

## SPIS TREŚCI

|                                                                                                                                            |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>WYKAZ PODSTAWOWYCH OZNACZEŃ .....</b>                                                                                                   | <b>9</b>  |
| <b>1. WSTĘP .....</b>                                                                                                                      | <b>15</b> |
| <b>2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU BADAWCZEGO .....</b>                                                                                          | <b>17</b> |
| <b>3. CELE I ZAKRES PRACY .....</b>                                                                                                        | <b>20</b> |
| <b>4. PRZEDMIOT PRACY .....</b>                                                                                                            | <b>23</b> |
| 4.1. Geometria, układy ścian, rozdział obciążeń .....                                                                                      | 23        |
| 4.2. Problematyka ścian usztywniających w ujęciu normowym .....                                                                            | 26        |
| 4.2.1. Eurokod 6 .....                                                                                                                     | 27        |
| 4.2.2. Polskie normy i przepisy poprzedzające Eurokod 6 .....                                                                              | 28        |
| 4.2.3. Inne normy projektowania obowiązujące w Europie .....                                                                               | 32        |
| 4.2.4. Normy i przepisy obowiązujące poza Europą .....                                                                                     | 33        |
| 4.3. Metodyka badań ścian ścinanych .....                                                                                                  | 39        |
| 4.4. Podsumowanie zagadnień dotyczących przedmiotu pracy .....                                                                             | 43        |
| <b>5. ANALIZA ZAGADNIEŃ ŚCINANIA I ZACHOWANIA MURÓW<br/>W ZŁOŻONYM STANIE NAPRĘŻEŃ ORAZ ZASADY<br/>MODELOWANIA NUMERYCZNEGO MURU .....</b> | <b>45</b> |
| 5.1. Wybrane zagadnienia dotyczące niezbrojonych ścian<br>poddanych ścinaniu .....                                                         | 45        |
| 5.2. Modele zniszczenia ścian niezbrojonych – podsumowanie .....                                                                           | 49        |
| 5.3. Wybrane zagadnienia dotyczące zbrojonych ścian<br>poddanych ścinaniu .....                                                            | 49        |
| 5.3.1. Podsumowanie wyników badań ścian<br>zbrojonych bez otworów .....                                                                    | 50        |
| 5.3.2. Wybrane badania ścian zbrojonych z otworami .....                                                                                   | 54        |
| 5.3.3. Modele zniszczenia ścian zbrojonych – podsumowanie .....                                                                            | 66        |
| 5.3.4. Problematyka ścinania w ujęciu normowym .....                                                                                       | 67        |
| 5.4. Wnioski wynikające z analiz zagadnień dotyczących ścian ścinanych .....                                                               | 89        |
| 5.5. Wybrane zagadnienia dotyczące zachowania muru<br>w złożonym stanie naprężenia i zasady modelowania numerycznego .....                 | 91        |
| 5.5.1. Teoretyczne kryteria zniszczenia muru ścinanego<br>poziomo i pionowo .....                                                          | 93        |
| 5.5.2. Kryteria wytrzymałościowe muru niezbrojonego w złożonym<br>stanie naprężenia .....                                                  | 102       |
| 5.5.3. Kryteria implementowane do analiz numerycznych .....                                                                                | 108       |
| 5.5.4. Sposoby numerycznego modelowania konstrukcji murowych .....                                                                         | 128       |
| 5.6. Podsumowanie zagadnień dotyczących kryteriów zniszczenia<br>i modelowania numerycznego konstrukcji murowych .....                     | 131       |

## 6. WŁASNE BADANIA DOŚWIADCZALNE ŚCIAN

|                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>USZTYWIAJĄCYCH</b>                                                                                             | 133 |
| 6.1. Program badań właściwości materiałów                                                                         | 134 |
| 6.2. Program badań ścian                                                                                          | 135 |
| 6.3. Ścienne modele badawcze                                                                                      | 139 |
| 6.4. Stanowisko badawcze do badań ścian ścinanych poziomo                                                         | 149 |
| 6.5. Technika badań ścian                                                                                         | 151 |
| 6.6. Wyniki badań towarzyszących murów                                                                            | 158 |
| 6.6.1. Wytrzymałość murów na ściskanie                                                                            | 158 |
| 6.6.2. Początkowa wytrzymałość na ścinanie murów i współczynniki tarcia w spoinach wspornych i spoinach czołowych | 161 |
| 6.6.3. Badania modułu odkształcenia postaciowego muru                                                             | 168 |
| 6.6.4. Przyczepność zaprawy do elementów murowych przy osiowym rozciąganiu                                        | 172 |
| 6.7. Wyniki badań komponentów składowych murów                                                                    | 174 |
| 6.7.1. Badania zapraw                                                                                             | 175 |
| 6.7.2. Badania elementów murowych                                                                                 | 178 |
| 6.7.3. Badania materiału elementów murowych oraz całych elementów murowych w trójosiowym stanie naprężeń          | 181 |
| 6.7.4. Badania energii pęknięcia elementów murowych                                                               | 190 |
| 6.7.5. Badania właściwości zbrojenia do murów                                                                     | 193 |
| 6.8. Wyniki badań części podstawowej                                                                              | 195 |
| 6.8.1. Ściany z silikatowych elementów murowych                                                                   | 195 |
| 6.8.2. Podsumowanie wyników badań ścian z silikatowych elementów murowych                                         | 210 |
| 6.8.3. Ściany z elementów murowych z autoklawizowanego betonu komórkowego                                         | 213 |
| 6.8.4. Podsumowanie wyników badań ścian z elementów murowych z autoklawizowanego betonu komórkowego               | 233 |
| 6.9. Wyniki badań części zasadniczej                                                                              | 236 |
| 6.9.1. Ściany z otworami z silikatowych elementów murowych                                                        | 236 |
| 6.9.2. Podsumowanie wyników badań ścian z otworami z silikatowych elementów murowych                              | 260 |
| 6.9.3. Ściany z otworami z elementów murowych z autoklawizowanego betonu komórkowego                              | 265 |
| 6.9.4. Podsumowanie wyników badań ścian z otworami z elementów murowych z autoklawizowanego betonu komórkowego    | 292 |
| <b>7. MODELOWANIE ŚCIAN USZTYWIAJĄCYCH</b>                                                                        | 297 |
| 7.1. Numeryczny model MES                                                                                         | 297 |
| 7.1.1. Strategia modelowania                                                                                      | 297 |
| 7.1.2. Przyjęte modele materiałowe elementów murowych                                                             | 299 |
| 7.1.3. Elementy kontaktowe                                                                                        | 329 |
| 7.1.4. Stalowe zbrojenie                                                                                          | 335 |
| 7.1.5. Wyniki obliczeń numerycznych modeli – etap I                                                               | 337 |
| 7.1.6. Wyniki obliczeń numerycznych modeli – etap II                                                              | 343 |
| 7.1.7. Wyniki obliczeń numerycznych modeli – etap III                                                             | 347 |

|                                                                                                         |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.1.8. Niezbrojone ściany .....                                                                         | 349        |
| 7.1.9. Ściany ze zbrojeniem stalowym .....                                                              | 365        |
| 7.1.10. Podsumowanie i wnioski wynikające z numerycznych<br>obliczeń MES .....                          | 373        |
| 7.2. Analityczny model ściany bez otworów .....                                                         | 374        |
| 7.2.1. Kryterium wytrzymałościowe .....                                                                 | 374        |
| 7.2.2. Założenia modelu ściany ścinanej .....                                                           | 401        |
| 7.2.3. Siły inicjujące zarysowania i siły rysujące w fazie sprężystej<br>i fazie quasi-sprężystej ..... | 415        |
| 7.2.4. Sztywności ścian w fazie sprężystej i fazie quasi-sprężystej .....                               | 422        |
| 7.2.5. Siła niszcząca w fazie postsprężystej .....                                                      | 427        |
| 7.2.6. Sztywności ścian w fazie postsprężystej .....                                                    | 429        |
| 7.2.7. Wyniki obliczeń sił rysujących i niszczących .....                                               | 432        |
| 7.2.8. Wyniki obliczeń kątów odkształcenia postaciowego<br>i kątów deformacji postaciowej .....         | 435        |
| 7.2.9. Podsumowanie wyników obliczeń ścian bez otworów<br>według analitycznego modelu ściany .....      | 439        |
| 7.3. Analityczny model ściany z otworami .....                                                          | 440        |
| 7.3.1. Założenia modelu .....                                                                           | 442        |
| 7.3.2. Siły inicjujące zarysowania i siły rysujące w fazie sprężystej<br>i fazie intersprężystej .....  | 443        |
| 7.3.3. Sztywności ścian w fazie sprężystej i fazie intersprężystej .....                                | 447        |
| 7.3.4. Siła rysująca i siła niszcząca w fazie quasi-sprężystej<br>i fazie postsprężystej .....          | 458        |
| 7.3.5. Sztywności ścian w fazie quasi-sprężystej i fazie<br>postsprężystej .....                        | 461        |
| 7.3.6. Wyniki obliczeń sił inicjujących zarysowania .....                                               | 464        |
| 7.3.7. Wyniki obliczeń sił rysujących i niszczących .....                                               | 466        |
| 7.3.8. Wyniki obliczeń kątów odkształcenia postaciowego<br>i kątów deformacji postaciowej .....         | 472        |
| 7.3.9. Podsumowanie wyników obliczeń ścian z otworami<br>według analitycznego modelu ściany .....       | 476        |
| <b>8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI .....</b>                                                                  | <b>478</b> |
| 8.1. Podsumowanie .....                                                                                 | 478        |
| 8.2. Wnioski .....                                                                                      | 485        |
| 8.3. Kierunki dalszych prac .....                                                                       | 489        |
| <b>PIŚMIENICTWO .....</b>                                                                               | <b>491</b> |
| <b>Streszczenie .....</b>                                                                               | <b>514</b> |