مدلسازي عددي رفتار غير خطي سدهاي خاكي در حين ساخت با در نظر گرفتن هسته بصورت نيمه اشباع

مقدمه:

بررسي رفتار سدهاي خاكي در حين ساخت از مسايل مهمي است كه تاكنون كمتر مورد توجه قرار گرفته است. نحوه ساخت مرحله اي سدهاي خاكي بصورت مخلوط كردن خاك با رطوبت بهينه و كوبيدن لايه اي آن موجب مي‌شود كه هسته سد خاكي در حين ساخت كاملا اشباع نبوده و درجه اشباع آن بين ۸۰ تا ۹۵ درصد باشد. بررسي‌هاي انجام شده نشان مي‌دهد كه در اين درجات اشباع فاز هوا در خاك بصورت يك فاز پيوسته نبوده بلكه هوا بصورت حباب‌هايي در داخل فاز آب پراكنده است. بر اين اساس مي‌توان هسته سدهاي خاكي در حين ساخت را يك محيط متخلخل اشباع در نظر گرفت به نحوي كه سيال منفذي آن مخلوطي از آب و حباب‌هاي هوا مي‌باشد كه در نتيجه به شدت تراكم‌پذير است. استفاده از اين رويكرد در تحليل سدهاي خاكي كه "سيال معادل" (Equivalent Fluid) ناميده مي‌شود قادر است كه رفتار هسته غير اشباع سدهاي خاكي در حين ساخت را بخوبي مدلسازي كند.

در تحقيق حاضر نرم افزاري توسعه داده شده كه قادر است دو معادله ديفرانسيل با مشتقات جزيي "تعادل" و "پيوستگي سيال" را بطور همبسته و با در نظر گرفتن تراكم‌پذيري سيال منفذي بر اساس روش اجزاي متناهي (Finite Element) حل كند. اين نرم افزار قادر است كه رفتارهاي الاستيك خطي و غيرخطي (Hyperbolic) و الاستيك - پلاستيك كامل (Mohr-Coulomb) را درنظر بگيرد. پس از تحقيق صحت نتايج نرم افزار تهيه شده، رفتار چند سد خاكي در حين ساخت با استفاده از اين مدل مورد تجزيه و تحليل قرار گرفته كه نتايج حاصل از نرم افزار تهيه شده حاكي از تطابق خوب آنها با مقادير اندازه‌گيري شده در محل است.

مروري بر كارهاي انجام شده قبلي:

مدلسازي عددي بر هم كنش تغيير شكل فاز جامد و فشار منفذي در قالب مدلسازي پديده تحكيم در خاكهاي رسي اشباع، نخستين بار بر اساس تئوري تحكيم Biot (١٩٤٠) بوسيله Wilson & Sandhu در سال ١٩٦٩ ارايه شد. در سال ١٩٧٦، Lewis و همكاران مساله را با فرض مدل رفتاري هذلولي (Hyperbolic) براي خاك و قانون جريان غيرخطي براي سيال حل كردند. در سال ١٩٧٧، Wroth تحكيم سدهاي خاكي را با روش اجزاي متناهي تحليل كرد و اثرات غير اشباع بودن هسته را با تغيير در مقادير ضرايب فشار منفذي Skempton لحاظ كرد. Duncan & Chang (١٩٧٧) تحليل عددي رفتار سدهاي خاكي را با فرض خاك اشباع با سيال تراكم پذير و رفتار غيرخطي مصالح انجام دادند.

بر اساس رويكرد پيشنهادي (١٩٨٨) Alonso براي تبيين رفتار خاكهاي غير اشباع، (١٩٩٢) Gatmiri & Delage، (١٩٩٣) Gatmiri و (١٩٩٥) Nanda et. Al يك نرم افزار رايانه‌اي بنام UDAM را تهيه كردند كه جهت تحليل تنش - تغييرشكل سدهاي خاكي در حين ساخت مورد استفاده قرار مي‌گيرد.

مباني نظري حل مساله:

حل همبسته مساله كه لازمه تحليل دقيق رفتار سدهاي خاكي در حين ساخت مي‌باشد مشتمل بر حل دو معادله ديفرانسيل با مشتقات جزيي "تعادل" و "پيوستگي حركت سيال " در محيط خاكي است.

صورت كلي معادله ديفرانسيلي تعادل بصورت زير است:

$$\Delta\sigma_{ij.j} + \Delta F_i = 0$$

با استفاده از اصل تنش موثر بصورت تعميم يافته زير:

$$\Delta\sigma_{ij} = \Delta\sigma'_{ij} + \alpha\Delta P.\delta_{ij}$$

و معادله رفتاري بصورت:

$$\Delta\sigma_{ij} = D_{ijkl}\Delta\varepsilon_{kl}$$

و اعمال گسسته‌سازي (discretization) بر اساس فرمول‌بندي روش اجزاي متناهي فرم جبري ساده شده معادله تعادل بصورت زير در مي‌آيد:

$$[K_{11}]\{\Delta U^*\} + [K_{12}]\{\Delta P^*\} = \{F_1\}$$

در روابط فوق $\Delta\sigma_{ij}$ تانسور تنش كل، $\Delta\sigma'_{ij}$ تانسور تنش موثر، ΔF_i بردار نيروهاي خارجي، ΔP فشار منفذي، $D\varepsilon_{kl}$ تانسور كرنش‌ها، D_{ijkl} ماتريس رفتاري مصالح (الاستيك و الاستوپلاستيك)، α ضريب Biot، K_{11} ماتريس سختي، K_{12} ماتريس همبستگي، ΔU^* بردار تغيير مكان‌هاي گرهي، ΔP^* بردار فشارهاي منفذي در گره‌ها و F_1 بردار بارهاي خارجي هستند.
صورت كلي معادله ديفرانسيلي پيوستگي جريان در محيط متخلخل بصورت زير است:

$$\frac{\partial n\rho}{\partial t} + \nabla.(\rho V) = 0$$

با استفاده از قانون دارسي در مورد سرعت جريان در محيط متخلخل و گسسته سازي در مكان بر اساس فرمول‌بندي روش اجزاي متناهي و گسسته‌سازي در زمان با تقريب تفاضلي، فرم جبري معادله ديفرانسيلي بصورت زير در مي‌آيد:

$$][\Delta U^*\} + [K_{22}]\{\Delta P^*\} = \{F_2\}$$

در روابط فوق n پوكي خاك، ρ چگالي سيال، t زمان، V سرعت سيال و ∇ عملگر گراديان، K_{21} ماتريس همبستگي، K_{22} ماتريس نفوذپذيري و F_2 بردار فلاكس‌هاي جريان از مرزهاي محيط و ΔU^* و ΔP^* مشابه معادله

ΔP^*
بردار فشارهاي منفذي در گره ها هستند. چون فرم نهايي معادلات تعادل و پيوستگي جريان، هر دو بر حسب مجهولات يكساني نوشته شده اند بصورت همزمان در يك دستگاه معادلات قابل حل خواهند بود:

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta U^* \\ \Delta P^* \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix}$$

نرم افزار تهيه شده بر اساس فرمولاسيون فوق دستگاه معادلات همزمان را حل كرده و مقادير ΔU^* يعني تغيير مكان در جهتهاي x و y و ΔP^* يعني فشار منفذي در هر گره را محاسبه ميكند.

نحوه اعمال اثرات غيراشباع بودن هسته:
عمدتا دو رويكرد جهت تحليل رفتار خاكهاي غير اشباع وجود دارد. رويكرد اول كه توسط Fredlund (۱۹۹۳) توسعه يافت درنظر گرفتن خاك غير اشباع بصورت يك محيط سه فازي متشكل از دانه هاي جامد خاك، آب و هوا است. در اين رويكرد فشار سيال منفذي به دو صورت فشار آب منفذي P_w و فشار هواي منفذي P_a وجود دارد و اختلاف بين اين دو فشار "كشش سطحي" نام دارد. در تحليل رفتار خاكهاي غير اشباع بر اساس اين رويكرد دو مولفه تنش مستقل يعني $(\sigma - P_a)$ و (P_a-P_w) بكار برده ميشود. Alonso (۱۹۸۵) پيشنهاد كرد كه از "سطوح حالت" كه تغييرات درجه تخلخل e يا تغييرات درجه اشباع S را نسبت به دو مولفه تنش نشان ميدهند استفاده شود. در اين رويكرد محدوديتي از نظر درجه اشباع وجود ندارد.
رويكرد دوم در تحليل رفتار خاكهاي غير اشباع مختص سدهاي خاكي است. در اين سدها بعلت ساخت مرحله اي آنها خاك لايه لايه ريخته شده و پس از مخلوط شدن با رطوبت

(OMC) مخلوط شده و با غلتك كوبيده مي‌شود. گاهي براي پلاستيك شدن هسته رسي و جلوگيري از بروز شكاف هيدروليكي (Hydraulic Fracture) در هسته سد، رطوبت را چند درصد بيشتر از رطوبت بهينه درنظر مي‌گيرند. در برخي حالات نيز چون احتمال مي‌رود كه در اثر تراكم لايه‌هاي رسي با غلتك و اثر وزن لايه‌هاي فوقاني خاك كاملا اشباع شود و فشار منفذي در هسته سد در حين ساخت افزايش يابد، رطوبت را چند درصد كمتر از رطوبت بهينه در نظر مي‌گيرند. به هرحال هسته رسي معمولا كاملا اشباع نيست.

اما بر اساس مطالعات (۱۹۹۳) Fredlund & Rahardjo و همچنين (۱۹۹۵) Ehen & Yu درجه اشباع بالاتر از ۸۰ تا ۹۰ درصد است. در اين درجه اشباع پيكربندي سيستم سه فازي خاك غيراشباع شرايط ويژه‌اي پيدا مي‌كند. در درجه اشباع كمتر از ۸۰ درصد دو فاز سيال آب و هوا در داخل خلل و فرج خاك وجود دارند كه هر دو بصورت پيوسته (continuous) هستند. در درجات اشباع بالاتر از ۸۰ درصد فاز هوا تدريجا از حالت پيوسته خارج شده و بصورت حباب‌هاي هواي مجزا در داخل فاز سيال (occluded bubbles) در مي‌آيد.

در اين وضعيت مي‌توان فرض كرد كه خاك با يك سيال معادل (Equivalent Fluid) كه حباب‌هاي هوا در آن بصورت پراكنده وجود دارند اشباع شده است. مشخصات مكانيكي اين سيال معادل بعلت تراكم پذيري زياد آن (بعلت وجود حباب‌هاي هوا) با مشخصات مكانيكي سيال بدون حباب‌هاي هوا تفاوت اساسي دارد. با اين رويكرد مي‌توان بدون استفاده از تئوري‌هاي خاك غير اشباع و سطوح حالت، از اصل تنش موثر در خاك‌هاي اشباع استفاده كرد مشروط بر آنكه تراكم‌پذيري فاز سيال در تحليل تنش‌ها و تغيير شكل‌ها كاملا درنظر گرفته شود.

تراکم پذیري فازهوا:

$$C_a = \frac{1}{P_a}$$

تراکم پذیري فاز آب:

C_w تراکم پذیري مخلوط آب وهوا:

$$C_w = \frac{1}{V_w}.\frac{dV_w}{dP_w}$$

$$C_{aw} = S.C_w B_w + (1 - S + h.S)\frac{B_a}{P_a}$$

در این پژوهش از رابطه:

$$C_{aw} = (1 - S + h.s)\frac{P_{atm}}{P_{atm} + P_w)^2}$$

براي محاسبه تراکم پذیري سیال معادل استفاده شده است. در روابط فوق P_a فشار هوا، P_w فشار آب منفذي ، P_{atm} فشار اتمسفر، S درجه اشباع ، h ثابت هنري، V_w حجم فاز آب و B_a و B_w پارامترهاي فشار هوا و آب حفره‌اي براي بارگذاري ایزوتروپ مي‌باشند.

ویژگي‌هاي مدل رایانه‌اي تهیه شده:

مدل رایانهداي تهیه شده در این پژوهش که TDAM نامگذاري شده یك مدل دو بعدي است که به زبان FORTRAN نوشته شده است. این مدل قادر به تحلیل رفتار تنش-تغییرشکل سدهاي خاکي در حالت کرنش مسطح (Plane Strain) مي‌باشد. گسسته‌سازي فضایي در این مدل با استفاده از دو نوع المان ایزوپارامتریك چهار ضلعي، چهارگرهي و چهارضلعي هشت گرهي صورت مي‌گیرد. با استفاده از این مدل تغییر مکان‌ها در دو جهت x و y و همچنین فشارهاي منفذي در گره هاي شبکه قابل محاسبه خواهد بود. تنشها و کرنشها در محل نقاط انتگرال‌گیري عددي (Gauss Points) تعیین مي‌شوند. مراحل

TDAM فرموله شده اند عبارتند از:

- مدل الاستيك خطي
- مدل الاستيك غيرخطي (هذلولي Hyperbolic)
- مدل الاستوپلاستيك كامل (موهر كلمب Mohr-Coulomb)

همچنين اعمال تنشهاي اوليه يا برجا (In-Situ Stresses) و فشارهاي منفذي اوليه در اين نرم افزار امكانپذير است.

اين برنامه پديده تحكيم سدهاي خاكي در حين ساخت و تغيير فشارهاي منفذي در هسته را با حل همزمان معادلات تعادل و پيوستگي جريان، شبيه‌سازي كرده و تنشها، كرنشها، جابجاييها و فشار حفره‌اي را در طول فرايند تحكيم محاسبه ميكند. به بيان ديگر مساله زمانمند تحكيم در خلال بارگذاري ناشي از ساخت مرحله‌اي توسط برنامه قابل تحليل است. همچنين در اين برنامه ميتوان از سيال با ضريب تراكم‌پذيري ثابت و يا متغير استفاده كرد. در حالت سيال با تراكم‌پذيري متغير، ضريب تراكم‌پذيري سيال در هر گام زماني بر اساس روابط ارايه شده محاسبه و در گام بعدي محاسباتي از آن استفاده ميشود.

ارزيابي برنامه رايانه‌اي تهيه شده و نتايج حاصل از آن:

جهت ارزيابي صحت نتايج نرم افزار تهيه شده نمونه‌هاي مختلفي با اين نرم افزار تحليل شد و نتايج حاصله با نتايج حل رياضي (Closed Form) يا نمونه‌هاي حل شده با ساير نرم افزارها مقايسه گرديد. در اينجا كاربرد نرم افزار در تحليل رفتار دو سد خاكي مورد بررسي قرار ميگيرد.

۱) نمونه اول: تحليل سد La Ganne

در اين نمونه سد La Ganne كه در سال ۱۹۹۲ در جنوب غربي فرانسه ساخته شده با استفاده از نرم افزار TDAM تحليل شده است. سد از مصالح رسي روي بستر

مدول ارتجاعي:

$$E = 350 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

ضريب پواسون:

$\nu = ۰/۳$

زاويه اصطكاك داخلي:

$$\phi = 26^0$$

چسبندگي:

$$E = 2 \frac{ton}{m^2}$$

وزن مخصوص مرطوب خاك:

$$\gamma = 2 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$$

ضريب نفوذپذيري:

$$K_0 = 3.4 \times 10^{-9} \frac{\text{m}}{\text{sec}}$$

پوكي اوليه:

n=0.38 درجه اشباع:

$S_r = 0.9$

ضريب تراكم‌پذيري اوليه سيال در اين نمونه $0.0103\ \text{ton}^{-1}$ درنظر گرفته شده است.
در شكل (۲) تغييرات فشار آب حفره‌اي در گره ۱ در طول زمان رسم شده است. در اين شكل نتايج حاصل از تحليل با نرم‌افزار TDAM (با فرض تراكم‌پذيري ثابت و متغير) همراه با مقادير فشار منفذي اندازه‌گيري

۲) نمونه دوم: تحليل هسته رسي در سد كرخه

در اين قسمت كارايي نرم افزار TDAM در تحليل هسته رسي سد كرخه مورد ارزيابي قرار گرفته است. هندسه مقطع عرضي سد و شبكه‌بندي اجزاي متناهي آن در شكل (۳) نشان داده شده است. جداول پيشرفت عمليات سد كرخه نشان مي‌دهد كه تقريبا هر ۱۰ متر از سد در مدت ۱۰۰ روز اجرا شده است. بنابراين سرعت عمليات اجرايي سد بطور متوسط ۰/۱ متر در روز در نظر گرفته شده است. ويژگي‌هاي مصالح هسته سد كه در تحليل عددي مورد استفاده قرار گرفته است بشرح زير است:

مدول ارتجاعي:

ضريب پواسون: $E = 3\times10^{-6}\ \frac{ton}{m2}$

ν = ۰/۳

زاويه اصطكاك داخلي:

$\phi' = 20^0$

چسبندگي:

$C' = 2100\frac{kg}{m^2}$

درجه اشباع:

$S = 80\%$

نفوذپذيري خاك:

پوكي اوليه: $K = 10^{-9}\ \frac{m}{sec}$

n=0.36

وزن مخصوص خاك:

$\gamma = 1980\frac{kg}{m^3}$

در شكل (٤) نتايج حاصل از تحليل با فرض سيال با تراكم‌پذيري ثابت و متغير در مقايسه با مقادير فشار حفره‌اي اندازه‌گيري شده بوسيله پيزومترهاي SP كه در پايين‌ترين رقوم هسته سد (گره ١) نصب شده آورده شده است.

با توجه به شكل (٤) ملاحظه مي‌شود تا ارتفاع ٥٥ متري سد مقادير فشار آب حفره‌اي اندازه‌گيري شده بيشتر از مقادير بدست آمده از تحليل با سيال با تراكم‌پذيري متغير بوده و تقريبا منطبق بر مقادير حاصل از تحليل با سيال با تراكم‌پذيري ثابت است. با افزايش ارتفاع هسته سد مقادير ثبت شده بوسيله پيزومترها انطباق كاملي با نتايج بدست آمده از تحليل با سيال با تراكم‌پذيري متغير دارد.

تشكر و قدرداني:

بدين وسيله از معاونت پژوهش و مطالعات پايه شركت سهامي مديريت منابع آب

مراجع :

1. *Alonso, E., Battle, F., Gens, A., Lioret, A. (1988): "Consolidation Analysis of partially saturated soils, Application to Earth Dam Construction", Num. Methods in Geomechanics, Innsbruch, pp. 1303-1308.*
2. *Laigle, S., Poulin, D. and magnin, P. (1995): "Numerical Simulation of LaGanne dam behaviour by a three-phase Approach", proc. of Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris, vol.3, pp. 1101-1109.*
3. *Nanda, A., Delage, p. and Gatmiri, B. (1995): "Comparison of two FEM models for Unsaturated Consolidation of Embakment Dams during Construction", Proc. of conference on Unsaturated soils, Paris, vol.1, pp.1129-1134.*
4. *Lewis, R.W., Roberts, G.K. and Zienkiewicz, O.C. (1976): "A Nonlinear Flow and Deformation Analysis of Consolidation problems", 2nd Int. Conf. on Num. Methods in Geomech., Blacksburg, Virginia, vol.2, pp.1106-1118.*
5. *Chang, C.S. and Duncan, J.M. (1972): "Analysis of Consolidation of Earth and Rockfill Dams", Report No. TE-77-3, Dept. of Civil Engineering, University of California at Berkely.*

Stress-Deformation Analysis of Earth Dams During Construction Considering the Effects of Unsaturated Core

Analysis of the behaviour of earth dams during construction has become increasingly important. Construction sequence of earth dams which involves mixing the soil with optimum moisture renders the degree of saturation to a value between 80 to 95 percent. In these saturation degrees the air phase in the soil is not continuous and is scatterred in the water phase as occluded bubbles. In these situations the soil can be considered fully saturated with an equivalent compressible fluid. By this approach the need for considering unsaturated soil mechanics principles is eliminated and the classical concept of principle of effective stress in its generalized form applies.

In this research project a finite element program which solves two partial differential equations of "equilibrium" and "Continuity of fluid flow" in a fully coupled manner is developed based on the above mentioned concept. This software is capable of conducting a complete stress-deformation analysis of earth dams using different constitutive relations such as linear relastic, non-linear elastic as well as elasto-perfect plastic (Mohr-Coulomb) material models.

After the verification stage, the software has been applied to simulate the behaviour of a number of earth dams. The results obtained from the model show a very good agreement with measured values and recorded data in the field.