非對稱摩擦系統之開發性能評估

林瑋浚 [1]　潘煌鍠 [2]　鍾育霖 [3]

[1] 國立高雄應用科技大學土木工程系碩士班研究生
[2] 國立高雄應用科技大學土木工程系教授
[3] 國立成功大學建築系助理教授

摘　要

摩擦阻尼因為行為穩定，機制單純，常用來作為結構中的耗能機制或是應用在新式柱梁接頭以提昇接合的耗能。自復位柱梁接頭為近年所發展的高性能結構接合形式，除了有耗能以及韌性之外，尚有自復位能力使結構在地震後回復原點，減少結構損傷以及修復工程，而摩擦阻尼與自復位系統結合可提升耗能，亦可提升接合的解壓彎矩強度，然而若設計過高的摩擦力卻會在卸載時影響自復位的效果，因而在設計上受到限制。

本研究提出非對稱摩擦系統，透過各位置螺栓軸力的不同以及螺栓孔徑大小的設定，可使系統在加載以及卸載時提供不同大小之摩擦力，亦即加載時正摩擦力大於卸載時負摩擦力，如此與自復位系統結合，一方面提升接頭強度及耗能面積，同時也不影響卸載時自復位的能力。透過摩擦單元試驗，證實系統確能發揮預期性能，且能準確計算其正負方向之摩擦力大小。

Development and Performance Evaluation of an Asymmetric Friction System

Wei-Jyun Lin [1]　Huang-Hsing Pan [2]　Yu-Lin Chung [3]

1 Master Student, Department of Civil Engineering.,National Kaohsiung University of Applied Sciences
2 Professor, Department of Civil Engineering.,National Kaohsiung University of Applied Sciences
3Assistant professor, Department of Architecture.,National Cheng Kung University

ABSTRACT

Friction damper is commonly used as the energy dissipation mechanism in the new developed steel beam-to-column connections. Self-centering connection system has been developed for several years. The energy dissipation and elastic deformation abilities enhance ductile behavior of structures. The self-centering feature allows the structure to recover to the original position without any residual deformation. Combination of friction damper and self-centering system can further increase the strength and energy dissipation ability. However, the self-centering behavior would be restricted by the amount of the unloading friction. To further improve the performance of the self-centering connection, an asymmetrical friction system is proposed in the study. The system includes two outer plates and one center plate. Two floating plates are placed in between. High tension bolts apply the normal force of the system. These friction surfaces between these plates move at difference timing to exhibit different

friction forces while under the loading and unloading stages. The friction tests conducted in the study have approved a reliable and stable performance of the system.

Keywords: Friction system, Self-centering connection,High Strengh Bolts

一、前言

抗彎矩韌性框架為鋼結構主要結構系統之一，結構藉由柱梁接頭的非線性行為消耗地震能量達到整體韌性行為，因此對於接頭韌性要求高，94 年北嶺地震過後發展的多數接頭都能符合美國鋼結構協會(AISC)對於新接頭的性能要求，接頭須能在層間變形角 4%不發生斷裂且強度仍能維持最大強度的 85%以上，其中多數設計為使柱梁接頭的梁發展成為塑性絞，以達到高塑性變形以及強度穩定的性能，切削式柱梁接頭(Reduced-Beam Section connection, RBS connection)，為應用最為廣泛的接合形式之一。然而由於地震後大量塑性絞以及結構殘留變形將導致困難的修復問題，近年許多研究轉向研發自復位結構系統(self-centering system)，其原理如圖 1 所示，由圖 1.(a)彈性構件透過施加預力緊結合柱梁構件，同時在接合處導入阻尼增加耗能如圖 1.(b)，兩者結合後若阻尼卸載的負向強度低於彈性構件的預力，則可達成圖 1.(c)旗幟型遲滯迴圈，除了可提供阻尼耗能並能在卸載後回復到原點，無殘留變形，如此結構可維持彈性，且接合處省去焊接工序，而摩擦阻尼因可提供穩定阻尼力，構造簡單，為常用阻尼形式。彈性材料除了承受預力，且須滿足接頭開合時的變形，特別是大尺度的梁，其要求彈性變形量大，因此多以跨越數跨的預力鋼纜透過端部以千斤頂施加預力，緊結合跨數跨的柱梁構件，如 Tsai (Tsai et al., 2007)所提出的系統，以此方式使結構具有自復位能力; 另一方面的研究係為避免預力鋼纜在構件中產生過大軸力，採用超彈性材料形成自復位接頭，如 Fang 等人(Fang et al., 2013)使用形狀記憶合金螺栓(Shape memory alloy, SMA)做為緊結構件，由於記憶合金超彈性效應可以達到 6%應變，可使用較短構件而使接頭能有足夠變形能力，然而 SMA 螺栓本身阻尼不高，且其強度較低，欲滿足規範之強度要求需要大直徑之 SMA 棒，如此並不符合經濟效益。因此，自復位的系統中，無論採用何種自復位機制，附加阻尼的特性對自復位特性以及接合強度會有所影響，本研究為能使增加此類型接合時的強度以及耗能能力，同時又不影響接合的自復位特性，提出了非對稱摩擦阻尼系統，如圖 2 示意圖所示，正向加載力量與卸載時力量不對稱，如此可增加接頭解壓以及最大強度，而卸載時因摩擦力較小，不會完全抵銷預力而保有自復位特性。本文中將說明此摩擦系統的機制以及力學特性並以單元摩擦試驗，以及柱梁接頭抗彎試驗評估此摩擦系統之性能。

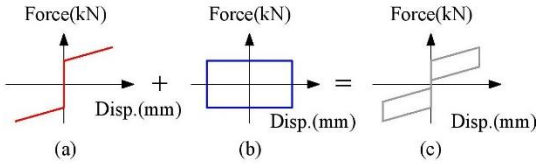


圖 1 自復位系統遲滯迴圈示意圖

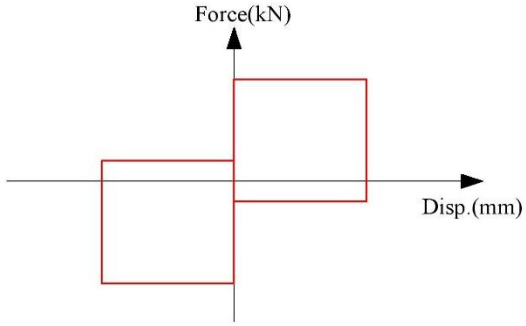


圖 2 非對稱摩擦力與位移關係圖

二、非對稱摩擦系統設計及單元試驗

2.1 非對稱摩擦系統機制

圖 3 為非對稱摩擦系統(Asymmetrical Friction System, AFS)機制及受力行為，主要有五片鋼板組成，各鋼板間放入摩擦係數高之金屬板並以高張力螺栓以預力結合提供摩擦所需正向力，上下最外側鋼板透過焊接與左側鋼板結合，右側的上下鋼板與最中間鋼板間則各夾一塊浮動鋼板(floating plate)，由於浮動鋼板受左右兩組螺栓固定，而浮動鋼板與上下的鋼板間僅以左側螺栓固定，因此受拉力時會以外側與浮動鋼板間介面開始滑動，而當螺栓接觸浮動鋼板螺栓孔邊界時，則強度上升直至浮動鋼板與中央鋼板間介面開始滑動，而受反向力量時，則會先由摩擦力小的上下外鋼板與浮動鋼板間介面滑動，此時摩擦力會與開始加載時的摩擦力相同，其對應之遲滯迴圈則如圖 3 右圖所示，透過各位置螺栓的預張力，可以調整各階段摩擦力大小。

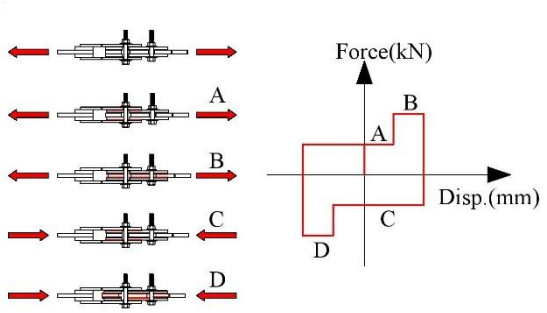


圖 3 非對稱摩擦系統機制圖

2.2 高拉力螺栓拉伸試驗

螺栓軸力的大小影響摩擦力強度，故在 F10T 螺栓頭鑽直徑 2mm、深度 50mm 的預埋孔並將 BTM-1C-3LDA 嵌入式應變片以 E-120HP 的 Epoxy 與螺栓黏結，依照 JISZ2241(1998)之標準試驗法進行拉伸試驗。圖 4 及圖 5 分別顯示螺栓預埋孔示意圖及螺栓拉伸試驗結果，由圖 5 顯示，當螺栓加載至 150kN 時還保持彈性範圍內，所以此結果之力量與應變關係，做為摩擦軸力施加的依據。

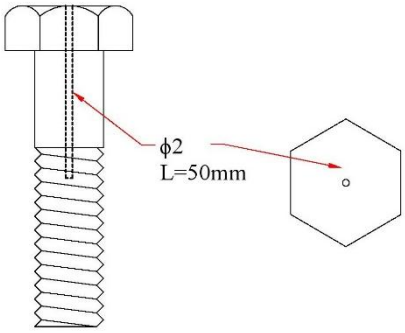


圖 4 螺栓預埋孔示意圖

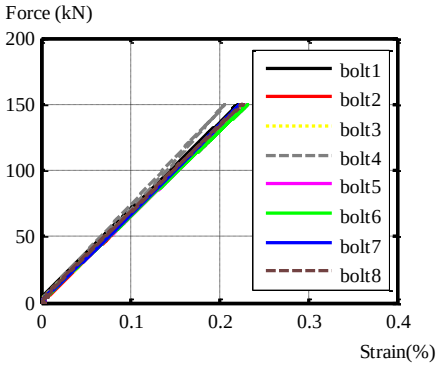


圖 5 螺栓拉伸試驗結果

2.3 摩擦單元試驗

摩擦試體及各板材由圖 6 以及表 1 所示，試體上下部各使用 2 顆裝有應變計之 M20 螺栓，透過靜態反覆加載試驗程序評估不同的摩擦板及不同軸力下的摩擦行為。試驗之加載歷程以位移量±2mm 加載至±10mm，每次增加±2mm 之振福，每位移量各加載兩次。試驗參數如表 2 所示，評估不同的摩擦板所能提供之摩擦係數(FC1 及 FA1)，以及改變上部螺栓軸力對上升段摩擦耗能的影響(F1-1 及 F1-2)。

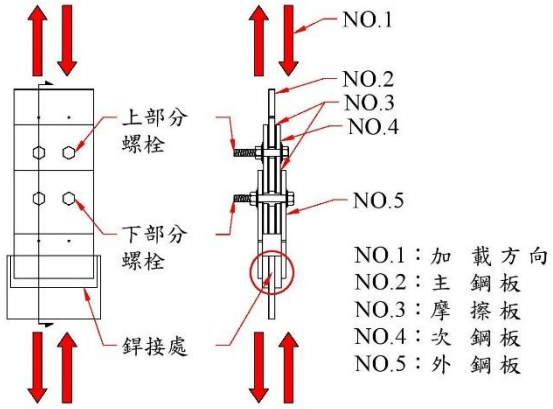


圖 6 摩擦單元試體圖

表 1 摩擦阻尼之材料材質與數量

名稱	材質	孔徑(mm)		數量
		上部分	下部分	
主鋼板	SS400	φ21	φ42	1
次鋼板	SS400	φ21	φ30	2
摩擦板	A1050P	φ21	φ30	2
	A1050P	φ21	φ21	2
	C1100P	φ21	φ30	2
	C1100P	-	φ21	2
外鋼板	SS400	-	φ21	2
高拉力螺栓	F10T or A490	M20		8

表 2 摩擦單元試驗參數

名稱	螺栓軸力(kN)	
	下部分	上部分
FC1(銅板)	50	50
FA1(鋁合金板)	50	50
F1-1	30	30
F1-2	30	50

2.4 摩擦單元試驗結果

圖 7 及圖 8 為摩擦單元試驗試驗所得之力量與變位的關係，圖 7 中兩組參數在加載位移小於 5mm 時均提供初始摩擦力，當位移量大於 5mm 則提供了上升段摩擦力，在相同螺栓軸力的情況下比較兩遲滯迴圈得知，FA1 試體的耗能能力優於 FC1 試體，且 FA1 試體也比 FC1 來得穩定，經由計算可得到摩擦係數

μ_{FC1}=0.3、μ_{FA1}=0.6，而上升段摩擦力的耗能強度等於初始摩擦力所提供的耗能強度。圖 8 中，F1-1 試體及 F1-2 試體的初始摩擦力均相同，但上升段摩擦力因上部分螺栓軸力改變，而使 F1-2 試體的上升段摩擦力大於 F1-1 試體，由此可知，摩擦系統的耗能能力可以藉由改變螺栓軸力控制。

圖 7 及圖 8 中，摩擦試驗的位移量並不對稱使得摩擦系統的上升段會有提早及延遲進入的情況發生，造成的原因有二，第一為螺栓圓心並未與鋼板圓孔之圓心對齊，第二為摩擦試體加載完後，並未重新將螺栓與鋼板圓孔重新對齊，而造成位移量不對稱的情況。

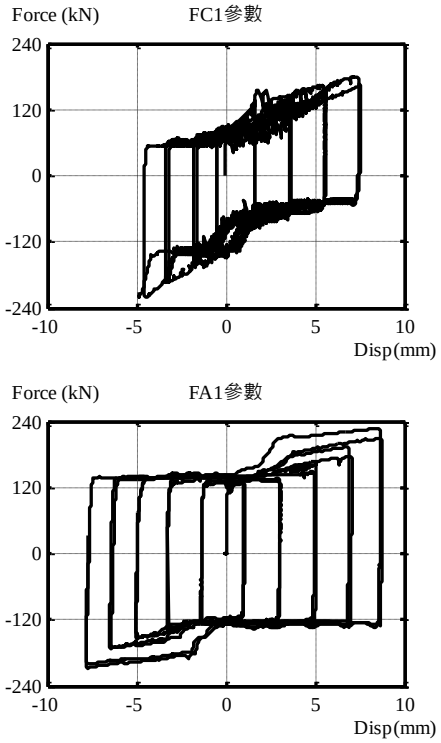
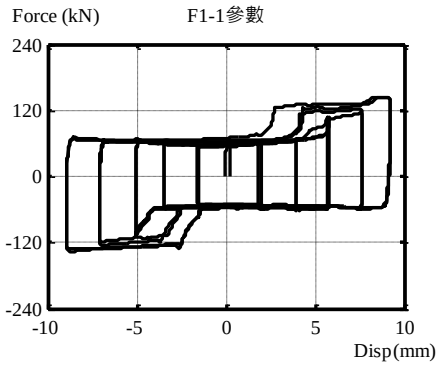


圖 7 摩擦單元試驗遲滯迴圈圖(FC1 及 FA1)



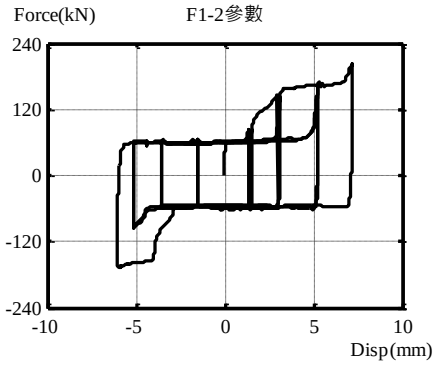
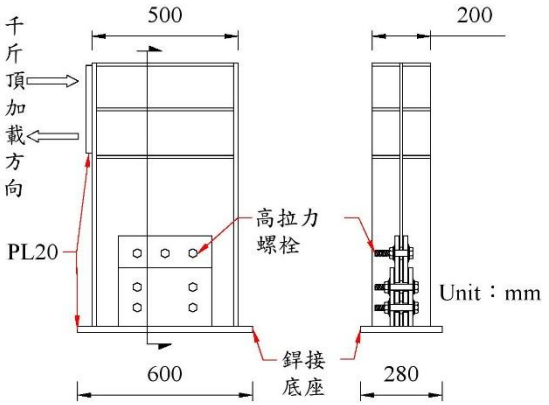


圖 8 摩擦單元試驗遲滯迴圈圖(F1-1 及 F1-2)

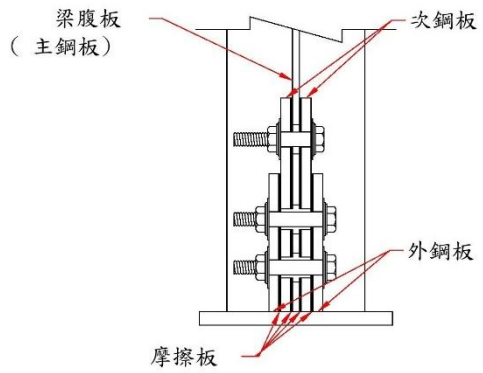
三、應用非對稱摩擦之柱梁接頭受彎試驗

3.1 加載歷程及實驗試體規劃

本試驗之試體、摩擦細部及照片如圖 9 及圖 10 所示，使用 H500×200×10×16、材質為 A572-Gr.50 的 RH 型鋼進行柱梁接頭試驗，並製作銲接底座以螺栓施加預力將其與鋼梁組裝，而在鋼梁上方使用高拉力螺栓將鋼梁與千斤頂固定，千斤頂施加水平向的反覆載重，油壓千斤頂可提供之最大載重為 100ton，其最大衝程為正負 25cm。加載歷程依照 AISC(2002)，以層間變形角 0.375%、0.5%、0.75%、1%、1.5%、2%、3%、4%、5%、6%進行加載試驗，而 0.375%~0.75% 各加載 6 次、1%加載 4 次、1.5%~6%各加載 2 次。試驗規劃參數如表 3 所示，基於前章摩擦單元試驗結果，以改變下部分螺栓軸力而固定上部分螺栓軸力進行靜態反覆加載試驗，而在下部分的螺栓數量增加至四顆，以增加初始。其螺栓編號、旋轉點及距離如圖 11 及表 4 所示



a



b

圖 9 柱梁接頭試體 a.側視及剖面圖 b.摩擦細部圖

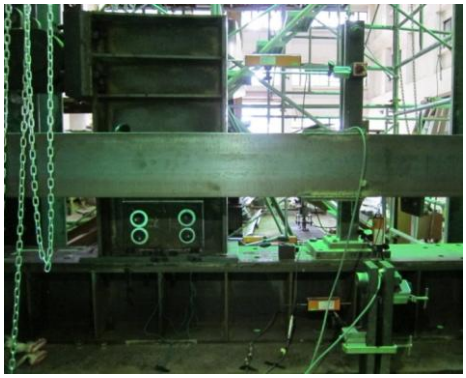


圖 10 柱梁接頭試體照片

表 3 柱梁接頭試驗參數

名稱	螺栓軸力(kN)	
	下部分	上部分
MF1	100	100
MF2	150	100

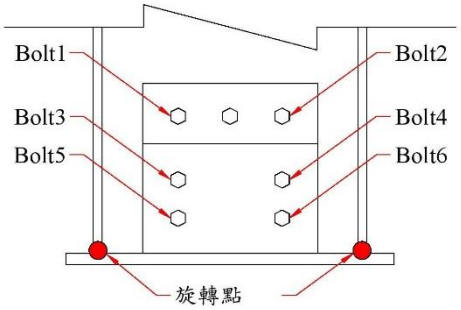


圖 11 螺栓編號、旋轉點圖

表 4 各螺栓至旋轉點之距離

螺栓編號	至旋轉點距離(mm)
Bolt1	438.09
Bolt2	380.3
Bolt3	311.33
Bolt4	256.55
Bolt5	222.77
Bolt6	179.23

3.2 抗彎試驗結果

圖 12 為柱梁接頭抗彎試驗結果，縱座標的彎矩為千斤頂出力乘以千斤頂中心到底部距離而得，橫坐標之梁端轉角乃由千斤頂位置位移計除以梁長度所得。在加載初期摩擦耗能穩定，但加載至轉角 2%時並沒有如預期的進入上升段摩擦力，反而轉角 3%方有上升現象，造成的原因推測為在柱梁接頭的滑移量並非與摩擦單元試驗相同，使得摩擦加載至層間變形角 3%才接觸螺栓使其上升。

梁斷面全性塑性彎矩強度 M_P =734.85kN-m，摩擦系統可提供之摩擦強度如公式(1)計算，其兩組參數之彎矩強度 M_{MF1}=214.6kN-m、M_{MF2}=272.8kN-m，遠小於實驗所得知彎矩強度，造成此原因推測為柱梁試體僅透過摩擦接合，無軸向力量將梁與底座緊結，導致在反覆加載過程，梁有逐漸有向上方偏移的情形，因而擠壓到摩擦板而使摩擦面改變，造成強度上升程度不高，此外旋轉點也改變至下部分螺栓中心，亦造成螺栓至旋轉點距離縮短而使摩擦力降低。

1.M_{MF1}、M_{MF2}

$$=(P_d\times n_d\times(D_3+D_4+D_5+D_6)+(P_u\times n_u\times(D_1+D_2) \quad (1)$$

M_{MF1}、M_{MF2}：預估彎矩摩擦強度(*unit*：*kN-m*)

P_d：下部分螺栓軸力(*unit*：*kN*)

n_d：下部分螺栓數量

P_u：上部分螺栓軸力(*unit*：*kN*)

n_u：上部分螺栓數量

D_1、D_2、D_3、D_4、D_5、D_6：各螺栓至旋轉點之距離(*unit*：*mm*)

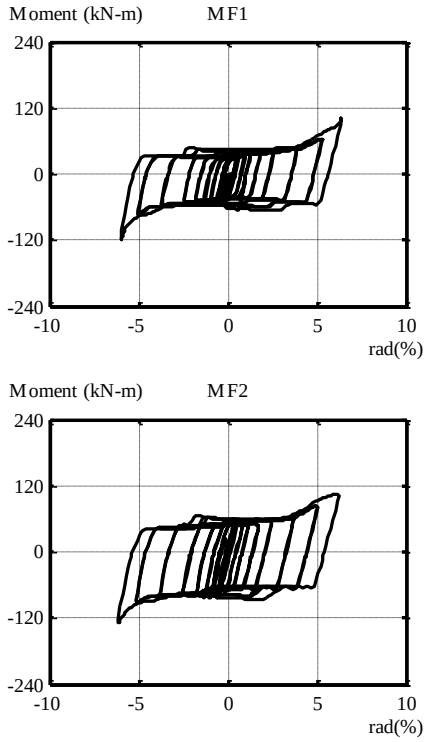


圖 12 柱梁接頭遲滯迴圈(MF1、MF2)

四、結論

為提高自復位柱梁接頭的抗彎強度、耗能以及維持卸載時的自復位效果，本研究提出新式的非對稱摩擦系統，利用控制螺栓軸力大小以及鋼板滑動面的方

式，使摩擦系統在加載及卸載產生不同摩擦力，供自復位柱梁接頭系統使用。本文中摩擦單元試驗及柱梁接頭抗彎試驗結果歸納結論如下：

1. 鋁合金板與銅板可提供的摩擦係數分別為 0.6 與 0.3，鋁合金板可以提供較高的摩擦係數，且遲滯迴圈也較銅板來的穩定。
2. 透過摩擦單元試驗，驗證所提出之非對稱摩擦系統透過利用上、下部分螺栓的軸力調整，以及螺栓孔大小，可使摩擦系統出現加載與卸載不對稱之遲滯迴圈。
3. 柱梁接頭抗彎試驗中因次鋼板的孔徑過大，使接頭在層間變形角 3%時才進入上升段摩擦力。
4. 柱梁接頭抗彎試驗中雖有出現非對稱遲滯迴圈，但因未對接頭施加軸向束制，使接頭在經過多次加載後，試體有向上偏移的情況，導致摩擦板受壓變形且旋轉點改變，而使螺栓至旋轉點距離縮短，造成摩擦力降低，在具有預力緊結的柱梁接頭應可避免此情況發生。

參考文獻

1. Keh-Chyuan Tsai,Chung-Che Chou,Chi-Lon Lin,Pei-Ching Chen,and Sheng-Jhih Jhang, *"Seismic Self-centering steel beam-to-column moment connections using bolted friction devices"*, EARTHQUAKE ENGINNERING AND STRUCTURE DYNAMICS, 2007.

2. Cheng Fang, Michael C.H.Yam, Angus C.C.Lam, Langkun Xie *"Cyclic performance of exteended end-lplate comnnections equipped with shape memory alloy bolts"*,Journal of Constructional Steel Research, 122-136, 2014

3. Masakazu TERAI, Takan SATO, Tomokazu YOSHIOKA and Koichi MINAMI, "*A STUDY of HYBRID FRICTION DAMPER USED ALUMINUM ALLOY*, 福山大學工學部紀要, 2007.

4. JIS Z 2241. "*Method of tensile test for metallic materials*" Japanese Standards Association, 1998.

5. AISC. *"Seismic Provisions for Structural Steel Building*" AISC：Chicago,IL2002.