

目 次

第 I 編 爆発作用を受ける土木構造物の安全性評価

第 1 章 爆発の基本	1
1.1 爆発とは	1
1.2 爆薬の爆発	1
1.3 蒸気雲爆発	2
1.4 沸騰液膨張蒸気爆発	4
1.5 粉塵爆発	4
1.6 爆薬の爆轟圧	4
1.7 通常反射(regular reflection)とマッハ反射(Mach reflection)	6
1.8 爆薬の爆発による最大過圧	7
1.9 爆風圧のスケール則(blast wave scaling law)	7
第 2 章 爆薬の爆轟理論	11
2.1 はじめに	11
2.2 一次元の爆轟理論	12
第 3 章 爆薬の爆発により構造物に作用する爆発荷重	19
3.1 爆風圧のパラメータ	19
3.2 爆風圧の時刻歴モデル	22
3.3 最大反射圧	24
3.4 爆風波の波面パラメータ(wavefront parameter)	27
3.5 構造物に作用する爆発荷重	30
3.5.1 前壁に作用する爆発荷重	32
3.5.2 頂版や側壁に作用する爆発荷重	33
3.5.3 後壁に作用する爆発荷重	35
第 4 章 ガス爆発により構造物に作用する爆発荷重	37
4.1 圧力容器からのガスの漏洩速度	37
4.2 ガス爆発の TNT 爆発への換算方法	40
4.2.1 等価 TNT 質量の計算	40
4.2.2 英国 Flixborough のガス爆発事故への適用	41
4.3 TNO Multi-Energy Method (TNO マルチエネルギー法)	43
4.4 TNO Multi-Energy Method (TNO マルチエネルギー法) の適用例	47
4.4.1 Flixborough 爆発事故への Multi-Energy Method の適用	47
4.4.2 LPG 貯蔵タンクの爆発	49

第5章	一質点系モデルによる爆破応答	53
5.1	はじめに	53
5.2	一質点系モデルの概要	53
5.3	線形一質点系モデルによる応答解析	54
5.4	弾性一質点系モデルの特徴と荷重～力積曲線 (PI 曲線)	55
5.4.1	衝撃的荷重における最大変位	55
5.4.2	準静的荷重における最大変位	56
5.4.3	応答区分に対応した最大変位の動的応答倍率	56
5.4.4	荷重～力積曲線 (あるいは等損傷曲線)	57
5.5	弾塑性一質点系モデルによる応答解析	58
第6章	ASCE 耐爆設計指針による RC 構造物の耐爆設計解析	63
6.1	ASCE 耐爆設計指針	63
6.1.1	構造物の耐爆設計プロセス	63
6.1.2	爆破荷重を受ける鉄筋コンクリート構造物の設計クライテリア	65
6.1.3	爆破荷重を受ける鉄筋コンクリート構造物の安全性照査	65
6.2	非線形動的有限要素解析	66
6.2.1	非線形動的有限要素解析を適用した耐爆設計の事例	67
第7章	地中爆発を考慮した耐爆設計	73
7.1	地中爆発を考慮した耐爆設計に関する考え方	73
7.2	地中爆発における爆発荷重の設定方法	74
7.2.1	爆土圧の性質	74
7.2.2	爆土圧の評価	74
7.2.2.1	爆土圧の計測例と爆土圧～時間関係の特徴	74
7.2.2.2	爆土圧の評価式	77
7.3	爆土圧を受ける部材の変形の評価	78
7.3.1	埋設コンクリート板に対する爆発荷重の載荷	78
7.3.2	部材の変形の評価例	79
第8章	爆破における飛散片に対する安全性	85
8.1	飛散物および飛翔体の分類	85
8.2	局部破壊現象	85
8.3	飛散片に対する構造安全性に対する既往の研究	85
8.4	爆発および飛翔体の高速衝突に対する防護設計指針の紹介	87
8.5	局部破壊評価式の分類	88
8.6	具体的な局部破壊の算定例	92
8.6.1	鋼版に対する貫通限界板厚	92
8.6.2	鉄筋コンクリート版に対する貫入深さ	92
8.6.3	鉄筋コンクリート版に対する裏面剥離限界版厚	93

8.6.4	鉄筋コンクリート版に対する貫通限界版厚	93
8.7	まとめ	94
第9章	窓の耐爆性とその設計	97
9.1	はじめに	97
9.2	各種のガラス	97
9.2.1	フロートガラス	97
9.2.2	合わせガラス	98
9.2.3	倍強度ガラス	99
9.2.4	強化ガラス	100
9.2.5	複層ガラス	101
9.3	防犯フィルムによる既存ガラスの耐爆補強	102
9.4	窓の耐爆性能を調べるための試験法	103
9.5	窓ガラスの耐爆設計法	105
9.5.1	静的設計荷重チャートを用いた場合	105
9.5.2	UFC 基準を用いた場合	107
第10章	爆発が人体に及ぼす影響	111
10.1	爆発による人体が受ける障害の分類	111
10.2	爆風圧による肺や鼓膜の損傷	113
10.3	爆破テロに対する安全距離の設定	116
第11章	爆発荷重を受ける RC 構造物に対するリスク評価手法の提案	119
11.1	はじめに	119
11.2	爆発荷重を受ける構造物のリスク評価手法の概要	120
11.2.1	評価プロセス	120
11.2.2	各評価プロセスの概要	121
11.3	ハザードの評価	124
11.3.1	爆破テロの年発生頻度と爆薬量の関係	124
11.3.2	対象地域におけるハザードの評価	124
11.4	フラジリティの評価	125
11.4.1	構造物に作用する爆発荷重	125
11.4.2	構造物の条件設定	126
11.4.3	1 質点系モデルによる爆発応答解析	127
11.4.4	部材種別ごとのフラジリティ評価	130
11.4.5	構造物全体におけるフラジリティ評価	132
11.5	ロスの評価	132
11.5.1	建物損失の評価	132
11.5.2	人的損失の評価	133
11.5.3	構造物におけるロスの評価	134

11.6	リスクの評価	135
11.7	おわりに	136
第 12 章	爆発荷重を受ける橋梁の安全性に関する研究の現状	139
12.1	はじめに	139
12.2	爆破テロにより橋梁に作用する爆風圧	142
12.3	橋脚に作用する爆風圧実験	145
12.4	爆発荷重を受ける橋梁の応答に関する解析的研究	147
12.4.1	Hao and Tang による研究	147
12.4.2	Son et al.による研究	152
12.4.3	Son and Lee による研究	153
12.5	爆発荷重を受ける RC 橋脚に関する実験的研究	157
12.5.1	Williamson et al.による研究	157
12.5.2	Fujikura and Bruneau による研究	163
12.5.3	Fujikura et al.による研究	168
12.5.4	Foglar and Koyar による研究	171
12.6	爆破荷重を受ける鉄筋コンクリート床版の損傷	173
12.7	爆発事故で大破した中国河南省の橋梁の被災事例	174
12.8	橋梁の耐爆設計法	176
第 13 章	トンネル内の爆風解析	183
13.1	概要	183
13.2	爆風の減衰特性	183
13.3	1次元爆風伝播解析	184
13.4	3次元爆風伝播解析	185
13.4.1	解析モデルと条件	185
13.4.2	解析結果	186
13.5	結論	191
第 14 章	偶発的荷重を受ける建物の進行性崩壊について	193
14.1	はじめに	193
14.2	S 造建物の進行性崩壊解析	194
14.2.1	解析モデルと解析条件	194
14.2.2	解析結果と考察	196
14.3	おわりに	201
第 15 章	曲げとせん断破壊を考慮した一質点系モデルと P-I 曲線	203
15.1	柱・梁部材のスケルトンカーブ	203
15.2	床スラブ部材のスケルトンカーブ	206
15.3	非線形スケルトンカーブを用いた P-I 曲線の作成方法	207

15.4	P-I 曲線による RC ボックスの直接せん断破壊に対する評価	209
第 16 章	C4 爆薬の接触・近接爆発に対するコンクリート版の損傷評価	213
16.1	はじめに	213
16.2	C4 爆薬の爆発による爆風圧特性	213
16.2.1	C4 爆薬の爆風圧に関する基礎実験	213
16.2.2	実験に対する数値シミュレーション	216
16.3	C4 爆薬の接触・近接爆発に対するコンクリート版の損傷・破壊に関する実験的検討	218
16.3.1	実験概要	218
16.3.2	実験結果および考察	218
16.3.3	Mcvay 評価式による損傷評価との比較	220
16.4	接触・近接爆発に対するコンクリート版の損傷シミュレーション	221
16.4.1	解析および構成モデル	221
16.4.2	解析パラメータの影響	223
16.4.3	実験結果との比較	226
16.4.4	爆薬の形状が破壊に与える影響	227
16.5	まとめ	227
第 17 章	爆土圧を受ける鉄筋コンクリート版の破壊シミュレーション	229
17.1	はじめに	229
17.2	密度依存剛性モデルの改良	229
17.2.1	密度依存剛性モデルの概要	229
17.2.2	密度依存剛性モデルの改良と入力データの設定	230
17.2.3	改良モデルに入力するヤング率とポアソン比の定式化	231
17.2.4	爆土圧の 3 次元シミュレーション	235
17.3	爆土圧を受ける鉄筋コンクリート版の破壊シミュレーション	236
17.3.1	実験の概要	236
17.3.2	解析の概要	238
17.3.3	解析結果および考察	239
17.4	おわりに	241
第 18 章	アーク放電火災への衝撃解析コードの適用例	243
18.1	研究の背景と目的	243
18.2	試験によるアプローチ	243
18.2.1	試験の概要	243
18.2.2	試験結果	243
18.3	数値解析によるアプローチ	246
18.3.1	数値解析手法	246
18.3.2	HEAF 試験への適用	247
18.3.3	数値解析結果	248

18.4	まとめ	248
------	-----	-----

第Ⅱ編 落石防護構造物の性能照査設計に資する各種検討事例

	これまでの経緯と本編の構成	251
第1章	我が国における性能設計導入の背景と経緯	253
1.1	国際協定と国際規格	253
1.2	国内の動き	253
1.2.1	政府、国土交通省が進めた政策	253
1.2.2	国土交通省所掌の技術基準類の改訂	254
1.2.3	学会による技術基準類の改訂	255
第2章	設計供用期間について	257
2.1	設計供用期間を示すことの意義	257
2.2	H25 衝撃委員会報告における設計供用期間記述について	257
第3章	落石およびその他の作用	261
3.1	落石作用	261
3.1.1	落石調査の現状	261
3.1.2	設計落石作用の設定	262
3.2	落石防護網・柵を積雪地域に配置する場合の設計への配慮	263
3.2.1	雪による作用	263
3.2.2	防護柵のメンテナンス	264
3.2.3	落石防護網・柵の積雪による損傷事例	264
3.3	崩壊土砂の荷重評価に関して	265
3.3.1	はじめに	265
3.3.2	荷重評価に関して	265
3.3.3	まとめ	270
第4章	ロックシェッド、落石防護柵の耐衝撃挙動と性能照査事例	273
4.1	要求性能と限界状態の定義に資する各種実験	273
4.1.1	緩衝材を設置した RC 梁部材の衝撃実験	273
4.1.2	PC 製ロックシェッド実物スラブ耐力実験	275
4.1.3	2/5 縮尺 RC 製ロックシェッドの衝撃実験	276
4.1.4	1/2 縮尺 RC 製ロックシェッドの衝撃実験	279
4.2	衝撃荷重の設定	283
4.2.1	実験結果の利用	283
4.2.2	数値解析の利用	284
4.3	実験による性能照査手法	287
4.3.1	RC 製ロックシェッドの性能照査事例	287

4.3.2	落石防護柵の性能照査事例	296
4.4	数値解析による性能照査手法	301
4.4.1	エネルギー一定則を用いた構造物へのエネルギー伝達率の推定法	301
4.4.2	RC製ロックシェッドに対する三次元動的骨組解析の適用性	304
4.4.3	RC製ロックシェッドに対する入力エネルギー倍率と損傷程度に関する検討	311
4.4.4	RC製ロックシェッドの性能照査設計例	314
第5章	落石防護網・柵の耐衝撃挙動と性能照査事例	333
5.1	要求性能と限界状態の定義に資する各種実験	333
5.1.1	落石防護網の落石衝突時における回転エネルギーの影響に関する検討	333
5.2	実験による性能照査手法	337
5.2.1	高エネルギー吸収型落石防護柵の性能照査事例	337
5.2.2	柵の実験結果の収集整理	337
5.3	数値解析による性能照査手法	341
5.3.1	大変形有限要素解析による性能評価	341
5.4	構造細目等	343
5.4.1	杭式落石防護柵の基礎の設計	343
5.4.2	落石防護網・柵等のアンカーの設計	346

第Ⅲ編 衝突作用を受ける各種構造物の性能設計例

	これまでの経緯と本編の構成	351
第1章	鋼製透過型砂防構造物の性能設計	353
1.1	はじめに	353
1.2	総則	354
1.2.1	適用	354
1.2.2	鋼製透過型砂防構造物の設計の基本	354
1.2.3	鋼製透過型砂防堰堤に求められる要求性能	355
1.3	限界状態	355
1.3.1	限界状態の定義	355
1.3.2	限界状態に対する基本的な考え方	356
1.4	作用	356
1.4.1	作用の定義	356
1.4.2	砂防堰堤に作用する力学的荷重	357
1.4.3	荷重レベルと限界状態との関係	357
1.5	砂防堰堤の種類	357
1.6	性能マトリックス	358
1.6.1	耐土石流性能マトリックス	358
1.6.2	砂防堰堤の種類による照査	358

1.7	性能規定	358
1.7.1	外的安定性（安定計算）	358
1.7.2	内的安全性（構造計算）	359
1.7.3	性能照査方法	359
1.8	数値計算例	360
1.8.1	目的	360
1.8.2	方法	360
1.8.3	荷重レベル2の設定	360
1.8.4	荷重レベル3の設定	362
1.8.5	荷重レベル3に対するコンクリート砂防堰堤の安全性照査	362
1.8.6	荷重レベル3に対する鋼製透過型砂防堰堤の安全性照査	364
1.9	結論および問題点	367
1.10	あとがき	367
第2章	港湾構造物における耐衝撃設計	369
2.1	はじめに	369
2.2	耐衝撃性に優れる防波堤ケーソンの設計マニュアル（案）	370
2.2.1	総則	370
2.2.2	要求性能および性能規定	371
2.2.3	照査方法	372
2.2.4	その他配慮事項および照査例	375
2.3	まとめ	375
第3章	竜巻飛来物の衝突による原子力施設防護対策に関する耐貫通設計ガイド	377
3.1	総則	377
3.1.1	目的	377
3.1.2	適用範囲	378
3.2	用語の定義	379
3.3	竜巻防護対策の要求性能および性能規定	379
3.3.1	一般	379
3.4	鋼板構造物に対する耐貫通評価ガイド	380
3.4.1	一般	380
3.4.2	評価手順	380
3.4.3	評価基準	381
3.5	防護ネットに対する耐貫通評価ガイド	388
3.5.1	一般	388
3.5.2	評価手順	388
3.5.3	評価基準	389

第4章 衝突作用を受ける RC 梁の性能設計マニュアル（案）と設計事例	395
4.1 総則	395
4.1.1 目的	395
4.1.2 適用範囲	395
4.1.3 本設計マニュアル（案）の記述方針	396
4.2 要求性能および性能規定	396
4.2.1 一般	396
4.2.2 衝突作用の発生頻度と作用の種別	397
4.2.3 衝突作用に対する限界状態	397
4.2.4 要求性能	398
4.2.5 性能規定	399
4.3 照査	400
4.3.1 RC 梁の実験による性能照査方法	400
4.3.2 RC 梁の数値解析による照査方法	401
4.4 審査	401
4.5 衝突作用を受ける RC 梁の設計と照査の事例	402
4.5.1 衝突作用と要求性能の設定	402
4.5.2 RC 梁の形状寸法	402
4.5.3 断面設計	402
4.5.4 実験による性能照査	403
第5章 衝突作用を受ける RC 版部材の性能設計マニュアル（案）	407
5.1 総則	407
5.1.1 目的	407
5.1.2 適用範囲	407
5.1.3 本設計マニュアル（案）の記述方針	408
5.2 目的・要求性能・性能規定	408
5.2.1 衝突作用を受ける RC 版部材の設置目的	408
5.2.2 衝突作用を受ける RC 版部材の設計供用期間	408
5.2.3 衝突作用を受ける RC 版部材の性能グレード	408
5.2.4 衝突作用	409
5.2.5 限界状態	411
5.2.6 要求性能	412
5.2.7 性能規定	413
5.3 照査方法	417
5.3.1 RC 版部材の実験結果を基にした性能照査	417
5.3.2 安全性の評価	420
5.3.3 RC 版部材の解析による性能照査	425
5.4 審査方法	426