性能設計における耐震性能判断基準値に関する研究

—JSCA 耐震性能メニューの安全限界値と余裕度レベルの検討—

STUDY ON STANDARDS FOR JUDGING STRUCTURAL PERFORMANCES
IN SEISMIC PERFORMANCE BASED DESIGN

—Evaluation of the safety limit value and margin I and II levels in JSCA seismic performance menu—

北村 春幸^{*1}, 宮内 洋二^{*2}, 浦本 弥樹^{*3}

Haruyuki KITAMURA, Youji MIYAUCHI and Hisaki URAMOTO

A series of studies have been conducted on the following subjects concerning the standards for judging seismic performances of ordinary seismic resistant, vibration controlled or seismic isolated buildings in JSCA performance menu, which are described in detail in the reference literature 2).

- 1) To establish the value to demonstrate safety limit corresponding ultimate limit state of structures;
- 2) to review the limit of margin I and II levels for each evaluation item; and
- 3) to review weighing factors for structural performance evaluation items.

Revised standards for judging performances and the corresponding revision of weighing factors are described herein based on results of the study. Although the study is based on limited experimental and/or analysis data, authors believe that the proposed standards provide more rational bases for judging seismic performance evaluation of buildings.

Keywords : performance based design, performance menu, performance grades, numerical threshold, dynamic time history response analyses

性能設計, 性能メニュー, 性能グレード, 判断基準値, 時刻歴応答解析

1. はじめに

1995年の阪神淡路大震災の被災経験以降, 2000年の建築基準法改正をはじめとして, 我が国の耐震設計は性能指向型へと移行しつつある。しかしながら, 現在求められている性能設計は, 建築基準法に準拠して応答変位を求めることなく, 建築主との対話を通じて建築物に対する要求性能を引き出し, それに基づき設定した目標性能に対して建築主の合意を得ることにある。

このような性能設計のツールとして, 日本建築構造技術者協会のJSCA性能メニュー¹⁾が提案されている。JSCA性能メニューでは, 全ての構造種別や構造形式に適用できることを原則として, 基準法の規定を建築物に必要とされる最低限の性能グレード(基準級)とし, より高い性能グレード(上級, 特級)を設定している。性能メニューは, 荷重・外力の発生頻度に対応した建物の目標とする状態により性能グレードを表示した“性能メニュー表”, 建物全体と各部の目標とする状態を利用者や所有者が理解しやすいように言葉により記述した“状態表”と, その状態の判断基準を工学量で表示した“判断基準値表”で構成される。表1に性能メニュー表を, 表2に判断基準値表を示す。判断基準値表は, 使用性・修復性・安全性を表す性能評価項目を採用し, 性能評価項目ごとに損傷限界値と安全限界値を規定し, その間を安全限界値に対する比率($r_1=2.0, r_2=1.5$)で限界値を規定した安全限界余裕度Ⅰ(以降, 余裕度Ⅰと略す)と安全限界余裕度Ⅱ(以降, 余裕度Ⅱと略す)の2段階のレベルを設けている。

設計者は, これらの判断基準値と建物の時刻歴応答解析から求まる応答値を比較することで性能グレードを判定するとしている。

筆者等は, 耐震・制振・免震構造で設計された8階建て鋼構造建物を用いた数多くの時刻歴応答解析から, JSCA性能メニューにおける“判断基準値表”の検証を行なった²⁾。その検討から, 割増した地震力で設計する方法では応答値の変化が小さく, 構造形式を変えることで性能グレードに明確な差が表れる。また, “判断基準値表”による判定では, 構造形式により, 性能評価項目ごとに対応する性能グレードが異なる。従って, 全ての構造形式に対して一つの“判断基準値表”で, あるいは一つの建物に対して全ての性能評価項目で同じグレードにすることは不可能と思われることが明らかになった。これらの検討を踏まえて, 性能評価項目や構造形式ごとに異なる性能グレードを総合的に判定する方法を提案した。性能評価項目ごとの性能グレードを数値化するために, 3つの判断基準値を上・下限値として5段階の判断値 $\lambda_i = 0 \sim 4$ を設定した。ここで, $\lambda_i = 0$: 安全限界超過, $\lambda_i = 1$: 余裕度Ⅱ～安全限界, $\lambda_i = 2$: 余裕度Ⅰ～余裕度Ⅱ, $\lambda_i = 3$: 損傷限界～余裕度Ⅰ, $\lambda_i = 4$: 損傷限界以下とした。次に, 建物挙動については用途ごとに, 構造体については構造形式ごとに, 性能評価項目に重付係数 a_i を設定し, 性能評価項目ごとの判断値 λ_i との積の和を平均値 $\bar{\lambda}$ で判定する方法である。さらに, この研究では, 提案方法の検証から以下の課題を明らかにした。

^{*1} 東京理科大学 教授・工博
^{*2} 勝竹中工務店 修士
(元 東京理科大学 大学院生)
^{*3} 東京理科大学 大学院生

Prof., Tokyo University of Science, Dr. Eng.
Takenaka Corporation, M. Eng.

Graduate Student, Tokyo University of Science

- ①構造部材や構造骨組の終局状態に対応した安全限界値を設定する。
 ②性能評価項目ごとに余裕度Ⅰ,Ⅱを規定する安全限界値に対する比率 r_1, r_2 を見直す。
 ③構造形式ごとに性能評価項目に対応した重付係数 a_i を見直す。

本論文では、“判断基準値表”に基づき性能グレードを判定する方法を具体的に利用できる状態にまで改善することを目的として、これらの課題を以下の方法で検討する。

鋼構造建物では、新耐震設計法(1981)で構造体の塑性変形能力を確保するための諸規定が定められ、1995年の阪神大震災の建物被害から、柱や梁などの構造部材に期待されている塑性変形能力を発揮する前に、柱・梁接合部が応力集中により延性破壊や脆性破壊を起こし、構造体の塑性変形能力に大きく影響するが明らかになっている。このことから、実験に基づく柱・梁接合部の破壊性状に関する論文^{9)~25)}を収集し、接合部詳細や接合形式ごとに整理し、柱・梁接合部の塑性変形能力を評価して、構造部材の安全限界値を設定する。さらに、架構の部材レベルの時刻歴応答解析から、構造部材と構造骨組の応答値の関係を求め、構造部材の安全限界値から構造骨組の安全限界値を定める。

次に、JSCA 性能メニューでは、層間変形角 R を性能評価項目の基準と考えており、損傷限界値、余裕度Ⅰ、余裕度Ⅱ、安全限界値を、それぞれ1/200, 1/150, 1/100, 1/75と規定している。そこで、極めて稀に作用する地震動に相当する長周期領域で速度応答スペクトルが $S_v=100\text{cm/s}$ (S_{v100})となる模擬地震動を入力したときの応答層間変形角 $R(S_{v100})$ を基準にとり、入力レベルを $S_v=80\sim 200\text{cm/s}$ に変化させたときの応答層間変形角 $R(S_v)$ との比率 $R(S_v)/R(S_{v100})$ を求め、余裕度Ⅰ、Ⅱに対応する入力を設定する。余裕度Ⅰ、Ⅱに対応する入力レベルの地震応答解析から求まる応答値から、層間変形角以外の性能評価項目の安全限界値に対する比率 r_1, r_2 を設定する。

また、JSCA 性能メニューでは、構造体の損傷の程度が主要な判定基準になるが、第一義的には建物用途に応じた機能維持の程度を評価することが重要と考え、判断基準値表を建物挙動と構造体に分けている。このうち建物挙動は、構造体以外の設備機器・配管、非構造部材、収容物などへの影響を評価する項目として、層間変形、床加速度、相対速度(ただし、速度の限界値は未設定)を採用している。従って、重付係数も建物挙動と構造体は別々に設定し、建物挙動の重付係数は、層間変形と床加速度のうち建物用途の機能維持にとって重要度の高いものに重みを付ける。一方、構造体は、応答値が安全限界値に近いものほど重みを付けることにし、構造形式、性能評価項目ごとに応答値の安全限界値に対する比率を求め、その比率に比例するように重付係数を設定する。最後に、ここで提案した“判断基準値表”と“重付係数一覧表”をモデル建物に適用して、JSCA 性能メニュー表を検証する。

2. 解析対象建物概要

解析対象建物は、文献2)で用いた8階建鋼構造建物を基本とする。図1に建物概要を示す。純ラーメン構造の標準架構モデルは、設計用せん断力係数分布として最適降伏せん断力係数分布 $\bar{\alpha}_1^{(3)}$ を用い、標準せん断力係数 $C_0=0.3$ の水平地震力に対して許容応力度設計(1次設計)、 $C_0=1.5$, $D_s=0.25$ に対して保有水平耐力検討(2次設計)を行う方法で、SM490材を使用した柱・梁部材断面を設定する。同

表1 性能メニュー表

荷重 グレード	稀に作用する 荷重	極めて稀に作用 する荷重	適用されるべき 建築物の用途例
特級	機能維持 無被害 修復不要	主要機能確保 軽微な被害 軽微な修復	防災拠点、拠点病院等
上級	機能維持 無被害 修復不要	指定機能確保 小破 小規模修復	一般病院、避難施設、 コンピュータセンター、本社機構、 不特定多数が利用する施設等
基準級	機能維持 無被害 修復不要	人命保護 限定機能確保 中破～大破 中～大規模修復	一般建築物

表2 性能判断基準値表

対象	性能評価 項目	損傷限界	安全限界 余裕度Ⅰ	安全限界 余裕度Ⅱ	安全限界
建物挙動	$R(\text{rad})$	1/200	1/150	1/100	1/75
	$a(\text{m/s}^2)$	—	2.5	5.0	10.0
	$V(\text{m/s})$	—	—	—	—
	Q	Q_v	Q_u		
構造体	μ	1.0	μ_u/r_1	μ_u/r_2	μ_u
	η	0	η_u/r_1	η_u/r_2	η_u
	$\gamma(\%)$	0	30	60	100
	μ_m	1.0	μ_{mu}/r_1	μ_{mu}/r_2	μ_{mu}
	η_m	0	η_{mu}/r_1	η_{mu}/r_2	η_{mu}
	η_d	—	η_{du}/r_1	η_{du}/r_2	η_{du}
制振免震 部材	W_d	—	W_{du}/r_1	W_{du}/r_2	W_{du}
	δ_1	—	δ_{1u}/r_1	δ_{1u}/r_2	δ_{1u}
	δ_2	—	δ_{2u}/r_1	δ_{2u}/r_2	δ_{2u}
建物の 「目標とする状態」		機能維持 無被害 修復不要	主要機能 確保 軽微な被害 軽微な修復	指定機能 確保 小破 小規模修復	人命保護 限定機能確保 中破～大破 中～大規模修復

注) R : 層間変形角, a : 床加速度, V : 相対速度, Q, Q_v, Q_u : 応答, 損傷, 安全限界層せん断力, μ, μ_u : 層の応答, 安全限界塑性率, η, η_u : 層の応答, 安全限界累積塑性変形倍率, γ : 塑性ヒンジ発生率, μ_m, μ_{mu} : 部材の応答, 安全限界塑性率, η_m, η_{mu} : 部材の応答, 安全限界累積塑性変形倍率, η_d, η_{du} : ダンパーの応答, 安全限界累積塑性変形倍率, W_d, W_{du} : ダンパーの応答, 安全限界エネルギー吸収量, δ_1, δ_2 : アイソレータの応答, 安全限界変位, r_1, r_2 : 安全限界余裕度Ⅰ, Ⅱを規定する安全限界値に対する比率

図1 対象建物概要

図2 解析モデルの復元力特性と増分解析による架構の履歴曲線の比較

様に耐震ブレース付構造の標準架構モデルは、図1の基準階伏図に破線で示した位置に耐震ブレースを配置し、1次設計 $C_D=0.25$ 、2次設計 $C_D=1.25$ 、 $D_S=0.35$ に対して部材断面を設定する。以上の方法で、純ラーメン構造と耐震ブレース付構造について、それぞれ1次設計用標準せん断力係数 $C_D=0.2, 0.25, 0.3, 0.4$ に対応する架構モデルを作成する。 $C_D=0.2$ の純ラーメン構造の図1の基準階伏図に破線で示した位置にLY100級の抵降伏点鋼を用いた制振ブレースを1階の降伏せん断力係数 $\alpha_s=0.06, 0.09, 0.12, 0.15, 0.18$ で高さ方向に $\bar{\alpha}_i$ 分布で各階に取り付けた制振ブレース付構造モデルと、純ラーメン構造の標準架構モデルの基礎部に免震層を設けた免震周期 $T_f=3.0, 4.0$ s の免震構造モデルを作成する。これらの検討建物の諸元を表3に示す。表中、 C_u は架構の各階保有水平耐力を1階の層せん断力係数に換算した値の最小値(換算ベースシア係数)を示す。

純ラーメン構造の簡略モデルとして、設計用せん断力分布を用いた架構モデルの増分解析結果をもとに、設計層せん断力 Q_D に対する降伏耐力比 $Q_D/Q_D=1.3\sim 1.6$ 、終局耐力比 $Q_u/Q_D=1.2\sim 1.8$ 、初期剛性 K_1 に対する2次剛性比 $K_2/K_1=0.4$ 、3次剛性比 $K_3/K_1=0.05$ となるTri-linear型復元力特性を持つ等価せん断型モデルを作成する。一方、耐震ブレース付構造の簡略モデルは、連層耐震ブレース付架構を境界梁付きの魚骨型に残りのラーメン架構を等価せん断型にモデル化する。図2に $C_D=0.25$ の純ラーメン構造と耐震ブレース付構造の復元力特性と増分解析による履歴曲線の比較を示す。さらに、純ラーメン構造と耐震ブレース付構造の標準架構モデルの1次固有周期を基本周期 T_0 として、目標周期 $T_1=2.0, 3.0, 4.0, 5.0$ s との比率で剛性と耐力を変換した簡易モデルを作成する。魚骨型の柱・梁部材の曲げ剛性 EI 、曲げ耐力 M_p は、架構モデルの値(EI_0, M_{p0})を用いて下式で設定する。

$$EI = \left(\frac{T_1}{T_0} \right) \cdot EI_0, M_p = \left(\frac{T_1}{T_0} \right) \cdot M_{p0} \quad (1)$$

ここで、 T_0 ：基本周期、 T_1 ：目標周期

基本周期 T_0 と目標周期 T_1 との比率で剛性と耐力を変換した簡易モデルは、図3に示すように、目標周期に相当する高さの建物を8質点系に縮約したモデルと考えられる。従って、層間変形を層間変形角に変換する際の階高は周期比(T_1/T_0)を掛けた値を用いることにする。以上のようにして作成した耐震構造の簡略モデルは、 $C_D=0.2\sim 0.4$ となる純ラーメン架構と耐震ブレース付架構の40モデルである。純ラーメン架構モデルと耐震ブレース付架構モデルの1次固有周期 T_1 と1次設計用ベースシア係数 C_D の関係を図4に示す。入力地震動は、長周期領域で速度応答スペクトルが $S_v=80, 100, 125, 150, 200$ cm/s となる模擬地震動波形($S_{80}\sim S_{200}$)を用いる。模擬波の位相特性は、標準波として HACHINOHE 1968 EW、直下型地震動として JMA KOBE 1995 NS、長周期地震動として TOMAKOMAI 2003 EW を採用する。図5(a),(b)に入力地震動の速度応答スペクトルとエネルギースペクトルを示す。

3. 構造体の安全限界値の設定

3.1 構造部材の実験論文に基づく安全限界値

耐震設計基準では構造体の塑性変形能力の確保は、柱・梁に局部座屈が生じない幅厚比の制限、梁の横座屈を防止するための保有耐力横補剛、柱梁接合部や継手部の耐力を確保する保有耐力接合が規

表3 検討建物の諸元($T_1=1.21$ s series)

構造形式		C_0	C_D	C_u	$T_1(sec)$
耐震	純ラーメン構造	0.2	0.11	0.16	1.81
		0.25	0.17	0.26	1.45
		0.3	0.25	0.37	1.21
		0.4	0.4	0.59	0.95
	耐震ブレース付構造	0.2	0.16	0.33	1.27
		0.25	0.25	0.51	1.02
		0.3	0.3	0.64	0.92
		0.4	0.4	0.88	0.80
構造形式		α_s			$T_1(sec)$
制振	制振ブレース付構造	0.06,0.09,0.12,0.15,0.18			1.81
免震	免震構造	0.04,0.05			3.00
		0.04,0.05			4.00

図3 簡略解析モデルの概念

図4 検討建物の一次固有周期 T_1 と一次設計用ベースシア係数 C_D の関係

図5 応答スペクトル($S_v=100$ cm/sec)

図6 累積塑性変形倍率の算定方法

定されている。調査文献の柱梁接合部試験体は、最高の幅厚比ランク Ⅲ でこれらの規定を満足するものがほとんどであり、塑性変形能

力を確保した柱梁接合部の破壊実験論文から標準的な接合部の破壊までの累積塑性変形倍率を構造部材の安全限界値として設定する。収集する実験論文は、角形鋼管柱とH型鋼梁の接合部を対象とする、正負交番の静的漸増荷重または動的荷重実験の論文とし、その中から溶接欠陥、不具合の見られないものとする。収集した文献6)~25)から、工場で梁端部を柱に溶接したブラケットタイプでは、JASS6型スカラップを基準として安全限界値を評価し、それに対する改良型スカラップ、ノンスカラップ型の性能を比較する。さらに、柱に梁を現場で取り付ける現場接合タイプでは、フランジを溶接接合しウェブをボルト接合とした梁端混用接合を評価する。また、RC床スラブの影響を評価するためブラケットタイプ梁にRC造スラブを付けた合成梁と角形鋼管柱の接合部の安全限界値を評価する。

累積塑性変形倍率は図6(a)に示す全履歴曲線より求めた値と、図6(b)に示す全履歴曲線からバウシング一部を分離した骨格曲線より求めた2種類の値を求める。全履歴曲線から求まる累積塑性変形倍率 η は、次式で求める。

$$\eta = \frac{\sum (W_{pi}^+ + W_{pi}^-)}{M_p \cdot \theta_y}, \quad \eta_s = \frac{\sum (\theta_{pi}^+ + \theta_{pi}^-)}{\theta_y} \quad (2a, b)$$

ここで、 W_{pi}^+, W_{pi}^- : 正負の塑性履歴エネルギー

$\theta_{pi}^+, \theta_{pi}^-$: 部材端部の正負の塑性部材角

M_p : 部材端部の全塑性モーメント

θ_y : 部材端部の全塑性モーメントに対する弾性限部材角

また、骨格曲線から求まる累積塑性変形倍率 η_s は、次式で求める。

$$\eta_s = \frac{(W_p^+ + W_p^-)}{M_p \cdot \theta_y}, \quad \eta_{s1} = \left(\frac{\theta_p^+}{\theta_y} - 1 \right) + \left(\frac{\theta_p^-}{\theta_y} - 1 \right) \quad (3a, b)$$

ここで、 W_p^+, W_p^- : 骨格曲線から求まる累積塑性履歴エネルギー

θ_p^+, θ_p^- : 骨格曲線から求まる累積塑性部材角

図7~図11に接合形式ごとに累積塑性変形倍率を示す。また接合形式はその詳細図を図中に示す。図7(a)で $\eta=10 \sim 30$ 、図7(b)で $\eta_s=3 \sim 8$ の範囲にあるJASS6型スカラップ試験体は、溶接時の積層方法が一層一パス、梁材がSN材以外、柱の幅厚比が比較的大きいなどが原因で、 η, η_s が小さくなっていると考えられている。限界値を平均値 -1.0σ と設定すると、概ね $\eta_{su}=32$ 、 $\eta_{su1}=10$ となり、上述の試験体を除いた下限値で設定したことになる。次に、スカラップ形状の違いによる性能評価は、JASS6型スカラップを基準として実験が実施されたものが多かったことから、本論文では、文献ごとまたは文献内で柱・梁の材種と寸法・形状が同じでスカラップ形状が異なる試験体(試験シリーズ)ごとに η, η_s を整理し、JASS6型試験体に対する改良型及びノンスカラップ型試験体の η, η_s の比率 r_f を求めることにする。JASS6型の η_u, η_{su} が平均値 -1.0σ で設定されていることから、改良型及びノンスカラップの η_u, η_{su} の算定には、 r_f の平均値を用いる。全履歴曲線と骨格曲線から求めたそれぞれの累積塑性変形倍率 η, η_s について、図8(a),(b)にはJASS6型と改良型の、図9(a),(b)にはJASS6型とノンスカラップの関係を示す。図中、1つのプロット点が1つの試験シリーズのスカラップ形状ごとに集計した η, η_s の平均値を示す。ただし改良型試験体については、種々のスカラップ形状が提案されており、ここでは試験体数の多かった文献6)の改良型スカラップのみを評価対象とする。これらの図より、改良型はJASS6型に対し η で $r_f=1.25$ 倍、 η_s で $r_f=1.16$ 倍、またノンスカラップ型は η で $r_f=1.70$ 倍、 η_s で $r_f=1.42$ 倍の限界値を設定する。

図7 JASS6型スカラップ試験体の累積塑性変形倍率

図8 JASS6型スカラップと改良型スカラップの比較

図9 JASS6型スカラップとノンスカラップ型の比較

図10 梁端混用接合試験体の累積塑性変形倍率

図11 床スラブ付鉄骨梁と純鉄骨梁の比較

梁ウェブを高力ボルト摩擦接合しフランジを現場溶接接合する梁端混用型はJASS6型スカラップと比較をしている文献が無かったため、試験体毎の η , η_u を図10に示す。JASS6型試験体と同様に、限界値を平均値 -1.0σ と設定すると、概ね $\eta_u=20$, $\eta_{um}=9$ となる。これらの値がJASS6型スカラップ試験体に対して比較的小さい値となっているのは、摩擦接合部の滑りによりウェブのモーメント伝達効率が低くなり、フランジのモーメント負担が大きくなることでスカラップ底に局部的に応力が集中し、早期に破断したためと考えられている。

RC床スラブと梁上フランジを頭付きスタッドで一体にした合成梁は試験体数が少ないため、溶接欠陥の見られる試験体についても評価対象として、床スラブの有無による限界値を比較する方法で評価する。横軸に床スラブのない純鉄骨梁、縦軸に合成梁の値をとり、同じ試験シリーズの純鉄骨梁と合成梁の累積塑性変形倍率をプロットしたものを図11に示す。純鉄骨梁に比べ1/2倍程度の低い値を示したのは、曲げモーメントを受けた際に床スラブと一体の上フランジが負担する軸力が下フランジに比べて大きくなり、これにより中立軸が上昇して下フランジの歪が増大し、早期に破断したためと考えられている。一方、純鉄骨梁に比べて合成梁の全塑性モーメントは数割程度大きくなるため、吸収エネルギーが等価になる合成梁の η , η_u は、純鉄骨に対して2/3倍を設定する。

累積塑性変形倍率は、破壊実験では一方向荷重試験結果との対応を図る意味で、全履歴曲線を骨格曲線部とパウシンガー部に分離し、骨格曲線より求めた η_u で整理されることが多い。一方、時刻歴応答解析では、部材や層の復元力特性が骨格曲線部とパウシンガー部を分離することが難しいことから全履歴曲線より求めた η で整理するのが一般的である。破壊実験から求めた η と η_u の関係を図12に示す。図12により、概ね $\eta=3.4\eta_u$ であり、設計で想定される一般的な範囲内に入っている。

以上より、JSCA性能メニュー表は時刻歴応答解析結果に対する規定であることから、部材の累積塑性変形倍率は全履歴曲線より求めた η_u で表す。ブラケットタイプの接合形式でスカラップ形状がJASS6型の床スラブ付鉄骨梁の η_u は、図7(a)で得られた純鉄骨梁の $\eta_u=32$ に床スラブの影響による低減係数2/3を乗じて、 $\eta_u=21.5$ とする。同様に接合形式が梁端混用接合梁の η_u は、図10で得られた $\eta_u=20$ を用いて $\eta_u=20 \times 2/3=13.5$ とする。改良型及びノンスカラップ型の η_u は、JASS6型の $\eta_u=21.5$ に接合形式に応じた r_j を乗じて算定し、表4のように設定する。

表4 累積塑性変形倍率の安全限界値 η_u

接合形式	η_u	r_j
JASS6型スカラップ	21.5	1.0
改良型スカラップ	27.0	1.2
ノンスカラップ	36.5	1.7
梁端混用接合	13.5	0.63

r_j : JASS6型の η_u に対する比率

3.2 構造骨組と部材の累積塑性変形倍率の関係

図1の架構モデルを用いた部材レベルの応答解析により、部材と層の応答値の比率を求め、前節で設定した部材の累積塑性変形倍率の安全限界値 η_{um} をもとに構造骨組の限界値 η_u を定め

図12 η と η_u の関係

図13 層の履歴曲線のBi-linear置換

図14 層と部材の累積塑性変形倍率

図15 層と部材の塑性率

▲ ART HACHI ▼ ART KOBE ● ART TOMA ○ 平均値
—— ART HACHI - - - - ART KOBE ART TOMA

(a) 純ラーメン構造

(b) 耐震ブレース付構造

図16 層間変形角の比率 $R(S_v)/R(S_{v100})$ と S_v の関係

● 純ラーメン構造 ● 耐震ブレース付構造 ○ 最大頻度の平均値

図17 層の塑性率 μ の比率 $\mu(S_v)/\mu(S_{v100})$ 図18 部材の塑性率 μ の比率 $\mu_m(S_v)/\mu_m(S_{v100})$

る。文献 2)と同様に、図 13 に示すように、架構の増分法による静的弾塑性解析から得られる各層の荷重-変形関係を、表 2 に示した安全限界 $R=1/75$ に相当する層間変形 δ_y 時の履歴面積が等しくなる (面積 S_1 =面積 S_2) 完全弾塑性型復元力特性に置換する。層の累積塑性変形倍率 η は、この置換した復元力特性における $Q_{eq} \cdot \delta_{eq}$ で、塑性履歴エネルギー (履歴ループ面積の累積値) を除した値としている。 δ_y は層に関わる部材が最初に全塑性モーメントに達する層間変形であり、部材の累積塑性変形倍率の起点となる。図 2 に示すように構造形式の違いにより δ_y と δ_{eq} に差が生じ、純ラーメン構造では $\delta_y / \delta_{eq} = 0.86 \sim 0.93$ 、耐震ブレース付構造では $\delta_y / \delta_{eq} = 0.63 \sim 0.79$ であった。従って、ここでは起点の差を解消するため、 δ_y / δ_{eq} を考慮した下式で累積塑性変形倍率の層の安全限界値 η_u と部材の安全限界値 η_{mu} を関係づける。

$$\eta_u = b(\delta_y / \delta_{eq}) \eta_{mu} \quad (5)$$

ここで、 η_u : 層の累積塑性変形倍率の安全限界値、 η_{mu} : 部材の累積塑性変形倍率の安全限界値を示す。部材の累積塑性変形倍率は、純ラーメン架構では全層にわたって大きい応力を示す梁端部 (A 通り架構, ③の右) を、耐震ブレース付構造ではラーメン架構の梁端部 (A 通り架構, ③の右) と連層耐ブレース付架構の境界梁 (C 通り架構, ③の右) を対象とする。図 14 に梁端部と層の累積塑性変形倍率を示す。図 14 よりラーメン架構の梁端部と耐震ブレース付架構の境界梁で、 b 値は若干異なるが、ここでは $b=0.5$ に設定する。

塑性率は、層も部材も δ_y が起点となるため、塑性率の層の安全限界値 μ_u と部材の安全限界値 μ_{mu} を下式で定義する。

$$\mu_u = c \mu_{mu} \quad (6)$$

累積塑性変形倍率と同様の位置の梁端部を対象にして、図 15 にラーメン架構の梁端部及び耐震ブレース付架構の境界梁と層の塑性率を示す。図 15 より、 c 値は純ラーメン構造、耐震ブレース付構造ともに $c=0.8$ に設定する。

4. 安全限界値に対する余裕度レベルの設定

4.1 構造体の性能評価項目の余裕度レベルの設定

JSCA 性能メニューでは、層間変形角 R を性能評価項目の基準と考えており、損傷限界、余裕度 I、余裕度 II、安全限界の順に $1/200, 1/150, 1/100, 1/75$ と設定している。そこで、 S_{v100} 入力時の応答層間変形角 $R(S_{v100})$ を基準にとり、入力レベル S_v をパラメトリックに変化させた応答層間変形角 $R(S_v)$ との比率 $(R(S_v)/R(S_{v100}))$ を求め、余裕度 I ($r_1=2.0$)、余裕度 II ($r_2=1.33$) に対応する入力レベルを設定する。純ラーメン構造 ($C_0=0.2 \sim 0.4$) と耐震ブレース付構造 ($C_0=0.2 \sim 0.4$) の層間変形角の比率 $(R(S_v)/R(S_{v100}))$ と入力レベル $S_v=80 \sim 200 \text{ cm/s}$ の関係を図 16(a),(b) に示す。図中、地震波ごとの $R(S_v)/R(S_{v100})$ の平均値から最小二乗法により求めた S_v と $(R(S_v)/R(S_{v100}))$ の関係を曲線で示し、入力レベルごとに全地震波の平均値を○印で示す。図 16 より、構造形式や地震波によらず、それぞれ余裕度 I、余裕度 II に対応する入力レベルとして S_{v200} 、 S_{v125} を設定する。

次に、これらの余裕度 I、余裕度 II、安全限界に相当する入力レベルの応答値から、性能評価項目 μ, η, μ_m, η_m における安全限界値

図 19 層の累積塑性変形倍率 η の比率 $\eta(S_v)/\eta(S_{v100})$ の頻度分布

図 20 部材の累積塑性変形倍率 η_m の $\eta_m(S_v)/\eta_m(S_{v100})$ の頻度分布

図 21 制振、免震部材の W_d 、 δ_i の比率

図 22 層間変形角 R と他の性能評価項目との係数 c_1, c_2 の比較

純ラーメン構造 $\blacktriangle C_0=0.20$ $\blacktriangledown C_0=0.25$ $\bullet C_0=0.30$ $\blacksquare C_0=0.40$
 耐震ブレース付構造 $\triangle C_0=0.20$ $\triangledown C_0=0.25$ $\circ C_0=0.30$ $\square C_0=0.40$
 制振構造 $\times T_f=1.81$
 免震構造 $\circ T_f=3.0$ $\triangle T_f=4.0$ $\triangledown T_f=5.0$

図 23 床加速度と判断基準値

に対する比率 $r_{1,2}$ を検討する。 $T_1=1.21\sim 5.0s$ 及び $C_0=0.2\sim 0.4$ の純ラーメン構造と耐震ブレース付構造の解析モデルについて $S_v=80\sim 200cm/s$ 入力時の応答解析を行い、塑性率 μ, μ_m と累積塑性変形倍率 η, η_m の $\mu(S_v)/\mu(S_{v100})$, $\eta(S_v)/\eta(S_{v100})$ と S_v の関係を図 17~20 の(a)に示す。 S_{v125} S_{v200} レベル入力時における $\mu(S_v)/\mu(S_{v100})$, $\eta(S_v)/\eta(S_{v100})$ の頻度分布を図 17~20 の(b),(c)に示す。図(a)中、○印で最大頻度を示す領域の平均値を示す。平均値は、 S_{v200}, S_{v125} の順に μ で 1.69, 1.24, μ_m で 1.80, 1.15, η で 4.61, 1.70, η_m で 4.46, 1.60 であった。

同様の方法で、制振ブレースと免震ダンパーの吸収エネルギー W_d 、免震層の最大変形 δ_d の安全限界値に対する比率 $r_{1,2}$ を設定する。図 21(a), (b)に吸収エネルギーの比率 $W_d(S_v)/W_d(S_{v100})$ 、図 21(c)に免震層の最大変形の比率 $\delta_d(S_v)/\delta_d(S_{v100})$ と S_v の関係を示す。なお、図中の○印は S_{v200}, S_{v125} レベル入力時の $W_d(S_v)/W_d(S_{v100})$, $\delta_d(S_v)/\delta_d(S_{v100})$ の平均値を示す。平均値は、 S_{v200}, S_{v125} の順に $W_d(S_v)/W_d(S_{v100})$ は制振ブレースで 4.60, 1.66, 免震ダンパーで 3.98, 1.56, 免震層の $\delta_d(S_v)/\delta_d(S_{v100})$ は 2.57, 1.38 であった。

S_{v100} 入力時の応答値に対する S_{v200}, S_{v125} の応答値の比率の平均値が、それぞれ安全限界値に対する比率 $r_{1,2}$ を表していることから、他の性能評価項目の比率と層間変形角の比率($r_1=2.0$, $r_2=1.33$)との比較を図 22 に示す。図 22 より、構造体、及び、制振、免震部材に関わらず、比率 $r_{1,2}$ は最大変形に関わる項目と累積値に関わる項目に分けることができ、分けた項目ごとにほぼ同じ値を示す。ここでは、 $r_{1,2}$ を層間変形角の比率の関数で表すことにする。最大変形に関わる項目は層間変形角と同じ値($r_1=2.0$, $r_2=1.33$)を採用し、累積値に関する評価項目は層間変形角の値の二乗とし、余裕度 I で $r_1=4.0$ 、余裕度 II で $r_2=1.77$ とする。

4.3 床加速度の性能判断基準値

床加速度は収容物の移動・転倒などに関わる応答値であり、電算機移動・転倒防止を目的とした床応答加速度の評価基準²⁶⁾を参考に、表 2 では移動しやすい機器の移動防止対策のみを規定している床加速度 $\alpha=2.5m/s$ を余裕度 I と設定し、全ての機器の移動・転倒防止対策が必要となる $\alpha=10.0m/s$ を安全限界とし、その間を補完する値 $\alpha=5.0m/s$ を余裕度 II としている。

ここでは、基準となる S_{v100} レベル入力時の表 3 に示す全解析モデルの床加速度と判断基準値を比較して、その妥当性を検証する。図 23(a),(b),(c)に、それぞれ耐震構造における終局耐力 C_u 、制振ブレースと免震構造ダンパーの降伏せん断力係数 α_s 、1 次固有周期 T_1 と床加速度 a の関係を示す。図中、表 2 で提案した判断基準値を横実線で示す。図 23(c)の T_1 は、免震構造では積層ゴムのみを、制振構造では初期剛性から求まる値を用いる。判断基準値は、全解析モデルの応答床加速度を概ね 3 段階に分割しており、床加速度の性能を評価できるように設定されている。

5. 性能判断基準値の設定

3 章と 4 章の結果をまとめて、表 2 に具体的な数値を入れた性能判断基準値表を表 5 に示す。表中、層間変形角は性能評価項目の基準とした応答値であり、表 2 に示した値を採用する。床加速度は 4.3 節で検証した表 2 の値を採用する。また、構造部材の累

表 5 性能判断基準値表

対象	性能評価項目	損傷限界	安全限界 余裕度 I	安全限界 余裕度 II	安全限界
建物挙動	$R(rad)$	1/200	1/150	1/100	1/75
	$\alpha(m/s^2)$	—	2.5	5.0	10.0
構造体	μ	1.0	2.0	3.0	4.0
	JASS6 型	0	$2.6(\delta_y/\delta_{eq})$	$6.0(\delta_y/\delta_{eq})$	$10.7(\delta_y/\delta_{eq})$
	ノスリタイプ	0	$4.5(\delta_y/\delta_{eq})$	$10.2(\delta_y/\delta_{eq})$	$18.2(\delta_y/\delta_{eq})$
	梁端混用	0	$1.7(\delta_y/\delta_{eq})$	$3.7(\delta_y/\delta_{eq})$	$6.7(\delta_y/\delta_{eq})$
	$\gamma(\%)$	0	30	60	100
	μ_m	1.0	2.5	3.75	5.0
	JASS6 型	0	5.4	12.0	21.5
構造部材	ノスリタイプ	0	9.0	20.5	36.5
	梁端混用	0	3.5	7.5	13.5
制振・免震部材	η_d	—	$\eta_{du}/4.0$	$\eta_{du}/1.77$	η_{du}
	W_d	—	$W_{du}/4.0$	$W_{du}/1.77$	W_{du}
	δ_d	—	$\delta_{du}/2.0$	$\delta_{du}/1.33$	δ_{du}

○ 純ラーメン構造 ● 耐震ブレース付構造

△▽ ($\alpha_s=0.06, 0.09$) 制振構造 <▷ ($T=3.0, 4.0$) 免震構造

— ART HACHI ——— ART KOBE ——— ART TOMA

図 24 応答値と判断値 λ

● ART HACHI △ ART KOBE ▽ ART TOMA

— ART HACHI (平均値) ——— ART KOBE (平均値) ——— ART TOMA (平均値)

図 25 性能評価項目 μ, μ_m, η, η_m の安全限界値に対する応答値の比率

積塑性変形倍率の安全限界値 η_{um} は、表 4 の値を採用し、構造骨組の η_u は、(5)式に $b=0.5$ と構造部材の η_{um} を代入して求める。

η_m と η の余裕度 I, II は、安全限界値 η_{um}, η_u を累積値に関する比率 $r_1=4.0, r_2=1.77$ で除して算出する。構造部材の塑性率の安全限界値 μ_{um} は、文献 5) に示された構造区分 S-I-1 に該当する部材の塑性変形能力の下限値をもとに $\mu_{um}=5.0$ とし、構造骨組の μ_u は、(6)式に $c=0.8$ と構造部材の μ_{um} を代入して求める。 μ_m と μ の余裕度 I, II は安全限界値 μ_{um}, μ_u を最大値に関する比率 $r_1=2.0, r_2=1.33$ で除して算出する。なお、構造体の塑性変形能力の確保の規定を満たさない場合は文献 5) 等に基づき限界値を適切に低減するものとする。制振ブレースと免震ダンパーの安全限界値 η_{du}, W_{du} 、免震層の最大変形の安全限界値 δ_{du} は、個々の建物ごとに設定されるものであり、ここでは安全限界値に対する比率 r_1, r_2 のみを示す。表 3 に示す部材レベルモデルを用いて S_{v100} レベル入力時の地震応答解析を行い、図 24(a)~(f)に、それぞれ層間変形角、床加速度、塑性率、累積塑性変形倍率と標準せん断力係数 C_0 の関係を示す。図中、○印が純ラーメン構造を、●印が耐震ブレース付構造の応答値を示す。また、制振建物の応答値を△▽印($\alpha_s=0.06, 0.09$)で、免震建物($\alpha_s=0.05$)の応答値を◁▷印($T=3.0, 4.0s$)で示す。このうち図 24(e),(f)の安全限界値は、 $\eta_{mu}=21.5, \eta_u=9.6$ (純ラーメン構造)、 $\eta_u=7.5$ (耐震ブレース付構造)と規定して、それに基づく判断基準値を示す。図 24 中の実線は純ラーメン構造、破線は耐震ブレース付構造の限界値を示し、線分で区分された領域を性能の上位に向かって判断値 $\lambda_i=0\sim 4$ と定義している。図 24 から応答値は、耐震・制振・免震構造などの構造形式や標準せん断力係数 C_0 の大きさにより、性能評価項目ごとに対応する判断値 λ が異なることがわかる。

6. 性能評価項目の重付係数の評価

文献 2) では、性能グレードの判定方法として、性能評価項目や構造形式毎に異なる判断値を総合的に評価する方法を示した。性能評価項目ごとの判断値 ($\lambda_i=0\sim 4$) に重付け a_i をし、判断値 λ_i との積の和の平均値 (平均判断値 $\bar{\lambda}$) を用いて評価する方法を提案し、重付係数 a_i を例示した。平均判断値 $\bar{\lambda}$ を下式で定義する。

$$\bar{\lambda} = \left(\sum_{i=1}^N a_i \cdot \lambda_i \right) / \left(\sum_{i=1}^N a_i \right) \quad (6)$$

ここで、 a_i : 重付係数 $0 \leq a_i \leq 1.0$

JSCA 性能メニューでは構造体や制振・免震部材の安全限界値は、建築基準法の規定する耐震性能レベルに相当すると位置づけられており、応答値がその値を超えることが重大な被害に結びつくことから、これら全ての性能評価項目が安全限界値内に納まっていることを検証することになっている。一方、安全限界余裕度 I, II は、損傷限界値と安全限界値の間を区分するために設定した値であり、被害や修復の程度の目安を示すものである。性能グレードの設定方法として、性能評価項目ごとの判断値の最小値を採用する方法が考えられるが、塑性率と累積塑性変形倍率の安全限界値に対する応答値の比率のばらつきが大きく

(図 25 参照)、全ての判断値の最小値を採用する方法では、図 24 に示すように対象とする地震動や性能評価項目が多くなるとグレード差が無くなり、性能の差を評価する観点からは適切とは思われない。従って、性能差の評価に主眼を置く方法として、(6)式の平均判断値 $\bar{\lambda}$ を用いている。また、層間変形角 R と床加速度 α では、図 24(a),(b)からわかるように、構造体の標準せん断力係数 C_0 の増加により、 R は減少するが α は増加するので、全ての判断値の最小値を採用する方法では評価が難しい。むしろ、(6)式で示す平均判断値 $\bar{\lambda}$ を用いる方が総合的な評価ができると考える。以上から、JSCA 性能メニューでは、構造体や制振・免震部材の性能評価項目が建築基準法の要求する耐震性能レベルに相当する安全限界値を満足した上で、建物挙動と構造体及びこれらを平均した総合評価を総合して評価書を作成するとしている。

ここでは、建物挙動の性能評価項目として、層間変形 R 、床加速度 α を選定し、表 1 に示す建物用途例から選定し、重付係数の修正案として表 6 を提案する。病院や研究施設のように収容物の移動・転倒や破損の防止策が必要される建物に対しては、床加速度に重みを付け、住宅などの一般建物の場合は人命保護に加えて構造体や非構造部材の損傷低減が要求されることから、層間変形に重みを付ける。防災拠点のように地震発生時から終了後も建物としての機能を維持する必要がある建物については、同じ重みとする。なお、重付けは明らかな差が付く 1:2 とする。

構造体の性能評価項目として、塑性率 μ, μ_m 、累積塑性変形倍率 η, η_m の 4 項目を選定し、構造形式ごとに安全限界に対する応答値の比率を求め、それに比例するように重付けを行う。表 3 に示した純ラーメン構造と耐震ブレース付構造のそれぞれの応答値から求めた比

表 6 建物用途ごとの性能評価項目の重付係数 a_i 一覧

対象		評価項目	防災拠点	病院	一般建築物	
建物挙動		R	0.5	0.3	0.7	
		α	0.5	0.7	0.3	
		Σa_i	1.0	1.0	1.0	
対象		評価項目	層応答			
構造体	構造骨組	μ	1/3	—	1/6	
		η	1/3	—	1/6	
		γ	1/3	1/3	1/3	
	構造部材	μ_m	—	1/3	1/6	
		η_m	—	1/3	1/6	
		Σa_i	1.0	1.0	1.0	
対象		評価項目	制振		免震	
制振・免震部材		η_d	0.5	—	0.5	—
		W_d	—	0.5	—	0.5
		δ_d	0.5	0.5	0.5	0.5
		Σa_i	1.0	1.0	1.0	1.0

図 26 平均判断値の $\bar{\lambda}$ の例示 (一般建物)

率を4項目の比率の総和で除した値 a_i を図 25(a),(b)に示す。図 25より、直下型、標準波、長周期地震動の3種類の地震波と $C_0=0.2\sim 0.4$ の範囲の応答結果は、標準せん断力係数 C_0 が小さいほど、継続時間の長い位相の地震波ほど、塑性率に比べて累積塑性変形倍率の a_i 値が大きくなり、ばらつきも大きくなる傾向を示す。ただし限られた解析結果であることから、可能な限り単純な形で整理することにし、塑性率と累積塑性変形倍率及び層と部材で異なる重みを付けないことにする。一方、安全限界値の見直しにより文献 2) に比べて純ラーメン架構と耐震ブレースの a_i 値の差は少なくなっている。また、構造体と分けて建物用途ごとに建物挙動を規定したことから、文献 2) では免震・制振構造を採用する建物用途を含んで重みを付けていた免震構造の上部構造も制振構造の主架構も、純ラーメン構造や耐震ブレース付架構と同じ重みを採用することにする。以上より、塑性ヒンジ発生率 γ を含めた5項目の重付係数 a_i を全て等しい値にする。表 6 は、簡略モデルによる層応答解析を行う場合には構造骨組の、部材レベルモデルによる応答解析の場合は構造部材または両方の評価を行うことを想定している。

免震構造では、ダンパーは累積塑性変形倍率 η_d またはエネルギー吸収量 W_d を、アイソレータは水平変形 δ_h を性能評価項目として選び、 η_d (または W_d) と δ_h に等しい重みを付ける。制振構造は、制振部材の累積塑性変形倍率 η_d またはエネルギー吸収量 W_d と、制振部材の可動変形 δ_k を性能評価項目として選び、エネルギー吸収性能と変形性能に等しい重みを付ける。以上を整理して表 6 に示す。ダンパーや制振部材には履歴減衰型や粘性減衰型があり、それぞれの限界性能に応じて性能評価項目を設定する。

図 24 の応答解析結果に表 6 の重付係数 a_i を適用し、総合評価を行った例を図 26 に示す。総合評価は、一般的な認識である免震・制振・耐震構造の順に高い平均判断値 $\bar{\lambda}$ を示しており、この評価手法の可能性を表している。

7. まとめ

本論文では、鋼構造の耐震・制振・免震建物を対象に、文献 2) で明らかにした ASCA 性能メニューにおける“判断基準値表”の課題である以下の点の検討を行った。

- ①構造部材や構造骨組の終局状態に対応した安全限界値を設定する。
- ②性能評価項目ごとに安全限界値に対する比率を見直す。
- ③構造体の性能評価項目に対応した重付係数を見直す。

これらの検討から、JSCA “性能判断基準値表”の修正と重付係数一覧表を再提案した。“性能判断基準値表”に示す構造体の安全限界値は、角形鋼管柱に接合された H 形鋼梁の柱梁接合部の破壊実験に関する論文を収集整理して設定している。また、安全限界余裕度 I, II を規定する安全限界値に対する比率 r_1, r_2 と構造体の性能評価項目の重付係数 a_i は、1 次固有周期 $T=1.0\sim 5.0$ 秒、標準せん断力係数 $C_0=0.2\sim 0.4$ で許容応力度設計された鋼構造の耐震・制振・免震建物を解析モデルに、長周期領域で $S_a=80\sim 200\text{cm/s}^2$ となる5段階の入力レベルで、位相特性が3種類(標準波、直下型地震動、長周期地震動)の模擬地震動波形を用いた応答解析結果に基づき設定している。従って、ここで提案した“性能判断基準値表”や“重付係数一覧表”の数値を、直接適用するのは、角形鋼管柱と H 形鋼梁で構成される中高層鋼構造の耐震・制振・免震建物に限られる。このように、収

集した特定の破壊実験結果と限られた数値解析結果によるものではあるが、“判断基準値表”の工學量と性能グレードの判定方法を提示することができたと考える。

今後とも、研究者・設計者の批判や意見をもとに議論を深め、設計者の目指す性能設計法の確立に向けて検討を続けたい。

謝辞

本論文は、JSCA 技術委員会目標性能 WG の活動の中で行った研究成果をまとめたものである。また、平成 17 年度科学研究費補助金基盤研究(B)「長寿命建築物が遭遇する全ての強震動を想定したライフサイクル累積損傷評価設計法(研究代表者:北村春幸、課題番号:17360275)」の研究に向けての成果の一部である。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) (社)日本建築構造技術者協会編:建築の構造設計,第4編目標性能と性能メニュー,オーム社,2002.7
- 2) 北村春幸,宮内洋二,福島順一,深田良雄,森伸之:性能設計における性能判断基準値に関する研究—時刻歴応答解析による JSCA 耐震性能メニューの検証—,日本建築学会構造系論文集,第 576 号,pp.47-54,2004.2
- 3) 秋山宏:エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計,技報堂出版,2002.4
- 4) 日本建築学会:建築耐震設計における保有耐力と変形性能,日本建築学会,1990.10
- 5) 日本建築学会:鋼構造限界状態設計指針・同解説,技報堂出版,2002.9
- 6) 日本建築学会近畿支部鉄骨部会:通しダイアフラム形式で角型鋼管柱に接合される H 形鋼梁の塑性変形能力に関する実大実験,1997.7
- 7) 秋山宏,他:実大振動台実験による柱梁接合部の破壊性状に関する研究,日本建築学会構造系論文集,第 512 号,pp.165-172,1998.10
- 8) 秋山宏,他:実大柱梁接合部の試験温度による延性破壊—脆性破壊遷移,日本建築学会構造系論文集,第 522 号,pp.105-112,1999.8
- 9) 中込忠男,他:ノンスラップ工法における梁端ディテールが柱梁溶接接合部の変形能力に及ぼす影響に関する実験的研究,日本建築学会構造系論文集,第 546 号,pp.121-128,2001.8
- 10) 吹田啓一郎,他:ノンスラップ工法と RBS 工法による柱梁接合部の塑性変形能力 日本建築学会構造系論文集,第 526 号,pp.177-184,1999.12
- 11) 中込忠男,他:梁材の力学的性能が柱梁溶接接合部の変形能力に与える影響に関する実験的研究,日本建築学会構造系論文集,第 540 号,pp.111-117,2001.2
- 12) 阿部洋,他:柱梁接合部の変形能力に及ぼす梁及び仕口制作方法の影響 その 1~その 2,日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.365-368,1998.9
- 13) 川乘安生,他:現場接合形式柱梁溶接接合部の力学性状に関する研究 その 1 エンドタブと溶接ワイヤ材質の影響,鋼構造論文集,第 7 巻第 28 号,pp.71-85,2000.12
- 14) 甲津功夫,他:現場接合形式柱梁溶接接合部の力学性状に関する研究 その 2 開先形状と溶接ワイヤの影響,鋼構造論文集,第 10 巻,第 38 号,pp.1-15,2003.6
- 15) 中込忠男,他:柱梁溶接接合部におけるノンスラップ工法梁端ディテールに関する実験的研究,日本建築学会構造系論文集,第 489 号,pp.141-151,1997.8
- 16) 中野達也,他:鋼構造梁端混用接合部の力学性状に関する実験的研究,日本建築学会構造系論文集,第 556 号,pp.139-144,2002.6
- 17) 坂本真一,他:鉄骨柱梁接合部における現場溶接接合形式梁端接合部の構造性能の改善法,鋼構造論文集,第 5 巻第 20 号,pp.113-124,1998.12
- 18) 増田浩志,他:鋼構造梁端混用接合部の力学性能に関する実験的研究,日本建築学会構造系論文集,第 509 号,pp.151-158,1998.7
- 19) 田中淳夫,他:鋼構造梁端混用接合部の力学性状に関する研究,日本建築学会構造系論文集,第 484 号,pp.121-130,1996.6
- 20) 江見卓郎,他:現場混用接合形式角形鋼管柱梁接合部の高力ボルトにおける応力伝達に関する研究,鋼構造論文集,第 11 巻第 43 号,pp.25-40,2004.9
- 21) 岡田健,他:従来型の柱梁接合部を有する合成梁の変形能力に関する実験的研究 合成梁の変形能力を反映した構造骨組の耐震性評価 その 1,日本建築学会構造系論文集,第 547 号,pp.161-168,2001.9
- 22) 岡田健,他:改良型の柱梁接合部を有する合成梁の変形能力に関する実験的研究,合成梁の変形能力を反映した構造骨組の耐震性評価 その 2,日本建築学会構造系論文集,第 554 号,pp.123-130,2002.4
- 23) 北園健一郎,他:合成ばり架構柱・はり接合部の破壊と塑性変形能力に関する研究,鋼構造論文集,第 8 号第 31 号,pp.65-79,2001.9
- 24) 石井匠,他:通しダイアフラム形式・柱梁接合部の破壊性状に関する実験的研究,鋼構造論文集,第 6 巻第 24 号,1999.12
- 25) 石井匠,他:通しダイアフラム形式・角型鋼管柱—合成梁接合部の破壊性状に関する実験的研究,鋼構造論文集,第 8 巻第 31 号,pp.87-102,2001.9
- 26) 通商産業省機械情報産業部:電子計算機システム安全対策基準 解説書,1991.6

(2005年10月7日原稿受理,2006年3月1日採用決定)