

鋼部材 이음부의 疲勞舉動에 關한 基礎的 研究

李 鎔 澤* · 鄭 榮 和**

A Fundamental Study on the Fatigue Behavior in the Joints of Steel Members

Lee Yong Jae · Chung Yeong Wha

ABSTRACT

For the study of the fatigue behavior, high-strength bolted connections on a small scale were manufactured, and carried on fatigue tests. Its experimental values were analysed by stress-fatigue life (S-N) curve. Three types of specimens: the base metal, the circular hole and the welded specimens had same net section were made. Through the same tests those experimental values were compared with those of the high-strength bolted connections.

The results of these studies are as followings.

It was found that the fatigue strength in $F_{n=100,000}$ and $F_{n=2,000,000}$ of the high-strength bolted connections were much more about 14% and 16% than that of the base metal specimen. It was thought that this trend was due to frictional force increasing fatigue strength.

It was known that fatigue strength in $F_{n=100,000}$ and $F_{n=2,000,000}$ of the welded joints were less 29% and 21% than that of base metal specimen. It was thought that that trend was due to weld flaw

It was appeared that the fatigue strength in $F_{n=100,000}$ and $F_{n=2,000,000}$ of the high-strength bolted connections were much more about 38% and 30% than that of welded joint. It was thought that it was due to both frictional force increasing the fatigue strength in bolted connections and weld flaw decreasing the fatigue strength in welded connections.

It was found that the fatigue strength in $F_{n=100,000}$ and $F_{n=2,000,000}$ of the B3 specimens were much more 2% and -2% than that of the B4 specimen. It was thought that that trend was due to the frictional force, which concerned with shape of specimen.

It was known that the fatigue strength in $F_{n=100,000}$ and $F_{n=2,000,000}$ of the specimen with circular hole was less 61% and 65% than that of base metal. It was known that the allowable stress for bolted joint was higher than that of welded Joints.

* 江原大學校 大學院 土木工學科 卒, 興和工業社, 設計部.

** 江原大學校 工科大學 土木工學科 副教授.

If this research is continued and more data are accumulated it can be expected that a basic pattern to provide the indicator of the fatigue design of the bolted connections of steel structures and presume the safety and lifeproof of existing structures is given.

1. 序 論

鋼材는 構造物에 대해 部材의 크기와 비용, 무게 등을 줄여주기 때문에 建築, 橋梁, 鐵道, 車輛, 기타 구조물에 널리 쓰이고 있으나, 지금까지는 鋼部材를 設計함에 있어서 一次元의 인 平均應力만을 고려하거나, 二次元的인 平面應力을 고려할 경우에도 應力集中現象을 소홀히 하고 平均應力만을 고려함이 보통이었으며, 또한 單調引張實驗에 의한 力學的 性質만을 設計資料로 삼는 것이 常例였다.¹⁾

그러나, 部材 中에 rivet 구멍, bolt 구멍, notch, 급격한 단면변화, 生産이나 製作 혹은 施工 및 供用 中에 생긴 龜裂이나 摩耗 등의 흠(flaw)이 있으면 그 주위에 至大한 應力集中이 일어나서²⁾³⁾ 平均應力만을 고려하여 解析할 경우 보다 매우 낮은 應力에서 이미 局部的인 降伏 및 極限應力에 到達하여 이 部分부터 豫測치 못한 破壞를 일으키고, 더우기 反復荷重을 받게 되면 매우 낮은 應力에서도 疲勞現象을 招來하여⁴⁾⁵⁾ 不意의 破壞를 일으킬 수가 있다.

最近에는, 工業技術이 발달함에 따라 鋼構造物이 大型化해지고 交通수단이 重量化 및 高速化해지며 computer에 의한 最適化設計의

傾向과 더불어 安全率이 減少해 가는 등, 安全 및 信賴性을 위협하는 要因이 증가해 감에 따라 應力集中 및 疲勞現象으로 인한 破壞事故가 종종 發生하고 있다.⁶⁾⁷⁾⁸⁾

그러나, 실제 構造物에 適用함에 있어서는 一般的으로 反復荷重을 받는 構造物의 수명은 주로 이음部의 疲勞強度에 지배된다.⁹⁾ 그러므로 이음部의 疲勞舉動에 대한 研究는 既存의 鋼構造物 및 앞으로 建設될 鋼構造物의 疲勞에 대한 安全性을 評價하고 改善하기 위해 必須的인 것이다.

따라서, 本 研究는 現在 現場施工에서 많이 使用하는 連結部 永久結合方法인 高張力 bolt 摩擦이음部의 疲勞舉動을 究明하여 疲勞進行을 豫測하고, 실제 疲勞設計에 適用되는 基礎資料를 求하기 위하여 行해졌다.

2. 實 驗

2.1. 材 料

本 實驗에 使用된 鋼材는 KS D 3503 一般 構造用 壓延 鋼材 SS41로 KS B 0801의 標準試驗片 1號에 의한 引張試驗 結果 얻어진 機械的 性質은 Table 2-1, 成分分析에 의한 化學成分은 Table 2-2와 같다.

Table 2-1 Mechanical Properties of Base metal

Steel	Yielding strength (kg /cm ²)	Tensile strength (kg /cm ²)	Elongation (%)
SS 41	2800	4300	18

Table 2-2 Chemical Compositions of Base metal

Steel	Composition (%)				
	C	Mn	P	S	Si
SS 41	0.16	0.69	0.010	0.019	0.23

bolt는 KS B 1010의 F 10 T M 16 bolt를 사용하였고, washer는 KS B 1326의 規定에 따르는 材質을 갖는 것을 사용하였다.

또, 鎔接棒은 KS D 7004와 KS D 3508을 따를 低水素系 E 1316이 사용되었다.

2.2. 試驗片의 形狀 및 尺寸

本 研究의 이음部 model로 複剪斷高張力 bolt 摩擦이음의 形態가 選定되었다. 그 形狀 및 尺寸은 Fig 2-1과 같다.

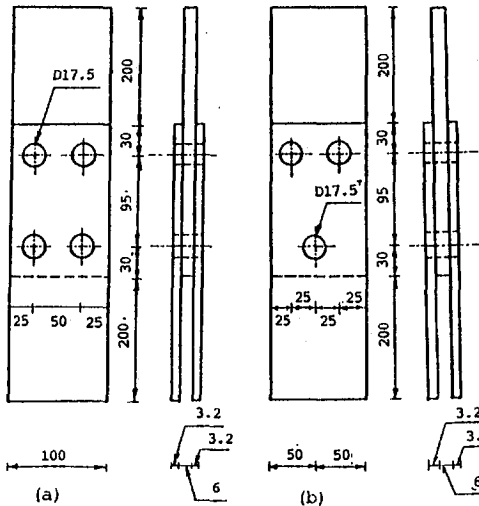


Fig. 2-1 (a) Bolted specimens with 4 hole (B4), (b) 3 hole (B3)

그리고, 高張力 bolt 摩擦이음한 試驗片과 比較하기 위하여 素材試驗片, 鎔接이음 試驗片 및 円구멍을 갖는 試驗片을 準備하였으며, 그 斷面積은 高張力 bolt 摩擦이음한 試驗片의 純

斷面積과 같게 製作하였다. 形狀 및 尺寸은 Fig. 2-2와 같다.

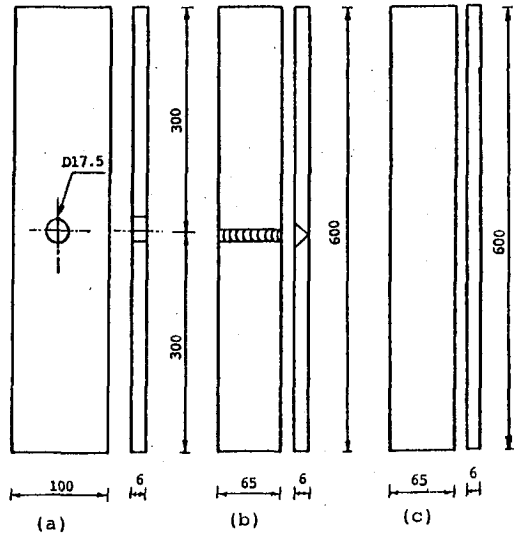


Fig. 2-2 (a) With circular hole (C), (b) Welded (W) and (c) Base metal (M) specimens

2.3. 試驗片의 製作

2.3.1 bolt 이음한 試驗片

板은 加工하지 않은 尺寸로 剪斷 (shearing cut)하고 다음에 正確한 尺寸로 加工하였다. 모든 bolt 구멍은 AISC 規定¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾에 따라 17.5 mm로 正確히 鑿었고 組立하기 前에 接觸表面을 깨끗이 하기 위하여 acetone 으로 닦아냈다. 이음部의 nut 아래에는 KS B 1326의 規定에 따르는 材質을 갖는 washer를 사용하였다. bolt는 密着 狀態 (snug tight)로 하기 위해 1,000 kg·cm의

torque로 조인 후 摩擦이음이 되도록 추가로 nut를 180° 回轉시켰다.²³⁾

2.3.2 鎔接이음한 試驗片

bolt이음한 試驗片의 純斷面積과 같은 幅을 갖도록 加工한 後 手動式被覆아크鎔接(manual arc covered welding) 法을 使用하여 鎔接하였다. 使用된 鎔接棒은 E 4316이고 鎔接形態는 Fig 2-3과 같다.

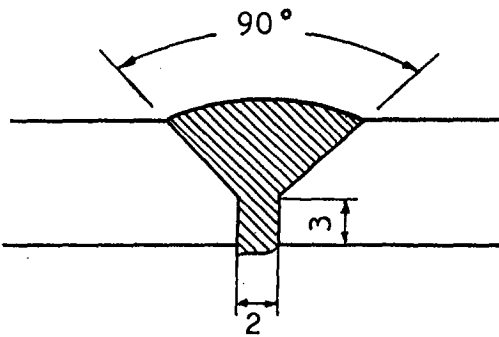


Fig. 2-3 Welded section

2.3.3 素材試驗片

鎔接이음한 試驗片과 같은 幅과 두께를 갖도록 製作하였다.

2.3.4 円구멍을 갖는 素材試驗片

板의 中央에 bolt 구멍과 같은 지름 17.5 mm의 구멍을 갖도록 製作하였다.

2.4. 疲勞試驗荷重

疲勞試驗은 荷重을 一定하게 維持시키는 荷重制御法을 擇하였고 載荷는 oto-tension으로 하였으며 作用應力은 降伏應力の 100~50%의 範圍에서 行하였다.

3. 結果 및 考察

3.1. 引張試驗結果

먼저 萬能試驗機로 各 試驗片에 對해 引張試驗을 行하였다. 그 結果 降伏強度 및 引張強度는 Table 3-1과 같았다.

Table 3-1 Results of Tensile tests

Specimen	Yielding strength (kg/cm ²)			Tensile strength (kg/cm ²)		
	1st	2nd	Average	1st	2nd	Average
B	2,950	3,410	3,180	4,150	4,410	4,280
W	3,370	3,150	3,260	4,460	4,200	4,330
B3	4,100	3,860	3,980	5,250	5,150	5,200
B4	4,300	4,406	4,353	4,950	5,100	5,025
C	3,610	3,450	3,530	4,340	4,000	4,170

3.2. 實驗最大應力-疲勞壽命(S-N)曲線

위의 實驗結果를 log-log紙에 S-N線圖로나

타내면 Fig 3-1, Fig 3-2, Fig 3-3, Fig 3-4, Fig 3-5와 같다.

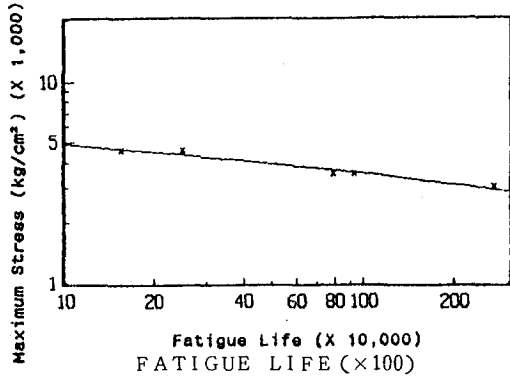


Fig. 3-1 Results on Bolted Specimens (B3 series)

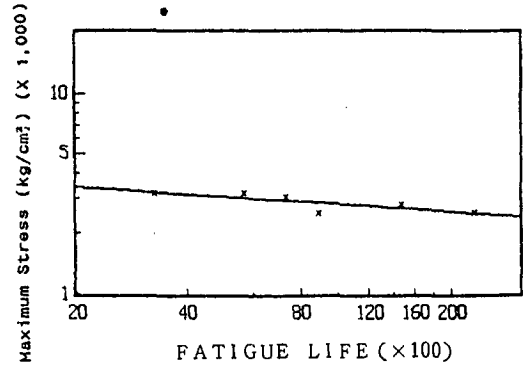


Fig. 3-4 Results of Fatigue Tests on Base Metal (M series)

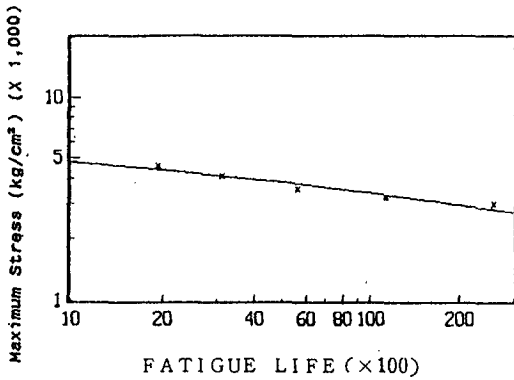


Fig. 3-2 Results on Bolted Specimens (B4 series)

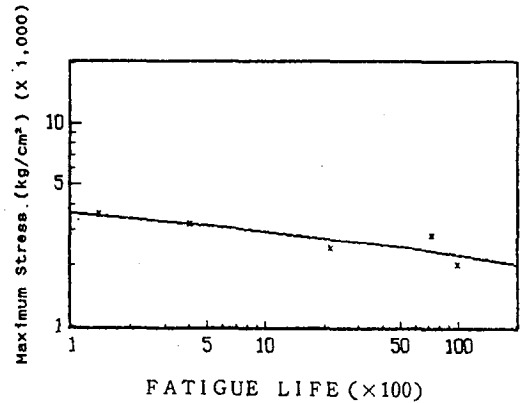


Fig. 3-5 Results on Specimen With Circular Hole (C series)

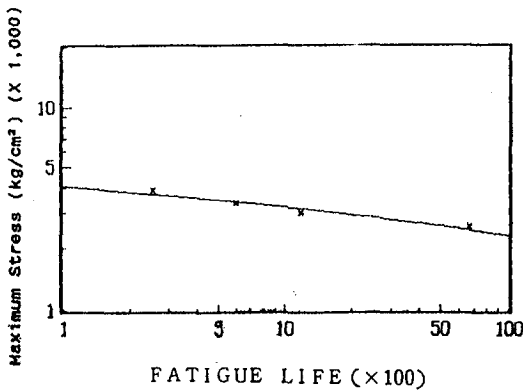


Fig. 3-3 Results on Welded Specimens (W series)

이 結果로서 다음 式⁹⁾에 의해 豫상되는 疲勞強度를 求할 수 있다.

$$F_n = S_n (N/n)^k$$

여기서

F_n : n 회에서의 疲勞強度

S_n : S-N線圖에서 N 회의 破壞應力

N : 實驗에 의한 疲勞壽命

n : F_n 을 求하기 위한 豫상 疲勞壽命

k : S-N線圖에서 直線의 기울기

各 實驗結果를 比較하기 위하여 위 表에 適當한 回數 $n=100,000$ 과 $n=2,000,000$ 回

의 疲勞強度를 計算하였다. 그 값은 Table 3-2와 같았다.

Table 3-2 Computed fatigue strength

Specimens	Fatigue Strength	
	$F_n = 100,000$ (kg/cm ²)	$F_n = 2,000,000$ (kg/cm ²)
M	4,436	2,698
C	2,710	1,776
W	3,155	2,142
B 4	5,128	3,010
B 3	5,069	3,065

3.3. 試驗片의 種類에 따른 疲勞強度의 比較

우선 이음부가 있는 경우와 없는 경우의 疲勞強度差異를 알아보기 위하여 bolt 이음부와 素材試驗片의 關係 (Fig 3-1, Fig 3-2, Fig 3-4)를 檢討하였다. 純斷面積에 의해 計算했을 경우 bolt 이음부가 素材試驗片에 비해 $F_n = 100,000$ 은 B 3形의 경우 114% B 4形의 경우 116%이고, $F_n = 2,000,000$ 은 B 3形이 114%, B 4形이 112%로 되었다. 또 全斷面積으로 計算했을 경우 $F_n = 100,000$ 은 B 3形이 77%, B 4形이 78%이었으며 $F_n = 2,000,000$ 은 B 3形이 76%, B 4形이 76%임을 알 수 있었다.

純斷面積으로 計算한 경우에서 疲勞強度가 크게 나타나는 것은 摩擦力 때문이라 생각된다.

또, 銲接이음부가 있을 경우와 없을 경우에 대해 알아보기 위해 Fig 3-3과 Fig 3-4를 比較해 보면, 銲接이음은 素材에 비해 $F_n = 100,000$ 이 71%, $F_n = 2,000,000$ 이 79.4%의 疲勞強度를 갖는다는 것을 알 수 있어 銲接이음에 의한 缺陷이 疲勞強度를 減少시킨다고 생각된다.

bolt 이음부의 形態에 따른 疲勞強度의 差異를 究明하기 위하여 Fig 3-2와 Fig 3-3

을 比較해 보면 $F_n = 100,000$ 은 B 4形이 B 3形에 비해 2% 높으나 $F_n = 2,000,000$ 의 경우에는 오히려 B 3形이 B 4形에 비해 2% 높은 疲勞強度를 갖는다는 것을 알 수 있었다. 이것은 bolt의 組立形態에 따른 摩擦力의 變化에 의한 것이라 생각된다.

bolt 이음부의 形態에 따른 疲勞強度의 差異를 究明하기 위하여 Fig 3-2와 Fig 3-3을 比較해 보면 $F_n = 100,000$ 은 B 4形이 B 3形에 비해 2% 높으나 $F_n = 2,000,000$ 의 경우에는 오히려 B 3形이 B 4形에 비해 2% 높은 疲勞強度를 갖는다는 것을 알 수 있었다. 이것은 bolt의 組立形態에 따른 摩擦力의 變化에 의한 것이라 생각된다.

円구멍의 影響을 究明하기 위하여 Fig 3-4와 Fig 3-5를 比較해 보면 円구멍을 갖는 경우 $F_n = 100,000$ 이 素材試驗片에 비해 61%, $F_n = 2,000,000$ 의 경우 65%의 疲勞強度를 갖는 것을 알 수 있었다. 이는 反復應力을 받는 部材에서는 缺陷의 影響이 더욱 增加하기 때문이라고 생각된다.

本 實驗에 使用된 円구멍을 갖는 試驗片은 素材試驗片에 비해 純斷面이 큰데도 疲勞強度가 오히려 더 낮은 것으로 나타났는데 이는

純斷面積이 같으면 疲勞強度는 더욱 낮아질 것 이라 생각된다.

3.4. 疲勞強度와 降伏強度의 關係

實驗結果 얻어진 疲勞強度와 降伏強度의 關係는 Table 3-3 과 같다.

素材試驗片에서 疲勞強度 $F_n = 100,000$ 은 降伏強度의 139% $F_n = 2,000,000$ 은 降伏強度의 84% 이고, bolt이음부에서는 B 3形 試驗片일 경우 $F_n = 100,000$ 은 降伏強度의 127%, $F_n = 2,000,000$ 은 77%이었으며, 또한 B 4形 試驗片은 $F_n = 100,000$ 이 降伏強度의 117%

Table 3-3 Relations of Fatigue Strength and Yielding Strength

Specimens	$F_n = 100,000 / \sigma_y$ (%)	$F_n = 2,000,000 / \sigma_y$ (%)
M	139	84
C	76	50
W	96	65
B 4	117	69
B 3	127	77

$F_n = 2,000,000$ 이 69%이었다.

또, 鎔接이음부는 降伏強度에 비해 $F_n = 100,000$ 과 $F_n = 2,000,000$ 의 경우 각각 96%와 65%였으며 円구멍을 갖는 試驗片은 降伏強度에 비해 각각 76%와 50%로 됨을 알 수 있었다.

실제로 円구멍, 鎔接이음, bolt이음, 素材의 순으로 疲勞強度에 影響을 주는 缺陷의 效果가 크다는 것을 알 수 있었다.

4. 結 論

실제 建設現場에서 많이 使用되는 連結部 結合方法인 高張力 bolt 摩擦이음부에 대한 疲勞舉動을 究明하기 위하여 適當縮尺으로 縮小된 實物形態의 試驗片을 製作, 疲勞試驗을 행하고 應力-疲勞壽命(S-N)線圖를 그려서 檢討하였다.

그리고, 같은 純斷面積을 갖는 素材試驗片, 鎔接이음試驗片 및 円구멍을 지닌 素材試驗片을 製作, 같은 試驗을 行하여 위 高張力 bolt 摩擦이음부의 경우와 比較·檢討하였다.

本 研究를 통하여 얻어진 結果는 다음과 같다. bolt 어음부의 경우 純斷面積으로 計算한 疲勞強度는 素材試驗片에 비해 $F_n = 100,000$ 이 約 14%, $F_n = 2,000,000$ 이 約 16% 크다는 사실을 알 수 있었다. 이는 摩擦力이 疲勞強度를 增加시키기 때문이라고 생각된다.

鎔接이음부의 경우 素材試驗片에 비해 疲勞強度 $F_n = 100,000$ 이 29%, $F_n = 2,000,000$ 이 21% 減少함을 알 수 있었다.

이는 鎔接이음에 따른 鎔接缺陷이 疲勞強度를 減少시키기 때문이라고 생각된다.

bolt이음부와 鎔接이음부의 경우 bolt이음부가 $F_n = 100,000$ 은 約38%, $F_n = 2,000,000$ 은 約 30% 크다는 것을 알 수 있었다.

이는 같은 斷面積의 bolt이음부에서는 摩擦力에 의해 疲勞強度가 減少하기 때문이라고 생각된다.

bolt이음부의 組立形態에 의해 B 3形과 B 4形은 約 2%의 疲勞強度差를 갖는다는 것을 알 수 있었다. 이는 bolt의 組立形態에 따른 摩擦力의 差異에 의한 것이라 생각된다.

円구멍을 갖는 試驗片은 素材試驗片에 비해 $F_n = 100,000$ 이 61%, $F_n = 2,000,000$ 이 65%의 낮은 疲勞強度를 갖는 것을 알 수 있

었다. 이는 反復應力을 받는 部材에서 缺陷의 影響이 더욱 增加하기 때문이라고 생각된다.

실제 이음부에 대한 許容應力은 bolt 이음부에 대해서는 더 크게, 鎔接이음部 에서는 더 작게 하는 것이 合理的이라는 것을 알 수 있었다.

이와 같은 研究가 계속되어 더 많은 data 가 蓄積되면 既存의 構造物과 앞으로 建設될 構造物의 이음부에 대한 安全性 및 耐用年限을 推定할 수 있는 基礎資料가 얻어질 수 있으리라 생각된다.

參 考 文 獻

1. 張東一, 鄭榮和, “安全交番荷重下에서의 鋼板의 破壞機構에 關한 基礎的 研究”, 大韓土木學會誌, 第2卷 第3號, 1982. 9. pp. 2.
2. R.E.Peterson, “Stress Concentration”, John Wiley & Sons Inc., 1953, pp. 110~112, pp. 126~127.
3. 西田正孝, “應力集中”, 森北出版株, 1969. pp. 49~60, pp. 585.
4. Stanley T. Rolfe, John M. Barsom, “Fracture and Fatigue Control in Structures”, Prentice Hall Inc., Engle Wood cliffs, New Jersey, 1977, pp. 232~236.
5. 河本實 外 10人, “金屬の疲れと設計”, コロナ社, 1974., pp. 160~161.
6. 張東一, 鄭榮和, “鋼橋梁의 취성 및 疲勞 破壞의 事例와 이에 대한 考察”, 大韓土木學會誌, Vol. 26, No. 2, 1978. 6, pp. 34~44.
7. “Engineering News Record”, McGraw-Hills Construction Weekly, New York, 1962. 9.
8. 西村俊夫, “鎔接鐵道橋의 破壞事故”, 日本鎔接學會誌, Vol. 37, No. 10, pp. 12~16.
9. Peter C. Birkemoc, Donald F. Meinheit, Willian H. Munse, “Fatigue of A 514 Steel in Bolted Connection”, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 95, No. ST 10, Prod. Paper 6811, oct., 1969, pp. 935.
10. AISC, Manual of Steel Construction (including “Specifications of the Design, Fabrication, and Erection of Structural Steel for Buildings”), first issued 1969, 7th ed., New York, 1970.
11. AISC, Specification for Design, Fabrication, and Erection of Structural Steel for Buildings Nov. 1, 1978, New York, N.Y
12. AISC, Manual of Steel Construction, 8th ed., Chicago, Illinois, 1980.