

鋼梁-柱接合部の曲げ剛性評価実験に関する データベース作成とその応用

DATA BASE OF STEEL BEAM-TO-COLUMN CONNECTION TESTS AND ITS APPLICATIONS

岸 徳光* W.F.Chen** 松岡健一*** 能町純雄****

BY Norimitsu KISHI, Wai-Fah CHEN, Ken-ichi MATSUOKA and Sumio NOMACHI

The aim of this paper is to provide moment-rotation characteristics and corresponding parameters of the beam-to-column connections used frequently in steel construction. Our literature survey encompassed those experimental data which have been published since 1936 to the present. To build-up this data base systematically, the Steel Connection Data Bank program (SCDB) is developed. Using the system of tabulation and plotting in the SCDB program, the moment-rotation characteristics of each connection type is made available and the appropriate connection models are also given in the program.

1. まえがき

これまで、鋼骨組構造物の解析において、一般的に接合部は完全剛接合あるいはピン接合と仮定して設計がなされてきた。しかしながら、現実的にはそれらの接合部は仮定どおり挙動するものではなく、ピン接合でもある程度の剛性を有しており、また剛接合においても荷重の増大とともに相対回転角が生じ、半剛性的な挙動を示すことが明らかになっている。鋼骨組構造物の実際のより合理的な設計手法を確立するために、これら梁-柱接合部の $M-\theta_r$ 特性を合理的に評価するための実験研究並びに理論研究が1930年代から継続的に行なわれてきた。1980年代に入ると、過去に行なわれた実験結果の系統的な調査がNethercot¹⁾ によって行なわれ、またGoverdhan²⁾ により実験結果の収集も試みられている。

特に、LRFD (Load and Resistance Factor Design)³⁾ のPR (partially restrained) タイプ接合を用いる場合には接合部の $M-\theta_r$ 特性を組み込んだ非線形構造解析に基づいて設計が行なわれなければならない。このため、半剛性接合を有する骨組構造物のより合理的な設計法を確立するためには、接合部の適切な剛性評

* 工博 室蘭工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒050室蘭市水元町27番1号)

** Ph.D. Professor and Head of Structure, School of Civil Engineering, Purdue University (West Lafayette, IN, 47907 U.S.A.)

*** 工博 室蘭工業大学教授 工学部土木工学科 (〒050室蘭市水元町27番1号)

**** 工博 日本大学教授 生産工学部土木工学科 (〒275習志野市泉町1丁目2番1号)

価を効率的に行なわなければならない、全世界の接合部剛性評価に関する実験データを基にしたデータベースの作成とその効率的な運用の必要性が叫ばれている。

本論文ではこのような要求に基づき、有効と思われる接合部曲げ剛性評価に関する実験データを集積してデータベースを作成するとともに、これらを機能的に運用するための支援応用ソフトの作成を行なったのでその概要を報告する。

2. 鋼梁-柱接合部曲げ剛性に関するデータベースの作成

(1) データベースの概要

ここで報告する鋼梁-柱接合部曲げ剛性に関するデータベースは、図-1に示すように接合部へのモーメントMの载荷によって生ずる相対回転角 θ_r に関するもので、米国、カナダおよびイギリスを中心とした国々において発表された論文および報告書に基づいて作成されたものであり、現在303件の実験データが収録されている。収録された実験データは接合タイプや使用されている単位系がまちまちであるため、データベース作成用プログラムを介し、データの分けや単位系の統一化を行なって整理している。本研究では実験データが米国で行なわれたものが多いことを考慮して、全て米国の慣用単位系に変換してデータベース化している。図-2にはデータの登録からデータベースの応用に至る流れを示している。ここではデータベース支援応用プログラムをSCDB (Steel Connection Data Bank) と呼んでいる。

(2) データの収集と整理

鋼梁-柱接合部の接合方法は構造物の重要性あるいは設計時の仮定などにより種々の方法が考えられるが、ここでは表-1に示しているような7つの接合方式に分類して整理している。

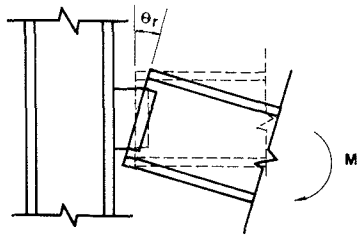


図-1. 接合部の相対回転変形

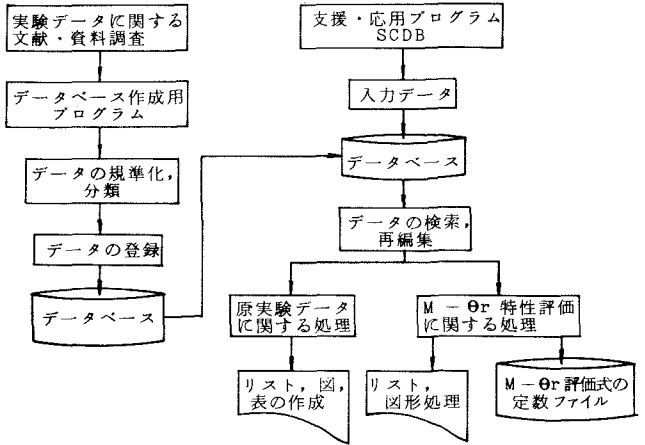


図-2. データの登録とデータベース応用の流れ図

表-1. 接合タイプの分類と実験者リスト

CONNECTION TYPE	REFERENCES FOR EXPERIMENTAL CURVES	NUMBER OF TESTS
SINGLE WEB-ANGLE CONNECTIONS, SINGLE PLATE CONNECTIONS	S.L.LIPSON (1968)	30
	L.F.THOMPSON ET AL (1970)	12
	S.L.LIPSON (1977)	8
	R.M.RICHARD ET AL (1982)	4
DOUBLE WEB-ANGLE CONNECTIONS	J.C.RATHBUN (1936)	7
	W.C.BELL ET AL (1958)	4
	C.W.LEWITT ET AL (1966)	6
	W.H.SOMMER (1969)	4
	L.F.THOMPSON ET AL (1970)	48
TOP-AND SEAT-ANGLE CONNECTIONS WITH DOUBLE WEB-ANGLE	B.BOSE (1981)	1
	J.C.RATHBUN (1936)	2
TOP-AND SEAT-ANGLE CONNECTIONS	A.AZIZIANMINI ET AL (1985)	20
	J.C.RATHBUN (1936)	3
EXTENDED END-PLATE CONNECTIONS	R.A.HECHTMAN ET AL (1947)	12
	S.M.MAXWELL ET AL (1981)	12
	M.J.MARLEY (1982)	26
	L.G.JOHNSON ET AL (1960)	1
	A.N.SHERBOURNE (1961)	5
	J.R.BAILEY (1970)	26
	J.O.SURTEES ET AL (1970)	6
	J.A.PACKER ET AL (1977)	3
	S.A.IOANNIDES (1978)	6
	R.J.DEWS (1979)	3
FLUSH END-PLATE CONNECTIONS	P.GRUNDY ET AL (1980)	2
	N.D.JOHNSTONE ET AL (1981)	8
FLUSH END-PLATE CONNECTIONS	J.R.OSTRANDER (1970)	24
HEADER PLATE CONNECTIONS	W.H.SOMMER (1969)	20

尚、表-1には実験者および収録した実験データの総数も示している。また、各接合方式によって接合部に用いられる鋼材の寸法あるいは締結位置が種々異なってくるため、各接合方式の特徴が効果的に表現できるように、各方式ごと独立なパラメータを設定し整理している。締結方式に関しては、リベット、高張力ボルト、溶接の三種類を設定し表-2のように12種類に分類している。各実験データは全て下に示すような項目順に従って整理され、データベース作成用プログラムに入力されている。

表-2. 締結方式の分類一覧

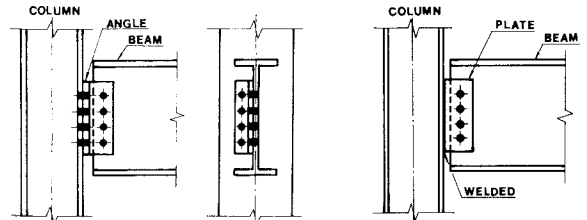
N	FASTENING MODE PATTERN
1	ALL RIVETED
2	ALL BOLTED
3	RIVETED-TO-BEAM AND BOLTED-TO-COLUMN
4	BOLTED-TO-BEAM AND RIVETED-TO-COLUMN
5	RIVETED-TO-BEAM AND WELDED-TO-COLUMN
6	BOLTED-TO-BEAM AND WELDED-TO-COLUMN
7	WELDED-TO-BEAM AND RIVETED-TO-COLUMN
8	WELDED-TO-BEAM AND BOLTED-TO-COLUMN
9	ALL RIVETED WITHOUT COLUMN STIFFENERS
10	ALL RIVETED WITH COLUMN STIFFENER
11	ALL BOLTED WITHOUT COLUMN STIFFENER
12	ALL BOLTED WITH COLUMN STIFFENER

- | | |
|------------------|--------------------------|
| ① 接合タイプと締結方式 | ② 研究者, 実験 I D, 実験を行なった国名 |
| ③ 締結材の寸法, 材質番号 | ④ 接合部に用いられる部材の材料強度 |
| ⑤ 接合部に関する全パラメーター | ⑤ $M-\theta$ rに関する実験データ |

(3) データベースに収録されている接合方式の概要

a) Single web-angle 接合, Single plate 接合

single web-angle 接合は図-3(1)に示されるように、ボルトあるいは溶接によって柱のフランジ部と梁のウェブとを1つの山形鋼によって連結する接合方式である。また、single plate接合は山形鋼の代りに平鋼を用い、柱のフランジ部に対しては溶接、梁のウェブ部に対してはボルトによって接合する方式で図-3(2)のように示される。これらsingle web-angle 接合と single plate 接合は、剛性が小さいためピン接合に近いものと考えられる。これらの接合方式に関しては Lipson⁴⁾ が系統的な実験を行なっている。



(1) single web-angle 接合 (2) single plate接合

図-3. single web-angle 接合および single plate 接合の概略図

b) Double web-angle 接合

Double web-angle接合は図-4に示されるようにボルトあるいは溶接によって柱と梁のウェブとを、二つの山形鋼により連結する接合方式である。

Rathbun⁵⁾ は1940年代に締結材としてリベットを用いて実験を行なっているが、Bell等⁶⁾、Lewitt等⁷⁾ はリベットと高張力ボルトを併用した場合について実験的な研究を行なっている。接合部の剛性が single web-angle 接合や single plate接合よりも大きいものの、いまだ撓接合の部類に属するものと考えられる。

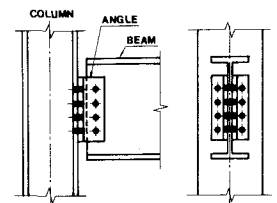
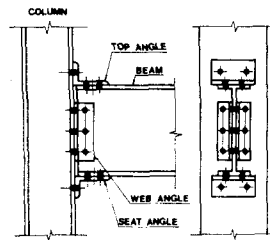


図-4. double web-angle 接合の概略図

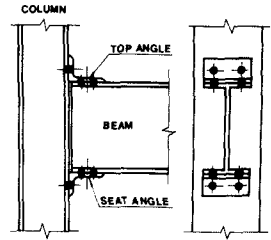
c) Top-and seat-angle 接合 (Double web-angle接合を付設する場合と付設しない場合)

図-5(1)に double web-angle を付設する top-and seat-angle 接合が示されている。この接合方式は柱のフランジ部と梁の上下フランジ部とを山形鋼で連結した top-and seat-angle 接合に double web-angle 接合を付加したものである。また、double web-angle 接合部を付設しない top-and seat-angle 接合は図-5(2)に示されている。top-and seat-angle 接合は double web-angle 接合の有無にかかわらず半剛性接合の代表的な接合形式としてよく用いられている。double web-angle 接合の付設された場合に関しては、Altman等⁸⁾ やAzizinamini等⁹⁾ がこれらの接合方式に対する地震時のエネルギー吸収能等の耐震性状を検討する

ために静的荷重実験や繰り返し荷重荷重実験を行なっている。ここでは特に静的荷重実験の結果のみを収録している。double web-angle接合が付設されない場合に関しては、Rathbun⁵⁾やHechtman等¹⁰⁾によって締結材としてリベットを用いた場合に関して実験が行なわれている。



(1) double web-angle 接合を有する場合



(2) double web-angle 接合を有しない場合

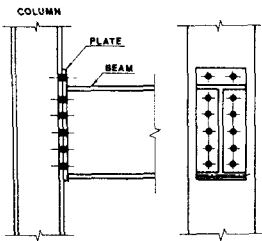
図-5. top-and seat-angle 接合の概略図

d) Extended end-plate 接合,

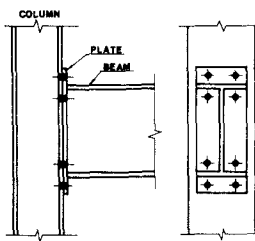
Flush end-plate 接合

End plate 接合の接合方式は、一般に

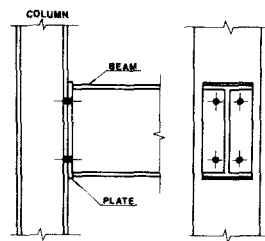
工場で梁端のフランジとウェブ両方に平鋼を溶接しておき、現場において柱のフランジ部とボルトで接合するもので、施工も容易でかつ一定の施工精度を保つことができるためモーメント接合を行なう時の方式としてよく採用されているようである。図-6(1)には引張側のみ、図-6(2)に引張側、圧縮側の両方向に拡がった場合の extended end-plate 接合を示している。また、図-6(3)には flush end-plate 接合の例を示している。end-plate 接合は、top-and seat-angle 接合同様代表的な半剛性接合の1つであるため、数多くの研究者によって実験的あるいは解析的な研究がなされている。



(1)



(2)



(3)

extended end-plate 接合

flush end-plate 接合

図-6. end plate 接合の概略図

e) Header plate 接合

この接合は、図-7に示されるように、梁の桁高よりも小さい平鋼が梁端のウェブに溶接され、かつ柱のフランジ部とボルトで連結する接合方式である。剛性の程度から考えると、double web-angle接合同程度の剛性を有する接合タイプに属するものと思われる。この接合方式に関する実験はSommer¹¹⁾によって系統的に行なわれている。

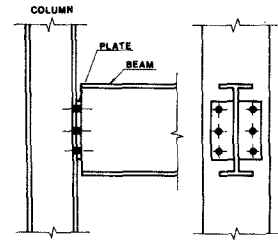


図-7. header plate 接合の概略図

3. データベース支援応用プログラム (SCDB)

(1) プログラム機能の概要

上記の方法により、これまで303の世界中の鋼梁-柱接合部曲げ剛性評価に関する実験データを蓄積することができた。著者等はこれらのデータベースをユーザーの利用目的に容易に対応できるように、7つの主要機能をもつプログラムSCDB (Steel Connection Data Bank) を作成した。以下にそれらの機能概要を説明する。

れたモデルを用いることにより、実験データの特性をそこなくM- θ r曲線を表すことが可能となった。

3) 三要素 power モデル

上記の修正exponential モデルは、実験データの最小二乗近似を与えるものであるが、これとは異なる観点から岸-Chen は半解析的に接合部の剛性を評価する方法として、RichardとAbott⁽¹⁵⁾が示した四要素パワーモデルの歪硬化項を無視した三要素モデルの使用を提案した。このモデルは接合部の簡略な解析モデルから導いた曲げに関する初期剛性と限界曲げ耐力および実験データを基にして決定する形状指数パラメータのみを用いてM- θ r特性を表すもので、M, θ rや剛性を直接代数式で算出することが可能である。現在、end-plate 接合を除いた他の接合方式に関して係数の算出が可能になっている。

本モデルの一般式を示すと、

$$M = \frac{R_{ki} \cdot \theta_r}{\{ 1 + (\theta_r / \theta_0)^n \}^{1/n}} \quad \dots\dots (3)$$

ただし、
 R_{ki} : 初期剛性
 θ_0 : 塑性回転角 (= M_u / R_{ki})
 M_u : 限界曲げ耐力
 n : 形状指数。

4. プログラムSCDBの2,3の応用例

3.において鋼梁-柱接合部の剛性評価のための実験データに関するデータベースを効率的に運用するための支援応用プログラムSCDBの概要を説明した。その応用例を2,3示す。図-8には double web-angle 接合の

II - 10

```

CONNECTION TYPE : DOUBLE WEB-ANGLE CONNECTIONS
MODE : RIVETED-TO-BEAM AND BOLTED-TO-COLUMN

TESTED BY : W.C.BELL ET AL (1958)          U.S.A.
TEST ID. : FK-4C

COLUMN : W12X65                             FASTENERS: A325--M19.1D
BEAM : W18X50                                M20.6 OVERSIZE HOLES
ANGLE : 6 X 4 X 3/8                          MATERIAL : G40.21
                                           FY = 2675 KSC
                                           FU = 4528 KSC

MAJOR PARAMETERS ( CM )

LP = 29.2100    LU = 8.2550    LL = 8.2550    TA = 0.9525
GB = 11.4300    GC = 6.5354    CU = 3.1750    CL = 3.1750
PB = 7.6200     PC = 7.6200    QB = 7.6200
NB = 2 X 4      NC = 1 X 4

REMARK 1) HIGH STRENGTH BOLTS USED
        2) BOLTS : FY=87.9 KSI, FU=136.6 KSI, RIVETS : FY=36.5 KSI, FU=63.2KSI
    
```

NO	MOMENT (KG-M)	ROTATION (RADIAN) X 1/1000	NO	MOMENT (KG-M)	ROTATION (RADIAN) X 1/1000
1	0.0	0.00	26	4721.2	44.97
2	308.4	0.57	27	4836.9	48.46
3	485.1	1.01	28	4952.6	51.94
4	661.8	1.45	29	5215.5	56.09
5	827.0	1.89	30	5478.5	60.25
6	992.2	2.33	31	5543.0	63.56
7	1298.5	3.59	32	5607.6	66.86
8	1469.8	3.93	33	5877.9	68.62
9	1641.0	4.27	34	6040.5	72.70
10	1823.8	4.61	35	6203.2	76.78
11	2006.5	4.95	36	6365.9	80.86
12	2172.2	5.24	37	6528.6	84.94
13	2337.9	5.53			
14	2621.2	6.79			
15	2935.9	9.06			
16	3171.4	10.91			
17	3342.0	13.98			
18	3512.6	17.05			
19	3683.1	20.11			
20	3774.5	24.03			
21	3865.9	27.94			
22	3957.3	31.85			
23	4048.7	35.77			
24	4327.1	38.62			
25	4605.5	41.48			

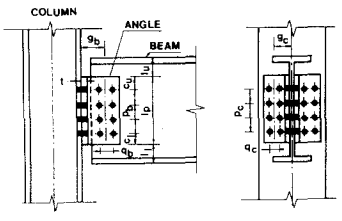


図-9. double web-angle 接合の概略図

図-8. 実験データ情報に関する出力例 - double web-angle 接合の場合 -

第10番目に整理されている実験データに関する情報一覧を示している。各パラメータに関する説明は紙面の都合により省略するが、図-9の本接合部の概略図中にパラメータを明記した。また、NB,NCはそれぞれ梁側、柱側の締結材の本数を意味している。なお、REMARK部はキャラクター入力であり単位系の変換を行なうことができないため、入力時の状態で出力することとしている。図-10は実験結果と三評価式を用いた場合のM- θ r曲線の比較を示しており、また図-11にはその場合における各評価式の諸係数および実験データおよび実験データに対応する計算結果の一覧を示している。

5. まとめ

鋼骨組構造物の合理的な設計手法を確立する過程において、接合部のM- θ r 特性を正確に評価することが必要となってくる。このため、ここでは実際の骨組構造物の解析に適用可能でかつ合理的な接合部のM- θ r 特性を与えることを主な目的として、有効と思われる接合部剛性評価に関する実験データの集積とこれらを機能的に運用するための支援応用ソフトの作成を行なった。本プログラムを用いることにより接合部の M- θ r特性評価式の妥当性の検討並びに、実験データを基にして得られた接合部の非線形な特性を直接骨組構造物の解析に組み込むことが可能となった。この支援応用ソフトと骨組構造物の非線形構造解析プログラムとを有機的に結合することによって、より有効な構造解析が可能になるものと考えられる。

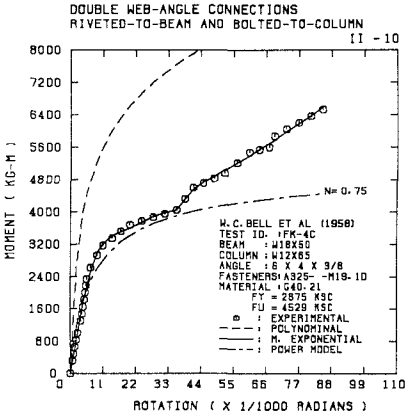


図-10. 実験結果と三評価式による結果の比較図

```
MOMENT-ROTATION PREDICTION EQUATIONS      ( R : X 1/1000 RADIAN )

# FRYE AND MORRIS POLYNOMIAL MODEL :      R = SUM ( AI X ( K*BM )**PI X 10**QI )
XD = 29.210000      G = 13.070840      T = 0.952500
A1 = 1.400148      A2 = 6.438382      A3 = 3.744390      K = 0.000488
P1 = 1      P2 = 3      P3 = 5      Q1 = 0      Q2 = -2      Q3 = -2

MODIFIED EXPONENTIAL MODEL :
BM = SUM ( AI X ( 1 - EXP ( - R / ( 2*I*C ) ) ) ) + SUM ( RKJ X ( R - RJ0 ) ) + BMO
C = 0.8504091E+00      BMO = 0.00000000E+00      NEXP = 6      NLINER = 2
AI = 0.50147103E+04      -0.82172180E+05      0.38249706E+06      -0.76097692E+06      0.69445621E+06      -0.23510451E+06
RJ0 = 35.7700      41.4800
RKJ = 0.87794524E+02      -0.33715552E+02

POWER MODEL :      BM = ( RKI X R ) / ( 1 + ( R/RO )**RN )** ( 1/RN )
RN = 0.750      RKI = 0.96060149E+03      RMO = 0.52202558E+04
```

NO	ROTATION (RADIAN) X 1/1000	MOMENT (KG-M)				CONNECTION STIFFNESS (KG-M) X 1000		
		EXPRI.	POLY.	M.EXP.	P.MODEL.	POLY.	M.EXP.	P.MODEL.
1	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1464E+04	0.5236E+03	0.9606E+03
3	1.01	485.1	1437.0	453.6	696.1	0.1330E+04	0.4048E+03	0.5369E+03
5	1.89	827.0	2462.5	799.9	1102.4	0.9902E+03	0.3909E+03	0.4021E+03
7	3.59	1298.5	3683.6	1466.5	1658.0	0.5150E+03	0.3854E+03	0.2662E+03
9	4.27	1641.0	3999.3	1723.2	1826.8	0.4223E+03	0.3703E+03	0.2331E+03
11	4.95	2006.5	4264.2	1968.7	1976.6	0.3565E+03	0.3470E+03	0.2064E+03
13	5.53	2337.9	4457.0	2161.6	2089.9	0.3151E+03	0.3226E+03	0.1877E+03
15	9.06	2935.9	5298.7	2997.2	2610.8	0.1853E+03	0.1541E+03	0.1168E+03
17	13.98	3342.0	6025.7	3407.8	3061.1	0.1201E+03	0.4033E+02	0.7224E+02
19	20.11	3683.1	6640.9	3607.3	3415.0	0.8510E+02	0.3404E+02	0.4629E+02
21	27.94	3865.9	7211.1	3884.8	3706.3	0.6304E+02	0.3151E+02	0.3005E+02
23	35.77	4048.7	7651.9	4047.3	3904.4	0.5060E+02	0.9463E+01	0.2137E+02
25	41.48	4605.5	7922.7	4563.4	4014.3	0.4443E+02	0.5075E+02	0.1730E+02
27	48.46	4836.9	8211.9	4887.3	4122.1	0.3882E+02	0.4358E+02	0.1381E+02
29	56.09	5215.5	8490.1	5214.9	4216.7	0.3422E+02	0.4304E+02	0.1112E+02
31	63.56	5543.0	8731.9	5544.3	4292.2	0.3075E+02	0.4547E+02	0.9221E+01
33	68.62	5877.9	8883.3	5779.7	4336.3	0.2880E+02	0.4742E+02	0.8208E+01
35	76.78	6203.2	9106.7	6177.9	4397.8	0.2619E+02	0.5005E+02	0.6911E+01
37	84.94	6528.6	9311.3	6594.0	4449.9	0.2405E+02	0.5182E+02	0.5912E+01

図-11. 三評価式の係数一覧と実験結果および三評価式による計算結果

参考文献

1. Nethercot, D.A. (1985), Steel Beam-to-Column Connections - a Review of Test Data, CIRIA, London.
2. Goverdhan, A.V. (1983), A Collection of Experimental Moment-Rotation Curves and Evaluation of Prediction Equations for Semi-Rigid Connections, Thesis Presented to Vanderbilt University, Nashville, Tennessee, in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science.
3. Load and Resistance Factor Design (LRFD) Specification for Structural Steel Buildings (1986), September, AISC, Chicago.
4. Lipson, S.L. (1968), Single-Angle and Single-Plate Beam Framing Connections, Canadian Structural Engineering Conference, Toronto, Ontario, 141-162.
5. Rathbun, J.C. (1936), Elastic Properties of Rivetted Connections, The Structural Engineer, Vol. 101, ASCE, New York, 511-515
6. Bell, W.G., Chesson, E. Jr. and Munse, W.H. (1958), Static Tests of Standard Riveted and Bolted Beam-to-Column Connections, A Progress Report of an Investigation Conducted by the University of Illinois Engineering Experiment Station.
7. Lewitt, C.W., Chesson, E. Jr. and Munse, W.H. (1966), Restraint Characteristics of Flexible Riveted and Bolted Beam-to-Column Connections, Department of Civil Engineering, University of Illinois.
8. Altman, W.G. Jr, Azizinamini, A., Bradburn, J.H. and Radziminski, J.B. (1982), Moment-Rotation Characteristics of Semi-Rigid Steel Beam-Column Connections, Department of Civil Engineering, University of South Carolina, Columbia, South Carolina.
9. Azizinamini, A., Bradburn, J.H. and Radziminski, J.B. (1985), Static and Cyclic Behavior of Semi-Rigid Steel Beam-Column Connections, Department of Civil Engineering, University of South Carolina, Columbia, South Carolina.
10. Hechtman, R.A., and Johnston, B.G. (1947), Riveted Semi-Rigid Beam-to-Column Building Connections, Progress Report No.1, AISC Research at Lehigh University, Bethlehem, PA.
11. Sommer, W.H. (1969), Behavior of Welded-header-Plate Connections, Thesis Presented to University of Toronto in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Applied Science, Toronto, Canada.
12. Frye, M.J. and Morris, G.A. (1975), Analysis of Flexibly Connected Steel Frames, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.2, 280-291.
13. Chen, W.F. and Lui, E.M. (1985), Column with end Restraint and Bending in Load and Resistance Factor Design, AISC Engineering Journal, Third Quarter, 105-132.
14. Kishi, N. and Chen, W.F. (1986) The Collection of Tests on Steel Beam-to-Column Connections, CE-STR-86-20, School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN.
15. Richard, R.M. and Abbott, B.J. (1975), Versatile Elastic-Plastic Stress-Strain Formula, Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol.101, No.EM4, 511-515.

(1988年10月12日)