

斜橋의 鋼床板의 靜的舉動에 대한 研究

A Study on the Static Behaviors of Steel Deck Plates of Skew Bridges.

梁昌鉉* · 吳知澤**

Yang, Chang Hyun · Oh, Gi Taek

Abstract

Skew bridges are found frequently in new bridge construction due to geographical conditions when new constructing bridges are put across the existing highways, railroads or rivers. This study is to investigate the static behaviors of the steel deck plates of skew bridges which are increasingly used in bridges due to outstanding quality of structural steels, development of welding techniques, in order to reduce dead loads and period of constructions. The static behaviours of steel deck plates are analyzed using general purpose FE code SAP90 by modeling the skewed deck plates with rigorous finite elements, as the skew angles vary. The results of finite element analysis for the behaviors of steel deck plates and concrete slabs in acute, obtuse corners and center of decks are compared and discussed as the skew angles vary from 90° to 30° . Two types of decks are treated, as isotropic plates and orthotropic plates, respectively. From the results of finite element analysis, it is found that more moments, reactions, and deflections occur at the obtuse corners than at the center of skewed decks regardless of isotropy or orthotropy. Especially, in case of the skewed deck plates with skew angles less than 45 degrees, significantly large discrepancies for the values of those internal forces are shown between the skewed and right deck plates. This study estimates the characteristics of deck behaviors according to skew angles, and proposes limitations of skew angles and the critical regions of decks.

要 旨

新設橋梁이 既存의 道路나 鐵道 또는 河川을 橫斷하는 경우에 地形的인 與件으로 인하여 斜橋(skew bridge)의 建設이 불가피한 경우가 흔히 있게 된다. 鋼床板은 最近 構造用鋼材의 品質向上, 熔接技術의 發達에 힘입어 死荷重의 減少 및 工期短縮 등을 위하여 특히 長大橋의 바닥판으로 널리 사용되어지고 있다. 本 研究에서는 鋼床板을 精巧한 有限要素로 모델링하여 斜角에 따른 靜的舉動의 變化를 汎用 有限要素解析 프로그램인 SAP90을 사용하여 分析 考察하였다. 有限要素解析을 통하여 床板의 斜角이 $90^\circ \sim 30^\circ$ 사이로 變化할 때에 發生되는 銳角部와 鈍角部 및 中央部에서의 舉動을 等方性平板과 直交異方性平板에 대하여 比較 分析하였다. 解析結果로부터 斜角을 갖는 床板은 等方性, 直交異方性에

*正會員 · 仁荷大學校 工科學科 土木工學科 教授

**正會員 · 仁荷大學校 工科學科 土木工學科 博士課程

상관없이 鈍角部에서의 모멘트, 反力 및 처짐이 床板의 中央部에 비하여 그 값이 크게 나타났으며, 특히 45° 以下의 斜角에서는 그 差異가 매우 크게 發生함을 알 수 있었다. 또한 55° 以下로 斜角이 減少할수록 床板 鈍角部에서의 모멘트가 中央部의 모멘트 크기를 超過하며, 그 差異는 斜角이 減少할수록 현저하게 커짐을 확인하였다. 本 研究에서는 斜橋의 斜角에 따른 舉動特性에 대한 定量的인 評價를 하고, 斜橋에 있어서 脆弱部位와 斜角의 限界를 제시하였다.

1. 序 論

斜橋는 新設道路網이 既存의 道路나 鐵路와 같은 交通路와 교차되는 地域과 河川 및 溪谷 등에서 불가피한 地域의 與件으로 인하여 架設하게 되는 橋梁의 形態이다. 交通疏通에 대한 空間制約의 增加와 高速化 道路의 建設과 같은 交通量의 速度增加에 따른 路線의 直線化 趨勢에 의해 점점 斜橋의 必要性이 증대되고 있다. 橋梁의 바닥板은 보통 콘크리트 슬래브床板과 鋼床板으로 分類된다. 直交異方性을 갖는 鋼床板의 基本構造는 일반적으로 바닥板이 縱方向의 리브(rib)와 橫方向의 가로보로 구성된 바닥틀로 支持된다. 이 鋼床板과 바닥틀은 板桁 또는 箱子桁에 의해 支持된다. 이러한 鋼床板의 가장 뛰어난 長點은 既存의 RC 슬래브 床板에 비하여 輕量이며, 靱剛性 및 비틀剛性이 크고 卓越한 荷重分配能力을 保有한다는 것이다. 특히 連續桁橋에서 鋼床板은 支點部의 上端에서 發生되는 負모멘트영역에서 發生되는 引張應力을 完全하게 抵抗할 수 있다. 이와 같은 舉動은 콘크리트 슬래브로 이루어진 床板에 비해 가장 뛰어난 長點이다. 最近까지도 直交異方性 鋼床板橋는 徑間이 75 m 이상이라야 經濟性이 있다고 생각되어 왔으나 24~36 m 정도의 짧은 徑間에서도 충분히 經濟性이 있다는 사실이 判明되었다.⁽¹⁾ 이러한 鋼床板은 長大橋梁 뿐만 아니라 짧은 支間의 橋梁에서도 死荷重의 減少로 인한 下部構造의 節減과 工期短縮의 長點이 있다. 특히 既存의 橋梁을 補修하거나 新設할 경우 鋼床板을 하나의 組立式 單位로서 6~24 m의 範圍로 제작하여 이 組立單位를 板桁에 용접시킴으로써 약 20% 정도의 鋼材를 節減할 수 있으며, 工期短縮의 效率性을 증대시킬 수 있다.⁽¹⁾

直橋의 床板은 等方性平板과 直交異方性平板의 解析理論으로서 해석될 수 있다. 直交異方性平板에

대한 解析은 等價의 連續體로서 다루는 古典的인 解法,⁽²⁾ 級數解法⁽³⁾과 有限要素法^{(4),(5)} 등이 있다. 이러한 여러 解法으로부터 얻은 解析 結果는 각각의 解法에 도입된 基本假定에 의해 그 사용이 제한되어 있다. Kennedy,⁽³⁾ R. Tinawi 등⁽⁴⁾과 D.J. Just⁽⁶⁾에 의해 直交異方性平板에 대한 解析이 수행되었으며, Rush, H.⁽⁷⁾ 등과 Balas, J.⁽⁸⁾는 等方性 슬래브 床板에 대한 設計모멘트값을 얻는데 影響面을 提案하였다. 이들은 斜角을 갖는 平板의 中央部에 대한 처짐과 모멘트에 대하여 理論과 實驗의 檢證을 통하여 각각 다른 解析方法을 제시하였다.

鋼床板의 設計는 標準트럭의 輪荷重에 의해 支配되며 鋼床板은 (1) 主桁의 一部로 作用하는 경우, (2) 바닥틀의 上部flange로 作用하는 경우, (3) 縱·橫리브에 의해 支持된 連續等方性板 등 3가지 構造系로 나뉘어 考察하게 된다. 本 研究에서는 두 번째의 바닥틀로 作用하는 경우에 대하여 有限要素解析을 수행하고 鋼床板에서 斜角으로 인한 影響을 究明하고 脆弱部를 考察한다.

直角平板은 平板의 4階 支配微分方程式에 境界條件 및 形狀에 대한 조건을 도입함으로써 理論解를 구할 수 있다. 斜角이 주어질 경우 傾斜座標系를 사용하여 支配微分方程式을 表現할 수 있으나 傾斜座標系를 사용한 支配微分方程式의 解를 구하는 것은 鈍角部에서 發生하는 特異點(singularities)으로 인하여 그 解를 구하는 것이 어려우며 일반적으로 斜角을 갖는 平板의 問題에 解析的인 方法을 적용하는 것은 거의 불가능하게 된다.⁽¹¹⁾

本 研究에서는 數值解析方法으로 가장 廣範圍한 適用性을 갖는 有限要素法을 사용하였다. 解析對象인 콘크리트 슬래브床板과 鋼床板을 각각 等方性平板과 直交異方性平板으로 간주하여 精巧한 有限要素 모델을 구성하였다. 床板의 縱橫比(aspect ratio)는 縱方向에 직각인 幅과 支持端에 직각인 支間の 比가

1인 경우로 선택하였다. 특히 鋼床板의 경우에 等價의 連續體가 아닌 鋼板과 縱리브 및 가로보로 구성된 實際形狀에 대한 有限要素 모델을 사용하였다. 解析의 수행은 汎用有限要素 解析프로그램인 SAP90을 이용하였으며 사용한 有限要素는 4節點 및 3節點 線要素를 사용하였다.^(4,6)

鋼床板을 補強하는 리브는 일반적으로 閉斷面 형태와 閉斷面 형태가 사용된다. 本 研究에 사용된 有限要素解析모델은 閉斷面 리브중에서도 構造의 長點이 많은 사다리꼴 閉斷面 리브로 補強된 鋼床板을 사용하였다. 리브의 간격과 가로보의 간격은 AISC 사양서에서 제시한 값⁽¹²⁾을 사용하였다. 解析結果로부터 直角床板의 舉動과 큰 差異를 보이는 斜角의 範圍와 斜角의 影響을 크게 받는 部分을 究明하고 脆弱部에 대한 舉動을 考察하였다.

2. 床板의 解析理論

橋梁의 床板은 대부분 平板으로 간주하여 解析을 하게 된다. 平板은 土木, 建築, 機械, 航空 및 造船 등과 같은 工學分野에서 힘과 軸力 및 剪斷力에 저항하는 構造用 部材의 한 形態로서, 2方向 舉動 때문에 荷重支持 能力面에서 뛰어난 長點을 지니고 있다. 일반적으로 平板은 材質과 形狀에 따라 等方性平板과 直交異方性平板으로 구분된다.⁽¹¹⁾ 等方性平板은 平板의 彈性係數 또는 斷面形狀이 모든 방향에 대하여 같은 平板이며, 直交異方性平板은 平板의 彈性係數 또는 斷面形狀이 서로 直交하는 2方向에 대하여 다른 平板이다.

2.1 等方性平板-薄板理論

Kirchhoff의 薄板理論의 基本假定⁽¹¹⁾을 따르며 平板의 支配微分方程式은 그림 1과 같은 直角座標系와 傾斜座標系에 대하여 각각 유도된다.

2.1.1 直角平板

그림 1(a)와 같은 直角座標系에서의 平板의 支配微分方程式은 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial^2 x \partial^2 y} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{-P_z(x, y)}{D} \quad (1)$$

또는,

$$D \nabla^2 \nabla^2 w = P_z \quad (2)$$

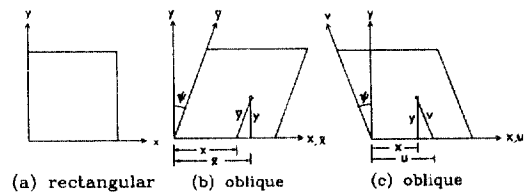


그림 1. 直角座標系와 傾斜座標系

여기서 w 는 平板의 처짐, $D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$ 는 等方性 平板의 휨剛性이다.

境界條件을 만족하는 식 (1)의 一般解 $w(x, y)$ 가 荷重 $P_z(x, y)$ 가 作用하는 平板의 처짐에 대한 식이며 解析의인 方法으로 正確解의 算出이 가능하다.

2.1.2 斜角平板

斜角을 갖는 平板은 航空機의 날개, 建物の 슬래브와 斜橋의 床板에서 흔히 볼 수 있는 형태이다. 이러한 平板의 支配微分方程式은 식 (1)의 (x, y, z) 대신에 식 (3)과 같은 관계를 갖는 그림 1(b)의 傾斜座標系 (\bar{x}, \bar{y}, z) 로 置換함으로서 얻을 수 있다.

$$\bar{x} = x - y \tan \psi, \quad \bar{y} = \frac{y}{\cos \psi}, \quad z = z \quad (3)$$

傾斜座標系에서의 平板의 支配微分方程式은 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{D}{\cos^4 \psi} \left[\frac{\partial w}{\partial \bar{x}^4} + 2(1 + 2\sin^2 \psi) \frac{\partial^2 w}{\partial \bar{x} \partial \bar{y}^2} - 4\sin \psi \left(\frac{\partial w}{\partial \bar{x}^3 \partial \bar{y}} + \frac{\partial w}{\partial \bar{x} \partial \bar{y}^3} \right) + \frac{\partial^4 w}{\partial \bar{y}^4} \right] = P_z(\bar{x}, \bar{y}) \end{aligned} \quad (4)$$

또는,

$$D \bar{\nabla}^2 \bar{\nabla}^2 w = P_z(\bar{x}, \bar{y}) \quad (5)$$

식 (4)로 표현된 斜角平板의 解析은 直交性이 없기 때문에 正確한 해를 구한다는 것이 매우 어려울 뿐만 아니라 解를 구했다 하더라도 平板의 鈍角部에서는 特異點(singularities)을 포함하게 된다. 식 (4)의 理論解를 구하려는 시도는 있었으나^(13,14) 일반적인 경우 식 (4)의 解析의인 解法은 거의 불가능하다.

2.2 直交異方性平板理論

直交異方성은 直交하는 두 主軸方向에서 材質의 彈性係數가 다른 경우와 斷面의 形狀이 다른 경우로 나눌 수 있다. 前者와 같이 材質에 의해 발생하는 直交異方성은 “natural orthotropy”라 불리우며 木材에서 볼 수 있고 後者の 경우는 鋼橋의 床板, 航空機의 胴體과 같은 構造物에서 흔히 볼 수 있다. 이러한 構造物을 解析하는데에는 直交異方性平板理論을 사용하여 해석한다.⁽¹⁾

2.2.1 直交異方性 直角平板

航空機의 胴體 및 鋼橋의 床板, 合成桁橋 등에서 사용되는 인접한 위치에 배치된 柔軟한 리브에 의해 보강된 平板으로 그 形狀이 4角形인 경우이다. 이와 같은 平板은 반드시 直交異方性平板理論에 의해서 解析이 수행되어야 하나 平板의 두 主軸方向의 휨剛性を 連續인 分布로 理想化하여 얻은 結果와 實驗에 의한 結果가 잘 一致하므로 設計와 같은 實際인 경우에 있어서 直交異方性平板에서의 不連續인 휨剛性を 連續인 것으로 理想化하여 사용하기도 한다.^(1,12) 直交異方性平板의 支配微分方程式은 식 (6)과 같으며 Huber에 의하여 정리되었으므로 Huber의 方程式이라 불리운다.

$$D_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2H \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = P(x, y) \quad (6)$$

$$D_x = \frac{E_x t^3}{12(1 - \nu_x \nu_y)} \quad D_y = \frac{E_y t^3}{12(1 - \nu_x \nu_y)}$$

$$D_{xy} = \frac{G_{xy} t^3}{12}$$

$$2H = D_x \nu_y + D_y \nu_x + 4D_{xy}$$

여기서 D_x , D_y 는 각각 平板의 두 主軸 x, y 軸方向으로의 휨剛性이고 D_{xy} 는 비틀剛性이다.

식 (6)의 $2H$ 는 直交異方性平板의 有效비틀剛性으로 補剛材의 形狀과 配置에 따라 결정된다. 식 (6)은 서로 直交하는 두 主軸方向으로 다른 휨剛性を 갖는 平板의 휨에 대하여 사용되며, 一般解는 식 (7)과 같이 두 가지 解를 重疊시킨 것과 같다.

$$w = w_h + w_p$$

식 (7)에서 w_h 는 齊次微分方程式의 解, w_p 는 特殊解이며 w_h 는 境界荷重(edge forces)에 의한 平板의

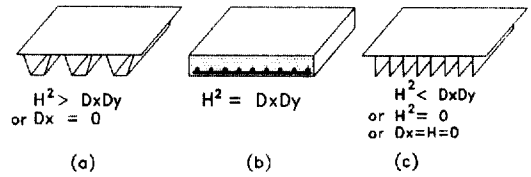


그림 2. 直交異方性平板의 形狀에 따른 휨剛性과 비틀剛性의 관계

처짐을 나타내고 w_p 는 單純支持로 假定한 平板에서 주어진 荷重 $P(x, y)$ 에 의해 발생되는 처짐을 나타낸다. 식 (7)이 一般解가 되기 위해선 實際 荷重이 載荷된 平板의 모든 境界條件을 만족시켜야 한다. 直交異方性平板에 대한 Huber의 方程式은 세 가지 剛性 D_x , H 와 D_y 의 관계에 의존하는 각각 다른 一般解를 갖는다. 直交異方性平板의 形狀에 따른 식 (6)의 剛性係數간의 관계는 그림 2에 나타내었다.⁽¹⁾

2.2.2 斜角을 갖는 直交異方性平板

等方性平板과 마찬가지로 直交異方性平板의 支配微分方程式 식 (6)은 주어진 斜角에 대응하는 傾斜座標系를 사용하여 표현할 수 있다. 그림 1(c)에 보인 바와 같이 直角座標系(x, y, z)와 傾斜座標系 (u, v, z)는 식 (8)과 같은 관계가 있다.

$$u = x + y \tan \psi \quad v = \frac{y}{\cos \psi} \quad (8)$$

1차미분

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 1, \quad \frac{\partial u}{\partial y} = \tan \psi, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{\cos \psi} \quad (9a)$$

4차미분

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \right) = \frac{\partial^4 w}{\partial u^4}$$

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right)$$

$$= \frac{\partial^4 w}{\partial u^4} \tan^2 \psi + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial u^3 \partial v} \tan \psi \frac{1}{\cos \psi}$$

$$+ \frac{\partial^4 w}{\partial u^2 \partial v^2} \frac{1}{\cos^2 \psi}$$

$$\frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^3 w}{\partial y^3} \right) \quad (9b)$$

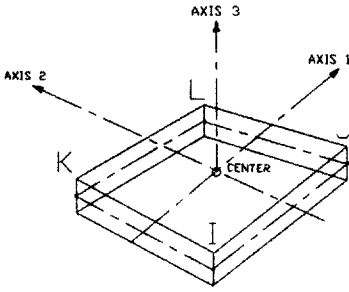


그림 3. 有限要素의 connectivity

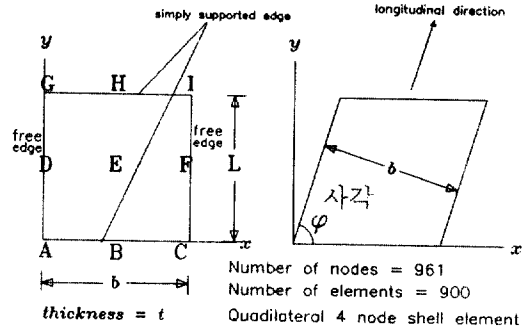


그림 4. 等方性平板의 解析모델

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\partial^4 w}{\partial u^4} \tan^4 \psi + 4 \frac{\partial^4}{\partial u^3 \partial v} \tan^3 \psi \frac{1}{\cos \psi} \\
 &+ 6 \frac{\partial^4 w}{\partial u^2 \partial v^2} \tan^2 \psi \frac{1}{\cos^2 \psi} \\
 &+ 4 \frac{\partial^4 w}{\partial u \partial v^3} \tan \psi \frac{1}{\cos^3 \psi} + \frac{\partial^4 w}{\partial v^4} \frac{1}{\cos^4 \psi}
 \end{aligned}$$

傾斜座標系로 표현된 식 (9a), (9b)의 導函數들을 식 (6)에 代入하여 정리하면 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned}
 &\frac{\partial^4 w}{\partial u^4} (D_x + 2H \tan^2 \psi + D_y \tan^4 \psi) \\
 &+ \frac{\partial w}{\partial^3 u \partial v} \left(4H \tan \psi \frac{1}{\cos \psi} + 4D_y \tan^3 \psi \frac{1}{\cos \psi} \right) \\
 &+ \frac{\partial^4 w}{\partial^2 u \partial^2 v} \left(2H \frac{1}{\cos \psi} + 6D_y \tan^2 \psi \frac{1}{\cos^2 \psi} \right) \\
 &+ \frac{\partial^4}{\partial u \partial v^3} \left(4D_y \tan \psi \frac{1}{\cos^3 \psi} \right) \\
 &+ \frac{\partial^4 w}{\partial v^4} \frac{1}{\cos^4 \psi} = P(x, y) \quad (10)
 \end{aligned}$$

解析的인 方法으로 식 (10)의 一般解를 구하는 것은 거의 不可能하다.⁽¹¹⁾

2.3 有限要素法

모든 형태의 構造物 解析에 사용할 수 있는 有限要素法은 많은 有限要素의 개발과 解析 프로그램의 발달로 인하여 그 사용이 점차 증가하는 趨勢이다. 直交異方性平板의 閉斷面 리브와 같은 補剛材에 대한 有限要素모델은 Dowling⁽¹⁷⁾에 의해 3次元

모델로서 제시되었으며 平板構造物에 대한 많은 研究^(5,6,15-17)가 有限要素法을 이용하여 수행되었다. 本研究에서는 斜角을 갖는 直交異方性 鋼床板을 汎用 有限要素解析 프로그램인 SAP90을 사용하여 解析하였다.

2.3.1 SAP90의 有限要素

鋼床板에서의 鋼板과 補剛材 사이에서 발생하는 引張, 壓縮 및 힘의 相互干涉效果를 고려하기 위하여 有限要素는 平板의 3次元의 撓舉動과 membrane 舉動을 考慮할 수 있는 4節點(quadrilateral)과 3節點(triangular) 有限要素를 사용하였다.

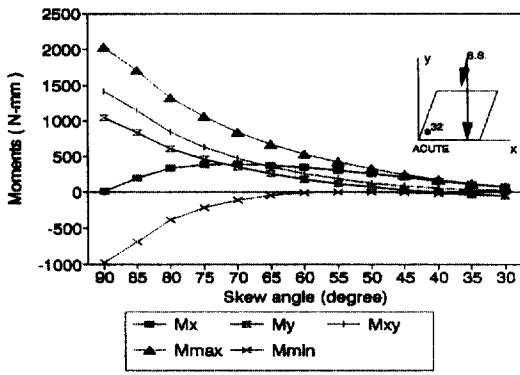
3. 數值解析 및 檢證

3.1 等方性平板

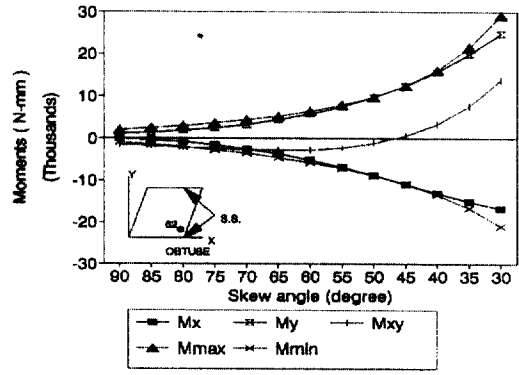
有限要素모델의 檢證과 斜角에 의한 平板의 舉動變化를 究明하기 위하여 일반적인 平板問題를 해석하였다. 정사각형 等方性平板의 마주보는 2邊을 單

表 1. 有限要素모델의 檢證

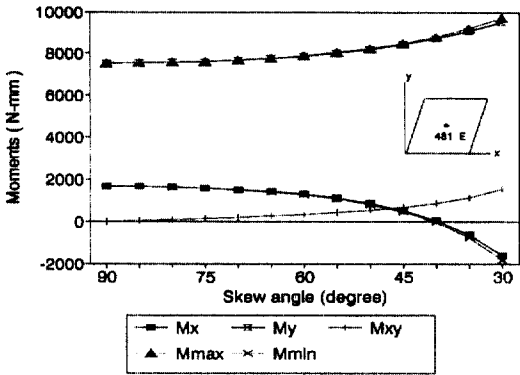
		M_x N·mm	M_y N·mm	처짐 mm
D	SAP90	0	8067.4	2.449
	EXACT ⁽²⁰⁾	0	8111.5	2.464
	ERR.(%)	0	0.54	0.61
E	SPA90	1668	7541	2.136
	EXACT ⁽²⁰⁾	1668	7539	2.139
	ERR.(%)	0	0.026	0.14



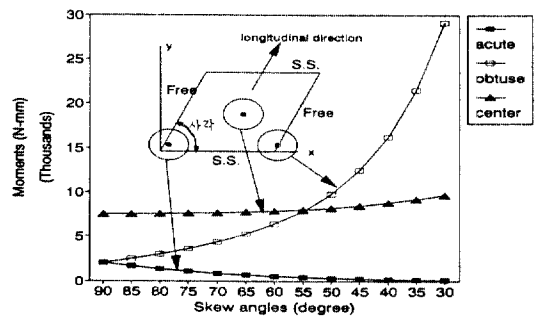
(a) 鋭角部



(b) 鈍角部



(c) 中央部



(d) M_{max} 의 比較

그림 5. 等方性平板의 모멘트 變化

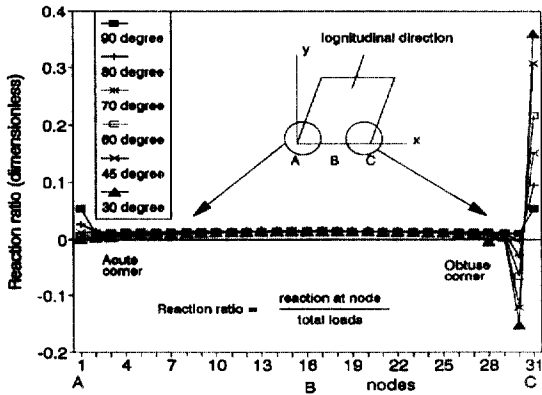


그림 6. 單純支持端의 反力比 變化

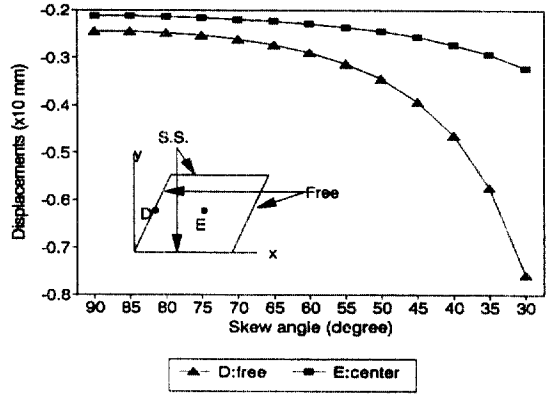


그림 7. 斜角에 따른 D點과 E點의 처짐變化

純支持시키고, 다른 2邊을 自由端으로하는 모델에 대하여 解析을 수행하였다. 그림 4와 같은 平板의 재원은 幅 $b=2\text{ m}$, 徑間 $L=2\text{ m}$, 두께 $t=20\text{ mm}$, 平板의 斜角 ϕ 는 $90^\circ\sim 30^\circ$ 사이로 變化시켰으며 縱軸方向에 直角方向인 幅 b 는 일정하게 유지하였

다. 作用荷重은 平板全體面積에 等分布荷重 $q=1539\text{ N/m}^2(0.0157\text{ kg/cm}^2)$ 이고 材質은 彈性係數 $E=205.8\text{ GPa}(2.1\times 10^6\text{ kg/cm}^2)$, Poisson比 $\nu=0.3$ 이다. 等方性平板에 대한 有限要素解析結果를 그림 5, 그림 6과 그림 7에 나타내었다.

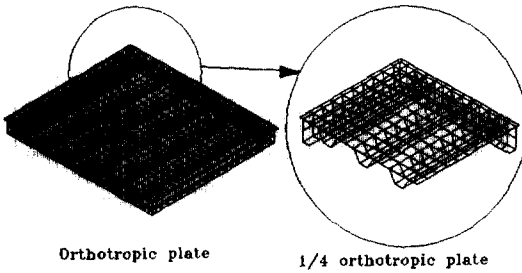


그림 8. 直交異方性平板의 形狀

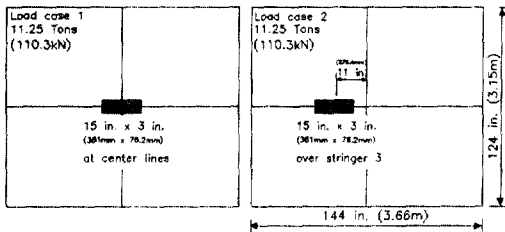


그림 9. 荷重의 크기 및 作用位置

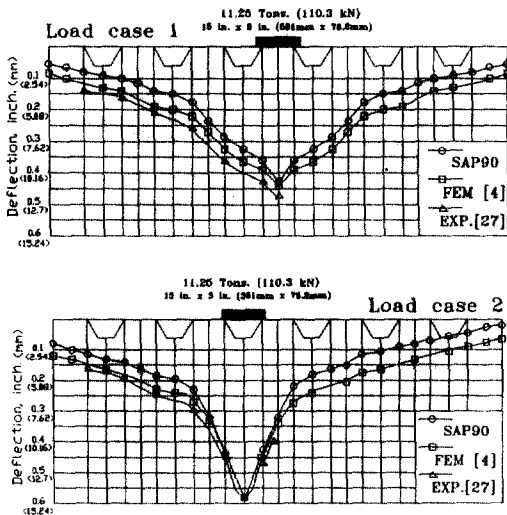


그림 10. SAP90과 R. Tinawi 등⁽⁴⁾의 結果比較

그림 5(a), (b)와 같이 斜角이 減少함에 따라 等方性平板의 모멘트는 銳角部에서 減少하며, 鈍角部에서는 增加하는 傾向을 보인다. 반면에 平板의 中央部에 대한 모멘트는 그림 5(c)와 같이 斜角에 의한 영향이 銳角部나 鈍角部に 비하여 거의 일정함을 나타낸다. 그림 5(d)는 中央部, 銳角部 및 鈍角部에서의 斜角에 따른 最大 모멘트의 變化를 나타내며 약 55° 以下の 斜角에서 中央部보다도 鈍角部の

最大 모멘트값이 더 크게 발생함을 알 수 있다. 그림 6은 斜角의 減少에 따라 鈍角部에서는 過大反力 및 비틀림이 발생하며 그 變動이 매우 복잡함을 나타낸다.

또한 처짐의 變化에 대한 그림 7은 斜角의 減少에 따라 平板의 中央部(E)보다는 自由端의 中央部(D)가 더 큰 影響을 받고 있으며 이 부분의 補強이 必要하다는 것을 나타낸다.

3.2 直交異方性平板

그림 8과 같이 閉斷面 리브로 補強된 直交異方性平板의 有限要素모델에 대한 檢證으로 셀要素를 사용한 結果와 R. Tinawi 등⁽⁴⁾의 結果를 比較하였다. 解析에 사용된 直交異方性平板의 材質 및 치수는 R. Tinawi 등이 사용한 모델과 同一하며, 그림 9와 같이 分布荷重으로 作用하는 荷重을 等價의 節點荷重으로 바꾸어 계산하였다. 直交異方性平板은 1199개의 節點과 1308개의 셀要素를 사용하여 모델링하였다. 그림 10에 나타나 있는 바와 같이 R. Tinawi 등의 結果와 本 研究에서 사용한 SAP90 結果의 變位形狀이 類似하며 거의 일정한 差異를 보이는 것은 實驗 모델이 彈性받침에 놓인 反面에 有限要素모델에서는 이러한 彈性받침을 스프링으로 모델링했기 때문에 발생한 것으로 간주된다.

本 研究에서 사용한 SAP90의 4節點 및 3節點 셀要素는 直交異方性平板에 대한 精巧한 有限要素 모델에 사용되어 충분한 精確度의 結果를 제공하였다.

3.3 콘크리트 슬래브 床板

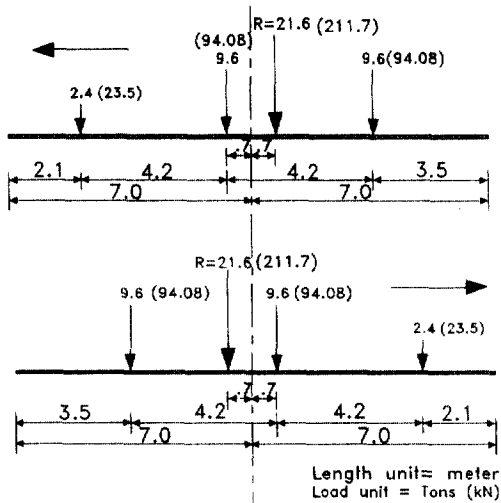
3.1절의 그림 4와 같은 境界條件을 갖는 等方性 슬래브 床板에서의 斜角에 따른 變動變化를 究明하였다. 슬래브 床板의 계원 및 值數는 그림 4의 形狀에 幅 $b=14\text{m}$, 徑間 $L=14\text{m}$, 두께 $t=1\text{m}$ 이며, 콘크리트의 彈性係數 $E=25.48\text{GPa}(2.6 \times 10^9\text{kg/m}^2)$, Poisson比 $\nu=0.2$ 를 적용하였다.

3.3.1 作用荷重

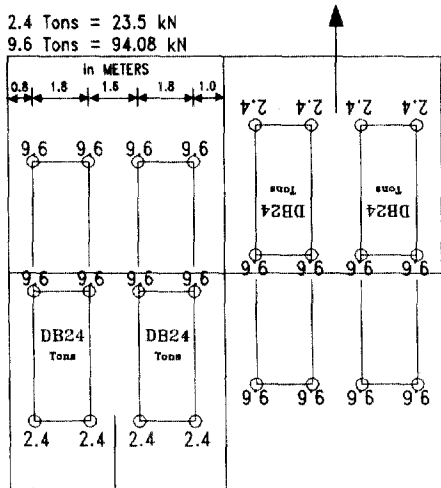
그림 11에서와 같이 作用荷重은 床板에 DB24荷重을 縱方向으로 한 대, 橫方向으로 最大 4대를 最大 휨모멘트가 발생하는 位置에 載荷시켰다.⁽¹⁹⁾

3.3.2 모멘트, 처짐 및 反力比의 變化

콘크리트 슬래브 床板에 DB24荷重 4대를 載荷시



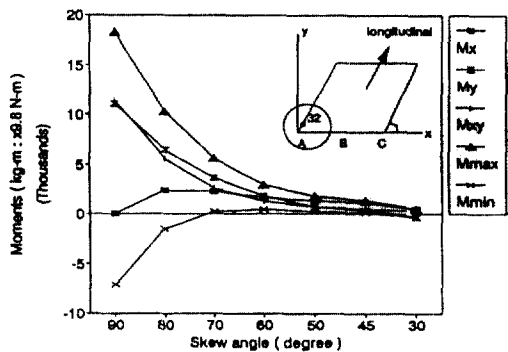
(a) 最大모멘트 발생位置



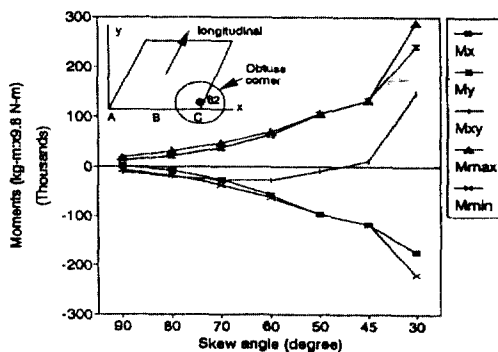
(b) DB-24 荷重의 載荷位置

그림 11. DB-24 荷重과 作用位置

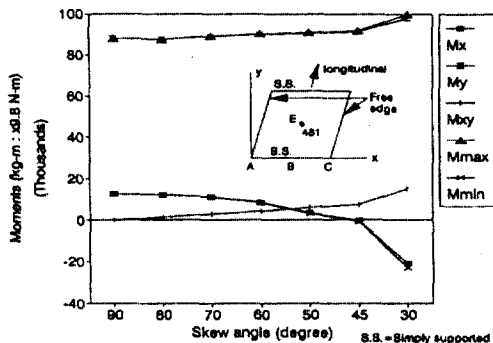
킨후 斜角을 90°부터 30°까지 變化시킨 有限要素 모델의 解析結果는 等分布荷重이 載荷된 等方性平板의 結果와 類似的한 樣相을 보인다. 斜角이 減少함에 따라 鈍角部에서는 모멘트와 反力比가 크게 발생하였다. 특히 그림 13(b)는 斜角이 減少함에 따라 鈍角部の 正·負反力의 크기가 增加함을 나타내고 그림 14와 같이 單純支持端으로부터 약 50 mm 떨어진 부근에서의 처짐形狀은 斜角이 減少함에 따라 鈍角部에서 비틀림이 增加함을 나타내고 있으며 약 60° 以下の 斜角에서 비틀림이 급격하게 커짐을 알 수



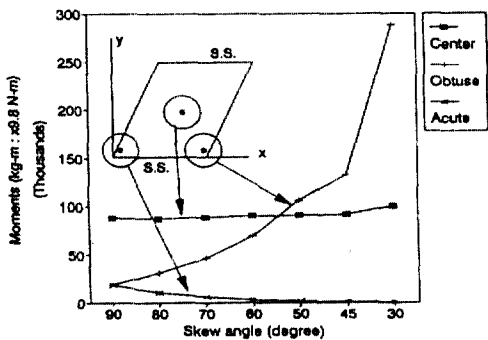
(a) 銳角部



(b) 鈍角部

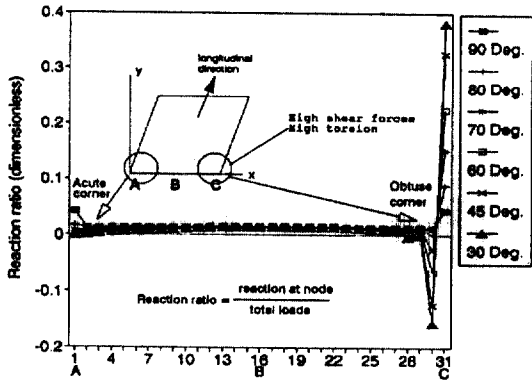


(c) 中央點

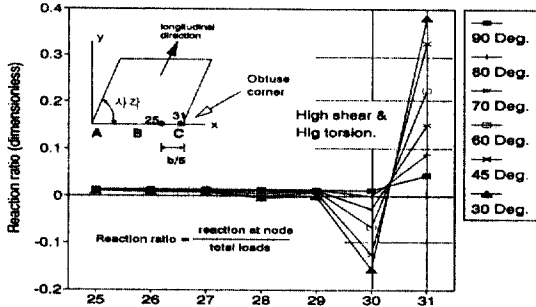


(d) M_{max} 의 變化比較

그림 12. 콘크리트 슬래브의 모멘트 變化



(a) 單純支持端의 反力比 變化



(b) 鈍角部에서의 反力比 變化

그림 13. 斜角에 따른 反力比의 變化

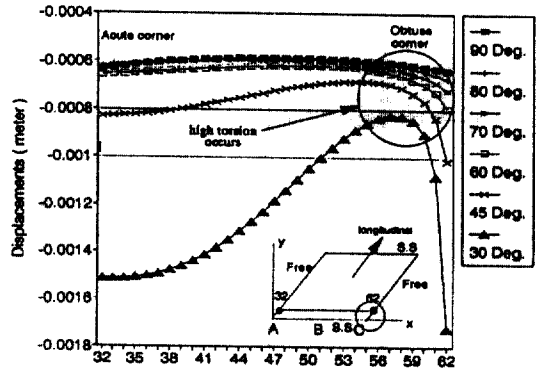


그림 14. 變位曲線-單純支持端 近處

있다. 이와 같은 비틀림으로 인하여 鈍角部의 上端에는 過大한 負모멘트가 발생한다.

3.4 鋼床板

作用荷重인 DB-24 4대와 幅, 徑間의 크기는 콘크리트 슬래브 床板의 경우와 같고, 鋼板, 縱方向의 閉斷面리브와 橫보로 支持된 直交異方性인 單純徑間 鋼床板에 대하여 有限要素解析을 수행하였다. 鋼床板은 床板의 네 모서리 부분만이 單純支持되어 있다.

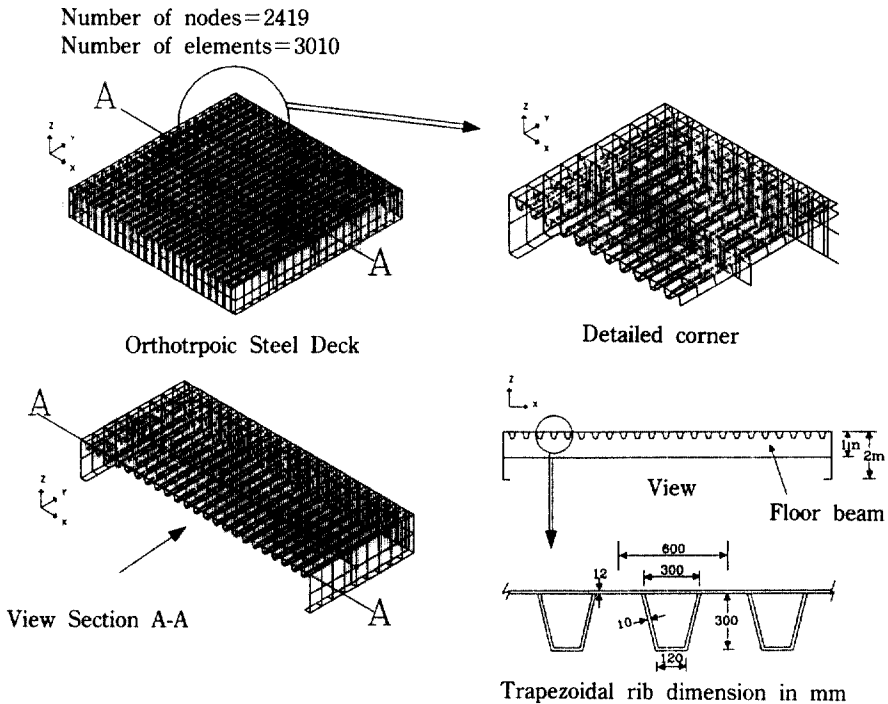
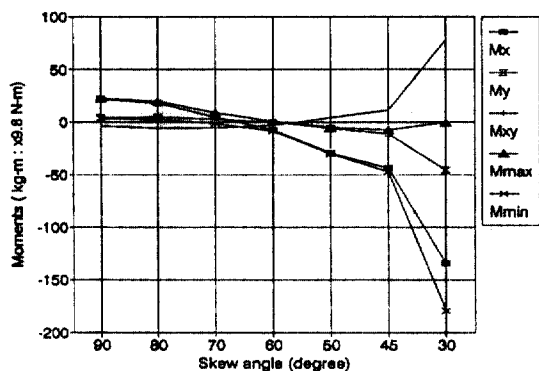
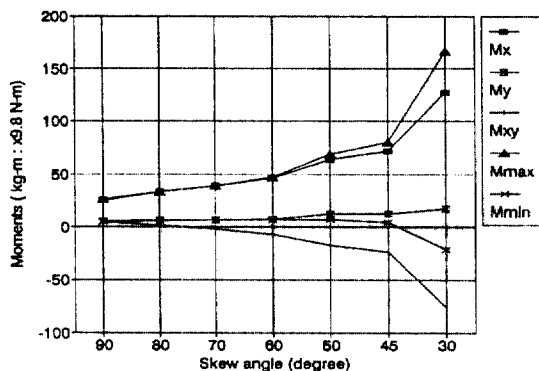


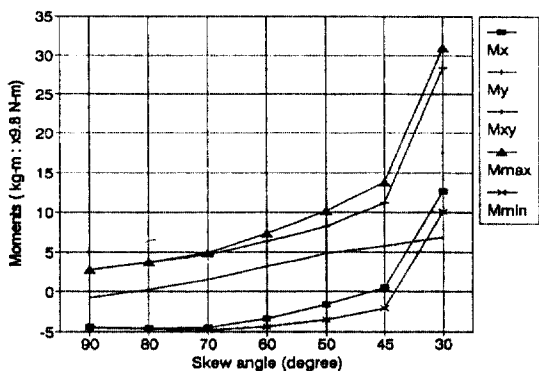
그림 15. 鋼床板의 형상 및 제원



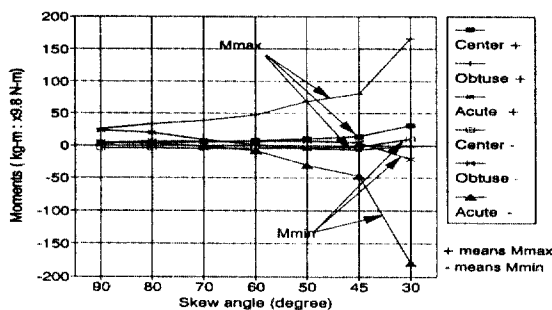
(a) 鋭角部



(b) 鈍角部



(c) 中央點



(d) M_{max} 의 變化比較

그림 16. 斜角에 따른 모멘트의 변화

閉斷面리브의 中心間隔, 橫보의 間隔은 文獻^(12,18)을 參照하여 각각 0.3 m와 3.5 m를 취하였다.

鋼床板의 鋼材는 彈性係數 $E=205.8 \text{ GPa}(2.1 \times 10^{10} \text{ kg/m}^2)$, Poisson比 $\nu=0.3$ 인 SS41鋼을 사용하였다. 鋼板의 두께는 12 mm, 사다리꼴 閉斷面리브의 두께는 10 mm, 가로보의 두께는 14 mm를 選擇하였다. 單純徑間 鋼床板의 有限要素모델은 3.2의 直交異方性平板에서 사용하였던 4節點 및 3節點 稜要素를 사용하여 實際形狀과 同一한 形狀으로 2419개의 節點과 3010개의 稜要素로 有限要素모델이 構成되었다. 가로보의 치수와 사다리꼴 閉斷面 리브의 치수는 그림 15에 표시된 바와 같다.

3.4.1 모멘트, 처짐 및 反力比의 變化

콘크리트 슬래브 床板과 마찬가지로 斜角을 $90^\circ \sim 30^\circ$ 사이로 變化시킨 鋼床板의 有限要素모델을 解析하여 그림 16, 그림 17 및 그림 18과 같은 結果를 얻었다.

鋼床板에서도 斜角이 끼치는 影響은 콘크리트 슬

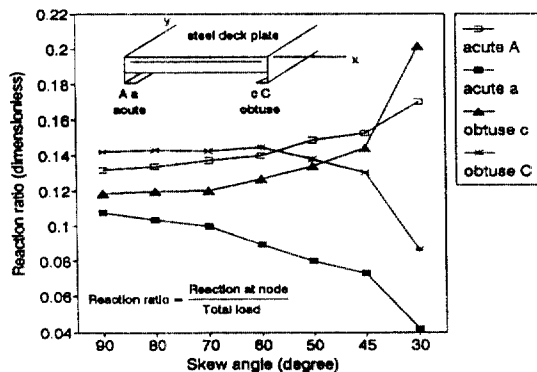


그림 17. 鋼床板 支持部의 反力比變化

래브와 類似한 樣相을 나타내고 있다. 다만, 다른 支持條件으로 인하여 中央部의 모멘트값이 斜角의 減少에 따라 增加하나 그 變化의 幅은 鋭角部, 鈍角部에 비하여 매우 작음을 알 수 있다(그림 16(c), (d)). 斜角이 약 45° 로 減少하면서부터 鋭角部, 鈍角部 및 中央部의 모멘트값이 급격한 變化를 나타

내고 있다.

4. 結 論

斜橋의 床板은 그 斜角의 크기에 따라 直橋의 床板과는 判異하게 다른 舉動을 한다. 床板의 鈍角部에서는 斜角의 減少에 따라 理論解로는 구할 수 없는 特異點(singularity)이 발생한다. 本 研究에서는 斜橋의 床板에 斜角이 끼치는 影響과 床板의 設計시 고려해야할 脆弱部에 대한 舉動을 考察하였다. 얻어진 結果를 要約하면 다음과 같다.

(1) 等方性平板에서는 斜角이 減少함에 따라 鈍角部の 모멘트는 增加, 銳角部の 모멘트는 減少하였으며 中央部の 모멘트는 거의 一定하였다. 약 55° 정도의 斜角에서 鈍角部の 最大모멘트값이 中央部の 最大모멘트값을 超過하며 單純支持端의 反力分布가 斜角의 減少에 따라 鈍角部로 集中되는 現狀을 알 수 있다. 처짐에 끼치는 斜角의 影響은 中央部보다도 自由端에서 더욱 크게 발생하였다(그림 7).

(2) 콘크리트 슬래브의 경우 斜角이 끼치는 影響은 等方性平板의 경우와 類似함을 알 수 있다. 특히 鈍角部에서 발생되는 過大한 正反力과 負反力は 過大한 비틀림과 負모멘트를 誘發시키며 이는 斜角의 減少가 鈍角部에 至大한 影響을 끼친다는 것을 나타낸다(그림 13).

(3) 鋼床板의 舉動은 等方性平板의 경우와 類似하나 銳角部에서 過大한 負모멘트가 발생함을 알 수 있다(그림 16(a)).

(4) 本 研究의 結果는 斜橋의 床板形式에 상관없이 斜角의 크기에 따라 그 舉動이 매우 큰 差異가 있음을 나타낸다. 斜橋의 設計시 斜角이 減少함에 따라 鈍角部에 集中되는 反力分布에 대한 보강이 必要하며, 약 55° 以下로 減少할 경우는 中央部보다도 鈍角部가 脆弱한 部分이 됨을 알 수 있다. 따라서 斜角이 약 55° 以下인 斜橋의 設計시 반드시 鈍角部の 過大 負모멘트, 비틀림에 대한 正確한 계산이 必要하며, 이러한 現狀은 콘크리트 床板形式에 있어서 불리한 점이라고 할 수 있다.

(5) 本 研究의 結果로부터 斜橋의 設計시 콘크리트 슬래브床板과 鋼床板의 경우 대체로 適切한 許容斜角은 55°, 最大許容斜角은 45°로 提示한다. 70° 以下の 斜角에서부터는 鈍角部の 反力集中에 대하여

床板과 主桁의 보강이 必要함을 確認할 수 있다. 過少한 斜角을 갖는 斜橋의 床板에는 引張·壓縮에 대하여 同等하게 抵抗하며 荷重分配能力이 탁월한 鋼材의 사용이 바람직하다.

本 研究는 斜橋의 斜角에 따른 床板의 靜的인 舉動을 究明하였으나, 이후 動的인 舉動뿐만 아니라 非線形 舉動의 究明에 대한 研究가 後續되어 最近 그 建設이 늘고 있는 斜橋의 設計指針을 제시하는 것이 必要하리라 생각된다.

感謝의 글

本 研究는 1993年度 포항종합제철주식회사의 研究費支援으로 遂行되었으므로 이에 감사의 뜻을 표한다.

參考文獻

1. Troitsky, M.S., *Orthotropic Bridges Theory and Design*, 2nd Ed., The James F. Lincoln arc Welding Foundation, Ohio, 1987.
2. Huffington, N.J., Jr., "Theoretical Determination of Rigidity Properties of Orthogonally Stiffened Plates", *J. of Applied Mechanics, Transactions, ASME*, Vol. 78, Paper No. 55-A-12, Mar., 1956, pp. 15-20.
3. Kennedy, J.B. and Davalath S.R. Gupta, "Bending of Skew Orthotropic Plate Structures", *J. of the Structural Division, ASCE*, Vol. 102, No. ST8, August, 1976, pp. 1559-1574.
4. Tinawi, R. and Redwood, R.G., "Orthotropic Bridge Decks with Closed Stiffeners-Analysis and Behaviour", *Computers & Structures*, Vol. 7, 1977, pp. 683-699.
5. Herrmann, L.R., "Finite Element Bending Analysis for Plates", *J. of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 93, No. EM5, Proc. Paper 5822, Oct., 1967, pp. 13-26.
6. Just, D.J., "Behavior of Skewed Beam and Slab Bridge Decks," *J. of the Structural Division, ASCE*, Vol. 107, No. ST2, February, 1981.
7. Rusch, H. and Hergenroder, A., *Influence Surfaces for Moments in Skew Slabs*, Munich, Technological University. 1961.
8. Balas, J. and Hanuska, A. *Influence Surfaces of Skew Plates*, Vydaratelstvo Slovenskej Akademie

- Vied, Bratislava. 1964.
9. Hambly, E.C., *Bridge Deck Behaviour*, 2nd Ed., E & FN SPON, 1991, pp. 188-198.
 10. Kennedy, J.B. and Simon N.G., "Linear and Non-linear Analyses of Skewed Plates", *J. of Applied Mechanics*, June, 1967, pp. 271-277.
 11. Szilard, R., *Theory and Analysis of Plates Classical and Numerical Methods*, Prentice-Hall, New Jersey, 1974, pp. 269-303, 361-369, p. 671.
 12. *Design Manual for Orthotropic Steel Plate Deck Bridges*, AISC, New York, 1963
 13. Krettner, J., "Beirag zur Berechnung schiefwinkliger Platten", *Ing.-Arch.*, Vol. 22, 1954, pp. 47-54.
 14. Lardy, P., "Die strenge Lösung des Problems der schiefwinkliger Platte", *Schweiz, Bauzeitung*, Vol. 67, April, 1949, pp. 207-209.
 15. Huang, H.-C., *Static and Dynamics Analyses of Plates and Shells Theory, Software and Applications*, Springer-Verlag, 1989.
 16. Dagher, H., Elgaaly, M. and Kankam, J., "Behavior of Integral Reinforced Concrete Skewed Slab Bridges", *Proceedings of the 4th Rail Bridge centenary conference*, Vol. 1, 1990, pp. 236-244.
 17. Dowling, P.J., "The Behaviour of orthotropic steel deck bridges", *Conference of Developments in Bridge Design and Construction*, University College, Cardiff, 1971.
 18. Heins, C.P. and Firmage, D.A., *Design of Modern Steel Highway Bridges*, John Wiley & Sons, New York, 1979, pp. 154-226.
 19. 도로교 표준시방서, 건설부, 1992년.
 20. Timoshenko, S.P. and Woinowsky-Krieger, S., *Theory of Plates and Shells*, 2nd Ed., McGraw-Hill, 1970, pp. 214-219, 318-319, 364-377.
 21. Lekhnitskii, S.G., Tsai, S.W. and Cheron, T., *Anisotropic Plates*, Gordon & Breach, New York, 1968, pp. 318-393.
 22. Powell, G.H. and Ogden, D.W., "Analysis of Orthotropic Steel Plate Bridge Decks", *J. of the Structural Division*, ASCE, Vol. 95, No. ST5, May, 1969, pp. 909-922.
 23. Pama, R.P. and Cusens, A.R., *Bridge Deck Analysis*, John Wiley & Sons, Great Britain, 1975, pp. 29-53, pp. 73-83, pp. 151-152, pp. 257-272.
 24. Bakht, B., "Analysis of Some Skew Bridges as Right Bridges", *J. of the Structural Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 10, October, 1988, pp. 2307-2322.
 25. Jaeger, L.G. and Bakht, B., *Bridge Analysis by Microcomputer*, McGraw-Hill, 1989, pp. 145-182.
 26. 鋼橋의 解析 및 設計, 교재 5-4, 전산구조공학회, 1992년.
 27. Dowling, P.J., *The behaviour of Stiffened plate bridge decks under wheel loading*, Ph.D. Dissertation, Imperial College of Science & Technology, University of London, 1968
 28. Wilson, E.L. and Habibullah, A., *SAP90-Structural Analysis User Manual*, Computers and Structures, Inc., Berkely, California, 1992.

(接受 : 1994. 5. 13)