材料と考える．複合材料全体および粗骨材の領域をそれぞれ D および Ω で表すものとする．このときモルタルの領域は， $D - \Omega$ で表される．粗骨材は本来種々の形状，大きさを呈しているが，本モデルでは全て同じ大きさの球体と仮定する．モルタルおよび粗骨材の剛性テンソルをそれぞれ C_m, C_f とする．モルタル，粗骨材ともに等方弾性体，骨材とモルタルの界面は完全接着と仮定する．いま，この複合材料（コンクリート）に一様外部応力 σ_0 が作用したとする．図 - 1 の解析モデルに Eshelby の等価介在物法を適用すると，平均内部ひずみ e_A は外部応力 σ_0 に対応するひずみ e_0 と，

$$e_A = R \cdot e_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

で関係づけられる．そして，系の歪エネルギーの等価性を考えると，求めるべき複合材料（コンクリート）の剛性テンソル C_c （6 行×6 列のマトリックス）は，

$$C_c = \left[\left\{ I + f B \cdot (I + R) \right\} \cdot C_m^{-1} \right]^{-1} \quad \dots\dots (2)$$

となる．ここで，

$$R = - \left[I + f A \right]^{-1} \cdot f A \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$A = (S - I) \cdot B \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$B = - \left[(C_f - C_m) \cdot S + C_m \right]^{-1} \cdot (C_f - C_m) \quad \dots (5)$$

であり， S は Eshelby テンソル（6 行×6 列）， I は単位マトリックス， f は粗骨材の体積含有率である．

3. 結果と考察

川上が行った実験結果⁽⁶⁾と比較することにより，本解析モデルの妥当性について検討した．川上は，九頭竜川流域で採取された主要な岩石 5 種類とそれらからつくられたコンクリートおよびモルタルの力学的特性

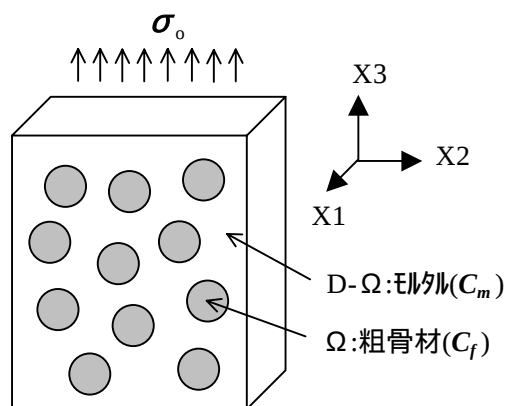


図-1 解析モデル

キーワード：コンクリート，弾性率，等価介在物法，粗骨材，モルタル

連絡先：〒651-2271 神戸市西区高塚台 1-5-5 TEL:078-992-5635 FAX:078-993-2056

表 - 1 岩石の物性

岩種 (粗骨材)	弾性率 (GPa)	圧縮強度 (MPa)
花崗岩	57.6	191.8
ひん岩	67.0	161.3
流紋岩	20.8	104.2
安山岩	58.6	218.9
砂岩	79.2	321.9

表 - 3 岩種別コンクリートの弾性率と圧縮強度

岩種 (粗骨材)	実験 E_0 (GPa)	解析 E_0 (GPa)	実験 $E_{1/3}$ (GPa)	解析 $E_{1/3}$ (GPa)	圧縮強度 (MPa)
花崗岩	35.3	38.1	30.0	34.9	39.7
ひん岩	38.1	40.4	33.1	37.0	35.2
流紋岩	28.0	24.3	24.4	22.5	34.7
安山岩	38.2	38.3	31.4	35.1	37.7
砂岩	41.5	43.1	33.8	39.2	36.7
モルタル	27.7	-	23.9	-	52.6

表 - 2 コンクリートとモルタルの調合

	W/C (%)	スランプ (cm)	細骨材率 (%)	単位水量 ($1/m^3$)	セメント ($1/m^3$)	砂 ($1/m^3$)	粗骨材 ($1/m^3$)
コンクリート	0.45	8	35.9	168	118	253	451
モルタル	0.45	-	-	308	217	465	-

を実験的に調べている．表 - 1 にそれら 5 種類の岩石の物性を示す．流紋岩の弾性率が最も小さく，砂岩のそれが最も大きい．また，表 - 2 にこれらの岩石を粗骨材として作成したコンクリートおよびモルタルの調合を示す．コンクリート中の粗骨材の体積含有率は 0.451 である．表 - 3 に岩種別コンクリートとモルタルの弾性率および圧縮強度を示す．初期弾性率 E_0 は，圧縮試験における応力(σ)・ひずみ(ε)関係のデータ 36 点を下記の式(6)にあてはめて係数値(a,b,c,d)を決定することにより求めている．また，弾性率 $E_{1/3}$ は圧縮強度の 1/3 の応力における割線係数である．

$$\sigma = a + b \varepsilon + c \varepsilon^2 + d \varepsilon^3 \quad \dots\dots\dots (6)$$

解析は，表 - 1 および表 - 3 に示した各岩石（粗骨材）とモルタルの弾性率，表 - 2 に示した粗骨材の体積含有率 0.451 を入力データとして行った．粗骨材，モルタルともポアソン比は 0.2 とした．本解析モデルによる結果を表 - 3 中に，実験結果との比較を図 - 2 に示す．粗骨材は全て同じ大きさの球体で骨材 / モルタル界面は完全接着という仮定にも関わらず，初期弾性率 E_0 (図 - 2 中の ● 印)，割線弾性率 $E_{1/3}$ (□ 印)ともに実験結果と解析結果の相関はかなりよい(両者とも相関係数は 0.97 以上)．この結果より，本解析モデルにより比較的高い精度でコンクリートの弾性率が推定できると考えられる．また， $E_{1/3}$ の方が E_0 よりも解析値と実験値のかい離が若干大きい(すなわち，実験値の方が少し小さい)傾向にある．これは，実験では圧縮応力の増加にしたがって，骨材とモルタル界面での微少なはく離やき裂等が進展し弾性率を低下させるが，解析モデルにおいては骨材 / モルタル界面を完全接着と仮定しているためと考えられる．

4. あとがき

等価介在物法により，コンクリート弾性率を推定できる可能性を示した．今後さらに，骨材 / モルタル界面における微少な損傷も取り入れるようなアプローチも必要と考えられる．

参考文献

- (1)清原，松永，佐藤，上田：コンクリートのヤング係数の推定式，コンクリート工学論文集，Vol.21，No.2，pp.601-606 (1999)
- (2)川上：コンクリートの弾性係数と複合理論の適用，コンクリート工学論文集，Vol.21，No.2，pp.619-624 (1999)
- (3)塚原，魚本：多層複合理論に基づいたモルタルのヤング係数に関する一考察，コンクリート工学論文集，Vol.22，No.2 (2000)
- (4)Eshelby, J. D., *Proc. R. Soc., Ser. A*, 241, pp.376-396 (1957)
- (5)片岡，田谷，杵沢：マイクロメカニクスによる短繊維複合材料の力学的挙動の解析(第 3 報)，機論，67-664, A, pp.1913-1920 (2001)
- (6)川上：骨材種類がコンクリートの力学的挙動に及ぼす影響，コンクリート工学論文集，Vol.13，No.1，pp.63-68 (1991)

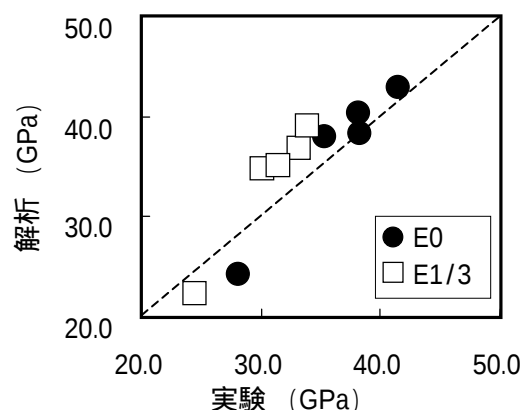


図 - 2 コンクリート弾性率の比較