

表-1.9.1 くさび挿入型割裂試験条件⁶⁾

試験種別	コンクリート 圧縮強度	CMOD 速度	粗骨材の 最大寸法	試験体の大きさおよび試験番号		
				S	M	L
動的試験	30	1	20	SM-300-20	—	—
	30	10	20	SF-300-20	—	—
	30	340	20	SU-300-20	—	—
	18	10	20	SF-180-20	—	—
	18	340	20	SU-180-20	—	—
	18	12,400	20	SE-180-20	—	—
静的試験	30	0.1	20	SS-300-20	—	—
	30	0.1	20	SS-300-20 (80)	—	—
	30	0.1	20	SS-300-20 (150)	—	—
	30	0.1	20	—	MS-300-20	LS-300-20
	30	0.1	40	—	MS-300-40 (80)	—
	30	0.1	80	—	MS-300-80 (150)	LS-300-80
	30	0.1	150	—	—	LS-300-150
	18	0.1	20	SS-180-20	—	—
	18	0.1	80	—	MS-180-80 (150)	—
18	0.1	150	—	—	LS-180-150	

注：()は数字の粗骨材最大寸法のコンクリートをウェットスクリーニングすることを示す。

表-1.9.2 強度試験結果一覧⁶⁾

想定圧縮強度	種 別	平均値
30MPa (材令 約3ヶ月時 における結果)	圧縮強度 f_{cm}	34.1MPa
	引張強度 f_{ctm}	2.53MPa
	曲げ強度 f_{bm}	3.63MPa
	静弾性係数 E_{cm}	33.5GPa
	ポアソン比	0.18
18MPa ($d_{max}=20mm$, 材令 約1ヶ月時におけ る結果)	圧縮強度 f_{cm}	17.6MPa
	引張強度 f_{ctm}	1.84MPa
	曲げ強度 f_{bm}	1.99MPa
	静弾性係数 E_{cm}	24.3GPa
	ポアソン比	0.15

表-1.9.3 くさび挿入型割裂試験による破壊エネルギー測定結果⁶⁾

試験条件	CMOD速度 (mm/min)	最大水平荷重 (平均値) F (kN)	最大荷重時 のCMOD (mm)	破壊エネルギー G _{FS} (N/m)
SS-180-20	0.1	1.93 (1.00)	0.131 (1.00)	204 (1.00)
SF-180-20	10	2.59 (1.34)	0.121 (0.92)	234 (1.44)
SU-180-20	340	2.99 (1.55)	0.125 (0.95)	243 (1.50)
SE-180-20	12,400	4.87 (2.52)	0.155 (1.18)	349 (2.15)
SS-300-20	0.1	3.31 (1.00)	0.122 (1.00)	226 (1.00)
SM-300-20	1	3.95 (1.19)	0.116 (0.95)	262 (1.30)
SF-300-20	10	3.91 (1.18)	0.128 (1.05)	269 (1.33)
SU-300-20	340	4.15 (1.25)	0.125 (1.02)	254 (1.26)

注：()内数字はSS条件に対する比率を示す。

試験番号	CMOD速度 (mm/min)	最大水平荷重 (平均値) F (kN)	最大荷重時の CMOD (mm)	破壊エネルギー G _{FS} (N/m)
SS-300-20	0.1	3.31	0.122	226
SS-300-20(80)	0.1	3.76	0.111	147
SS-300-20(150)	0.1	2.66	0.104	132
MS-300-20	0.1	24.5	0.287	215
MS-300-40(80)	0.1	29.7	0.211	219
MS-300-80(150)	0.1	27.6	0.238	248
LS-300-20	0.1	39.7	0.312	208
LS-300-80	0.1	50.7	0.329	276
LS-300-150	0.1	47.7	0.336	317
SS-180-20	0.1	1.93	0.131	204
MS-180-80	0.1	26.3	0.242	311
LS-180-150	0.1	43.3	0.297	304

b) 破壊エネルギーとクラック進展速度の関係

図-1.9.10⁶⁾は、破壊エネルギー比 G_{FSD}/G_{FSS} (G_{FSS} は、基準とするクラック進展速度 V_{cs} の時の破壊エネルギー) とクラック進展速度比 $V_c = V_{CD}/V_{cs}$ の関係を示したものである。同図では CMOD 速度 0.1mm/min に対する値を静的な条件として添字 S、これより大きい CMOD 速度に対する結果を動的な条件として添字 D で示している。CMOD とは、くさび挿入試験における片口開口変位のことである。破壊エネルギー G_{FS} はクラック進展速度の増加とともに増大しており、実験の範囲における最大速度では、静的な条件から 50%程度大きな G_{FS} が得られている。

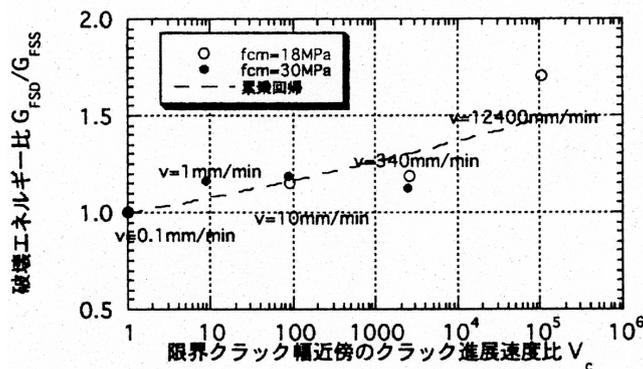


図-1.9.10 破壊エネルギーとクラック進展速度の関係⁶⁾

c) 粗骨材の最大寸法と破壊エネルギーの関係

図-1.9.11⁶⁾は破壊エネルギー G_{FS} に対する粗骨材の最大寸法の影響を示したものである。図より、粗骨材の最大寸法が大きくなると破壊エネルギーが増加することがわかる。また、図には CEB-FIP モデルコード 1990 での関係式（圧縮強度 20~88MPa を対象）が示されているが、同じ粗骨材寸法ではダムコンクリートの方が大きな破壊エネルギーを有することがわかる。

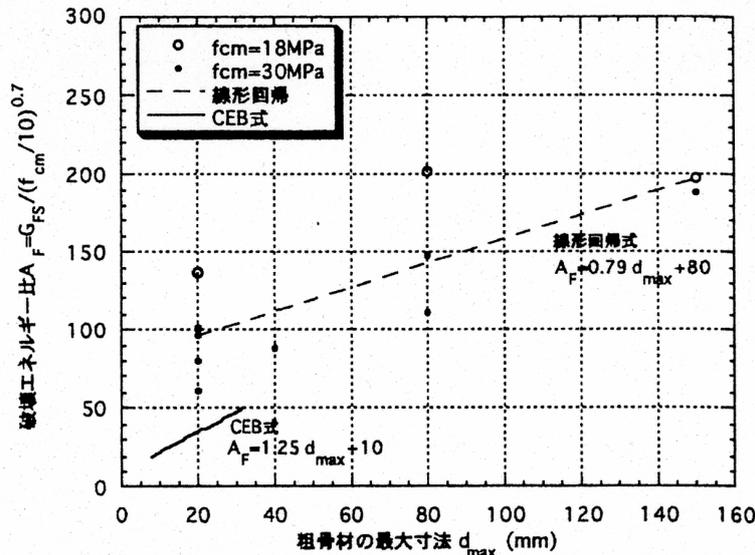


図-1.9.11 粗骨材の最大寸法と破壊エネルギーの関係⁶⁾

2. 4 分布型クラックモデル（スミアドクラックモデル（smeared crack model））解析における引張軟化式（引張軟化曲線）の影響

① 引張軟化式の傾きと要素代表長さの関係

分布型クラックモデルを用いて解析を行う場合、一要素当りの代表要素長 h （要素の大きさ、形状および変位の補間次数から算出されるもので、一般に要素寸法が大きくなれば代表要素長は大きくなる）をコンクリートの特性長さ l_{ch} （弾性係数、引張軟化開始応力、破壊エネルギー、引張軟化曲線形状より算出される）より小さく要素分割を行う必要がある。これは、代表要素長 h がコンクリートの特性長さ l_{ch} を越えると、ひび割れ直交方向の応力-ひずみ関係が引張強度以降、応力の減少とともに変位も減少するスナップバック現象が発生し、計算が不安定となるためである。しかし、ダムの有限要素法解析を想定した場合、ダムの構造寸法が大きいため必然的に大きい要素を用いることとなり、つまり一要素当りの代表要素長 h が大きくなる。そのため、引張軟化曲線にコンクリートの特性長さが比較的大きくとれる単直線近似を用いている例が多い。

② 二直線式と単直線式の比較⁷⁾

引張軟化曲線を二直線で近似した場合と単直線で近似した場合の構造物耐力計算に与える影響を検討するため、図-1.9.12 に示したような梁の三点曲げ試験を模擬した解析を行った。図-1.9.13 は、引張軟化曲線を単直線および二直線で近似した場合の荷重と右端最下点（図-1.9.12 に位置を示す箇所）の変位の関係で、引張軟化応力 3.0MPa について示したものである。なお、破壊エネルギーは 300N/m で一定とした。図より、実際の物性をより厳密に表現していると考えられる二直線近似の場合は単直線近似より最大荷重が小さくなり、最大荷重時の変位も小さくなることがわかる。また、図には引張

軟化曲線を単直線近似で引張軟化開始応力を 3.0MPa より 10%下げ、破壊エネルギーを 300N/m より 19%下げたケースも併記している。図より最大荷重が引張軟化開始応力 3.0MPa の二直線近似とほぼ同じ値になっているのがわかる。ここでは梁の三点曲げ試験の一例だけの比較であるが、解析上の制約から単直線近似の引張軟化曲線を用いる場合には、破壊エネルギーおよび引張軟化開始応力を適宜割引くことが必要となると考えられる。

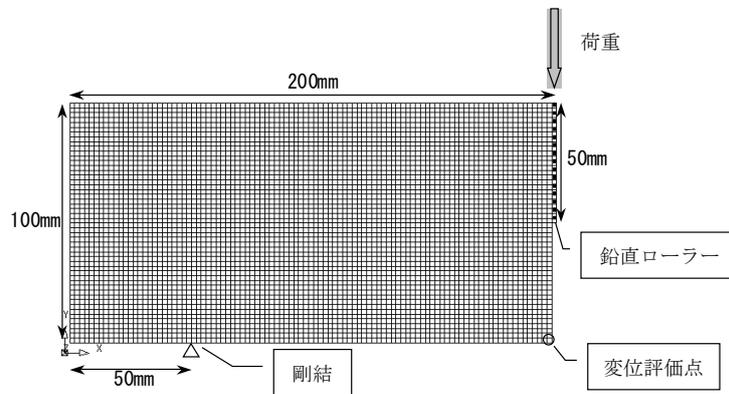


図-1.9.12 解析モデル

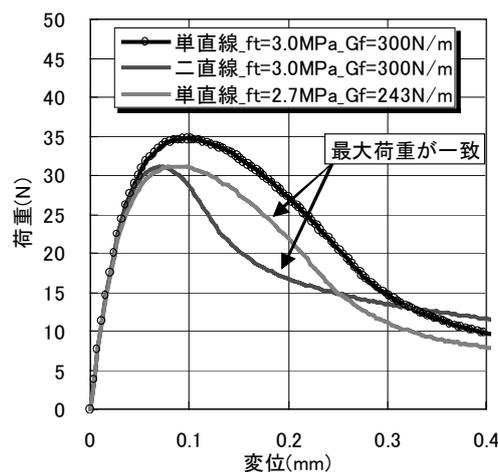


図-1.9.13 引張軟化曲線の影響

3. 材料物性値の設定例

以上のことを考慮して、コンクリートの粗骨材最大寸法 150mm、圧縮強度 25MPa の場合におけるコンクリートの材料物性値の設定例を以下に示す。

[設定例]

引張強度を圧縮強度の 1/10 程度と考えると 2.5MPa とし、引張軟化開始応力を引張強度と同値と考える。図-1.9.5 を参考にして、弾性係数は 27,000MPa とする。破壊エネルギーについては、文献 6)において、圧縮強度 30MPa、骨材最大寸法 150mm のダム用コンクリートのくさび挿入型試験による L 型試験体を用いた緩速載荷条件により破壊エネルギー 317N/m となっているのを参考にして、300N/m と設定する。

なお、動的載荷では引張強度および破壊エネルギーともに増加することが期待される。しかし、ここでは分布型クラックモデルによる解析において引張軟化開始曲線を単直線で近似する場合として、

動的載荷割り増しは考慮しない。

参考文献

- 1) コンクリート工学協会：JCI 規準「切欠きはりを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法 JCI-S-001-2003
- 2) 永山 功、佐々木隆、波多野政博：載荷速度がコンクリートの引張強度に及ぼす影響、ダム技術、No.148、1999 年 1 月
- 3) Raphael, J.M. "*Tensile Strength of Concrete*", ACI Journal, March-April 1984
- 4) 永山 功、渡辺和夫、尾畑伸之：ダム用コンクリートの直接引張強度試験とその試験結果についての考察、ダム技術、No.54、1991 年 3 月
- 5) 土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編]、2002 年 3 月
- 6) 堀井秀之、内田善久、柏柳正之、木全宏之、岡田武二：コンクリートダム耐力評価のための引張軟化特性の検討、電気土木、No.286、2000 年 3 月
- 7) 山口嘉一、佐々木隆、金縄健一：コンクリートダムの耐震性評価法の合理化に関する調査、土木研究所成果報告書【平成 14 年度】、pp.289-298、2003 年 3 月