Obsah

Poděkování 11

Úvod 13

1 Základní rovnice metody konečných prvků 21

1.1 Základní rovnice a princip virtuálních posunutí 21

1.1.1 Základní rovnice teorie pružnosti 22

1.1.2 Základní rovnice metody konečných prvků 24

1.2 Příklady 26

1.2.1 Osově zatížený přímý prut 27

1.2.1.1 Přesné řešení úlohy integrací podmínky rovnováhy 27

1.2.1.2 Princip virtuálních posunutí 28

1.2.1.3 Řešení metodou konečných prvků 29

1.2.2 Příklad 2D úlohy za podmínek rovinné deformace 38

1.2.2.1 Podmínky rovinné deformace 38

1.2.2.2 Odvození tříuzlového trojúhelníkového prvku . . 39

1.2.2.3 Vytvoření sítě a určení počtu stupňů volnosti . . 43

1.2.2.4 Sestavení matice tuhosti konstrukce – lokalizace . 45

1.2.2.5 Výpočet uzlových posunů 46

1.2.2.6 Porovnání s přesným řešením 46

1.3 Vybraná specifika MKP v geotechnice 47

1.3.1 Strategie řešení nelineární úlohy 49

1.3.1.1 Newton–Raphsonova metoda 51

1.3.1.2 Optimální délka kroku (*line search*) 53

1.3.1.3 Kritérium konvergence 54

1.3.1.4 Porovnání vybraných metod na příkladu základového pasu 56

1.3.2 Zavedení účinku vody do modelu 59

1.3.2.1 Odvodněná zemina 62

1.3.2.2 Neodvodněná zemina 62

1.3.3 Výpočet exkavačních sil 63

1.3.4 Vliv okrajových podmínek 66

2 Typy konečných prvků v programu Geo5 MKP **69**
2.1 Přehled prvků pro modelování zemního tělesa 70
2.1.1 Vektory napětí a přetvoření 72
2.1.2 Porovnání výpočtů s různými typy prvků 74
2.2 Tažené–tlačené prvky 76
2.2.1 Vyztužení svahu pomocí geotextilie 79
2.3 Ohýbané nosníkové prvky 80
2.3.1 Průběhy vnitřních sil na nosníku a kruhové desce 82
2.4 Kontaktní prvky 89

3 Materiálové modely **95**
3.1 Principy formulace materiálového modelu 95
3.1.1 Invarianty napětí 96
3.1.1.1 Hlavní napětí 96
3.1.1.2 Střední napětí 97
3.1.1.3 Deviátor napětí 97
3.1.1.4 Ekvivalentní deviatorické napětí 97
3.1.1.5 Lodeho úhel 98
3.1.2 Invarianty přetvoření 98
3.1.2.1 Objemové přetvoření 98
3.1.2.2 Deviátor přetvoření 99
3.1.2.3 Ekvivalentní deviatorické přetvoření 99
3.1.3 Konstitutivní vztahy teorie pružnosti vyjádřené v invariantech 99
3.2 Základní modely teorie plasticity 100
3.2.1 Mohr–Coulombův model 101
3.2.2 Drucker–Pragerův model 103
3.2.3 Modifikovaný Mohr–Coulombův model 105
3.2.4 Modifikovaný Cam clay model 105
3.2.5 Hypoplastický model jílu 107
3.2.6 Konstitutivní vztahy pro kontaktní prvky 110
3.3 Modelování laboratorních testů 110
3.3.1 Edometrická zkouška 111
3.3.2 Trojosá smyková zkouška 113
3.4 Kalibrace a verifikace materiálových modelů 114
3.4.1 Kalibrace Mohr–Coulombova modelu 114
3.4.2 Kalibrace hypoplastického modelu pro jíly 116
3.4.2.1 Odhad φ_c 116
3.4.2.2 Určení κ^* a λ^* z edometrické zkoušky 118
3.4.2.3 Nastavení parametru N 120
3.4.2.4 Určení míry překonsolidace 122
3.4.2.5 Kalibrace parametru r 125

4 Modelování základů **127**
4.1 Sedání základového pasu 127
4.1.1 Základová spára na povrchu terénu 128
4.1.2 Základová spára pod povrchem terénu 129
4.1.3 Vliv tuhosti základu 130
4.1.4 Příklad modelování základového pasu 130
4.1.4.1 Výsledky 132
4.2 Pilota 134
4.2.1 Vliv úhlu dilatance 134
4.2.2 Vliv kontaktních prvků 136
4.2.3 Příklad – praktická aplikace 137
4.2.3.1 Profil základové půdy 137
4.2.3.2 Geometrie modelu 138
4.2.3.3 Materiál piloty 138
4.2.3.4 Kontakty 138
4.2.3.5 Výpočet 139
4.3 Spolupůsobení piloty s deskou 140
4.3.1 Výsledky 142
4.4 Zatěžovací zkouška kruhovou deskou 142
4.4.1 Příklad 142

5 Pažení stavební jámy **145**
5.1 Nosníkové prvky jako pažící konstrukce 145
5.2 Modelování kotev 146
5.3 Vliv koeficientu bočního tlaku v klidu 146
5.4 Interakce mezi zeminou a pažící konstrukcí 150
5.5 Příklad výstavby pažené stavební jámy 153
5.5.1 Parametry stavební jámy 153
5.5.1.1 Geologický profil 153
5.5.1.2 Kotevní prvky 153
5.5.2 Výpočetní model 155
5.5.2.1 Síť konečných prvků 155
5.5.2.2 Výpočetní fáze 156
5.5.2.3 Podzemní stěna 156
5.5.2.4 Podzemní voda 156
5.5.3 Výsledky 157

6 Stabilita zemních konstrukcí **159**
6.1 Vliv sítě 160
6.2 Hladina podzemní vody 162
6.3 Výztužné prvky 162
6.3.1 Kotvy 163
6.3.2 Výztuhy 164

6.4 Porovnání s analytickými metodami . . . 165
6.5 Vliv materiálového modelu . . . 165
6.6 Kontaktní prvky v úlohách stability . . . 166
6.7 Příklad posouzení stability pilotové stěny . . . 172
6.7.1 Geologický profil . . . 173
6.7.2 Výpočetní model . . . 174
6.7.3 Výsledky . . . 174
6.7.4 Porovnání s analytickými metodami . . . 176

7 Modelování výstavby tunelu **179**
7.1 Ražený tunel . . . 179
7.1.1 Konvergenční metoda . . . 179
7.1.2 Ostění . . . 181
7.1.2.1 Primární ostění . . . 182
7.1.3 Členěná čelba . . . 186
7.1.3.1 Příklad . . . 188
7.1.4 Podpůrné konstrukce . . . 189
7.1.4.1 Kotvy . . . 190
7.1.4.2 Zpevňující injektáž . . . 192
7.1.5 Příklad výpočtu tunelu Brusnice . . . 192
7.1.5.1 Cíl modelování . . . 193
7.1.5.2 Velikost numerického modelu . . . 194
7.1.5.3 Geologie v oblasti řezu . . . 195
7.1.5.4 Síť konečných prvků . . . 196
7.1.5.5 Exkavace . . . 196
7.1.5.6 Primární ostění . . . 197
7.1.5.7 Kontaktní prvky . . . 198
7.1.5.8 Fáze výpočtu . . . 198
7.1.5.9 Výsledky výpočtu . . . 202
7.1.5.10 Porovnání výsledků numerického modelování a geotechnického monitoringu . . . 204
7.2 Přesypávané konstrukce . . . 205
7.2.1 Topologie modelu a profil základové půdy . . . 206
7.2.2 Technologie výstavby a jednotlivé fáze hutnění . . . 207
7.2.3 Výsledky výpočtu . . . 208

8 Modelování proudění podzemní vody **213**
8.1 Základní rovnice . . . 214
8.1.1 Rovnice kontinuity . . . 214
8.1.2 Okrajové podmínky . . . 216
8.1.3 Darcyho zákon . . . 217
8.1.3.1 Meze platnosti Darcyho zákona . . . 218
8.1.3.2 Vliv anizotropie . . . 219

8.1.3.3 Stanovení součinitelů permeability pro plně nasycené prostředí . . . 220
8.1.3.4 Příklad simulace úplné studny a bloku zeminy . . 222
8.1.3.5 Stanovení proudových tlaků . . . 226
8.1.4 Časová diskretizace rovnice kontinuity . . . 227
8.2 Popis proudění v nenasycené zemině . . . 228
8.2.1 Stanovení parametrů van Genuchtenova modelu . . . 230
8.2.2 Modely součinitele relativní permeability . . . 232
8.2.2.1 Vliv parametrů modelu v úlohách neustáleného proudění . . . 238
8.2.2.2 Nastavení počátečních podmínek . . . 240
8.2.2.3 Zavedení okrajových podmínek do výpočtu . . . 242
8.3 Příklady 2D modelování proudění v zemině . . . 244
8.3.1 Vliv okrajových podmínek . . . 245
8.3.1.1 Propustná, nepropustná a průsaková hranice . . . 245
8.3.1.2 Využití vnitřní okrajové podmínky . . . 247
8.3.1.3 Použití průsakové hranice uvnitř zemního tělesa nebo masívu . . . 248
8.3.2 Ustálené proudění . . . 249
8.3.2.1 Příklad modelování stávající heterogenní hráze . 249
8.3.2.2 Příklad odvodnění a prolomení dna stavební jámy 252
8.3.3 Neustálené proudění . . . 257
8.3.3.1 Příklad simulace průsaku vody sypanou hrází . . 257
8.3.3.2 Příklad inverzní úlohy – stanovení parametrů prostředí při vsakovací zkoušce . . . 260

9 Konsolidace **263**
9.1 Základní rovnice . . . 263
9.1.1 Typy konečných prvků v programu Geo5 MKP . . . 267
9.2 Příklady . . . 268
9.2.1 Jednodimenzionální konsolidace . . . 268
9.2.2 Konsolidace v podmínkách rovinné deformace . . . 271
9.2.3 Zavedení kontaktních prvků do výpočtu . . . 275
9.2.4 Zavedení nosníků do výpočtu . . . 277
9.2.5 Nelineární konsolidace . . . 280
9.2.6 Příklad konsolidace zemního tělesa pod náspem . . . 286
9.2.6.1 Konsolidace v programu Geo5 Sedání . . . 290

Závěr **295**

Literatura **299**

Rejstřík **311**