

V-20 コンクリートの強度およびヤング係数に及ぼす骨材の影響について

名古屋工業大学 正員 吉田弥智
日本道路公団 正員 〇七沢和男

1. まえがき

コンクリートの強度性状(圧縮強度およびヤング係数)が骨材の強度性状によってどのような影響を受けるか調べるため、コンクリートを母材たるモルタルと骨材から成る二相複合材と考え、これらの間の関係を理論的にあるいは実験的に明らかにしたのが本研究である。このため筆者等はコンクリートをモデル化することにより、コンクリートの圧縮強度(以後単に強度と呼ぶ)およびヤング係数を決定するモデル式を導びくとともに、骨材の強度性状が既知な特殊な骨材を使用して実験を行ない、モデル式の妥当性を検討した。

2. 実験概要

(a) 配合 予備実験で求めた組成比が一定のモルタルに粗骨材を添加し、骨材容積比 V_a が 0, 0.1, …, 0.5 となるようにモルタル量と粗骨材量を変化させて、一連のコンクリートを配合する特殊な方法によった。(b) 使用材料および試験方法 セメントはアサノ早強ベロセメント、細骨材は三重県伊賀川産の自然砂、粗骨材としては軽量砂を使用したモルタルを破碎して作成したモルタル骨材 ($A_1 \sim A_4$, B_1 , $M_1 \sim M_6$)、レンガ骨材 (R_1 , R_2)、大谷石 (O)、川砂利 (N)、および鉄筋を切断して作った鉄骨材 (I)を使用した。ストレインゲージは鉄骨材コンクリートのみワイヤゲージを使用し、他はすべてモールドゲージを使用した。供試体はJISの規格に従って作成し、一週間水中養生後表乾状態(鉄骨材コンクリートは気乾)で強度試験および歪試験を行なった。

3. コンクリートのモデル化とモデル式の誘導

コンクリートを図-1のようにモデル化し、以下の仮定の下にC-C断面における破壊時のつり合いを考えることにより、コンクリートの強度およびヤング係数を決定するモデル式(1),(2)を導びいた。仮定 1) 骨材はコンクリートに相似形に埋め込まれている、2) ホアソン効果を無視する、3) 付着力は十分大きい、4) モルタルと骨材が断面C-C上で同時に破壊する。

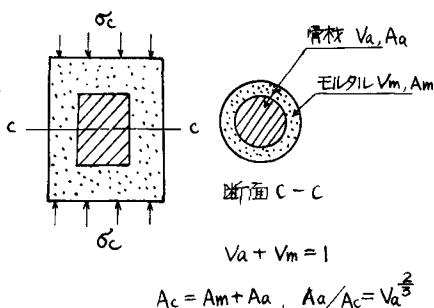
$$\sigma_c = \sigma_m - (\sigma_m - \sigma_a) V_a^{\frac{2}{3}} \quad \text{----- (1)}$$

$$E_c = E_m - (E_m - E_a) V_a^{\frac{2}{3}} \quad \text{----- (2)}$$

図-1. コンクリートモデル

4. 実験結果およびモデル式の検討

表-1は21シリーズ(うち軽量19, 重量2)のコンクリートの強度およびヤング係数に関する実験結果と、ここに求めたモデル式による計算値との関係を示したものである。またこれらの実験結果の一部をプロットしてモデル式による理論曲線と比較したのが図-2~4である。参考は軽量コンクリートを中心に実験値と計算値を比較検討し、最後に重量コンクリートについても参考した。



(a) ヤング係数について

図-2, 3は Modular ratio ($M = E_a/E_m$) がそれぞれ 0.28, 7.4 の場合の実験結果を
横軸に骨材容積比 V_a , 縦軸に無次元量 E_c/E_m をとってプロットしたものである。また参考のため軽量
コンクリートと重量コンクリートの代表的な応力-歪曲線を図-6に示した。これらの表および図が

表-1 実験結果 およびモデル式による計算値

試 験 記 号	V_a 0 (フル)		0.1		0.2		0.3		0.4		0.5		1.0 (骨材)			S	M	V_g (%)	V_E (%)
	σ_m	E_m	σ_c	E_c	σ_c	E_c	σ_c	E_c	σ_c	E_c	σ_c	E_c	σ_a	E_a	ρ_a				
A _F -2	498	245	344 364	1.91 2.07	271 309	1.86 1.85	221 264	1.33 1.67	183 229	1.90 1.50	174 194	1.80 1.35	72	0.70	1.56	0.14	0.29	14	21
A _g -1	370	1.98	289 278	1.74 1.72	200 241	1.53 1.57	173 211	1.51 1.44	167 185	1.30 1.32	136 163	1.09 1.22	78	0.77	1.62	0.21	0.39	14	6
A _g -2	513	277	386 374	2.83 2.34	297 318	1.99 2.09	257 272	1.90 1.87	217 236	1.41 1.68	168 205	1.14 1.51	78	0.77	1.62	0.15	0.28	10	16
A _g -1	324	2.24	241 240	1.75 1.88	201 204	1.77 1.68	167 175	1.51 1.50	139 152	1.33 1.34	112 133	1.14 1.20	56	0.59	1.63	0.17	0.26	13	4
A _F -2	502	2.79	344 361	2.17 2.32	279 301	1.87 2.04	218 256	1.59 1.81	192 221	1.33 1.60	145 186	1.05 1.40	56	0.59	1.63	0.11	0.21	14	15
M ₁ -1	376	240	344 349	2.03 2.25	347 352	1.95 2.17	327 320	1.79 2.10	292 307	1.69 2.03	259 296	1.69 1.97	249	1.72	1.75	0.66	0.72	6	13
M ₁ -2	440	2.77	414 438	2.55 2.54	401 407	2.35 2.41	384 382	2.25 2.30	357 359	2.10 2.20	327 338	1.99 2.11	249	1.72	1.75	0.51	0.62	3	4
M ₂ -3	557	2.60	444 491	2.62 2.30	475 451	2.30 2.12	424 418	2.11 1.97	412 389	2.24 1.84	384 362	1.81 1.71	248	1.19	1.62	0.45	0.46	4	13
M ₄ -1	295	2.42	314 277	2.76 2.27	267 266	2.22 2.18	234 258	1.96 2.11	241 250	1.62 2.04	200 243	1.42 1.98	211	1.72	1.70	0.72	0.71	11	19
M ₆ -2	462	2.48	356 356	2.39 2.09	319 310	2.04 1.88	263 273	1.74 1.67	232 245	1.53 1.50	198 222	1.17 1.34	122	0.67	1.57	0.26	0.27	6	10
O-1	273	240	227 205	1.50 1.93	205 177	1.72 1.66	183 156	1.54 1.43	158 137	1.48 1.22	130 120	0.78 1.03	58	0.23	1.80	0.21	0.094	14	18
O-2	468	2.77	327 337	2.02 2.22	273 281	2.35 1.90	202 239	1.69 1.63	180 206	1.34 1.39	151 173	1.19 1.17	58	0.23	1.80	0.12	0.082	11	12
O-4	386	2.42	301 282	2.27 1.95	265 239	2.03 1.67	233 205	1.74 1.44	185 178	1.60 1.23	153 154	1.23 1.04	58	0.23	1.80	0.15	0.093	8	22
R ₁ -1	283	2.51	253 226	2.45 1.99	198 204	1.82 1.69	168 187	1.40 1.43	153 171	1.01 1.21	117 158	0.78 1.00	108	0.11	1.97	0.38	0.044	15	17
R ₁ -2	445	2.70	339 338	2.16 2.14	253 294	2.08 1.81	234 258	1.57 1.54	195 231	1.38 1.29	149 205	1.17 1.07	108	0.11	1.97	0.24	0.041	16	8
R ₁ -4	406	2.36	307 313	2.10 1.88	257 272	1.99 1.59	248 248	2.05 1.35	181 219	1.37 1.14	160 195	0.92 0.94	108	0.11	1.97	0.27	0.041	11	28
R ₂ -2	518	2.62	505 461	2.44 2.38	518 427	2.45 2.24	470 398	2.25 2.13	467 373	2.00 2.02	429 350	1.96 1.93	249	1.51	2.13	0.48	0.58	20	5
R ₂ -3	529	2.71	570 469	2.63 2.46	508 433	2.55 2.31	525 404	2.14 2.19	489 377	2.10 2.08	420 352	1.87 1.98	249	1.51	2.13	0.47	0.56	24	6
B ₁ -2	465	2.50	311 335	2.40 2.08	230 279	1.84 1.83	208 237	1.59 1.63	184 205	1.48 1.44	127 172	0.95 1.27	53	0.55	1.47	0.11	0.22	16	13
N-2 (重量)	531	2.79	480 -	3.00 -	430 -	3.06 -	417 -	3.40 -	410 -	3.66 -	401 -	3.64 -	-	-	2.67	-	-	-	-
I-2 (重量)	543	2.84	513 -	3.09 6.75	467 -	4.22 9.05	423 -	4.63 10.98	357 -	5.10 12.69	343 -	6.10 14.28	-	21.00	7.80	-	7.39	-	44

備考 (1) 上段…実験値 (σ_{ti}, E_{ti}) (2) $S = \sigma_a / \sigma_m$ (3) $V_g = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1.0 - \sigma_{ti} / \sigma_{cali})^2}$
下段…計算値 (σ_{cali}, E_{cali}) $M = E_a / E_m$ $V_E = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1.0 - E_{ti} / E_{cali})^2}$
単位… σ (Kg/cm²), E (X10⁵ Kg/cm²) n …1ミリの供試体数

ら明らかのように、Modular ratio が1以下の軽量コンクリートにおいては、 E_c/E_m は骨材容積比の増加とともに減小し、反対に1以上の重量コンクリートの場合には増大している。また軽量コンクリートの場合には、計算値に対する実験値の変動は平均約13% となって計算値と実験値はほぼ近似しているが、重量コンクリートの場合には実験値は計算値よりかなり小さな値となっている。以上の考察から、モデル式は軽量コンクリートには適用できるが、重量コンクリートには適用できないことがわかる。

(b) 強度について

ヤング係数の場合と同様、横軸に骨材容積比 V_a 、縦軸に無次元量 σ_c/σ_m をとって、Strength ratio が0.15 の場合および1以上の場合の実験結果を示したのが図-4,5である。Strength ratio ($S = \sigma_a/\sigma_m$) というのはヤング係数の場合の Modular ratio に対応するものであり、骨材強度をモルタル強度で割ったものである。図から明らかのように Strength ratio が1以下の軽量コンクリートにおいては、ヤング係数の場合と同じように σ_c/σ_m は骨材容積比の増加とともに減小するが、Strength ratio が1以上の重量コンクリートにおいては、図-5で示されるようにヤング係数の場合と異なり、骨材容積比の増加とともに σ_c/σ_m は減小している。これは一見非常に不合理的現象で、重量コンクリートの大きな特徴である。これについては(c)で改めて考察するので、以下においては軽量コンクリートについてのみ考察する。強度の場合にはヤング係数の場合と違って、Strength ratio が0.45以下になると、実験値はモデル式(1)による計算値よりも小さな値となって余り一致しなくなる。このためモデル式が実験結果に適用するように、(1)式に補正係数 β を導入し次式のように補正した。すなわち、

$$\sigma_c = \sigma_m - (\sigma_m - \sigma_a) V_a^{\frac{2}{3}} \beta \quad \text{----- (1')}$$

今回の実験結果から β の値を求めると、 $0.45 \leq S \leq 0.72$ の場合には $\beta = 1$ 、 $S < 0.45$ の場合には $\beta = \frac{3}{4}$ となった。表-4および図-4の計算値は各 Strength ratio の場合の β を使用して計算した値である。このように補正係数 β の導入により、補正式による計算値と実験値とはほぼ一致しその変動は平均約12% となった。

(c) 重量コンクリートにおける強度とヤング係数の差異

ここでは重量コンクリートの強度が図-5で示されるように、骨材容積比の増加とともに減小するという不合理的現象についてその

図-2

軽量コンクリートのヤング係数と骨材容積比との関係

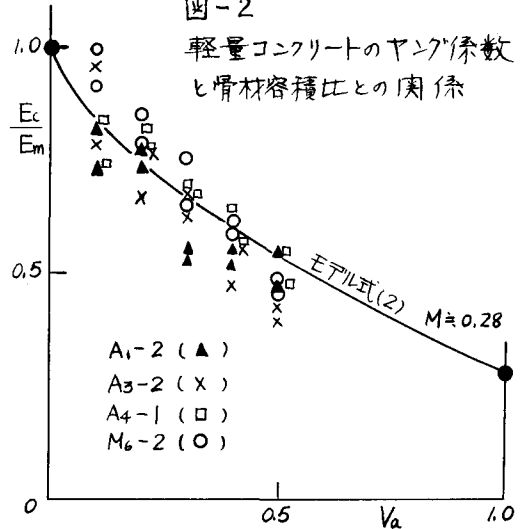
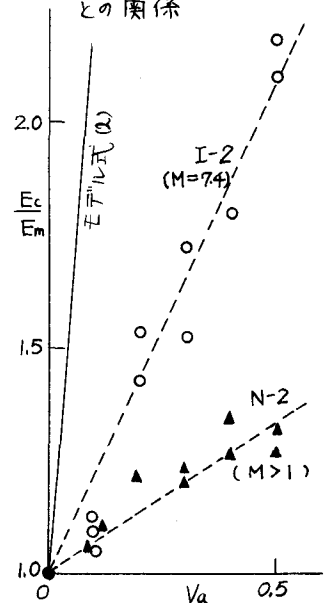


図-3

重量コンクリートのヤング係数と骨材容積比との関係



原因や、さらにヤング係数との差異について考察する。今、モルタル強度 σ_m と付着強度 σ_b の大きさに応じて次の二つの状態を考える。第一は $\sigma_b > \sigma_m$ の場合で、この場合にはコンクリートの強度に骨材強度が寄与できるが、今回の実験ではこのような状態は見当

らなかった。それゆえ実際のコンクリートでは一般に $\sigma_b < \sigma_m$ となっているものと思われる。これが第二の状態である。この場合にはコンクリートはモルタル強度に達する前に付着部分がすでに破壊し、骨材強度はコンクリート強度に寄与できない。さらに付着強度は骨材の量が増加すれば、骨材を包むモルタルが相対的に減少することになり、今回の実験結果のように骨材容積比の増加によって増々強度が減少するのである。これに対しヤング係数の場合には、コンクリートがモルタル強度に達していない荷重状態においては、コンクリートはまだ破壊していないので骨材とモルタルとの付着は完全であり、この荷重範囲内では応力-歪曲線を書くことができ、したがってその傾きからヤング係数を求めることは可能である。それゆえ強度とは異なり、骨材のヤング係数がコンクリートのヤング係数に寄与できるわけで、その結果は図-3で示される通りである。

5. 結論

今回の研究より次のことが明らかにになった。

1) 軽量コンクリートの圧縮強度は次式で与えられる。

$$\sigma_c = \sigma_m - (\sigma_m - \sigma_a) V_a^{\frac{2}{3}} \quad \text{----- (1)}$$

ただし、 $S < 0.45$ の場合は $\frac{3}{4}$ 、 $0.45 \leq S \leq 0.72$ の場合は $\frac{3}{4}$ 、 $V_a \leq \text{約} 0.5$ 。

2) 軽量コンクリートのヤング係数は次式で与えられる。ただし、 $M \leq 0.72$ 、 $V_a \leq \text{約} 0.5$ 。

$$E_c = E_m - (E_m - E_a) V_a^{\frac{2}{3}} \quad \text{----- (2)}$$

図-4
軽量コンクリートの強度と
骨材容積比との関係

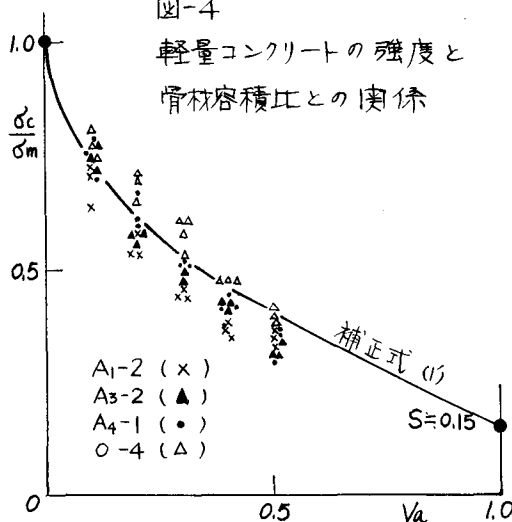


図-5.
重量コンクリートの強度
と骨材容積比との関係

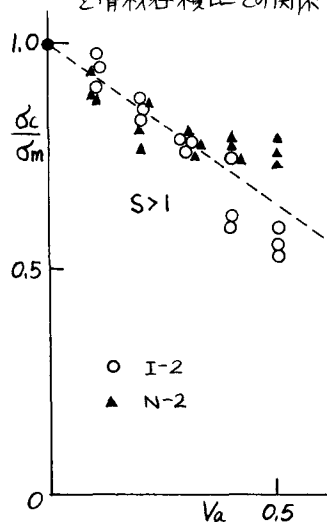


図-6. 応力-歪曲線

