

MUDSLIDING 에 저항하는 말뚝基礎設計와 構造物 解析

河 虎 夫 (現代建設株式會社 海外土木事業本部 理事)

序 論

1969年 8月 태풍 Camille 號가 Mexico灣 Mississippi江 河口의 delta 지역을 통과하면서 3개의 platform들을 쓰러뜨리고 5개의 platform들을 原來의 位置에서 變形 移動시켜버린 참변이 發生하기 以前까지는, 海洋波濤와 海底面의 土質 및 構造物의 相互力學的摩擦에 대한 문제점들을 熟知하지 못하고 있었으며, 그 以後 海洋條件과 構造物이 位置할 場所의 地質 條件이 더욱 심각한 設計條件으로 대두되었다. 이 태풍으로 알미암아 海底面으로부터 30m 깊이의 연약土盤이 1km 이상 미끄러져 흘러내림 (mudsliding)으로써 platform들과 pipeline들의 파손을 초래하였던 것이다.

본 發表 발췌에서는 강연자가 그동안 美國에서 연구하였던 내용들과 실제로 주관하였던 projects의 例를 근거로 wave-sea bottom interaction에 대한 動力學的 理論을 간단히 설명하고 mudsliding에 支持하는 海洋/港灣 構造物과 그의 말뚝基礎 構造設計 方法을 소개하고자 한다.

本 拔萃文은 상세한 理論을 전개하는 학술논문이라기 보다는 오히려 本 강연회 발표의 時間的 制限에 相應하여 시청자들에게 理解를 돕기위해 쓰여진것이므로 구체적인 理論式의 전개나 參考文獻들의 수록은 생략하였다.

1.0 WAVE-SEA BOTTOM INTERACTION의 判斷

어떤 一定한 波高와 波長을 가진 wave가 一定한 주기를 갖고 進行을 하면 wave energy는 水深 및 海底面의 geological, geophysical 그리고 geotechnical 狀態와 傾斜度에 따라 變化를 하게되며, wave의 진폭, 波狀變位 및 sinusoidal motion에 의한 動水壓의 波動變位가 海底面에 作用하게 된다(Fig. 1). 이와같은 wave-sea bottom interaction에 關한 高찰은 다음과 같은 내용을 근거로 判斷하게 된다.

GEOLOGICAL EVALUATION - Geological 측정자료와 역사적 기록의 해석, 특히 퇴적층의 퇴적율과 시기 추정등은 중요한 판단자료가 된다. 퇴적율은 단순히 流水 운반에 의한 것 뿐만 아니라 조류 및 조수 간만에 의하여 생기는 것과 태풍이 밀려왔을 때의 경우도 고려된다. Delta 지역은 물론이지만 海底面의 土粒子들은 surface sinusoidal wave의 특성에 따라 비록 무시할 정도의 운동일지라도 계속 움직이고 있다. 한 例로 sand wave가 있다.

GEOPHYSICAL EVALUATION - Side scan sonar records등을 해석함으로써 海底土盤의 狀態를 음미한다. 이 자료로서 gas pockets의 分布뿐만 아니라 편협지역적인 斜面의 붕괴, 최근 퇴적층의 under-consolidation status 등도 조사할 수 있어서 해저토층의 安定度를 추정할 수 있다.

OCEANOGRAPHIC EVALUATION - Oceanographic data 수집과 해석은 가장 중요하다. Ocean wave의 最大 波高, 波長 및 주기를 항상 hindcast하여 측정하며 각 wave의 return period를 확률통계적으로 분석하여 design wave parameter를 정해야 한다.

태풍/hurricanes가 지나는 通路를 따라서는 波高가 크지만, swell이 일거나 通路에서 떨어져 있는 부분은 오히려 波長이 길고 주기가 더 늦다. 海底面에 作用하는 bottom pressure는 wave의 波高보다는 波長과 주기에 더욱 민감한 함수관계를 가진다. 따라서 最大波高, 最大波長 및 最大주기가 發生하는 경우의 배열組合을 정하는 것은 bottom pressure의 變化를 계산하는데 先行해야 할 作業이다.

또 한가지 重要한 것은 深海에서의 波高는 海岸쪽으로 진행하면서 波高가 낮아지고 있다는 사실이다. 이와같이 波高가 낮아지는 현상은 海底 변형율에 따르는 energy감소에 의한 wave energy 보존法則으로 설명할 수 있으며, 水深이 낮고 海底面이 연약한 곳에서는 波高의 영향에 의한 것으로 나타나고 있다. 이와같이 海底面의 狀態에 따라 波形 變化를 해석하는 작업을 "wave decay analysis"라고 하며, 해양/항만 구조물 설계조건을 정하는데 先行해야 할 作業 과정이다.

지금까지 hindcast하여 측정한 결과 실험에 의한 理論式에 근거하여 wave decay theory 를 認定하게 되었으며, 이러한 이유에서 API RP2A의 design loading 조건을 세우는 guideline이 쓰여졌다. 한가지의 例가 Fig. 2에 表示되어 있다.

古典 海洋學에서는 海底面이 變形을 하지않는 rigid boundary라고 가정하고 wave 波動式을 전개해서, 水深의 變化에 따라 動水壓, 波動變位를 계산하여 사용하였으나 이 古典式들은 水深이 相代的으로 깊다면가 (500m 이상) 또는 海底面의 土盤이 아주 단단한 地層내지는 岩으로 되어 있을 경우에는 적합하지만, 일반적인 연약 海底面에는 적용할 수 없다.

海底面이 變形할 수 있는 deformable boundary의 경우 古典 理論式을 수정하여 어떤 正規 WAVE에 의하여 생기는 sea bottom pressure는 Fig. 3의 式으로 유도하여 사용하고 있다. 이 式의 첫項은 rigid boundary의 경우이며 둘째項은 deformable boundary에 의한 영향을 고려한 것이다. 海底面의 變形은 水面과 海底面의 깊이의 變化에 따르는 變位角 (ϕ)에 따라 變하는 bottom pressure에 의해 증감된다. 變位角이 삼각함수의 제1상한 (0도 - 90도)과 제 4상한 (270도 - 360도)內에 있을때에는 bottom pressure를 감소시키지만 제 2상한과 3상한 (90도 - 270도)內에서는 bottom pressure가 증가한다. 變位角은 bottom motion 密度와 土質 소성도의 함수이다.

海底面의 變形이 근소할때에는 海底面 土層은 탄성적인 反力을 나타내며 이때의 變位角은 대략 180도에 가깝다. 대개의 경우 dynamic viscoelastic continuum analysis에 의하면 變位角은 120도내지 130도 범위내에 있다.

Geotechnical Evaluation - Oceanographic data와 동일하게 중요한것은 geotechnical data를 in-situ 조건대로 수집 해석할 수 있는 능력이다. 대개의 경우 procone, pressure-meter등을 사용하여 현장 시험을 하며, 특수한 장비및 실험설비를 사용하여 고도의 정확성을 가지고 토질시험을 하며 제 3자의 견해및 해석을 수반하는 경우가 대부분이다.

이와 관련한 여러가지 형태의 현장/실험실 실험방법들에 대한 소개는 생략하기로 한다. 갖가지 실험의 해석방법은 표준화되어 있지 않으나 project의 scope내지는 특수 현장조건에 따라서 실험방법에 따라 경험있는 기술자의 판단과 해석에 의해 설계에 반영하고 있다.

2.0 MUDSLIDING 解析

海底面의 安定 解析을 위해 지금까지 여러가지 형태의 解析方法이 연구 개발되어 왔으며, 각각의 方法들은 다음의 3가지 理論中의 한가지 범주에 해당된다.

(i) Limit Equilibrium Method

Henkel이 정리발표한 Modified Bishop's Method에 준한 slip-circle 해석 방법이다. 이 方法은 靜的 解析인데다가 土質의 nonlinear stress-strain 關係를 반영할 수 없다. 海底面에 局部的으로 急傾斜를 이룬곳이나 DUNE의 斜面 安定 문제의 검토를 위해서 이따금 사용되고 있다.

(ii) Elastic Continuum Solutions

최초의 解析方法들은 海底面의 土盤이 homogeneous하고 isotropic한 elastic half space라고 가정하고 static sinusoidal normal stress가 表面에 作用하는 것으로 解析하였다. Fig. 3에 表示한 sinusoidal wave의 amplitude 와 波長 (L)에 의해 생기는 최대전단력의 無次元 關係가 Fig. 4에 그려져 있다. 여기서 Z는 海底面으로 부터의 깊이이며, plastic factor (0.5 - 0.8)를 적용하여 inertial effects, 복합지층 그리고 travelling wave등의 영향을 간접적으로 고려하고 있다.

최근에는 이 方法이 좀더 연구개발되어 wave와 soil motion의 상대 變位角을 계산하고 Fig. 4에서 구한 전단력을 nonlinear stress-strain 관계에 부합시켜, 각 응력 상태에서의 strain을 계산하고 積分하여 wave에 의한 海底土盤의 displacement도 계산할 수 있으나 이 方法은 개략적인 解析에 지나지 않는다.

(iii) Finite Element Method

Sea-bottom pressure wave (Fig. 3)와 海底土質의 特性을 3次元의 finite element 解析方法으로 wave에 의한 海底土盤의 安定度를 구할 수 있다. 여러가지 종류의 실험으로 구한 海底土質의 非 선형적 變形 特性 및 응력상태를 실제와 유사하게 model 할 수 있다.

海底面의 傾斜度를 고려함으로써 重力軸과 主 應力軸과의 相位角을 계산하고, 따라서 wave가 下向 傾斜面 또는 上向 傾斜面을 향해 進行할 경우의 각 finite element에 작용하는 主應力들을 계산한다 (Fig. 5).

반복하중에 대한 영향도 검토할 경우에는 장시간의 전산기 사용이 불가피한 결점도 있다. 따라서 거의 모든 경우, elastic analysis로 개략적인 계산을 한후에 구체적이고 상세한 검토/해석을 하는 과정에서 이 방법을 쓰고있다.

상기의 어느 방법을 사용하든지간에 궁극적으로 필요한것은 wave에 의한 해저면 토반의 안정성, 즉 soil movement를 구하는 것이다. 예를 들면 Fig. 6(a)와 같은 in-situ shear strength와 Fig. 6(b)와 같은 stress-strain 관계를 가진 해저면에 반복하중에 의해 Fig. 6 (c)와 같은 displacement가 생기며, 이것이 계속 누적되어 Fig. 6 (d)와 같은 형태의 movement가 계산된다.

이 결론에 따라 다음과 같은 결론을 짓는다.

0 - 125 ft Mudsliding Zone

이 지역에서는 wave pressure에 의한 최대전단력이 土質의 전단강도보다 크며 displacement도 토질의 failure strain보다 큼.

125 - 180 ft Transition Zone

이 지역에서의 土盤은 movement가 생기기는 하였으나 sliding은 일어나고 있지 않음.

180 ft 이하 Stable Zone

이 지역에서는 wave pressure와 displacement가 土質의 전단강도와 failure strain보다 상대적으로 무시할 정도로 작음.

3.0 말뚝基礎의 設計와 構造解析

海底面의 安定性 檢討결과 mudsliding zone, transition zone, stable zone이 결정되면 Fig. 7과 같은 解析 model을 사용하여 말뚝 基礎를 設計한다.

Mudsliding zone에서 생기는 mudflow의 driving force는 finite element analysis의 결과를 사용하거나 또는 elastic analysis를 사용했을 경우에는 다음의 실험공식을 사용하고 있다.

$$\frac{\text{FORCE}}{\text{LENGTH}} = (11.42) (125.9 * \frac{V}{D} * \text{No}) \text{ Su} . D$$

V = Max. resultant velocity of soil particles

D = Pile diameter

No = Viscoelastic modulus coefficient

Su = Undrained shear strength of the soil

$$\text{No} = 0.194 + (-0.023) \text{ Ln} (\text{Su})$$

WHERE Su IS IN PSF.

Transition zone에서의 횡파중 지지곡선 (p-y curve)는 정상적인 土質의 p-y curve를 wave에 의해서 displacement 생긴만큼 대칭 이동한다. 즉, 말뚝이 土質이 움직인 정도이상 움직여야만 土質로부터 횡지지력을 받을수 있다는 것이다. 말뚝이 그만큼 움직이지 못하였다면 그에 상당하는 interlocking force가 말뚝에 작용한다는 의미이다.

Stable zone에서는 정규의 p-y curve를 사용한다.

말뚝의 axial load capacity를 계산할때 mudsliding zone의 skin friction은 무시하고 있으며, 거의 모든 경우 mudsliding 하중조건은 말뚝의 penetration depth을 결정하지 않는다.

構造解析을 위한 하중조건으로는

- (i) 100년 빈도의 environmental condition
- (ii) Decayed wave (대개의 경우 7-15년 빈도의 environmental condition과 유사)와 mudsliding loads
- (iii) Operating condition

각 하중 조건에서 반복연속 계산하여 上部構造와 下部構造 (foundation)의 compatibility와 equilibrium condition을 충족시켜야 함.

Mud flow시 vortex shedding 영향에 의해 mudsliding force가 가중되는것을 막기위해 conductor들을 main pile속에 위치시켜 놓는다. 따라서 말뚝의 직경은 96 in 이상이 보통이며 현재까지는 126 in의 직경이 최대이다. 이러한 大口徑의 말뚝은 transition cone을 임시로 설치하고 항타를 한다.

4.0 結 論

Mudsliding에 저항하는 말뚝 基礎 및 構造物의 設計 解析은 Fig. 8에 表示한 flow diagram에 근거하여 수행하고 있다.

한국정부와 기업들이 여러가지 형태로 서해안의 개발을 계획하고 있는 이즈음에 본 학회를 중심으로 대학과 여러 연구 기관에서는 이 강연회에서 설명한 내용들을 한국의 지역에 맞게 연구 개발하여 국내의 해양/항만 건설기술 향상에 도움이 되는 주춧돌이 되길 바라는 바이다.

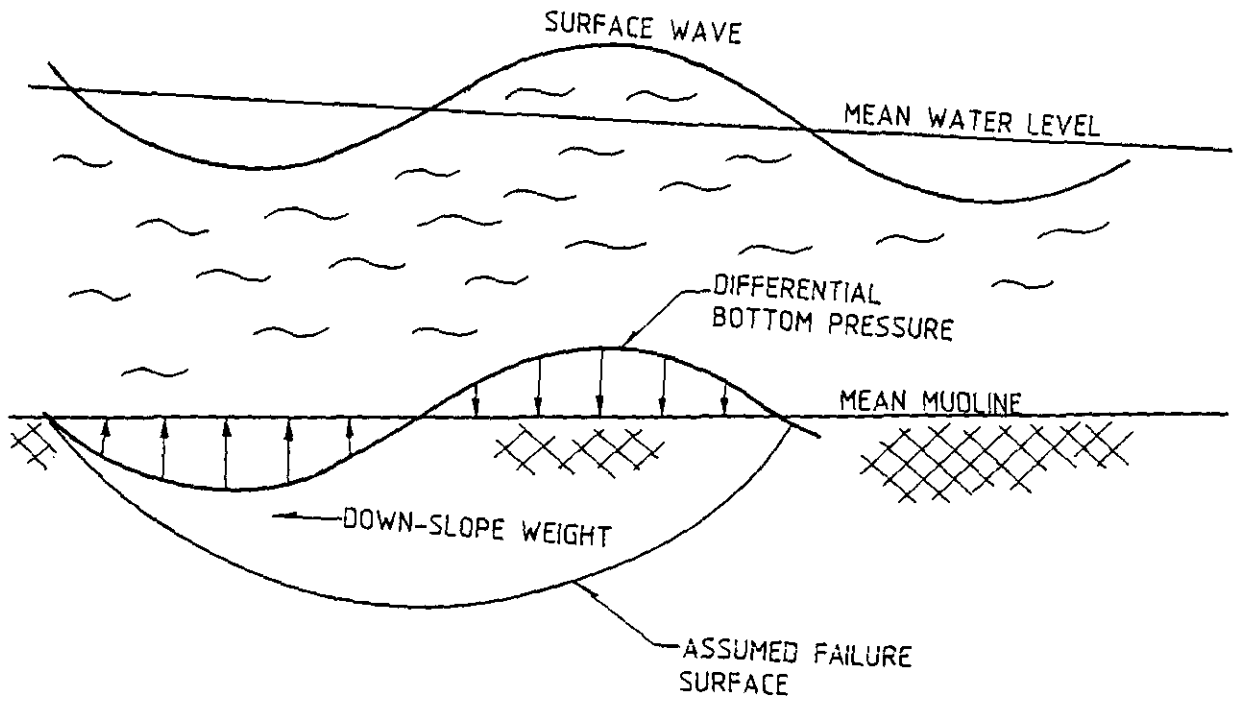


Fig. 1 Wave 영향에 의한 핵저면에 작용하는 외력

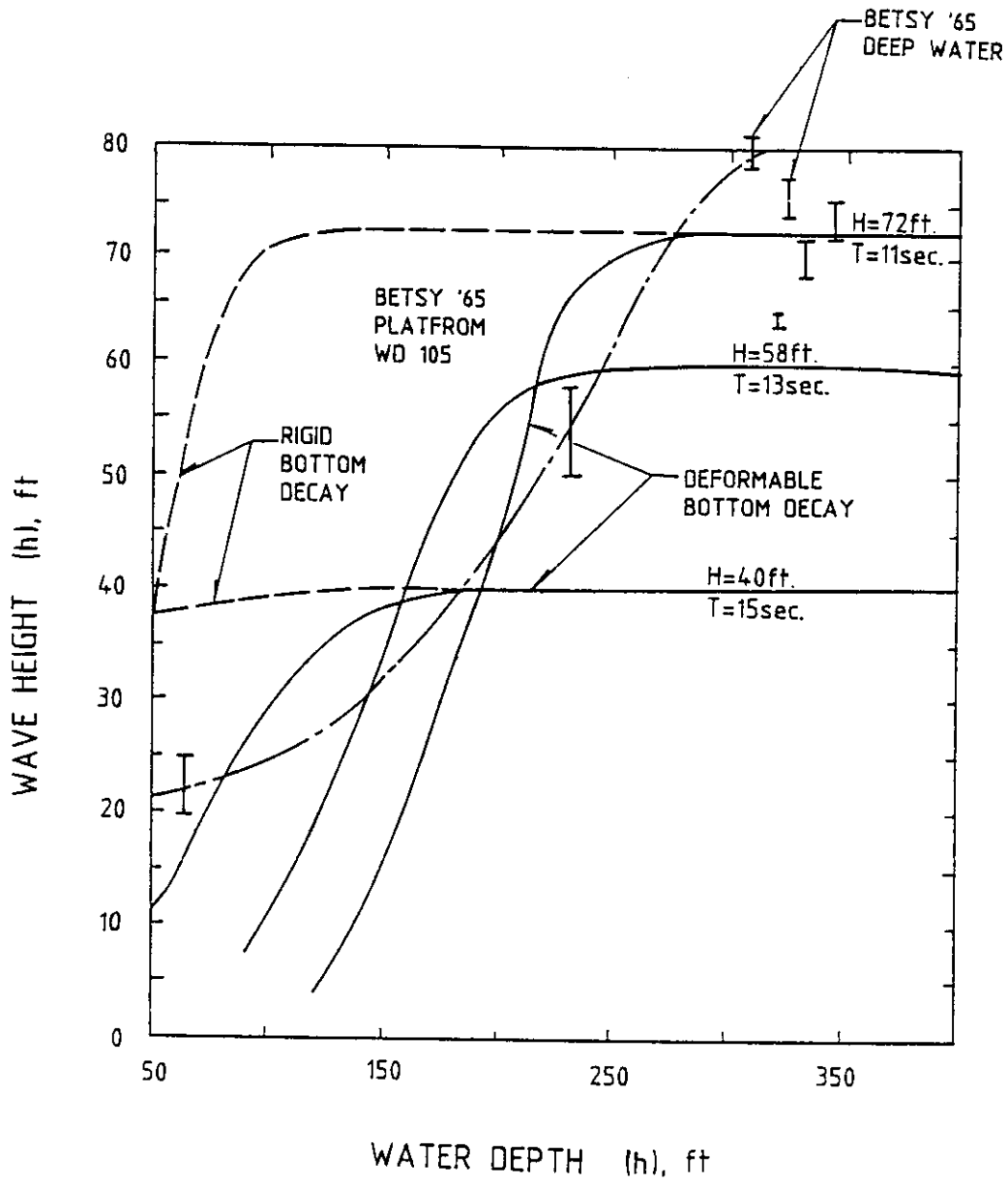
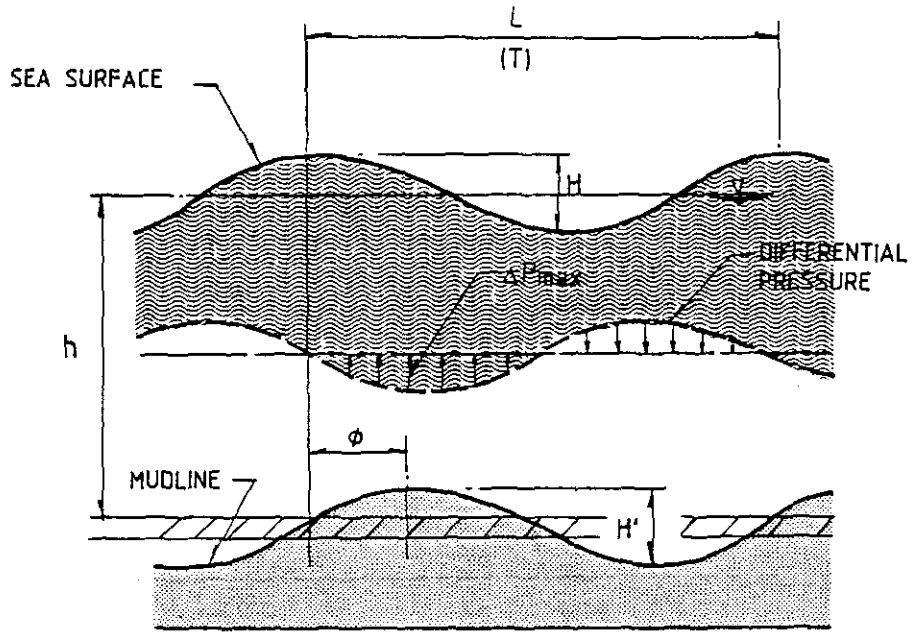


Fig. 2 파고의 실측치와 Wave Decay 론에 의한 파형변화



$$\Delta P_{max} = \frac{\gamma}{2} \left[\frac{H}{\cosh K h} - \frac{H' \omega}{g K} \cos \phi (\tanh K h) \right]$$

$$K = \frac{2\pi}{L}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

Fig. 3 Wave 에 의한 Sea Bottom Pressure 의 파동 식

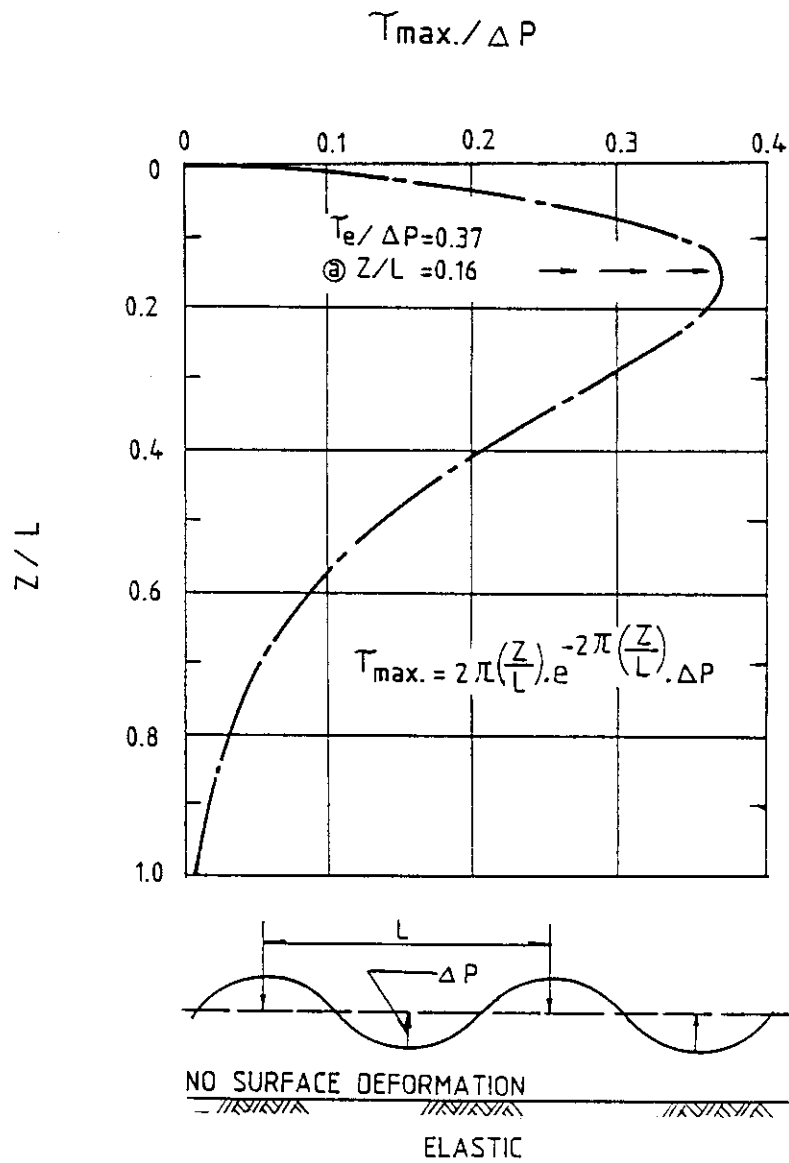


Fig. 4 Wave 에 의해 Elastic Half Space 에 작용 하는 최대전단력의 변화

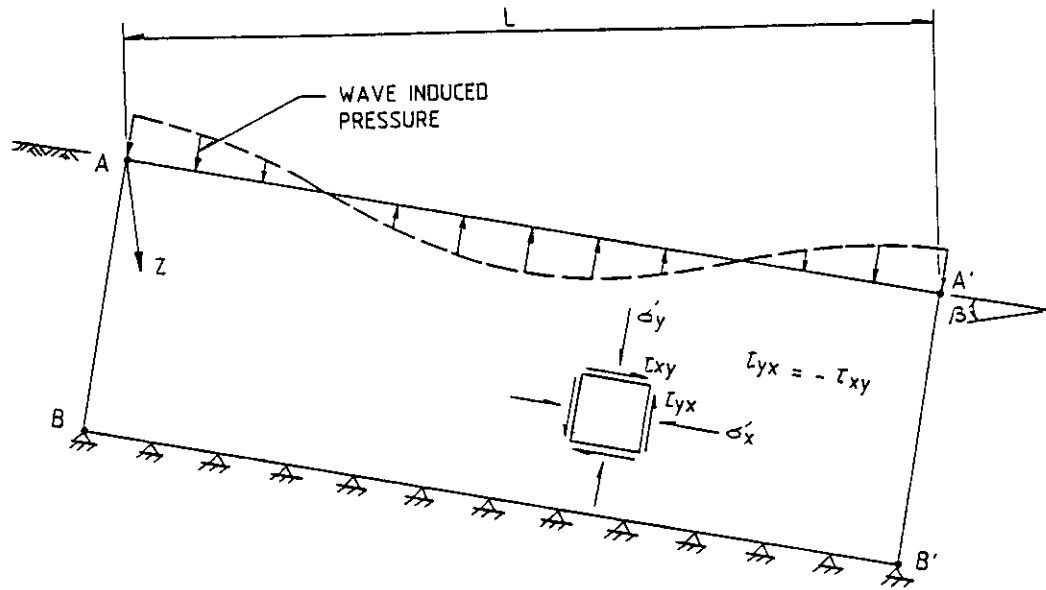
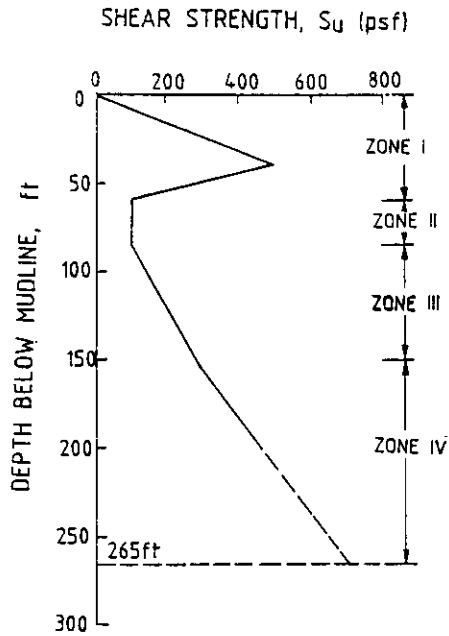
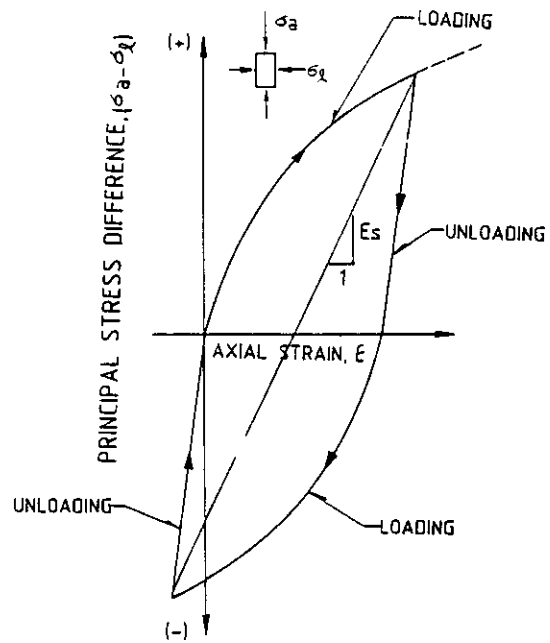


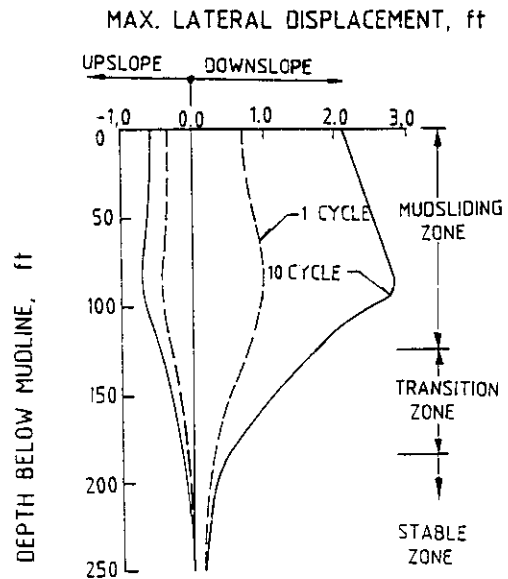
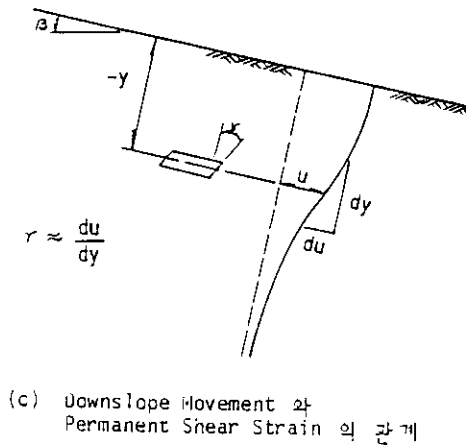
Fig. 5 3차원적 Finite Element Analysis Model



(a) In-Situ Shear Strength



(b) Nonlinear Characteristics of Stress-Strain Relationship



(d) Soil Movements

Fig. 6 액체 상태

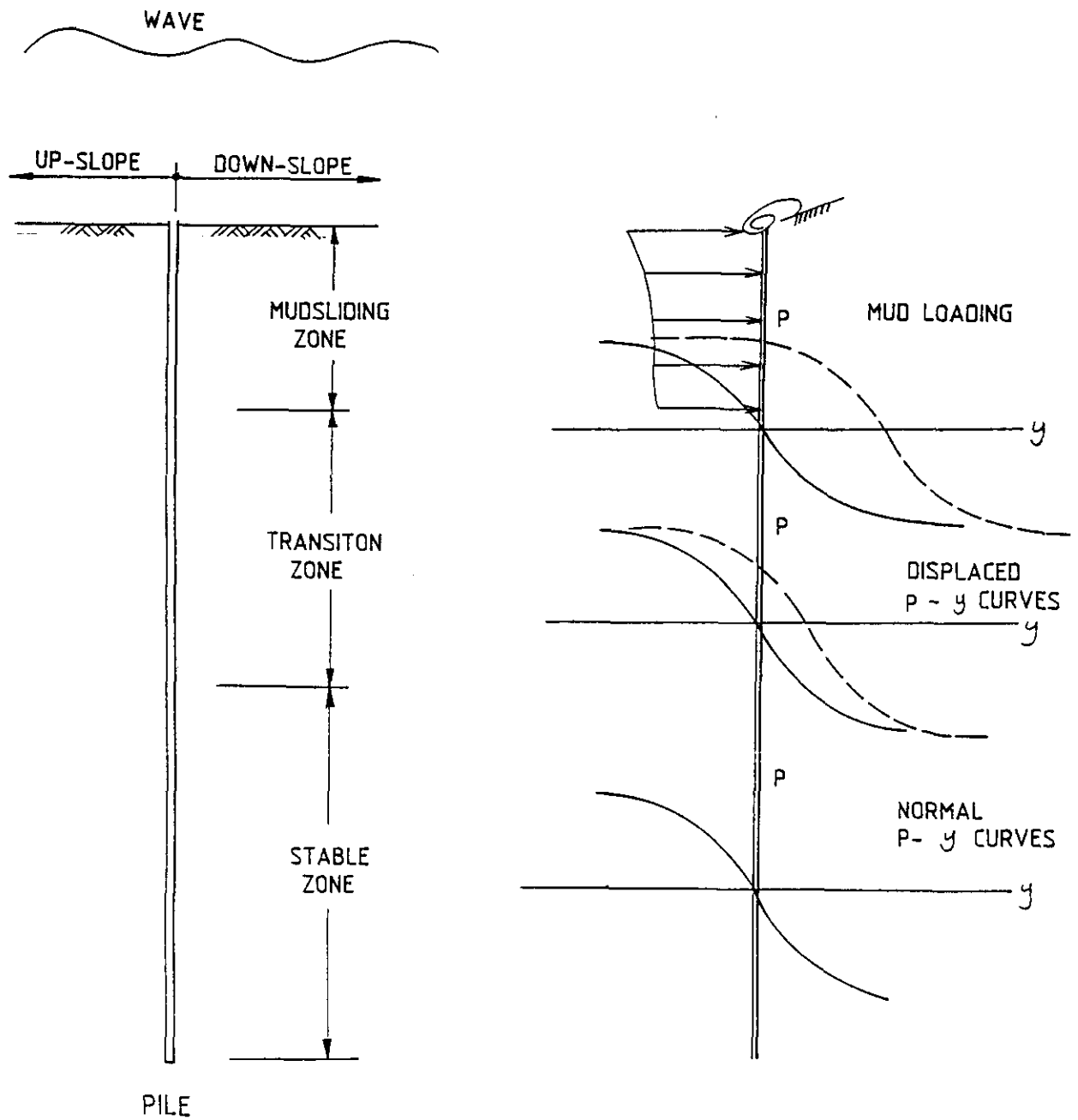


Fig- 7 말뚝 기초설계를 위한 Analytical Model

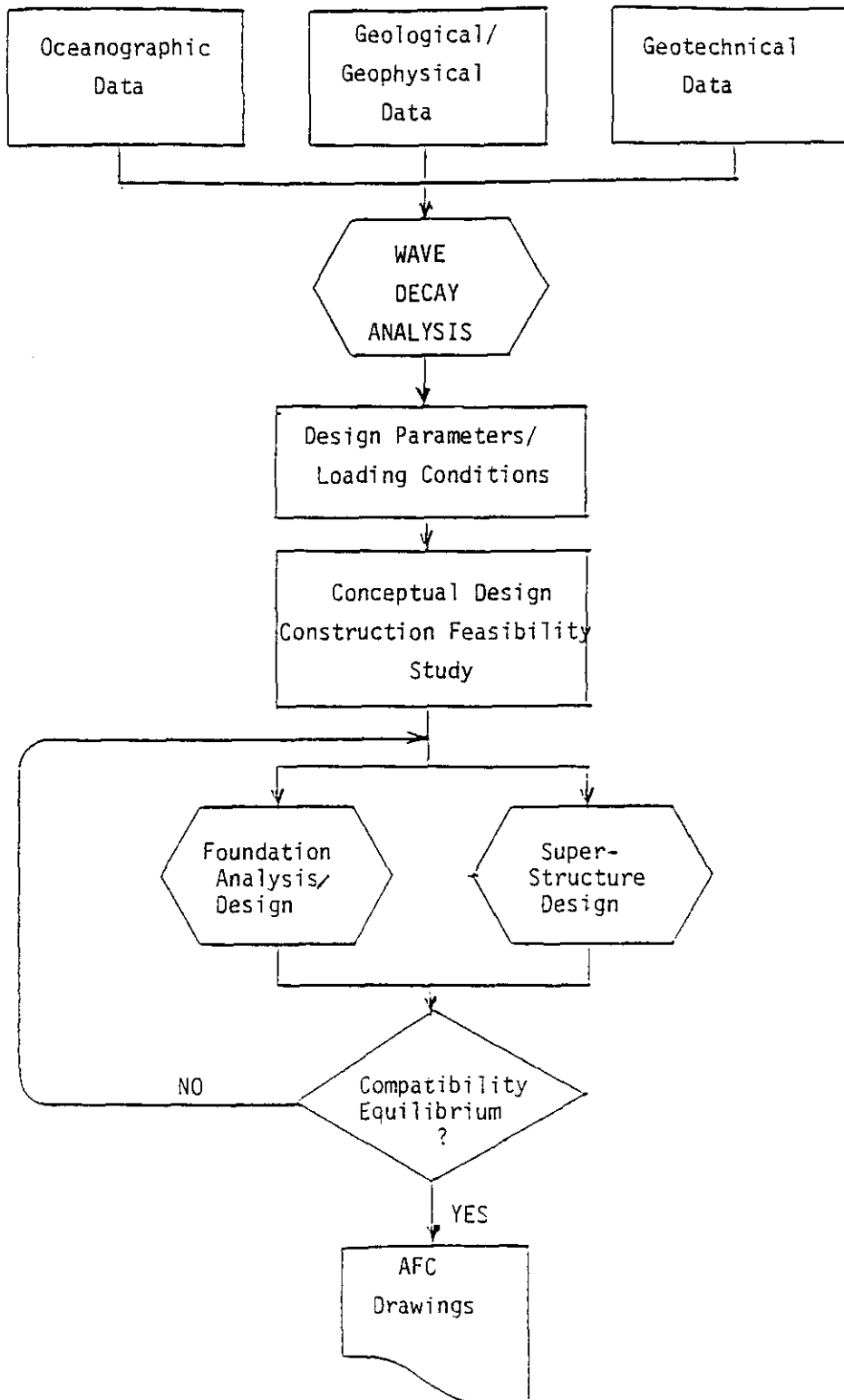


Fig. 8 MUDSLIDING에 저항하는 기초구조물의 설계해석

FLOW DIAGRAM