
Introduction aux effets d'échelle sur la résistance des structures

Zdeněk P. Bažant

 *Hermès*

Lavoisier

Table des matières

Préambule	v
Préface de l'auteur	vii
A propos de l'auteur	ix
1 Introduction	1
1.1. Nature du problème	1
1.2. Eléments historiques	4
1.3. Développements plus récents dans le domaine des matériaux quasi-fragiles	7
1.4. Eléments de base de la théorie des effets d'échelle	10
1.5. Lois en puissance et absence de longueur interne	11
1.6. Transition entre plusieurs lois en puissance pour différentes échelles	14
1.7. Déduction à partir de l'analyse dimensionnelle	18
1.8. Stabilité des structures et effets d'échelle	20
2 Analyse asymptotique de l'effet d'échelle	23
2.1. Analyse asymptotique de l'effet d'échelle dans les structures conte- nant des entailles ou des grandes fissures	23
2.2. Loi d'effet d'échelle en énergie et raccordement asymptotique	27
2.3. Effet d'échelle analysé à l'aide du taux de restitution d'énergie en mécanique de la rupture	29
2.4. Analyse de l'effet d'échelle asymptotique par l'intégrale J	30
2.5. Identification des paramètres de rupture à partir de la loi d'effet d'échelle	32
2.6. Validation expérimentale et simulations numériques	36
2.7. Effet d'échelle à l'amorçage de la fissuration	41
2.8. Redistribution des contraintes causée par une bande de fissures	46

2.9.	Effet du gradient des déformations sur la rupture à l'amorçage de la fissuration	48
2.10.	Loi d'effet d'échelle universelle	49
2.11.	Effet d'échelle asymptotique et diagramme d'interaction dans le cas de plusieurs charges	51
2.12.	Effet d'échelle pour de très petites structures	53
3	Effets d'échelle statistiques et déterministes	57
3.1.	La théorie statistique de Weibull est-elle applicable aux structures quasi-fragiles ?	57
3.2.	Théorie probabiliste non locale de l'effet d'échelle	62
3.3.	Formule énergétique-statistique pour l'effet d'échelle sur les ruptures à l'amorçage de la fissuration	66
3.4.	Effet d'échelle déduit de l'intégrale J pour des fissures arbitrairement distribuées	71
3.5.	La fractalité des surfaces de fissures est-elle la cause des effets d'échelle ?	73
3.6.	La fractalité lacunaire des microfissures est-elle la cause de l'effet d'échelle ?	76
4	Effet d'échelle énergétique pour la glace de mer et les ossatures en béton	81
4.1.	Effet d'échelle sur la rupture de la glace de mer	81
4.2.	Rotules adoucissantes dans les poutres et les plaques	85
4.3.	Effet d'échelle sur la rupture de poutres et plaques comportant des rotules adoucissantes	88
4.4.	Poutres mixtes acier-béton et effet d'échelle composé	93
4.5.	Effet d'échelle et règles de calculs des ouvrages en béton	103
4.6.	Calculs des ouvrages en négligeant la résistance en traction et effets d'échelle	108
5	Effets d'échelle en compression. Application au béton, aux roches et aux composites	111
5.1.	Propagation d'une bande d'endommagement en compression	111
5.2.	Effet d'échelle dans les poteaux en béton armé	115
5.3.	Treillis bielles-tirants pour la rupture en cisaillement du béton armé	120
5.4.	Effondrement de galeries souterraines creusées dans la roche	122
5.5.	Analyse asymptotique équivalente pour les fissures avec une contrainte de pontage résiduelle	123
5.6.	Application à la rupture en compression dans les composites à fibres longues	125
5.7.	Effet de l'orthotropie du matériau	125

6	Effet d'échelle dans les composites analysé par l'intégrale J	127
6.1.	Analyse par l'intégrale J des bandes de fissures	127
6.2.	Calcul de l'intégrale J	132
6.3.	Rupture à l'amorçage de la bande cisaillement pour une éprouvette entaillée	135
6.4.	Comparaisons avec des résultats expérimentaux	136
7	Effets temporels, fatigue et capacité d'absorption d'énergie	141
7.1.	Influence de la vitesse de chargement sur l'effet d'échelle	141
7.2.	Effet d'échelle en fatigue	144
7.3.	Propagation d'onde et influence de la viscosité	146
7.4.	Ductilité et capacité d'absorption d'énergie des structures	147
8	Approches numériques de la rupture quasi-fragile et effet d'échelle	155
8.1.	Analyse par valeurs propres via le modèle de fissure cohésive	155
8.2.	Modèle microplan	157
8.3.	Modèles d'endommagement capables de reproduire l'effet d'échelle	159
8.4.	Approches simples et pratiques	160
8.5.	La modélisation non locale et sa justification physique	161
8.6.	Contrôle de la localisation de l'endommagement	162
8.7.	Éléments discrets, treillis et arrangement aléatoire de particules	164
9	Effets d'échelle asymptotiques du modèle de fissure cohésive	167
9.1.	Version K de la méthode des pointes de fissures distribuées	169
9.1.1.	Cas 1. Géométrie positive avec entaille ou fissure initiale ($g_0 > 0, g'_0 > 0$)	174
9.1.2.	Cas 2. Rupture à l'amorçage de la fissuration ($g_0 = 0, g'_0 > 0$)	180
9.1.3.	Cas 3. Transition entre les géométries positives et négatives ($g_0 > 0, g'_0 = 0, g''_0 > 0$)	182
9.1.4.	Récapitulation	185
9.2.	Asymptotes aux petites tailles du modèle de fissure cohésive	186
9.3.	MELR non locale. Une approche simple de la fissuration cohésive et de son effet d'échelle	187
9.4.	Loi d'effet d'échelle pour un grand intervalle de tailles et son développement en série de Dirichlet	190
10	Nanomécanique et effets d'échelle	195
10.1.	Modèles avec effet de gradient	196
10.1.1.	Loi de comportement de Fleck et Hutchinson	196
10.1.2.	Théories MSG et TNT de Gao et Huang	199

10.1.3. Théorie d'Acharya et Bassani	201
10.2. Comportement asymptotique	201
10.2.1. Analyse du modèle de Fleck et Hutchinson	202
10.2.2. Analyse des modèles MSG et TNT	205
10.2.3. Analyse du modèle d'Acharya et Bassani	210
10.3. Raccordement asymptotique	210
10.4. Conclusions	211
10.5. Résultats très récents	212
11 Perspectives	215
Bibliographie	217