

1. 目的

セメントペーストあるいはモルタルと骨材の付着強度は、コンクリートのひびわれ挙動と密接な関係があることから重要視されている。骨材・モルタル間の付着強度を測定する試験方法は、数多く考案されているが、その中の一つに骨材・モルタル界面と載荷軸をある一定の角度をなすようにした供試体を一軸載荷し、その破壊荷重をモール・クーロン理論を用いて整理することによって界面の付着強度を検討する方法(せん断ボンド強度試験)がある。この方法は、配合条件、養生条件、骨材の材質および骨材の表面粗さなどの検討に有益であり、多く用いられている。しかし、せん断ボンド強度試験は、骨材とモルタルの材料特性の相違によって生ずる応力分布の変化を何ら考慮することなく、界面部分における応力分布が均一であるとして試験結果を処理する点に問題があるといえる。本研究は、骨材とモルタルの不均一性によって生ずる応力分布の変化がその付着強度にどの程度影響するかを有限要素法(FEM)を用いて検討するものである。

2. 解析方法

図-1に示すようなせん断ボンド測定用供試体を想定し、FEM二次元弾性解析を行うことにより、供試体内部と界面部分における応力分布を検討した。解析に採用したせん断ボンド測定用供試体は、縦て幅を一定とし、高さを界面の傾きによって幅の3.2~5.2倍の範囲としたものであり、水平軸と35, 40, 45, 50, 55, 60, 65および70度の角度をなす界面をもつ8種類である。要素数は、288~550の範囲であり、界面部分およびその近くで細分割し、応力分布状況を把握しやすくした。骨材の弾性係数(E_a)とモルタルの弾性係数(E_m)の比($\eta = E_a/E_m$)を1, 2, 3および4の4種類とし、骨材およびモルタルともにポアソン比を0.2と一定にして解析を行った。なお、本解析では、圧縮を正としている。

3. 結果および考察

図-2は、MC65シリーズのFEM解析による最大主応力分布状況を示す。図より、骨材とモルタルの弾性係数の相違によって応力分布に乱れが生じ、 η の増加とともに骨材の鋭角部分に応力集中が生ずることがわかる。図-3は、MC65シリーズの界面部分における垂直(σ)およびせん断応力(τ)の分布状況を示す。骨材とモルタルの不均一性を考慮した場合($\eta=2, 3$ および4)は、均一であるとした場合($\eta=1$)とは異なり、界面部分に著るべき応力分布に大きな変化が見られ、 σ および τ ともに骨材の鋭角部分で大きい値となる。MC65シリーズ以外の他のシリーズの応力分布状況は、基本的にはMC65シリーズと類似の傾向を示す。モール・クーロン理論では、 σ と τ の組合せによって破壊を生ずるので、単にいずれかの応力の大小

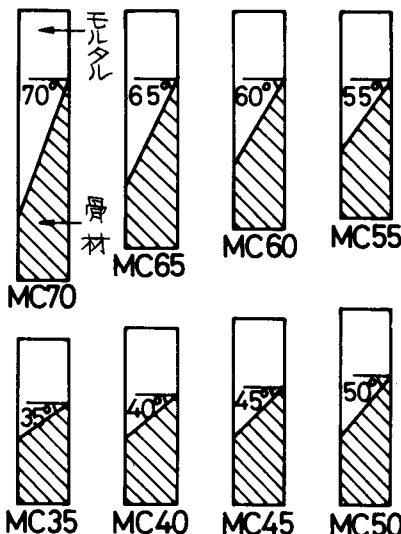


図-1 FEM解析に用いたせん断ボンド供試体の種類

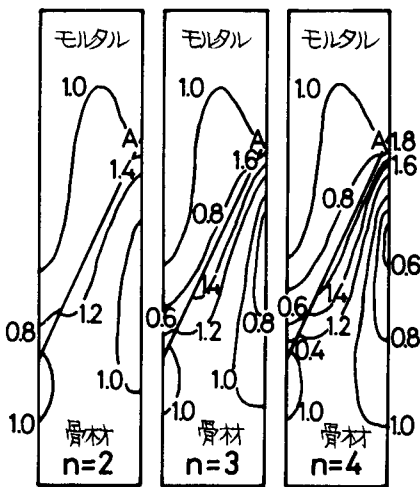


図-2 等分布外力1.0 kgf/cm²のときのMC65シリーズの最大主応力分布(単位: kgf/cm²)

小のみで不均一性を考慮した場合のクリティカルな界面部分を決められないが、界面における各部分の σ と τ を検討することによって、図-2のA点で示す骨材鋭角部分の界面が一般にクリティカルとなることがわかる。表1に等分布外力 1.000 kgf/cm^2 が加わったときの各シリーズのクリティカルな界面部分の σ と τ の値を示す。いずれのシリーズにおいても、 n の増加によって τ の増加の著しいことがわかる。せん断ボンド強度測定用供試体の最大強度に表1の値を乗ずることによって、 $n=2, 3$ および4の場合のクリティカルな界面部分における σ と τ が容易に得られる。表1の値は、圧縮載荷のみならず、引張載荷における結果の検討にも使用できる。

図-4は、Taylorら¹⁾によって得られた界面の応力分布を均一とした場合の付着強度と同一のデータを表1を用いて修正した結果を示す。図より、 n の増加によって、粘着力が大きくなり増加し、摩擦角にも変化を生ずることがわかる。付着強度のこの程度の変化がコンクリート内部の骨材・モルタル界面の圧縮載荷下における破壊挙動にどの程度影響を及ぼすかを検討するために、モルタル中に円形骨材1個を有するモデルコンクリートを想定し、界面部分が図-4に示す付着強度をもつものとしてFEM=次元弾性解析を行った。解析は、対称性を考慮して供試体の1/4について実施し、図-5に示す要素分割(要素数:403)を用いた。表2は、モデルコンクリートの界面に最初のひびわれを生ずる等分布外力を示しており、最初のひびわれはいずれも図-5のB点で生ずる。表より、図-4に示す程度の付着強度の変化が界面に最初のひびわれを生ずる応力レベルに大きく影響することがわかる。以上の結果は、モール・クーロン理論を用いて骨材・モルタル間の付着強度を検討する場合やさらにこの結果をFEM解析などによる破壊挙動の検討に用いる場合には、骨材とモルタルの材料特性の相違を考慮することが重要であることを示している。

文献 1) M.A.Taylor and B.B.Broms :
J.ACI, V.61, No.8, Aug. 1964.

表2 モデルコンクリートの界面に最初のひびわれを生ずる等分布外力

モデルコンクリートの骨材とモルタルの弾性係数比	界面の破壊条件	界面に最初のひびわれを生ずる等分布外力 kgf/cm^2	等分布外力の増加量 %
$n=2$	図-4の(1)	80.2	32.2
	" (2)	106.0	
$n=3$	図-4の(1)	78.1	52.5
	" (3)	119.1	
$n=4$	図-4の(1)	77.2	69.0
	" (4)	130.5	

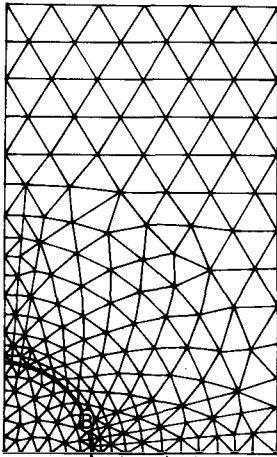


図-5 モデルコンクリートの要素分割

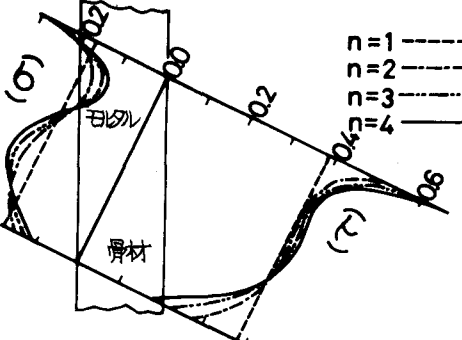


図-3 等分布外力 1.0 kgf/cm^2 のときのMC65シリーズの界面部分における垂直(σ)およびせん断応力(τ)分布(単位: kgf/cm^2)

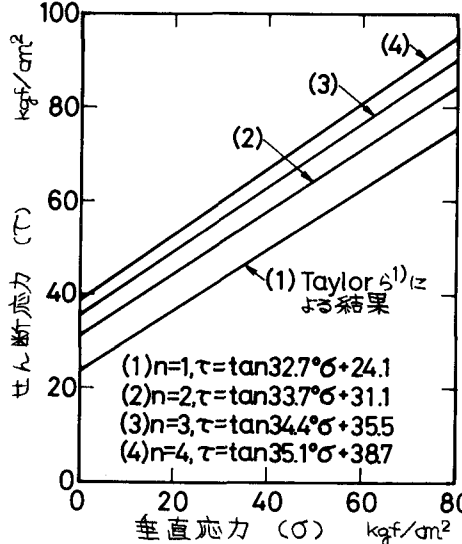


図-4 表1による付着強度の修正

表1 等分布外力 1.000 kgf/cm^2 のときのクリティカルな界面部分における垂直(σ)およびせん断応力(τ)の値(単位: kgf/cm^2)

シリーズ	MC35	MC40	MC45	MC50
$n=1$	σ 0.671	0.587	0.500	0.413
	τ 0.470	0.492	0.500	0.492
$n=2$	σ 0.680	0.608	0.537	0.462
	τ 0.502	0.546	0.578	0.591
$n=3$	σ 0.675	0.605	0.541	0.473
	τ 0.519	0.575	0.617	0.642
$n=4$	σ 0.668	0.596	0.535	0.470
	τ 0.532	0.595	0.643	0.675
シリーズ	MC55	MC60	MC65	MC70
$n=1$	σ 0.329	0.250	0.179	0.117
	τ 0.470	0.433	0.383	0.321
$n=2$	σ 0.384	0.308	0.234	0.160
	τ 0.577	0.550	0.515	0.444
$n=3$	σ 0.400	0.331	0.258	0.178
	τ 0.634	0.616	0.593	0.522
$n=4$	σ 0.400	0.338	0.269	0.187
	τ 0.671	0.659	0.646	0.575