Massimo Comedini Pietro Rimoldi

Terre rinforzate

Applicazioni - Tecnologie - Dimensionamento

Dario Flaccovio Editore

INDICE

Premessa ..... pag. 11

Parte Prima

Applicazioni e tecnologia delle opere in terra rinforzata

1. Cenni introduttivi

1.1. Storia ..... » 15
1.2. Tipologie di rinforzo dei terreni con rinterro ..... » 17
1.3. Applicazioni delle terre rinforzate ..... » 18
1.4. Vantaggi delle terre rinforzate ..... » 22
1.4.1. Vantaggi dei muri in terra rinforzata ..... » 22
1.4.2. Vantaggi dei pendii rinforzati ..... » 25
1.5. Svantaggi delle terre rinforzate ..... » 25
1.6. Bibliografia ..... » 25

2. Tipologie di terre rinforzate

2.1. Tipologie di rinforzi ..... » 28
2.2. Tipologie di paramento ..... » 29
2.2.1. Pannelli modulari prefabbricati in calcestruzzo ..... » 29
2.2.2. Pannelli prefabbricati in cemento armato a tutta altezza ..... » 30
2.2.3. Paramento modulare in blocchi ..... » 30
2.2.4. Paramento in gabbioni ..... » 32
2.2.5. Terre rinforzate con risvolto frontale (Wrap around system) ..... » 32
2.3. Bibliografia ..... » 33

3. Valutazione delle alternative progettuali

3.1. Fattibilità ..... » 35
3.1.1. Ingombro dei rinforzi ..... » 35
3.1.2. Terreno di riempimento ..... » 36
3.1.3. Ambiente chimico-fisico ..... » 36
3.1.4. Altezza ..... » 37
3.1.5. Sovraccarichi ..... » 37
3.1.6. Deformazioni laterali nei muri ..... » 37
3.1.7. Azioni del moto ondoso e delle correnti ..... » 37
3.1.8. Sottoservizi ..... » 37
3.2. Bibliografia ..... » 38

4. Principi di funzionamento del sistema terreno/rinforzi

4.1. Trasferimento delle tensioni ..... » 41
4.2. Deformazione dei rinforzi ..... » 42
4.3. Compatibilità delle deformazioni ..... » 44

5. Fattori che influenzano il comportamento e le caratteristiche di una terra rinforzata

5.1. Il terreno ..... » 47
5.1.1. Stress e resistenza al taglio ..... » 48
5.1.2. Resistenza al taglio e deformazioni ..... » 49
5.1.2.1. Angolo di resistenza al taglio a riposo ..... » 51
5.1.2.2. Angolo di resistenza al taglio allo stato critico ..... » 52
5.1.2.3. Angolo di resistenza al taglio di picco ..... » 52

5.1.3. Costipazione del terreno ... » 58
5.2. I rinforzi ... » 59
5.2.1. Resistenza dei rinforzi ... » 59
5.2.2. Rigidezza ... » 60
5.2.3. Interazione col terreno ... » 62
5.2.4. Distribuzione dei rinforzi ... » 65
5.2.4.1. Spaziatura dei rinforzi ... » 65
5.2.4.2. Lunghezza dei rinforzi ... » 67
5.2.4.3. Il paramento ... » 67
5.3. Bibliografia ... » 68

6. Scelta del sistema costruttivo ... » 69

7. Proprietà dei materiali e loro caratterizzazione ai fini della progettazione delle terre rinforzate
7.1. Il terreno del rilevato strutturale ... » 73
7.1.1. Angolo di resistenza al taglio ... » 75
7.1.2. Caratteristiche elettrochimiche dei terreni del rilevato strutturale ... » 78
7.1.2.1. Terreno e rinforzi metallici ... » 79
7.1.2.2. Terreno e geosintetici ... » 79
7.2. Rilevati strutturali con materiali speciali ... » 80
7.2.1. Terreni stabilizzati a calce ... » 80
7.2.1.1. Tecnica di stabilizzazione delle terre ... » 81
7.2.1.2. Effetti della stabilizzazione con calce ... » 82
7.2.1.3. Effetti della stabilizzazione mista calce-cemento ... » 83
7.2.1.4. Fasi dello studio preliminare ... » 83
7.2.1.5. Modalità esecutive ... » 84
7.2.1.6. Terre rinforzate e stabilizzazione a calce ... » 84
7.2.1.7. Valutazione dell'efficacia delle tecniche di rinforzo e trattamento del terreno ... » 85
7.2.2. Rifiuti solidi urbani (RSU) ... » 90
7.2.2.1. Caratteristiche geotecniche dei RSU ... » 90
7.2.2.2. Compatibilità chimico-fisica rifiuti-rinforzi ... » 91
7.3. I rinforzi ... » 93
7.3.1. Rinforzi in acciaio ... » 96
7.3.1.1. Corrosione dei rinforzi metallici ... » 99
7.3.2. Rinforzi polimerici (geosintetici) ... » 102
7.3.2.1. Polimeri utilizzati nella fabbricazione dei geosintetici per il rinforzo dei terreni ... » 103
7.3.2.2. Caratteristiche dei polimeri principalmente usati nel rinforzo dei terreni ... » 105
7.3.2.3. Composizione dei materiali polimerici ... » 110
7.3.2.4. Tipologie di geosintetici per il rinforzo dei terreni ... » 110
7.3.3. Proprietà dei geosintetici per il rinforzo dei terreni ... » 125
7.3.3.1. Caratteristiche fisiche ... » 126
7.3.3.2. Comportamento meccanico dei geosintetici e interazione col terreno ... » 127
7.3.3.2.1. Modelli di comportamento complessi ... » 129
7.3.3.2.2. Modelli di comportamento elementari ... » 131

7.3.3.2.3. Determinazione della resistenza a trazione e della deformazione a breve termine dei geosintetici ... » 134
7.3.3.2.4. Determinazione della resistenza a trazione a lungo termine a carico costante: effetto delle deformazioni viscose ... » 138
7.3.3.3. La degradazione dei geosintetici e la caratterizzazione della loro suscettibilità all'aggressione chimico-fisico-biologica e al danneggiamento meccanico ... » 141
7.3.3.3.1. Suscettibilità all'aggressione chimico-fisico-biologica ... » 142
7.3.3.4. Danneggiamento durante la posa in opera ... » 148
7.3.3.5. Comportamento nel tempo dei geosintetici desunto da opere in vera grandezza ... » 150
7.3.4. Determinazione della resistenza a trazione e della deformazione di progetto dei geosintetici ... » 152
7.3.5. Interazione terreno-rinforzo ... » 154
7.3.5.1. Interazione in condizioni di sfilamento ... » 156
7.4. Blocchi prefabbricati incrementali ... » 163
7.4.1. Resistenze di interfaccia dei blocchetti incrementali ... » 164
7.5. Bibliografia ... » 168

8. Inserimento ambientale delle terre rinforzate
8.1. Tecniche di inerbimento ... » 176
8.2. Rivestimento con piante arbustive ... » 177

9. Costruzione delle terre rinforzate
9.1. Metodi di costruzione ... » 181
9.1.1. Facciata inerbita e impervia ... » 182
9.2. Opere a facciata rinverdita ... » 184
9.2.1. Procedura di costruzione con casseri a perdere in rete elettrosaldata ... » 186
9.3. Opere a facciata impervia ... » 190
9.3.1. Procedura di costruzione di muri a blocchetti incrementali ... » 192
9.3.2. Procedura di costruzione di muri a pannelli incrementali ... » 194
9.3.3. Esempio di istruzioni operative per la costruzione di un muro a pannelli incrementali ... » 196
9.3.4. Esempio di istruzioni operative per la costruzione di un muro a facciata verde con casseri a perdere in rete elettrosaldata ... » 198
9.3.5. Esempio di istruzioni operative per la costruzione di un muro a facciata verde con casseri a perdere in rete metallica a doppia torsione ... » 202
9.4. Bibliografia ... » 206

Parte II
Progetto delle opere in terra rinforzata

10. Metodi di analisi di stabilità
10.1. Progettazione di opere in terra rinforzata ... » 209
10.2. Terreno costituente il blocco rinforzato ... » 210
10.3. Analisi in condizioni statiche ... » 212
10.3.1. Stima delle deformazioni della facciata ... » 214
10.3.2. K-stiffness Method ... » 215
10.3.3. Metodo cinematico (o degli spostamenti) ... » 222

10.4. Analisi in condizioni sismiche » 224
10.4.1. Metodi di calcolo pseudostatici » 226
10.4.2. Analisi dinamica semplificata » 227
10.5. Meccanismi di collasso » 233
10.6. Metodo dell'equilibrio limite » 234
10.6.1. Verifica di stabilità interna » 235
10.6.2. Verifica di stabilità esterna » 236
10.6.3. Verifica di stabilità globale » 244
10.7. Modellazione numerica agli elementi finiti (FEM) » 252
10.8. Raccomandazioni e normative tecniche » 260
10.8.1. Normativa inglese BS 8006-1 (2010) » 260
10.8.2. Raccomandazioni americane AASHTO 2007 e FHWA 2009 » 262
10.9. Bibliografia » 267

11. Carichi e sollecitazioni in una terra rinforzata
11.1. Carichi agenti sulle superfici di rottura » 273
11.1.1. Carico uniforme » 273
11.1.2. Carichi lineari applicati al contorno » 274
11.1.3. Carichi puntuali ripetuti ad intervalli regolari » 275
11.1.4. Carichi puntuali isolati » 275
11.1.5. Carichi dovuti alla presenza di tiranti » 276
11.1.6. Falde nei terreni » 276
11.2. Forze prodotte dai rinforzi » 279
11.3. Spinta attiva » 279
11.3.1. Calcolo della spinta attiva con il metodo di Coulomb » 279
11.3.2. Calcolo della spinta attiva con il metodo di Rankine » 280
11.3.3. Spinta idrostatica » 280
11.4. Resistenza passiva » 281
11.4.1. Metodo di Coulomb » 281
11.4.2. Metodo di Rankine » 282
11.5. Effetto della coesione » 282
11.6. Spinta attiva in presenza di un carico uniforme sul terrapieno » 284
11.7. Effetto dei carichi sulla parete di un muro » 285
11.7.1. Linee di carico sul terrapieno orizzontale » 285
11.7.2. Carico puntiforme su terrapieno orizzontale » 286
11.7.3. Striscia di carico su piano campagna inclinato » 286
11.8. Carichi dinamici dovute a forze di natura sismica » 287
11.8.1. Metodo di Mononobe e Okabe » 288
11.8.2. Spinte di calcolo del terreno e dell'acqua in condizioni sismiche » 290
11.9. Valutazione degli spostamenti » 293
11.9.1. Metodo di Newmark » 293
11.9.2. Metodi semplificati » 296
11.10. Bibliografia » 297

12. Dimensionamento dei pendii ripidi in terra rinforzata
12.1. Cenni di teoria » 299
12.2. Metodi di calcolo » 302
12.3. Pendii ripidi rinforzati: definizione e impostazione del problema » 302
12.4. Forze richieste e disponibili » 303

12.5. Distribuzione delle forze massime richieste » 303
12.6. Forze disponibili e ammissibili » 305
12.7. Determinazione dei parametri di progetto » 308
12.8. Criteri di progetto » 308
12.9. Forze necessarie » 310
12.10. Diagrammi di Jewell » 313
12.11. Determinazione della spaziatura tra i rinforzi » 315
12.12. Risvolto » 316
12.13. Procedura di calcolo » 317
12.14. Bibliografia » 323

13. Dimensionamento dei muri in terra rinforzata con rinforzi estensibili
13.1. Analisi di stabilità richieste » 325
13.2. Geometria del muro e caratteristiche del terreno » 327
13.3. Caratteristiche dei GSR » 328
13.4. Fattori di sicurezza » 328
13.5. Analisi di stabilità esterna » 329
13.6. Coefficiente di spinta del terreno » 329
13.7. Forze in gioco » 331
13.8. Scivolamento lungo la base del muro » 332
13.9. Scivolamento lungo il primo GSR » 333
13.10. Ribaltamento » 333
13.11. Capacità portante » 333
13.12. Analisi di stabilità interna » 334
13.12.1. Rottura per trazione dei GSR » 334
13.12.2. Sfilamemto dei GSR » 336
13.13. Analisi di stabilità locale della facciata » 337
13.14. Tensioni tangenziali » 341
13.15. Analisi di stabilità globale » 343
13.16. Bibliografia » 344

14. Dimensionamento dei muri in terra rinforzata con rinforzi inestensibili
14.1. Introduzione alle opere in terra rinforzata con rinforzi inestensibili » 345
14.2. Progetto delle opere in terra rinforzata con rinforzi inestensibili: analisi di stabilità richieste » 348
14.3. Fattori di sicurezza » 349
14.4. Metodo della gravità coerente » 350
14.5. Assunzioni nel calcolo di stato limite » 351
14.6. Progettazione di muri in terra con rinforzi lineari inestensibili » 351
14.6.1. Tensione nei rinforzi » 352
14.6.2. Modi di rottura di un muro in terra rinforzata » 355
14.6.3. Stabilità esterna » 355
14.6.4. Carico e condizioni al contorno » 356
14.6.5. Azioni prodotte dall'acqua » 357
14.6.6. Schema di calcolo » 358
14.6.7. Profondità di fondazione del muro » 358
14.6.8. Spaziatura verticale » 359
14.6.9. Lunghezza del rinforzo » 360
14.6.10. Spinta laterale del terreno e sollecitazioni verticali » 360

14.6.11. Stabilità esterna ... » 364
14.6.11.1. Scivolamento lungo la base ... » 364
14.6.11.2. Ribaltamento ... » 366
14.6.11.3. Rottura per capacità portante ... » 367
14.6.11.4. Stabilità globale ... » 369
14.6.11.5. Carico sismico ... » 369
14.6.12. Stabilità interna e locale ... » 371
14.6.12.1. Forze di trazione negli strati di rinforzo ... » 371
14.6.12.2. Stabilità interna rispetto alla rottura dei rinforzi ... » 373
14.6.12.3. Stabilità interna in relazione allo sfilamento dei rinforzi ... » 373
14.6.12.4. Resistenza a trazione e variazioni di spaziatura ... » 376
14.6.12.5. Stabilità interna rispetto ai carichi sismici ... » 376
14.7. Bibliografia ... » 380

15. Inquadramento normativo con NTC 2008
15.1. Valutazione della sicurezza ... » 381
15.2. Azioni sulle costruzioni e classificazione delle azioni ... » 382
15.3. Caratterizzazione delle azioni elementari ... » 382
15.4. Combinazioni delle azioni ... » 384
15.5. Stati limite ultimi ... » 384
15.6. Verifiche della sicurezza e delle prestazioni di sistemi geotecnici ... » 385
15.6.1. Verifiche nei confronti degli stati limite ultimi (SLU) ... » 385
15.6.2. Azioni ... » 385
15.6.3. Resistenze ... » 386
15.6.4. Tipi di analisi ... » 387
15.7. Opere di sostegno in terra rinforzata ... » 388
15.8. Verifiche sismiche ... » 389
15.8.1. Azioni sismiche ... » 390
15.9. Applicazione del metodo semiprobabilistico agli stati limite ... » 398

APPENDICE – Esempi di progetti e voci di capitolato ... » 399