

2025年 高雄市水利技師公會年會

水利工程與土壤液化

成功大學 土木工程學系

陳景文 名譽教授

June 21, 2025 11:00-11:40
Kaohsiung, TAIWAN

報告內容

- 水利工程沿革
- 土壤液化沿革
- 土壤液化探討與研究
- 土壤液化災害
- 土壤液化土壤液化潛能評估
- 土壤液化防治方法
- 感恩與祝福

水利工程沿革

水利工程是土木工程中著重於水流體的自然運動與人工輸送及利用。

工程領域：河道、水庫、運河以及堤防等關於水流、江川及海堤，並與公共衛生，環境工程，水土保持工程和大地工程相關

Hydraulic engineering is a field of civil engineering that focuses on the design, analysis, and management of water-related systems.

It involves applying the principles of fluid mechanics to solve problems related to the collection, storage, control, transport, regulation, measurement, and use of water. This field is crucial for ensuring the efficient and safe use of water resources, including water supply, irrigation, flood control, and power generation.

中國水利史

周朝《[史記·河渠書](#)》中最早的記述：[秦王政](#)元年（246年）引[涇水](#)入[洛河](#)，故名[鄭國渠](#)，澆灌[關中](#)農田四萬餘頃。

[漢朝](#)致力於治理[黃河](#)。「[修渠築堤，自滎陽東至千乘海口千餘里](#)」，[元鼎](#)六年，[穿鑿六輔渠](#)。太始二年於[鄭國](#)渠之南方，穿渠引涇水，與鄭國渠統稱[鄭白渠](#)。

[西漢](#) [司馬遷](#)《[河渠書](#)》中記述了上自[大禹治水](#)，[商朝](#)[五次遷都](#)均為水患，其中又以[黃河](#)最為暴虐，很早就成了中國水利防治的重點。

[隋朝](#)開鑿[京杭大運河](#)。[隋煬帝](#)時陸續開鑿四條[運河](#)。[黃鞠](#)修隧道水利工程。

[明朝](#) [潘季馴](#)治理[黃河](#)。[黃河](#)善徙在於水漫沙壅。應築堤束水，借水刷沙。

明末清初，河道年久失修，災害連年，疊有黃河奪淮之事。康熙年間，獎勵墾荒屯田，重視興修水利，使得經濟得到恢復和發展。《清聖祖實錄》記載，康熙皇帝在親政之初，即以「朕自聽政以來，三藩及河務、漕運為三大事，曾書而懸之宮中柱上，夙夜廬念。」康熙帝六次南巡，均以巡視河工為首要。

康熙十六年（**1677年**）二月，帝敕諭安徽巡撫靳輔總督河道，靳輔「周度形勢，博採眾論，為八疏同日上之」。靳輔指出：「清口以下不浚築，則黃淮無歸，清口以上不鑿引河，則淮河不暢。高堰之決口不盡封塞，則淮分而刷黃不力，黃必內灌，而下流清水潭亦危。且黃河南岸不提，則高堰仍有隱憂，北岸不提，山以東必遭沖潰。故築堤岸，疏下流，塞決口，但有先後，無緩急。今不為一勞永逸之計，屢築屢圯，勢將何所底止。」並借用明代水利學家潘季馴「築堤束水，以水攻沙」的理論，治河取得了初步成效。



治河名臣靳輔和謀士陳潢，一同展開漫長的治水歷程。圖為清 王翬等作《康熙南巡圖卷》局部。
(公有領域)



康熙帝為更好地尋求治河方法，決定親自視察河工，首開南巡之舉。圖為清 王翬等作《康熙南巡圖卷》局部。（公有領域）

土壤液化沿革



土壤液化沿革

Allen Hazen 乃首位形容土壤液化現象的學者

1918 美國加州 Calaveras Dam 崩潰，其以如下文字形容堤壩之崩潰現象：

If the pressure of the water in the pores is great enough to carry all the load, it will have the effect of holding the particles apart and of producing a condition that is practically equivalent to that of [quicksand](#)...

The initial movement of some part of the material might result in accumulating pressure, first on one point, and then on another, successively, as the early points of concentration were [liquefied](#)...



Allen Hazen
(1869 –1930)

$$k = C(D_{10})^2$$

Arthur Casagrande 約在1930年代，在土壤力學文獻中首次用 **soil liquefaction** 名詞的學者。然而，其認為用 soil liquefaction 形容因地震或反覆載重引致孔隙水壓造成砂土沉陷變形現象並不適當。其強烈堅持 **soil liquefaction** 須用於容土壤呈現大變型如流動之現象。亦即 Casagrande 對 **soil liquefaction** 之認知，與吾人之認知，並非相同。



Arthur Casagrande
(1902 –1981)

當砂土層受反覆剪應力作用後，其液化發生之機制可分為兩大類

第一類為**初始液化 (Initial Liquefaction)**

- 初始液化此種現象主要發生於**飽和疏鬆砂土層**中，當土層受到突然之荷重或反覆動態荷重作用後，土壤之孔隙水在來不及排出的情況下，導致超額孔隙水壓的產生，**當激發之超額孔隙水壓等於土壤所承受圍壓時，即稱為初始液化**
- **此時土壤的有效應力降至零**，同時喪失其全部強度，而產生連續性的大量變形；當變形量達到完全破壞的程度後(**約20% Double Amplitude**)，此時**土壤已無任何抵抗變形能力**，即產生塑性流(Plastic Flow)

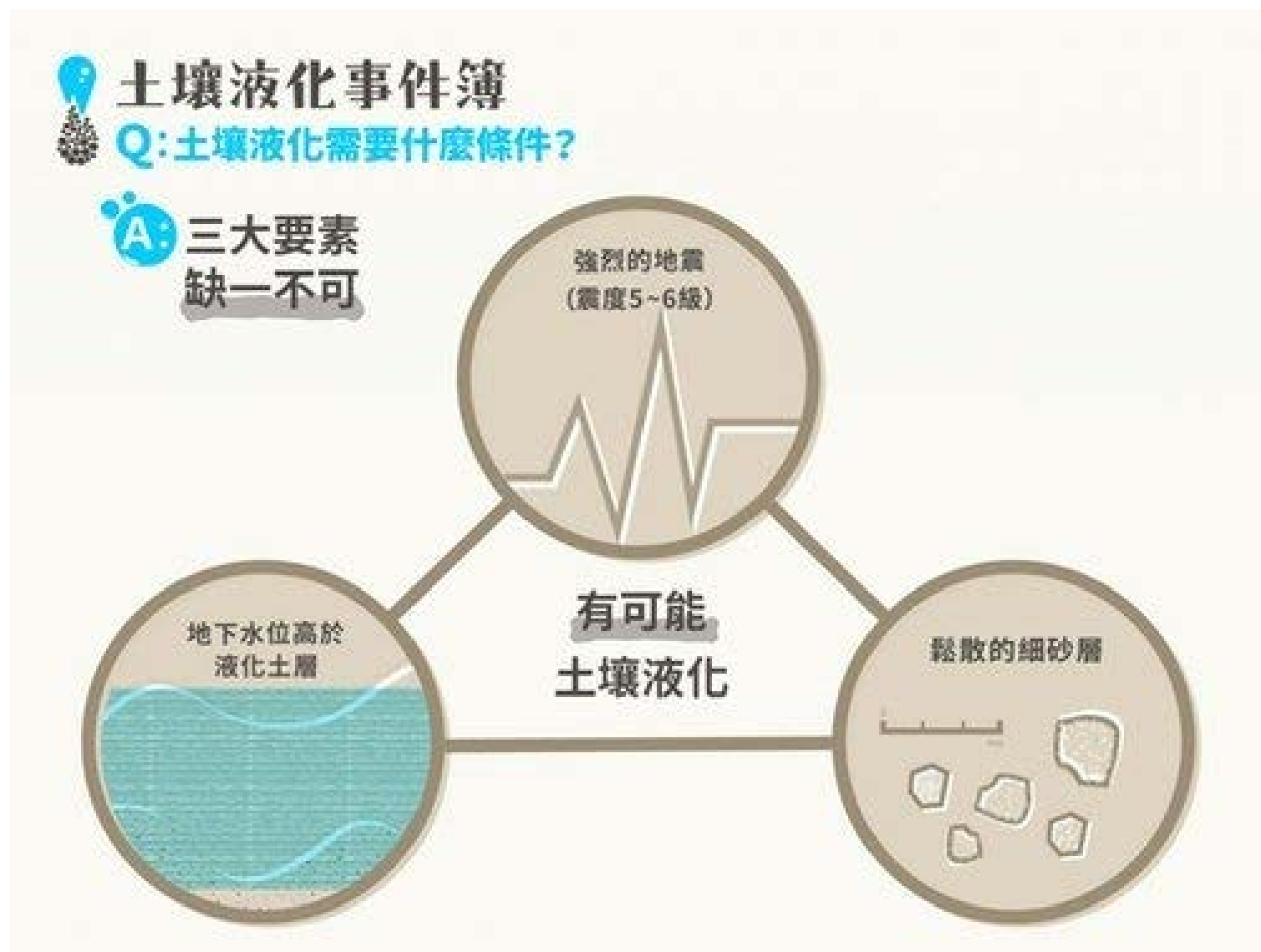
第二類為反覆流動變形(Cyclic Mobility)

- 反覆流動變形此種現象主要發生於此飽和中等緊密或緊密砂土層，當土層受到連續反覆荷重作用而達到初始液化時，土壤只產生少量的變形；同時繼續施加反覆荷重，當土體的變形只隨著持續的荷重而增加時，稱為有限制的應變 (Limited Strain)。
- 此乃因為緊密砂土受荷重作用後具有膨脹(Dilation)傾向，在不排水狀況下沉下會激發"負"的孔隙水壓而使有效應力增加，使得土壤更趨於穩定所引致。



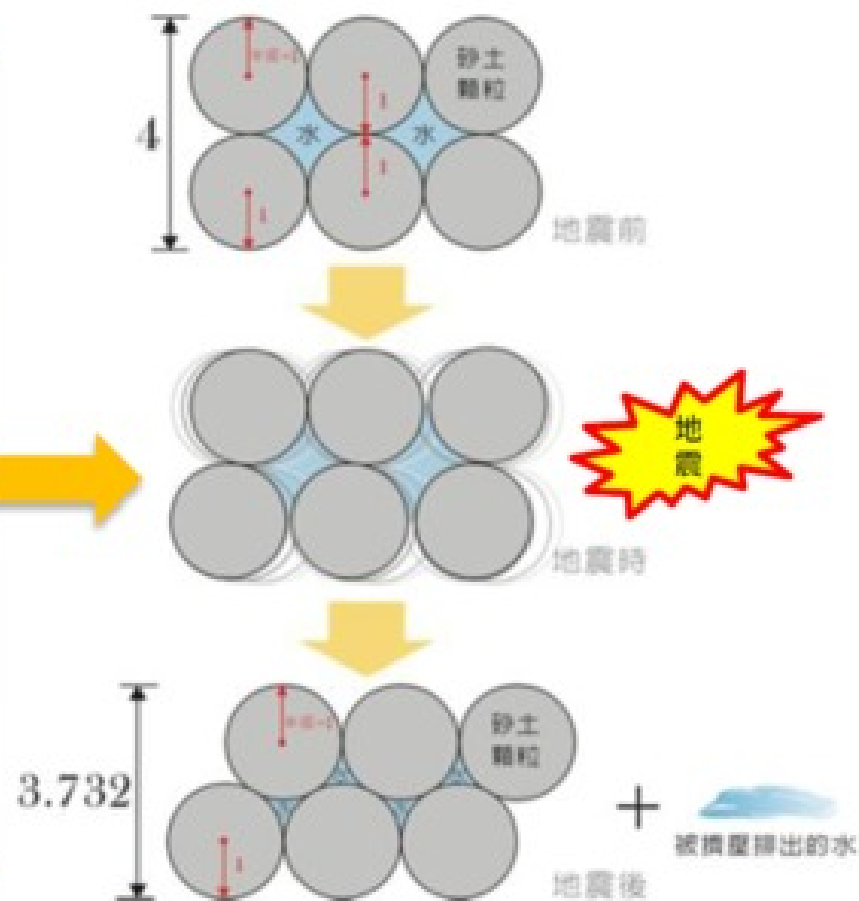
土壤力學之父
Karl Terzaghi
(1883-1963)

土壤液化條件



疏鬆砂土 + 地下水位高 + 強烈地震 → 液化

- ✓ 地震前地下砂土顆粒飽和含水、結構疏鬆，顆粒暫時維持穩定。
- ✓ 地震激烈搖動，使得砂土顆粒重新排列，地下水壓增高，砂土顆粒彼此間的結合力消失，土壤類似流砂而失去承載能力，引起房屋下陷、傾斜。
- ✓ 地震後液化的砂土向下沉降，形成比原來緊密和安定的結構。



土壤液化探討與研究

流砂 (Quicksand)



Quick clay



Turbidity currents

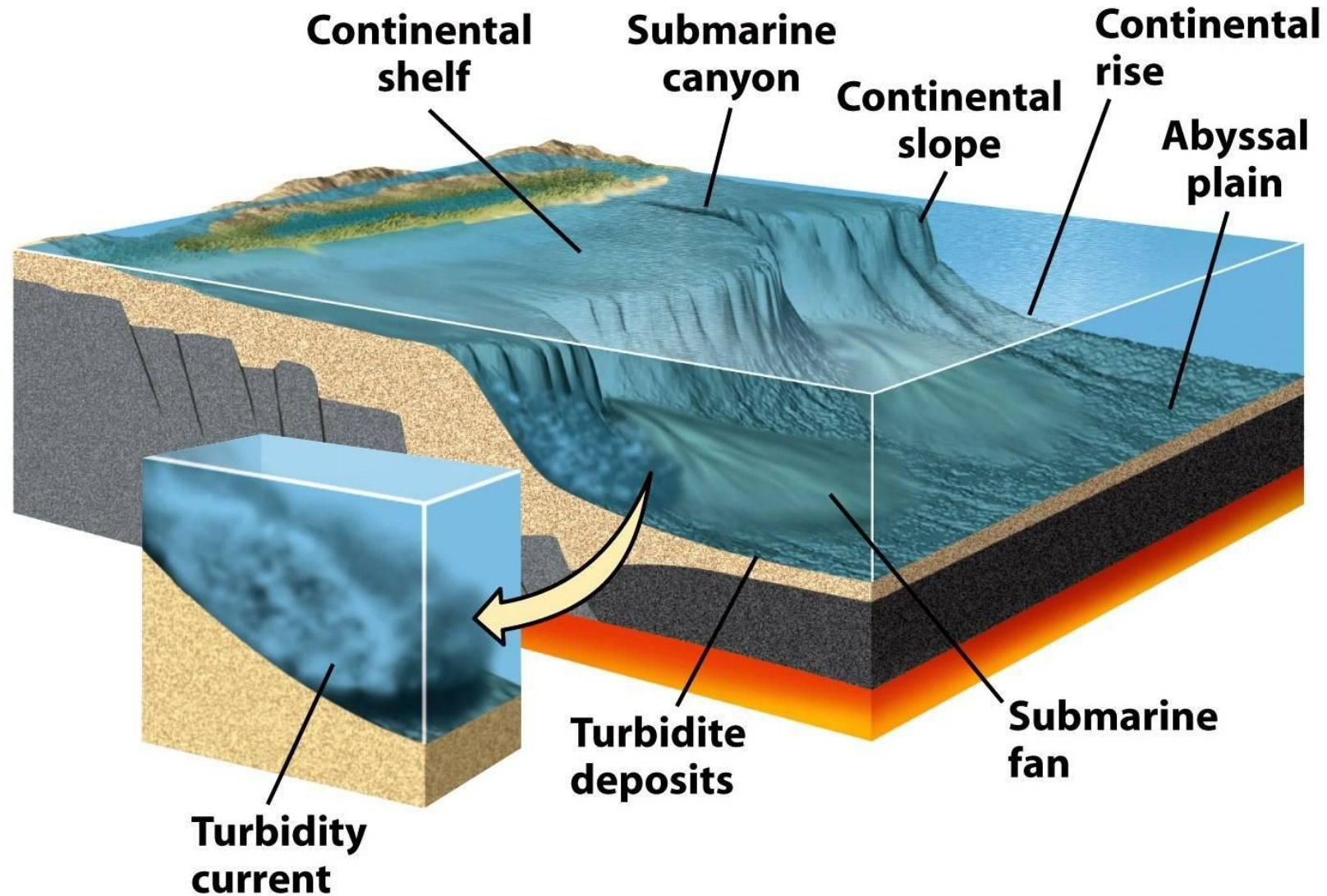


Figure 20.19a
Understanding Earth, Sixth Edition
© 2010 W. H. Freeman and Company

Earthquake liquefaction

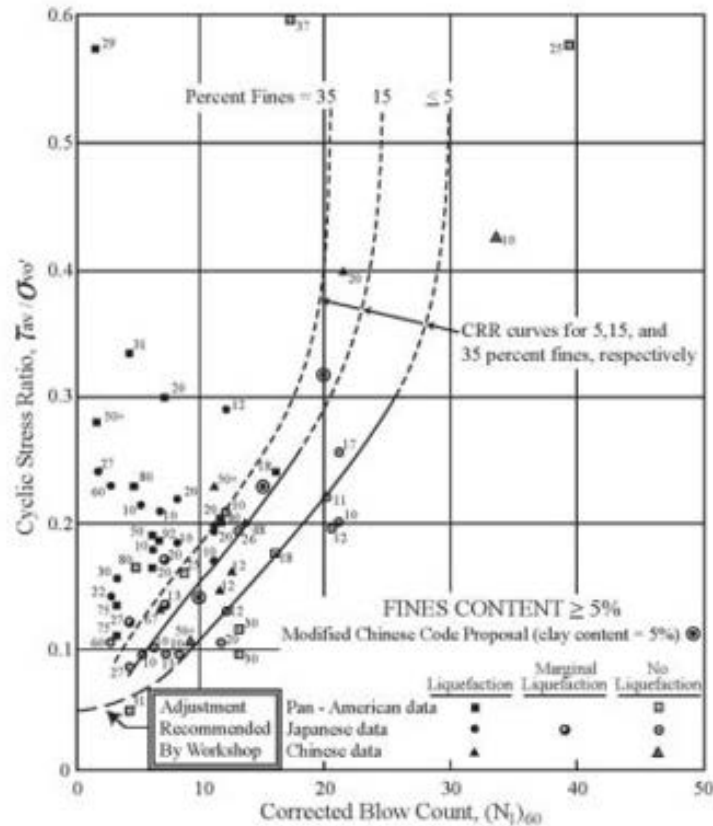


On March 27, 1964 at 5:36pm local time, a great earthquake of magnitude 9.2 occurred in the Prince William Sound region of Alaska.



University of California - Berkeley

Liquefaction – SPT Analysis



HAYWARD
BAKER
Geotechnical Engineers



Harry Bolton Seed
(1922 -1989)

The **1964 Niigata earthquake** 13:01 local time on 16 June, a magnitude of 7.5 or 7.6. The [earthquake](#) caused [soil liquefaction](#) over large parts of the city.



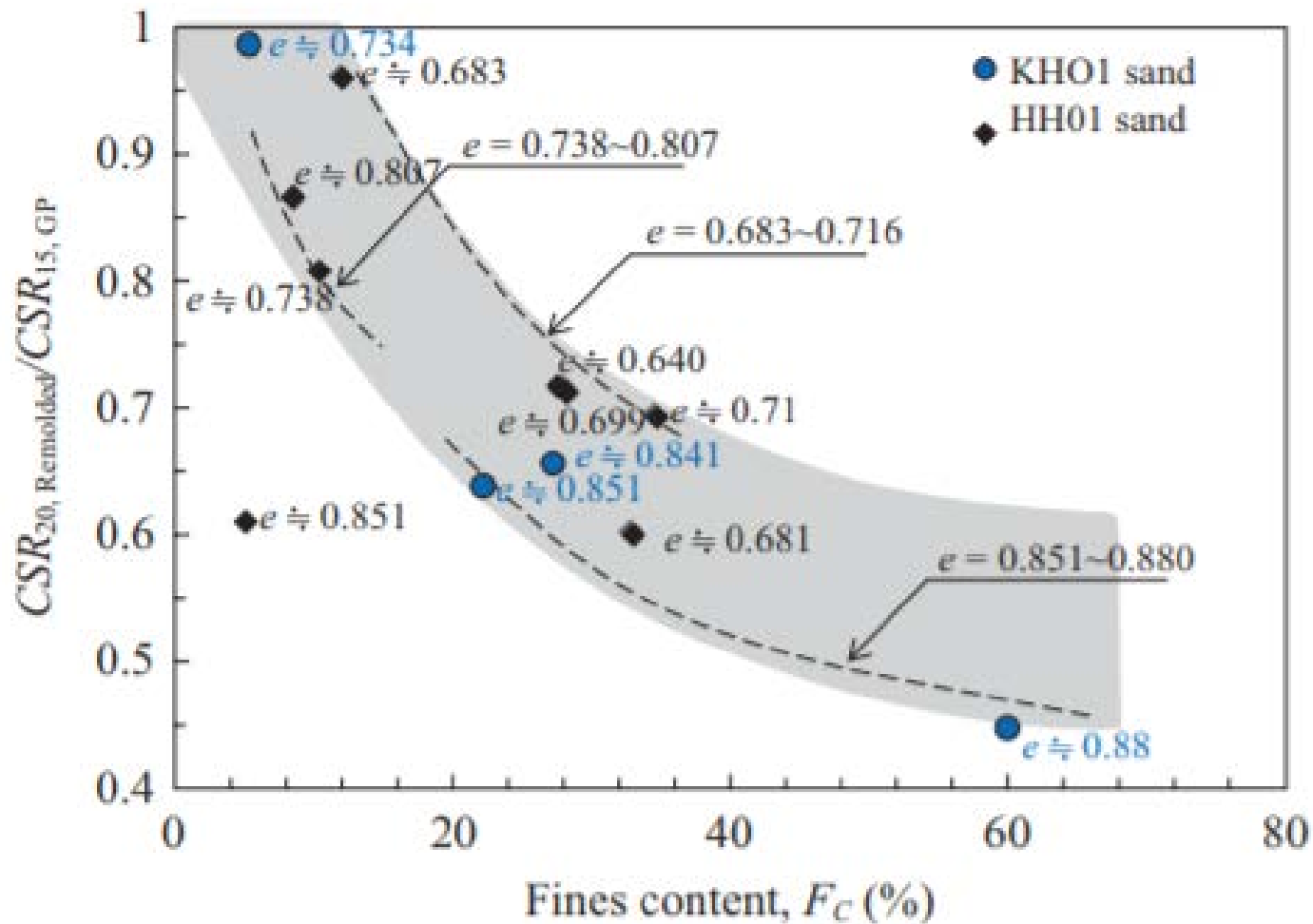


Fig. 16. Summary of fines content influence and disturbance effects on cyclic stress ratio of non-plastic silty sand.



Kenji Ishihara
(1934-)

土壤液化災害

土壤液化災情-建物嚴重下陷



建物沉陷及傾斜。

土壤液化災情-排水溝渠崩壞



土壤液化災情-地板噴砂



地面破裂與噴砂

土壤液化災情-田野噴砂



土壤液化災情-田野噴砂



土壤液化災情-河岸滑落



土壤液化災情-生物遭殃



地震時蛇也喪命

蛇窩堵塞，無家可歸，凍斃





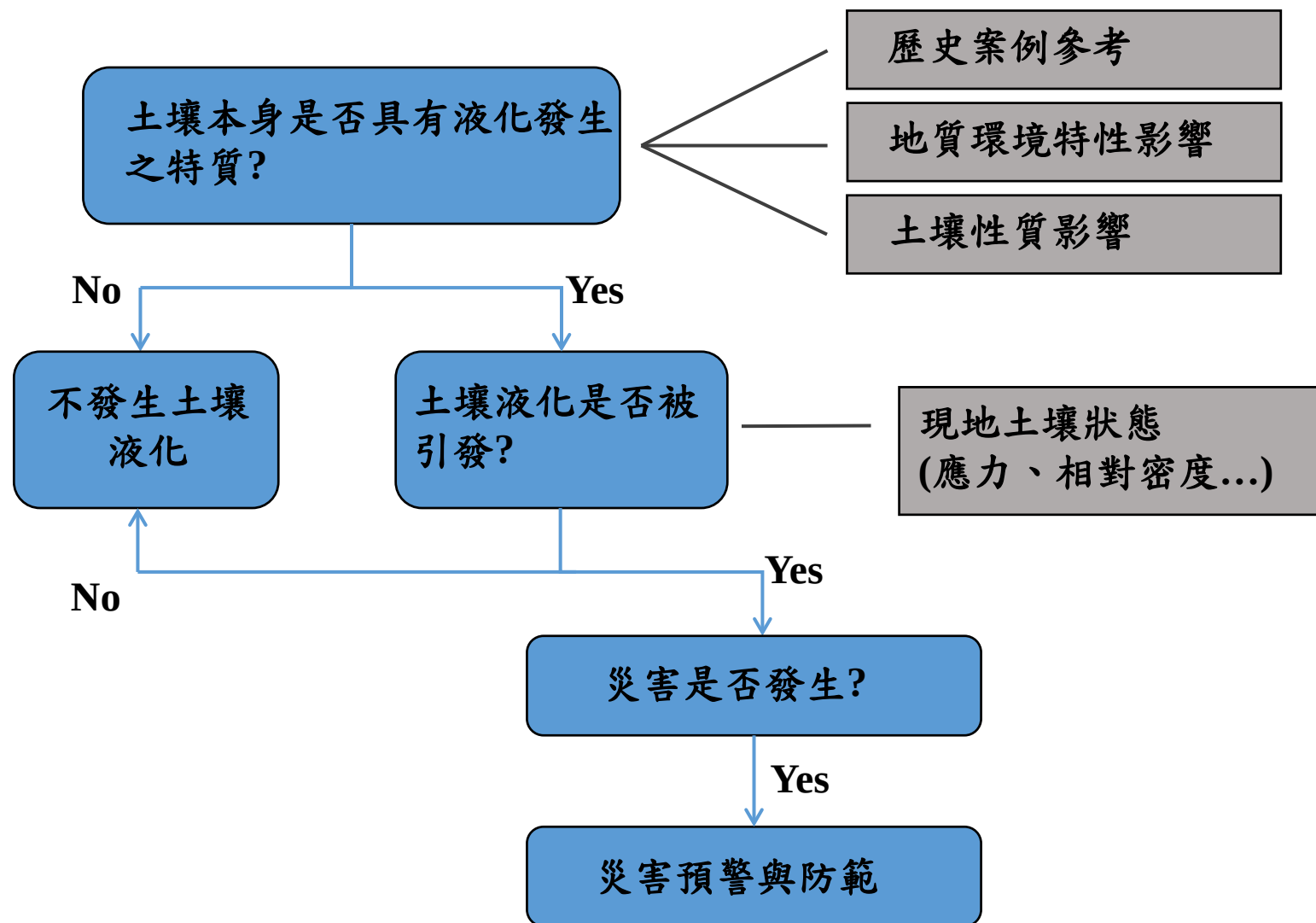
散裝沙石：貨輪沉沒的隱性殺手

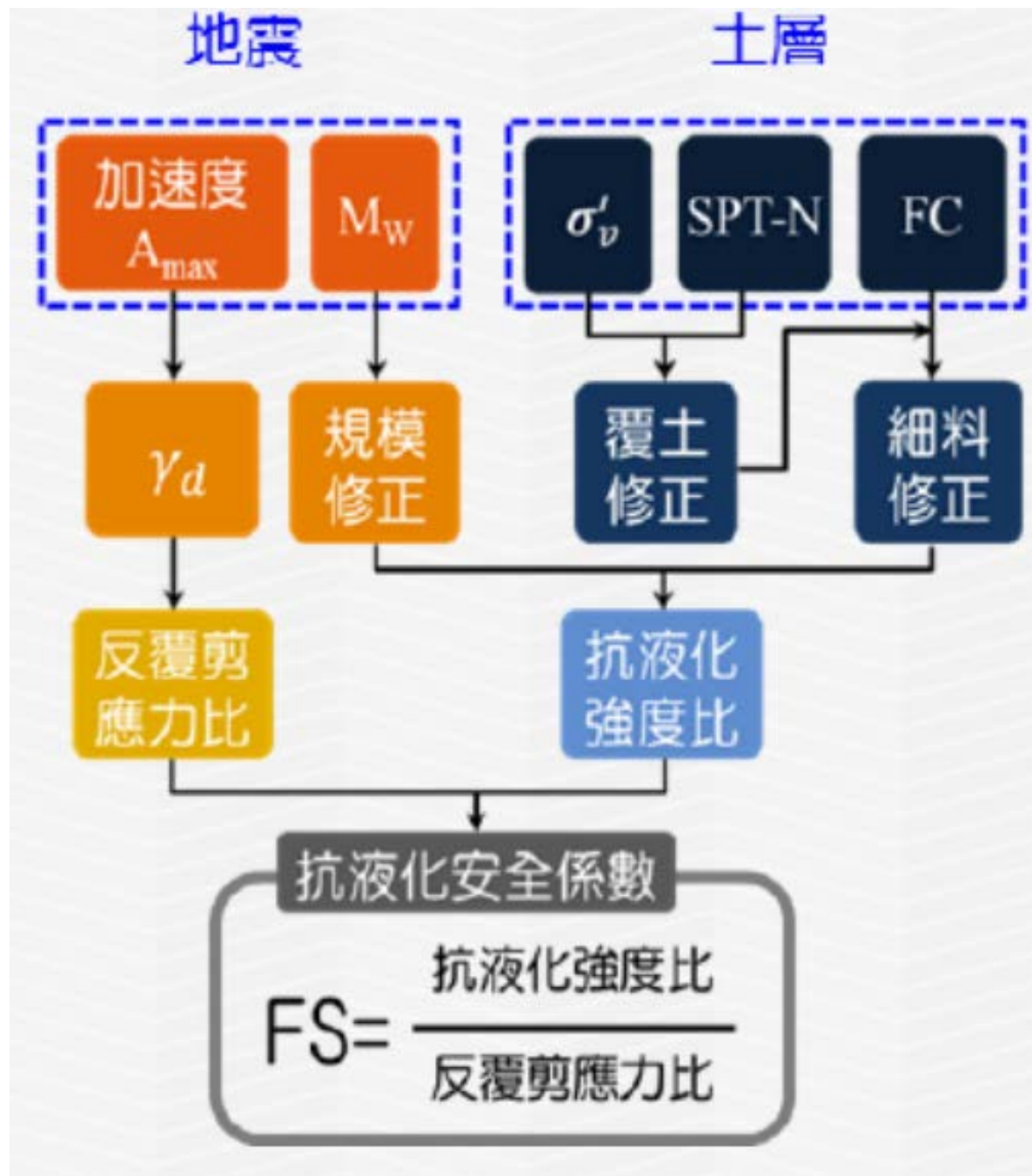


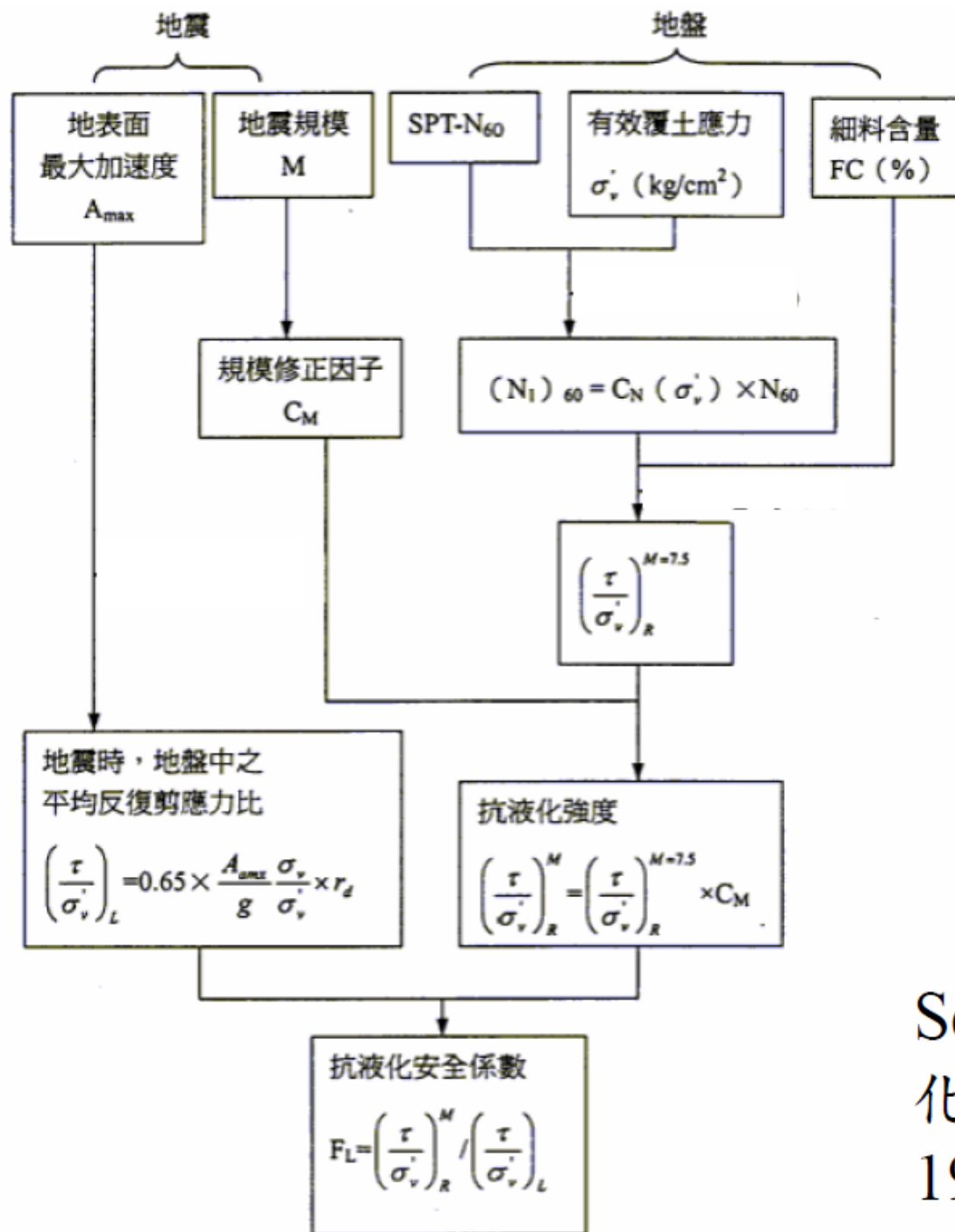
散裝砂石貨輪，因波浪搖晃，砂石忽由固態變成液態，砂石全流至船側，貨輪瞬間毀滅性翻覆！

土壤液化潛能評估

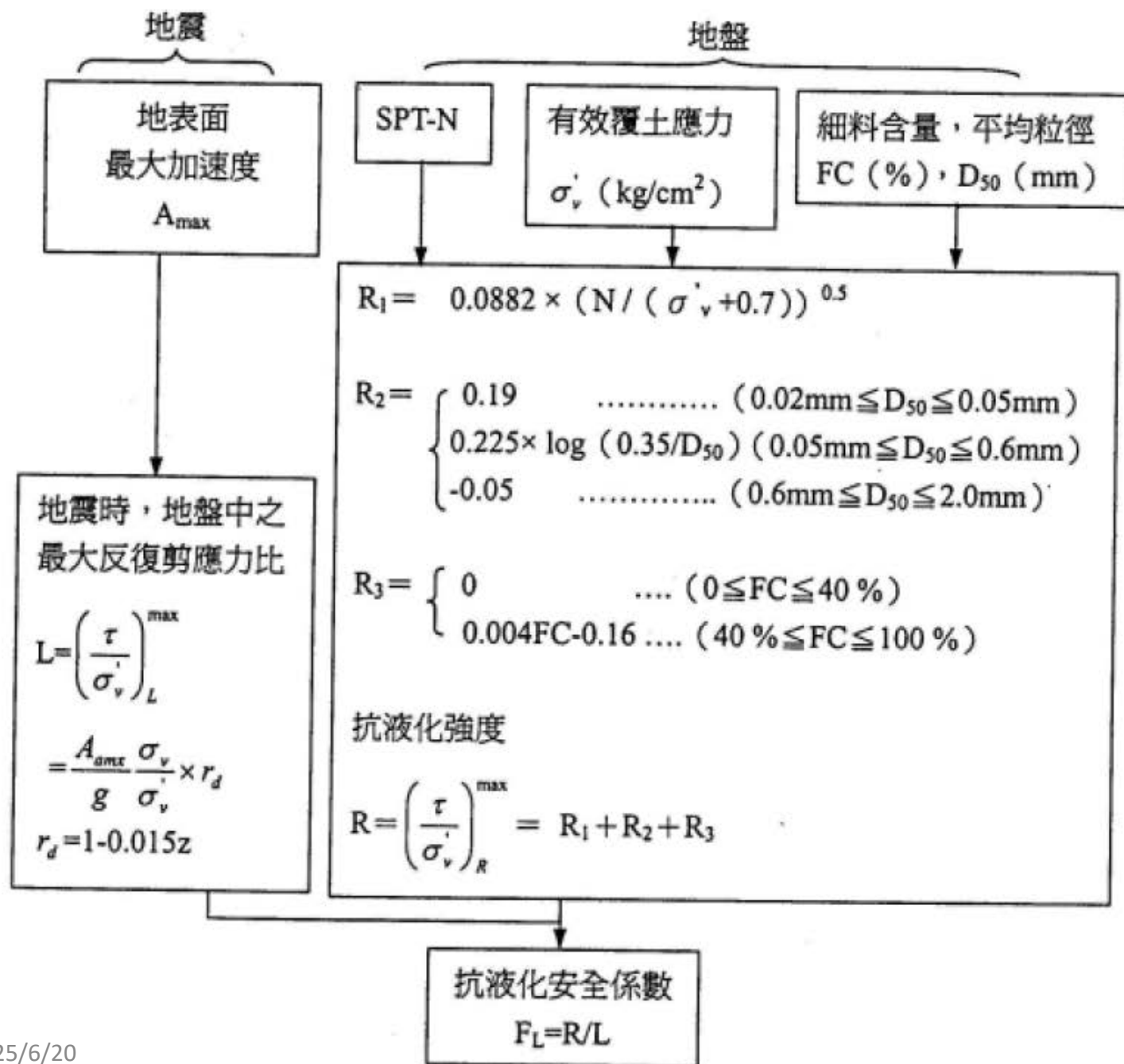
液化災害評估流程



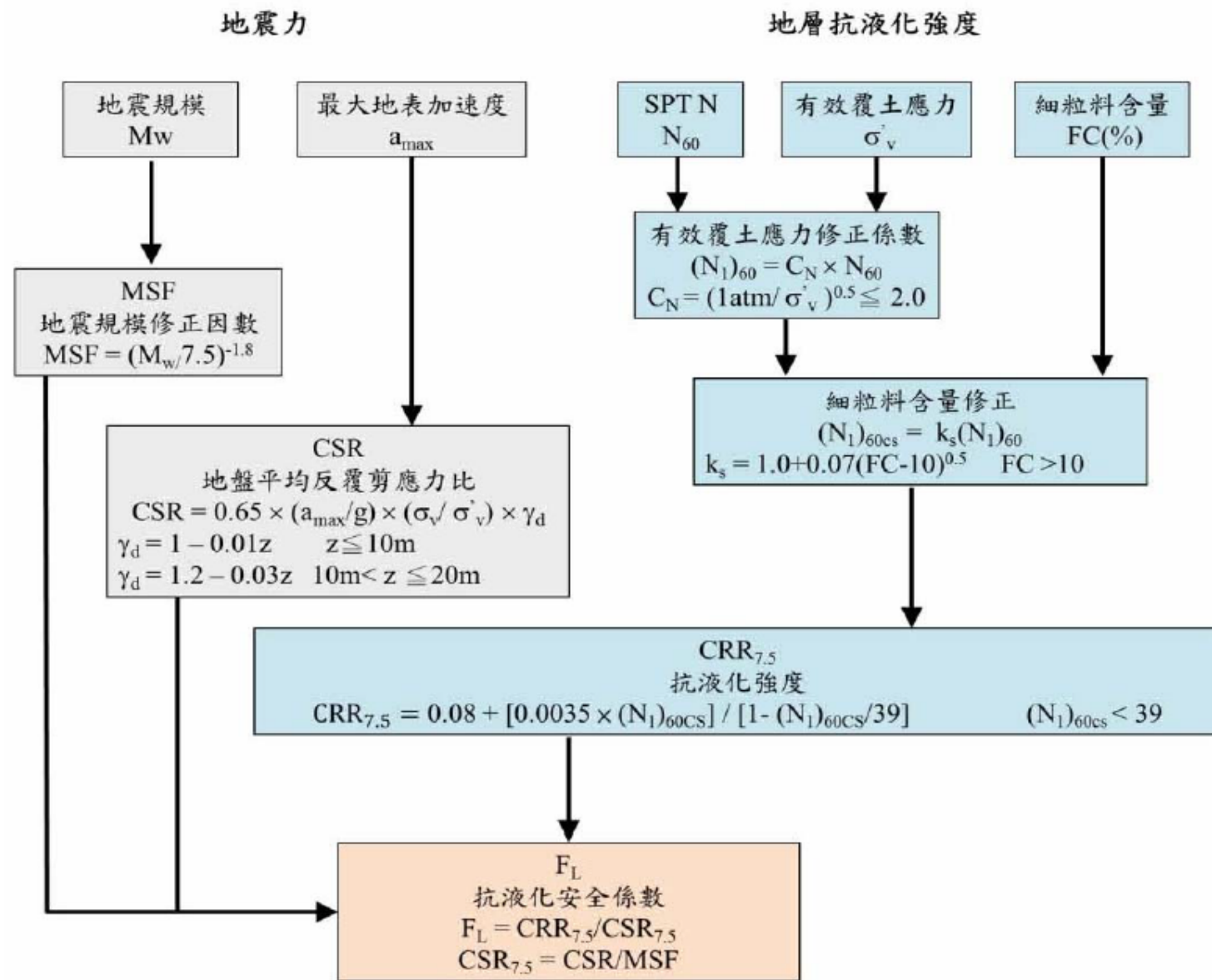




Seed 簡易經驗法之液化分析流程 (Seed et al., 1985)



新日本道路橋分析法
(1996)



在深度加權方面，採用 Iwasaki 深度加權法，說明其液化潛能指數 P_L 定義如下。 $P_L = \int_0^{20} F(z)w(z)dz$

其中：

$$F(z) = \begin{cases} 1 - F_L(z) & \text{for } F_L(z) < 1 \\ 0 & \text{for } F_L(z) > 1 \end{cases}$$

$$W(z) = 10 - 0.5z$$

Z = 地盤深度 (m)，考慮深度範圍為 0~20m

$F_L(z)$ = 抗液化安全係數

$W(z)$ = 深度權重係數

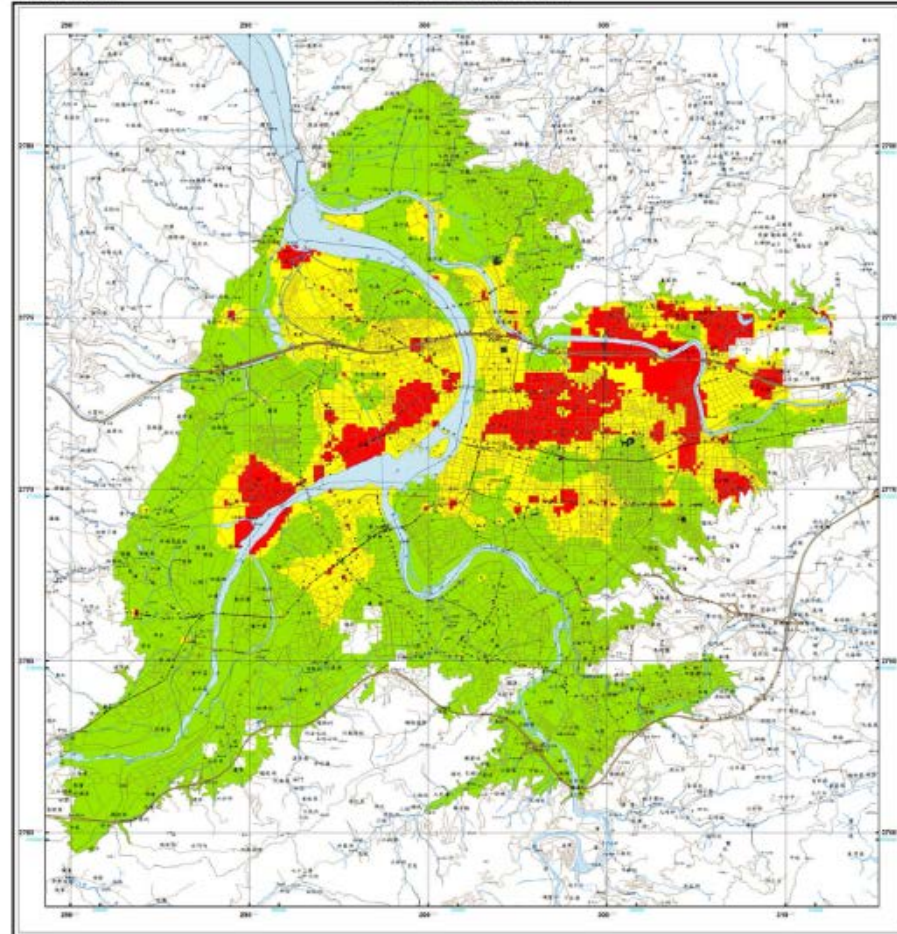


$P_L = 0$: Liquefaction risk is very low
(液化危險度極低)。

$0 < P_L \leq 5$: Liquefaction risk is low
(輕微液化; 液化危險度低)。

$5 < P_L \leq 15$: Liquefaction risk is high
(中度液化: 液化危險度高)。

$15 < P_L$: Liquefaction risk is very high
(嚴重液化: 液化危險度極高)。



圖例 Legend

- 高潛勢區 ($P > 15$)
- 中潛勢區 ($5 \leq P \leq 15$)
- 低潛勢區 ($P < 5$)

● 分析樣本位置

註：P 為液化潛能指數

圖例使用說明：

1. 本圖係為區域性、大範圍的環境地質或災害評估，圖面比例尺為二萬五千分之一，供都市土地開發計畫、土地利用及防災規劃之參考，以瞭解區域土壤液化潛勢的分布特性。
2. 本圖分析網格為100公尺，基於調查及使用上精度之限制，本圖不適於大比例尺的放大套疊使用，對於特定目的之開發計畫或工程規劃設計上的應用，應依相關法規選擇適當之比例尺及精度，從事進一步的工程環境地質調查工作。
3. 地理坐標採用TWD97系統(黑色)，另列TWD67系統(藍色)為參考。

資料分析依據：

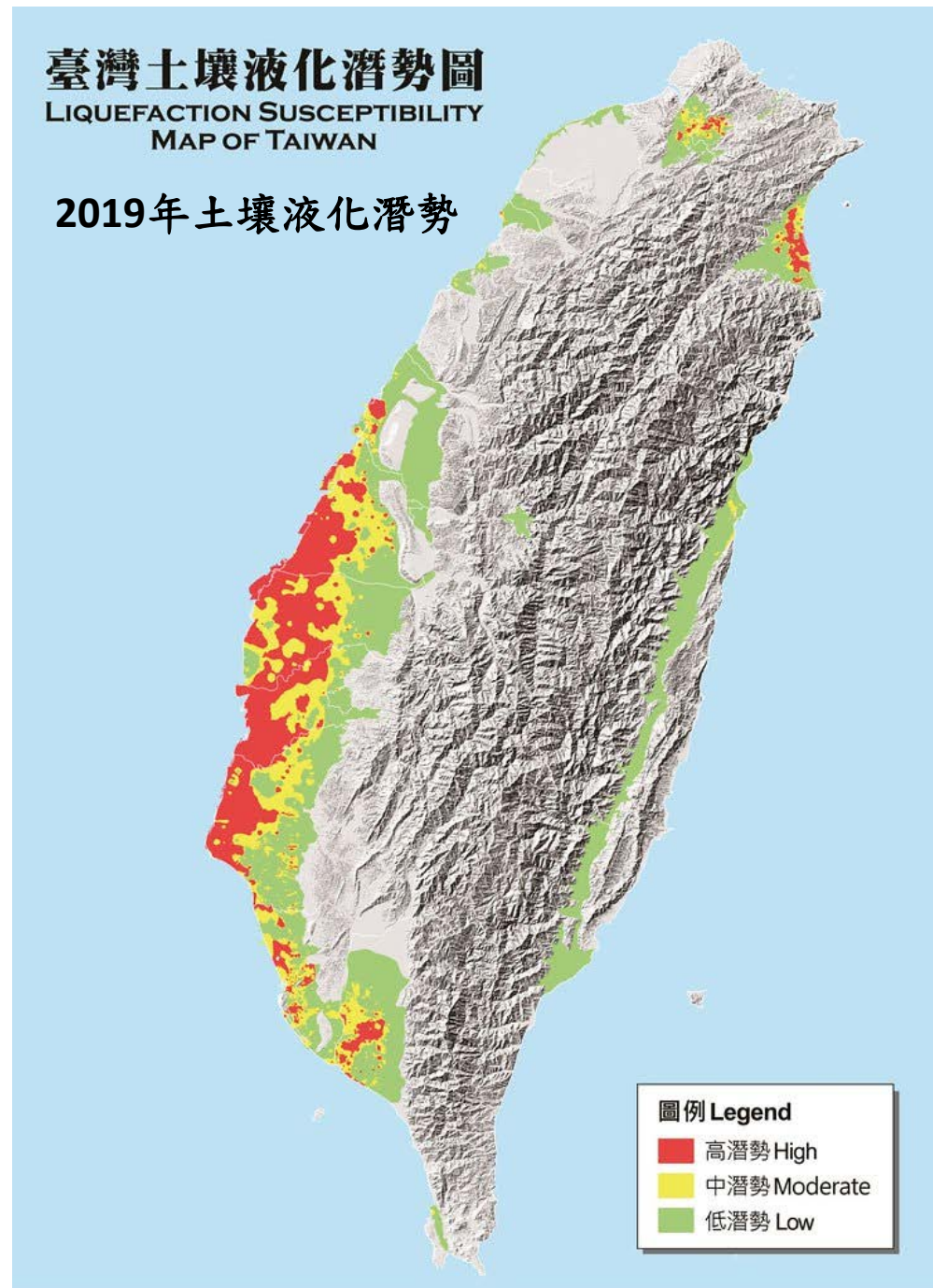
土壤液化潛勢分析係依內政部建築研究所震害設計規範(2011)及建築物基礎設計規範(2011)規定，以各地區設計地震水平地表加速度係數進行分析。



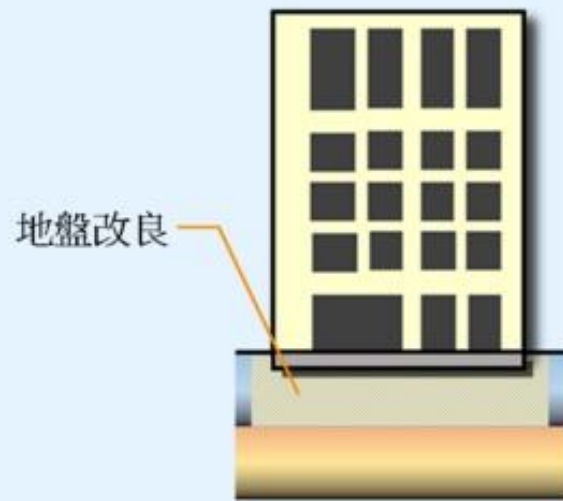
臺灣土壤液化潛勢圖

LIQUEFACTION SUSCEPTIBILITY
MAP OF TAIWAN

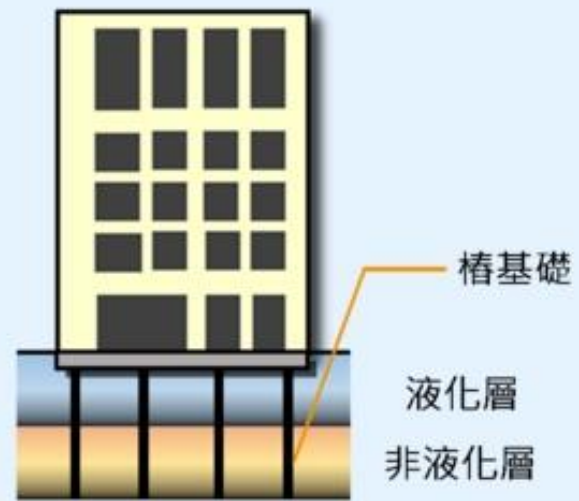
2019年土壤液化潛勢



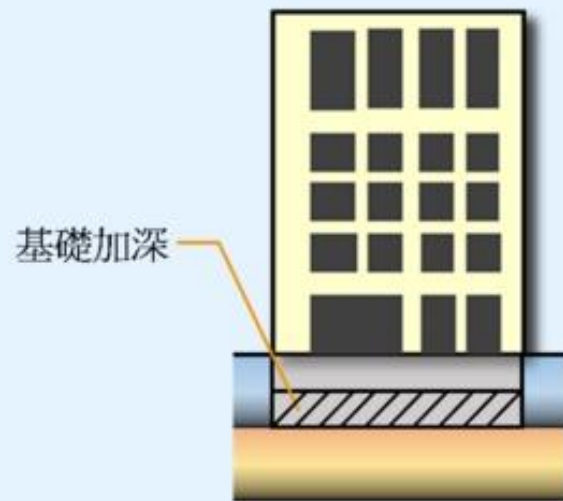
土壤液化災害之防治



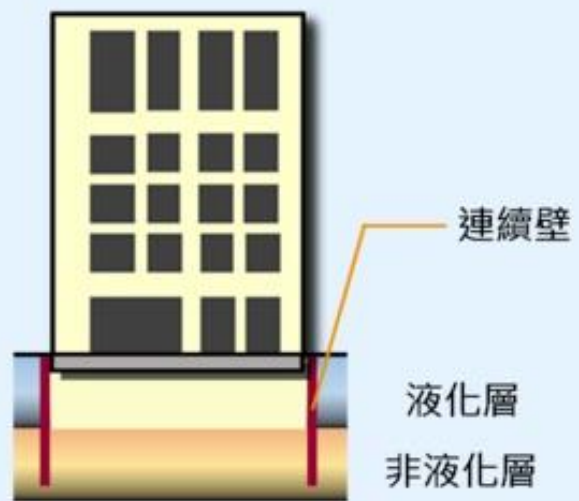
液化地層地盤改良



基礎型式採用樁基礎

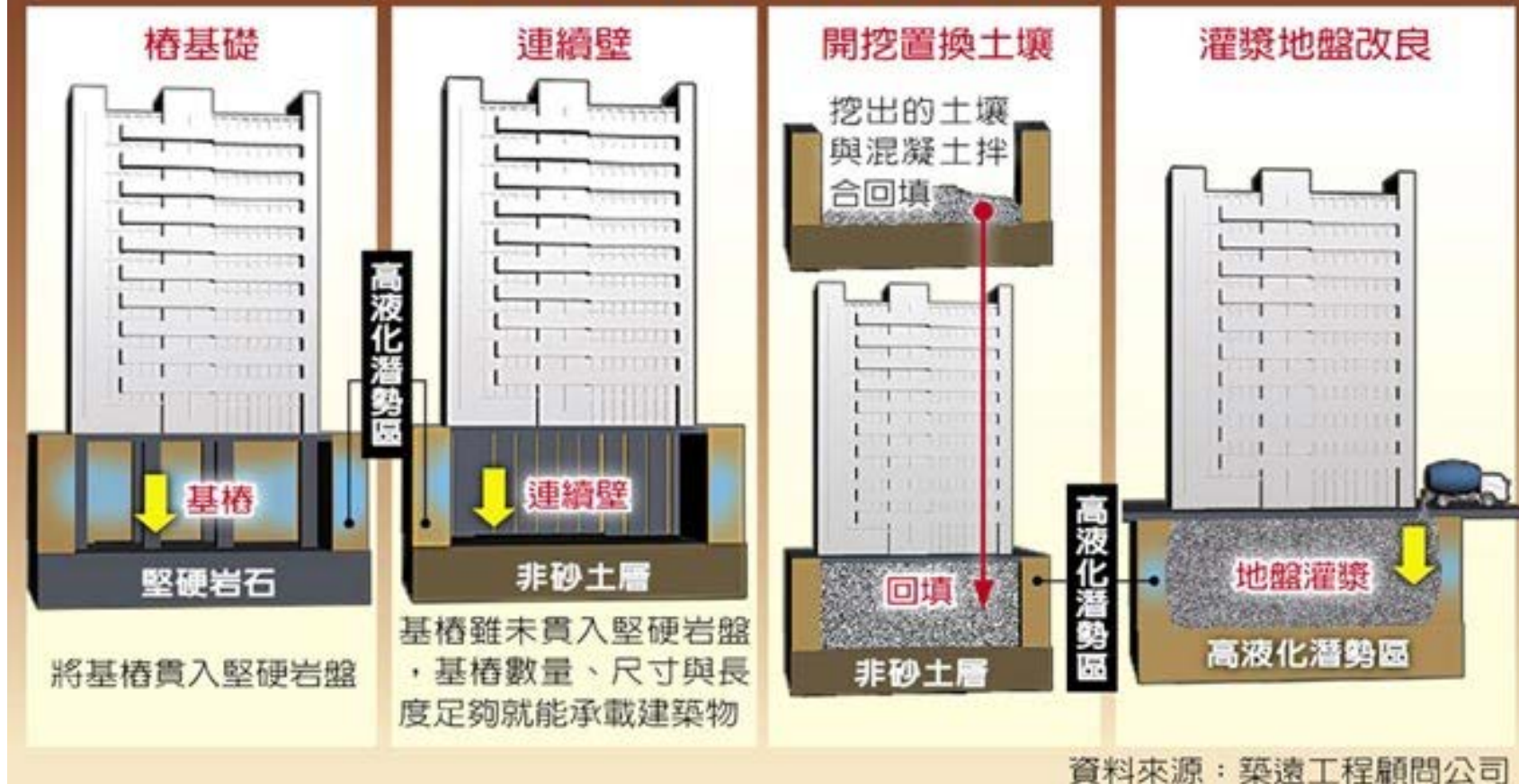


基礎底面加深



基礎外緣採用連續壁圍束

土壤液化災害防治對策



● 土壤液化的觀點

➤ 紅通通的一片，有那麼嚴重嗎？

Free field vs Land utilization

➤ 規範仍然是規範！

無奈的技師們-初階液化判斷-土地利用，地質分區，水文資料，地質歷史，災害歷史

➤ 紅的不必太緊張，綠的也不要太放心

民眾：那些只會吃飯睡覺的專家學者？

➤ 氣象預報的機率觀點

由民眾自承風險的概念

感恩與祝福



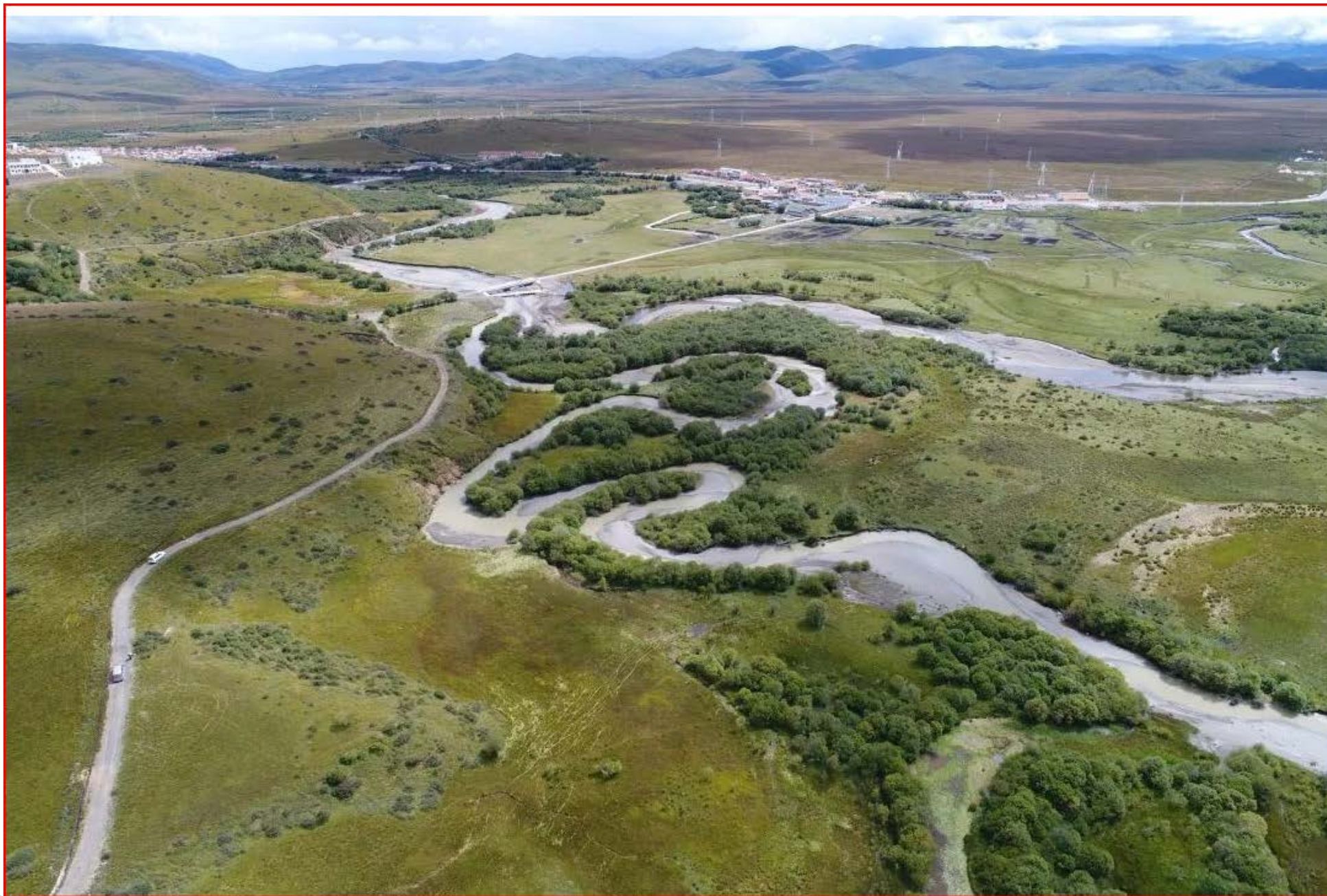
老子道德經

上善若水。水善利萬物而不爭，處眾人之所惡，故幾於道。居善地，心善淵，與善仁，言善信，政善治，事善能，動善時。夫唯不爭，故無尤。

水之特質-水利工程師之期許

- 適應環境：水無固定形狀，裝在什麼容器，顯現何等形狀態
- 雍容大度：江河不捐細流，湖海能納百川，深沉平靜，不興波瀾
- 與人為善：水緩緩而流，循循善誘，信實可靠
- 條理分明：河道之水，循序而下，井然有序
- 可柔可剛：可以清滌，亦可切割堅石

治水有功



山川之美

感謝聆聽
敬請指教