

СУЧАСНІ УЯВЛЕННЯ ПРО СТРУКТУРНІ ЕЛЕМЕНТИ Й ПРИРОДУ СТРУКТУРНИХ ЗВ'ЯЗКІВ У ҐРУНТАХ

Характер поведінки ґрунту в основі будинків і споруд, природних і штучно створених схилів суттєво залежить від міцності й енергії структурних зв'язків, які існують між окремими структурними елементами ґрунту. Під *структурними елементами* розуміють тверді частки (елементарні мінеральні частки, зерна та їх асоціації), які формують скелет ґрунту та пори, які заповнені рухливими (рідкою та газовою) компонентами ґрунту.

Формування структурних зв'язків здійснюється на протязі геологічної історії існування ґрунтів, тому їх поділяють на первинні та вторинні. *Первинні зв'язки* між твердими частками виникають під час створення ґрунтів – гірських порід (остигання магми, перекристалізації при метаморфізмі, осадоконакопиченні тощо), *вторинні* – виникають в подальшому під впливом процесів вивітрювання, розчинення, ущільнення тощо.

Процеси виникнення структурних зв'язків є дуже складними. При взаємодії часток у залежності від відстані між ними можуть виникати як сили тяжіння, так і сили, що викликають відштовхування структурних елементів, причому сили такої самої природи в одному випадку можуть викликати відштовхування, а в іншому – тяжіння елементів.

Серед сил тяжіння виділяють:

- хімічні (ковалентні, іонні);
- фізичні й фізико-хімічні (молекулярні, електростатичні, іонно-електростатичні, магнітні та капілярні);
- механічні (зачеплення).

Структурні зв'язки хімічної природи є найбільш міцними серед існуючих у ґрунтах. Вони утворюються при щільному контакті окремих часток, що відбувається в процесі заповнення мінеральною речовиною пор ґрунту при цементації, під дією розплаву або високих температур і тиску. Ці зв'язки мають електромагнітний характер і виникають тільки при зближенні атомів на відстані яка дорівнює сумі їх радіусів, що обумовлено взаємодією валентних електронів атомів (іонні й ковалентні зв'язки). Характерною особливістю хімічних зв'язків є висока енергія, що досягає 1200 кДж/моль, яка діє на невеликих відстанях (порядку 0,5-3,5 А; 1 А - *ангстрем дорівнює 10^{-10} м*).

У ґрунтах магматичного походження хімічні зв'язки виникають одночасно зі створенням самих мінеральних зерен під час застигання магми; у метаморфічних – при перекристалізації материнських порід; в осадових – у результаті випадіння солей з розчинів або осадження й старіння колоїдного кремнезему або гідроокису заліза.

Завдяки надзвичайно високій міцності ґрунтів з хімічними структурними зв'язками їх руйнування під навантаженням може відбуватися як по місцях контактів твердих часток, так і по самих частках.

Міцність всіх інших видів структурних зв'язків (фізичних, фізико-хімічних і механічних) завжди менше міцності самих твердих часток, які вони з'єднують, тому при руйнуванні під навантаженням ґрунтів з такими зв'язками відкол відбувається тільки по місцях контактів твердих часток, тобто по зв'язках.

Серед *структурних зв'язків фізичної та фізико-хімічної природи* виділяють молекулярні, іонно-електростатичні, магнітні і капілярні. Вони характерні для глинистих ґрунтів, торфу, ґрунтів рослинного шару, а також окремих різновидів крейди, мергелю, діатомітів та трепелу.

Молекулярні зв'язки (вони ще мають назву - сили Ван-дер-Ваальса) присутні в осадових незцементованих ґрунтах і виникають при взаємодії молекул, тому й відносяться до далекодіючих

- проявляються на відстанях до 300-400 нм (1 нм – *нанометр дорівнює 10^{-9} м*). За своєю природою молекулярні сили відносяться до сил електростатичного та електромагнітного характеру. В основному вони утворюються завдяки дії орієнтаційного

(коли обидві молекули, що взаємодіють, мають диполі), чи індукційного (коли одна з молекул є диполем) ефектів. Молекулярні сили можуть відігравати певну роль тільки на стадії формування осадка при утворенні тонкодисперсних ґрунтів.

Більш важливе значення мають іонно-електростатичні зв'язки, утворення яких здійснюється за рахунок електростатичного тяжіння негативно зарядженої поверхні глинистих часток розташованим між ними катіоном. Типовим прикладом є особливість будови кристалічної решітки глинистих мінералів групи гідролуд, в яких окремі структурні шари поєднуються за допомогою катіона калію, що знаходиться в міжшаровому просторі і забезпечує значну міцність структурних зв'язків цієї групи мінералів.

Іонно-електростатичні зв'язки є зв'язками середнього радіусу дії й проявляються на відстанях до 2-3 нм і менше.

При певних умовах взаємодії часток ґрунту, пов'язаних із тертям або їх розколюванням може спостерігатись ефект електризації часток, тобто накопичення на поверхні твердих часток при їх безпосередньому контакті електростатичних зарядів. Частки з різнойменними зарядами притягаються, з однойменними – відштовхуються, тобто відбувається їх кулонівська взаємодія. Цей ефект характерний, головним чином, для піщаних ґрунтів. Величина й знак заряду пов'язані з мінеральним складом зерен, їх розміром, тривалістю взаємодії зерен і ступенем зволоження ґрунту. Виявлено, що кварцові та біотитові частки завжди отримують негативний заряд, у той час, як кальцитові - позитивний. Таким чином, за рахунок утворення на різних частках різнойменних зарядів у ґрунтах можуть проявлятися сили тяжіння (електростатичні сили). Величина їх невелика і досягає 10^{-10} – 10^{-11} Н.

Магнітні зв'язки обумовлені присутністю на поверхні глинистих часток тонких плівок (0,05–0,5 мкм; *1 мкм – мікрометр дорівнює 10^{-3} мм*) із тонкодисперсних феромагнітних мінералів (типу магнетиту, гематиту, ільменіту тощо), а також присутністю атомів заліза в кристалічній решітці окремих глинистих мінералів. Магнітні сили мають менші значення, ніж молекулярні, але діють на більших відстанях. Ці сили мають деяке значення лише на перших стадіях формування глинистих осадків за рахунок дії тяжіння між частками, що обумовлює коагуляцію глинистих часток.

Капілярні зв'язки виникають в дисперсних ґрунтах завдяки капілярного тиску, якій діє в місцях стику твердих часток на межі поділу води та повітря. Орієнтовно, для одиночного контакту при поверхневому натягу води $72,7 \times 10^{-5}$ Н/см, величина капілярного тиску може складати до $4-6 \times 10^{-7}$ Н).

Капілярні зв'язки є найбільш дієвими в зоні знаходження капілярної води кутів пор, яка створює внутрішній капілярний тиск по всьому об'єму вологого ґрунту. У результаті сухий сипкий пісок при його невеликому зволоженні набуває зв'язність й навіть набуває можливість утримувати невеликі вертикальні відкоси. При висушуванні або при інтенсивному зволоженні меніски й капілярний тиск зникають і пісок знов стає сипким.

Структурні зв'язки механічної природи характерні для крупноуламкових і піщаних ґрунтів. В основі цих зв'язків лежить зачеплення окремих часток ґрунтів, що викликано нерівностями поверхні. Сили, які виникають на контактах зачеплення, залежать від багатьох факторів - щільності, гранулометричного складу та ступеню обкатаності часток. Чим більше розмір, неоднорідність і кутастість твердих часток ґрунтів, тим більше сили зачеплення.

Сили відштовхування обумовлені іонно-електростатичним відштовхуванням подвійних електричних шарів, які мають однойменні заряди; відштовхуванням за рахунок тонких гідратних шарів, що утворюються на поверхні часток ґрунту за рахунок адсорбції молекул води, а також борновським відштовхуванням атомів твердих поверхонь на малих відстанях.

Іонно-електростатичне відштовхування між частками, яке обумовлене перекриттям однойменно заряджених часток починає проявлятися на значних відстанях (до 100 нм).

Величина цих сил залежить від електрокінетичного потенціалу часток і підвищується з його зростанням. Іонно-електростатичне відштовхування є одним з компонентів розклинюючого тиску в ґрунтах.

На малих відстанях (до 1,5-6 нм) значну роль у формуванні сил відштовхування вносять *тонкі гідратні шари*. Вони формуються з тонких шарів води (3-4 молекули), адсорбованих на поверхні твердих часток, мають чітку межу і за своїми властивостями сильно відрізняються від властивостей вільної води. При перекритті цих шарів на контактах відбувається руйнування особливої структури їх периферійних частин, внаслідок чого частина адсорбованої води переходить в об'ємну фазу, що призводить до зміни вільної енергії гідратного шару й виникнення розклинюючого тиску.

Молекулярні поверхневі сили, які діють в гідратних шарах являють собою другу компоненту розклинюючого тиску між гідратованими частками ґрунту.

Борновське відштовхування діє на відстанях близько 0,3 нм між поверхневими атомами ґрунтових часток. Сили відштовхування утворюються за рахунок перекриття електронних оболонок атомів, а також за рахунок електростатичного відштовхування самих ядер, що мають однойменні заряди. Енергія борновського відштовхування залежить від відстані між атомами і зменшується по мірі її зростання.

Ефект взаємодії сил тяжіння і відштовхування між частками ґрунту обумовлений балансом цих сил. У залежності від характеру ґрунту (дисперсний чи скельний) баланс сил буде залежати від взаємодій різних сил. Так, у *дисперсних ґрунтах* будуть взаємодіяти молекулярне та магнітне тяжіння й іонно-електростатичне відштовхування дифузних шарів глинистих часток. У *скельних ґрунтах* взаємодіють сили тяжіння хімічного характеру та сили борновського відштовхування атомів.

У *водонасичених глинистих ґрунтах* переважають далекодіючі сили молекулярного й магнітного тяжіння. При подальшому зближенні часток до відстані 10-100 нм починають переважати сили іонно-електростатичного відштовхування однойменно заряджених дифузних шарів, що обумовлене існуванням енергетичного бар'єра, який заважає зближенню часток (відстань його дії приблизно десятки нанометрів, що порівнюється з ефективною товщиною дифузного шару). На більш коротких відстанях (порядку 0,5 нм) молекулярні та іонно-електростатичні сили тяжіння починають переважати над розклинюючим тиском тонких гідратних шарів. Зближення часток на відстань 0,1-0,3 нм знов призводить до зміни сил тяжіння на борновське відштовхування.

Таким чином, внаслідок дії сил різної природи в залежності від відстані між окремими структурними елементами в ґрунтах переважають або сили тяжіння або сили відштовхування, що у свою чергу обумовлює характер деформаційної та міцностної поведінки ґрунтів.

Структурні зв'язки формуються не по всій поверхні окремих структурних елементів (мінеральних часток, зерен та їх асоціацій), що складають ґрунт, а в місцях їх найбільшого зближення - *контактах*. Контакти є найбільш слабкими зонами в ґрунтах - під дією зовнішнього навантаження вони руйнуються в першу чергу. Від характеру контактів, їх кількості залежить поведінка ґрунтів під навантаженням і при взаємодії з водою.

У ґрунтах розрізняють такі типи контактів:

- 1) фазові;
- 2) цементаційні;
- 3) коагуляційні;
- 4) перехідні;
- 5) зачеплення.

Фазові контакти (їх ще часто називають кристалізаційними) формуються завдяки хімічним зв'язкам на поверхні міцно стиснутих зерен, що складають ґрунт. Створенню таких контактів сприяють підвищення температур і тиску, а також застигання й кристалізація магматичного розплаву, що призводить до виникнення валентних зв'язків на контактній кристалічній поверхні зерен. Міцність таких контактів дуже висока (як правило, не нижче 10^{-6} - 10^{-5} Н). Ґрунти з фазовими контактами (магматичні, метаморфічні, частково - осадові

зцементовані) мають крихкий характер руйнування.

Цементацийні контакти за своєю природою наближаються до фазових контактів, але відрізняються участю у формуванні контактів нової фази - цементуючої речовини (наприклад, кремнезему, гіпсу, карбонатів, гідроксиду заліза тощо), яка виділяється з розчинів, що циркулюють у порожнинах ґрунту. Мінімальне значення міцності контактів цього типу дорівнює 10^{-6} Н. Ґрунти з переважанням цементацийних контактів (осадові зцементовані) характеризуються значною міцністю і крихким руйнуванням.

Характерною особливістю фазових і цементацийних контактів є їх незворотність по відношенню до води – ґрунти з такими контактами не втрачають міцність (або знижують її дуже мало) при зволоженні.

Коагуляційні контакти розвинуті, головним чином, у молодих і слабоущільнених дисперсних ґрунтах (глини, суглинки, торфи та діатоміти). Характерною їх відзнакою є наявність між частками тонкого прошарку зв'язної води, товщина якого залежить від фізико-хімічних факторів і змінюється від декількох до десятків нм. Коагуляційні контакти в залежності від товщини гідратного шару в зоні контакту можуть бути далекими (при взаємодії часток на значних відстанях - 70-100 нм) і близькими (при відстанях взаємодії часток порядку - 2-3 нм). У залежності від цього знаходиться і міцність коагуляційних контактів - міцність дальнього одиничного контакту складає 10^{-12} – 10^{-11} Н, а ближнього – 10^{-10} – 10^{-9} Н.

Важливою особливістю коагуляційних контактів є зворотній характер їх руйнування – після руйнування вони швидко поновлюються.

Перехідні (точкові) контакти відрізняються тим, що безпосередня взаємодія структурних елементів виникає на невеликій за розмірами (точковій) площі. Ці контакти характерні, головним чином, для глинистих ґрунтів, що знаходяться в або в стані неповного водонасичення (сухі та маловологи) або витримали значне літогенетичне ущільнення.

Характерною особливістю перехідних контактів є їх зворотність по відношенню до дії води. При взаємодії з водою вони гідратуються і переходять у коагуляційні в умовах зняття зовнішнього тиску або при зволоженні ґрунту. Та навпаки, із підвищенням зовнішнього тиску й температури площа перехідних контактів поступово підвищується і вони можуть перейти у фазові контакти, які є стійкими по відношенню до води. Ця обставина й обумовила назву цього типу контактів.

Ґрунти з перехідними контактами в сухому стані мають крихке руйнування, але при зволоженні набувають властивості пластичних різновидів глинистих ґрунтів при деформуванню. Міцність одиничного контакту перехідного типу змінюється в межах 10^{-8} – 10^{-6} Н.

Контакти зачеплення обумовлені механічним зачепленням мінеральних зерен у крупноуламкових і піщаних незцементованих ґрунтах, у яких структурна зв'язність відсутня. Важливий вплив на міцність контактів цього типу має форма й характер поверхні контактуючих зерен – вона зростає в ґрунтах, які представлені необкатаними зернами з жорсткою поверхнею.

Завдяки низькій міцності контактів зачеплення (вона коливається від 10^{-9} до 10^{-10} Н) та їх невеликої площі уламкові незв'язні ґрунти поведуть себе в природних умовах як типові сипкі тіла.

Як правило, між структурними елементами в ґрунтах одночасно діють різні типи контактів (може бути й два й навіть три типа), що призводить до широкої різноманітності в деформаційній поведінці ґрунтів і коливань величин їх міцнісних характеристик.