

電腦程式 SLOPE-ffdm 2.0 簡介

在國立成功大學土木工程學系黃景川教授之加勁土壤研究室於 2012 年所發展的以計算邊坡變位為基準之全新邊坡穩定分析法稱為 FFDM (Force-equilibrium-based Finite Displacement Method)。其發展動機是為了超越極限平衡分析法(Limit Equilibrium Method)邊坡安全係數過於粗略且無法評估邊坡之變位的限制。以 FFDM 為核心之第一代之電腦程式稱為 SLICE-DISP, 主要用於研究 FFDM 應用於地下水位變動產生之邊坡滑動與加勁邊坡在荷重下之變位等案例之驗證。SLOPE-ffdm 2.0 即為 SLICE-DISP 之進階版,具有方便的使用者介面整合可應用於邊坡穩定與整治之研究與設計分析。

FFDM 滿足極限平衡法中力平衡的原則, 並考慮邊坡土體切片之變位場與非線性剪力-變形構成式,發展出嶄新之邊坡滑動土體變位分析法,此方法超越了極限平衡法之種種限制, 但並不增加運算時間,因此可成為大地與土木工程師與研究者在邊坡相關研究設計方面有效率的分析工具。

FFDM 與計算非線性土壤性質之有限元素法(FEM)或分離元素法(DEM)相比,在所需計算時間、輸入參數的數量與校正輸入參數所需之人力與時間方面皆有極大優勢。因此 FFDM 可以成為土木與大地工程設計之有效工具。

近年來對於重要邊坡與擋土設施已逐漸採用變位為基準的設計分析。FFDM 之邊坡地震變位分析已經在 1995 日本神戶大地震中鐵路加勁路堤、1999 台灣集集大地震與振動台之模型邊坡試驗中,得到全面性的驗證。可以提供工程師與學術研究者有效率的分析工具。

FFDM 在降雨引發地下水位變動導致邊坡長期間歇性的變位問題方面,亦累積豐富之實用驗證案例。根據邊坡之變位反算(Back-calculate) 滑動面力學參數,不但可節省不必要的鑽探與取樣費用,其反算力學參數可用於將來邊坡之滑動變位之預測。對於邊坡生命週期中安全與維修為有效之分析工具。

FFDM 發展至今 13 年,除了上述之驗證案例外,SLOPE-ffdm 團隊亦致力於建立土壤之非線性強度參數、加勁材料在土體中抗拉拔 (Pull-out resistance) 行為之模式化與力學參數資料庫之建立。成為最新版程式 SLOPE-ffdm 2.0 之強力後盾。

被眾多邊坡研究者所關注之土壤(Peak) 與殘留(Residual) 強度對邊坡破壞之影響。SLOPE-ffdm 2.0 採用一經典之箕舌線 (Versoria or Witch of Agnesi) 模擬土壤自尖峰狀態到達殘留狀態間之剪力-變形行為。其有效性超越現存以線性或二次曲線為主之模擬方式,以箕舌線為核心之殘留強度理論已成為 SLOPE-ffdm 2.0 分析模組之一,其有效之 FFDM 分析已通過實例得到驗證。

為何採用 SLOPE-ffdm 2.0

1. 注重時間效益之分析：

SLOPE-ffdm 2.0 可以在極短時間（大致與傳統極限平衡法求得安全係數所需時間相近），以非線性理論求得邊坡在荷重、邊界條件或地下水位變化下之坡頂沉陷與邊坡滑動量。相較於考慮非線性材料性質之有限元素法(FEM), 採用 SLOPE-ffdm 2.0 分析之電腦時間效益十分顯著。

2. 自然與人造邊坡在移除坡腳、外加荷重或地下水位變化下之滑動位移計算：

SLOPE-ffdm 2.0 可預測各種之自然與工程行為變化所產生之邊坡穩定性與位移變化, 其分析所需之邊坡材料參數庫亦已完整建立。

3. 求得地震變位反應曲線(Seismic displacement response curve):

SLOPE-ffdm 2.0 以變位為基準推算邊坡或擋土牆耐震能力, 可以將預估地表最大加速度直接輸入 SLOPE-ffdm 2.0 中, 計算該慣性力作用下邊坡之邊位量。這可以免去以極限平衡法邊坡穩定分析中必須依靠經驗法則來評估水平地震係數（一般為地表最大加速度之 0.3- 0.5 倍）與土壤材料參數之過度倚賴經驗法則之窘境。

4. 根據變位基準之擋土牆型式比較分析：

對於加勁或不加勁之邊坡, SLOPE-ffdm 2.0 具備比較分析各種形式之擋土牆（重力式、疊砌塊石、疊砌蛇籠）之能力。不同形式擋土牆對於邊坡穩定之貢獻, 可量化顯示於坡頂變位與邊坡滑動量, 提供擋土牆系統選擇之參考。

5. 根據滑動行為之擋土面牆選用：

定量分析擋土牆之面牆形式與邊坡滑動量之關係為 SLOPE-ffdm 2.0 具備之特殊功能。採用可調整之面牆之內部與外部力學參數, 來充分模擬實際面牆之受力行為。

6. 邊坡變位參數之反算與邊位預測：

多數自然邊坡之滑動面發生在於岩石-土壤交界漸變區, 該區域之不擾動取樣成功率極低, 容易形成預算與資源的浪費。以 SLOPE-ffdm 2.0 進行邊坡變位之反分析, 可反算滑動面之變位相關力學參數, 進而預測將來邊坡可能的變位。

7. 多種破壞面搭配多種分析法之比較分析：

具備多種破壞面形式供比較分析, 包括: 圓弧、對數螺線、楔形、複合式破壞(圓弧與線段之組合)、任意指定破壞面等多種破壞形式供比較分析。SLOPE-ffdm 2.0 對於邊坡, 特別考量擋土牆對邊坡之穩定貢獻, 破壞分析結果可以分辨破壞形式為擋土牆上方之破壞、擋土牆體上之

破壞、或為通過牆體下方之破壞。在擋土牆型式之選用與牆體尺寸之最佳化探討方面提供獨到的見解。

8. 經過實驗與實例驗證之材料力學參數：

歷經日本神戶地震、台灣集集地震、振動台試驗及豪雨邊坡滑動之分析驗證，在使用 FFDM 於邊坡變位分析之材料參數資料庫已完整建立。

9. 錨定式邊坡穩定分析：

針對預應力地錨與鋼筋混凝土樑面系統加固的邊坡，SLOPE-ffdm 2.0 提出了三種分析方法，以評估地錨加強邊坡的潛在破壞機制。這種先進方法提供了以位移為基準之錨定邊坡穩定分析，提高邊坡穩定性與地錨構造適當性評估的準確性。

10. 以變位為基準之邊坡抗滑動樁分析：

邊坡抗滑動樁為變位敏感之邊坡－樁體互制結構物。傳統邊坡抗滑動樁設計是根據經驗之土壓力分佈假設，忽略樁體變位後樁體抵抗力之發展。以 SLOPE-ffdm 2.0 在邊坡與樁體變位諧和條件下，兼顧土壓力與樁體內部應力之發展，可成為一有效之分析工具。本分析模組將包含於下一版 SLOPE-ffdm.

SLOPE-ffdm 2.0 的實際應用

1. 預測邊坡位移與沉陷

- SLOPE-ffdm 2.0 能夠準確計算潛在的邊坡位移與沉陷，考量地質條件、地下水位變化、內外載重及地震影響。

2. 評估不同擋土構造的效能

- 基於位移分析，評估各種擋土面牆構造（如重力式擋土牆、模組化面牆結構、蛇籠式擋土結構）的穩定效能。

3. 估算已動員的加勁材應力

- 針對加勁擋土結構與錨定土坡，FFDM 估算已動員的加勁材應力，取代傳統極限平衡法分析中以經驗數據輸入的加勁材應力。

4. 加勁材料配置最佳化

- 確定最佳的加勁層數、位置與方向，達到加勁配置系統優化。

5. 探討錨固邊坡的關鍵破壞機制

- FFDM 詳細分析錨固邊坡的破壞機制，如地錨與鋼筋混凝土樑系統穩定性，幫助深入理解邊坡穩定控制因素。

6. 確定最佳地錨配置

- FFDM 根據精確的地錨與土體互制分析，優化地錨數量、鋼索長度、預應力強度及傾角，將地錨之穩定效能最大化。

7. 透過位移反應曲線評估抗震能力

- FFDM 生成的位移反應曲線可用於評估邊坡與擋土結構的抗震性能，增強地震防護規劃。

8. 反算地滑土塊的材料性質

- FFDM 可用於反算含解體岩塊材料的邊坡性質，提供防止未來可能滑坡災害的重要洞見。
- 此方法可避免在碎裂岩體邊坡中進行未擾動土壤採樣所面臨的技術挑戰