

他分野（建築、機械、原子力） における耐震設計との比較

中島 正愛（防災科学技術研究所）

第17回鋼構造基礎講座「鋼橋の耐震設計—その歴史
変遷、海外・他分野との比較から最新情報まで—」

他分野（建築、機械、原子力）における
耐震設計との比較

2009年11月16日

京都大学防災研究所
(独) 防災科学技術研究所・Eーディフェンス

中島 正愛

土木と建築の違い・・・こんな記事を昔書いた

中島正愛：米国ノースリッジ地震との類似点と相異点そして
我彼のゆく道の違い、Structures、日本建築構造技術者協会、
No.65、1998年1月、pp.47-49.

中島正愛：建築・土木分野における鋼構造物の耐震性能評価
の相違点・共通点(2)、JSSCジャーナル、日本鋼構造協会、
36号、2000年4月、p.18.

中島正愛、伊藤義人：建築・土木分野における鋼構造物の耐
震性能評価の相違点・共通点(3)土木建築の垣根を越えて、
JSSCジャーナル、日本鋼構造協会、37号、2000年7月、
pp.47-48.

中島正愛：建築と土木の棲み分けと連携—建築と土木の違
い：耐震設計—、土木学会誌、2001年10月、Vol.86、
pp.26-29.

本日のトピック

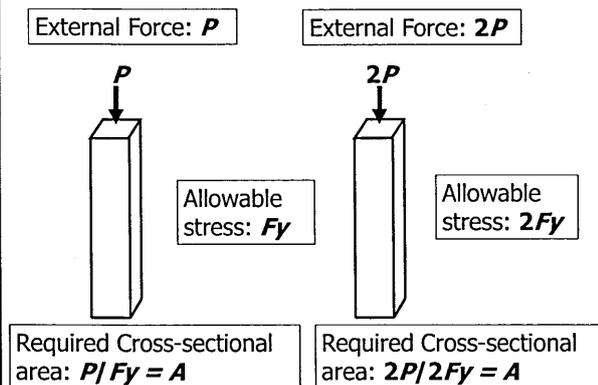
- (1) 設計規準における見かけの違いと実質の違い
- (2) 国やジャンルを超えた耐震設計規準の整備にお
ける性能設計の位置づけ
- (3) 耐震設計技術と耐震施工技術の違いと死守すべ
き耐震施工技術

議論その1

耐震設計規準における
見かけの違いと実質の違い

日米の耐震設計規準・指針はどれほど違うと
いうのか？

見かけの違いと実質の違いの例

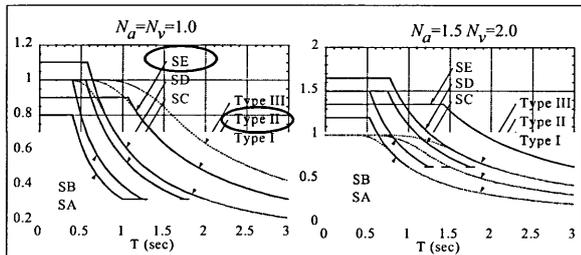


COMPARISON OF DUCTILITY EXPECTED TO STEEL MOMENT AND BRACED FRAMES IN THE U.S. AND JAPAN

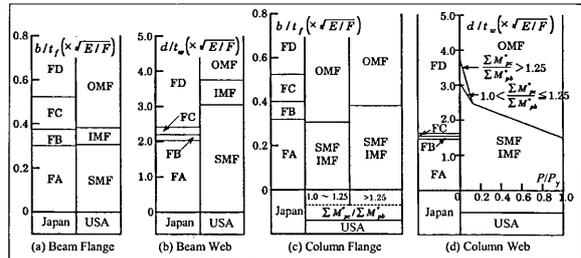
Nakashima, M., Roeder, C. W., and Maruoka, Y. (2000). "Steel Moment Frames for Earthquakes in the United States and Japan," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 126(8), 861-868.

Tada, M., Fukui, T., Nakashima, M., and Roeder, C. W. (2003). "Comparison of Strength Capacity for Steel Building Structures in the United States and Japan," *International Journal of Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, Chinese Taiwan Society for Earthquake Engineering 4(1), pp37-50.

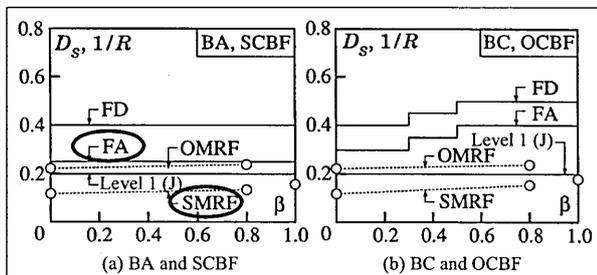
Unreduced Base Shear Spectra



Width-to-Thickness Requirements for Ductile Frames



Seismic Force Reduction Factors



所見

耐震設計規準における
見かけの違いと実質の違い
日米の耐震設計規準・指針はどれほど違うと
いうのか？

見かけは異なるが、実質はそんなに変わらない
— 日本の方がやや **“Conservative”**
⇓
万一黒船がやってきても、
じたばたする必要はない

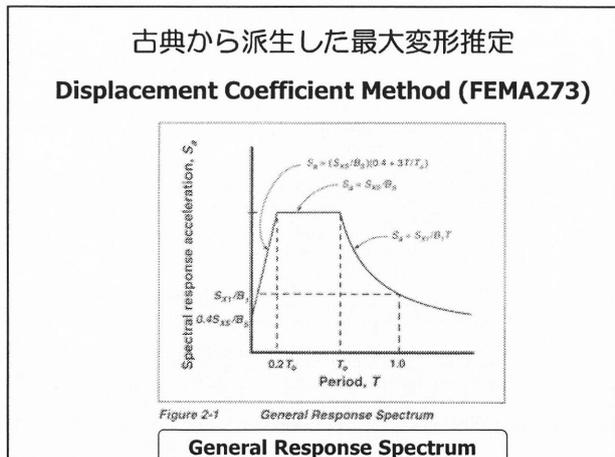
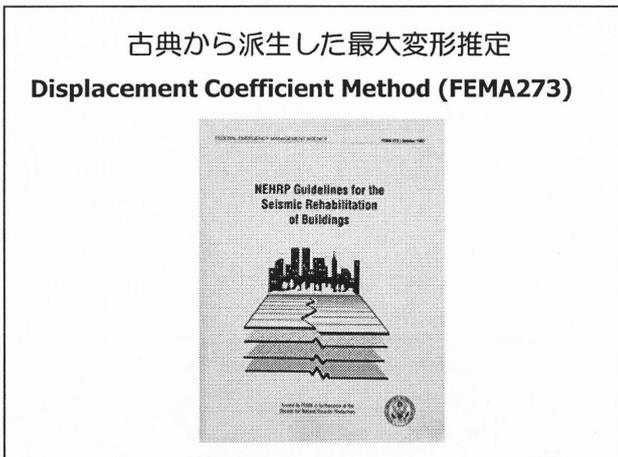
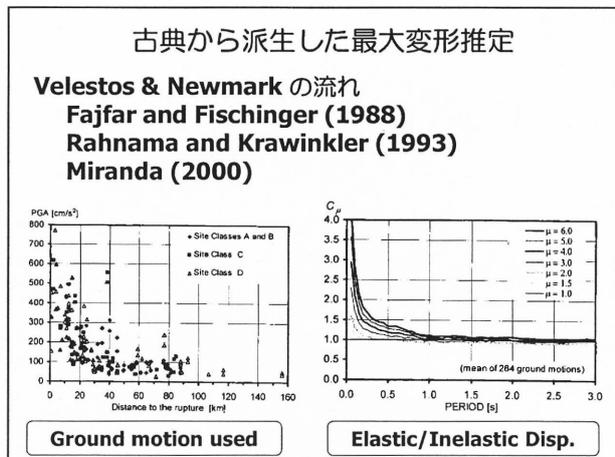
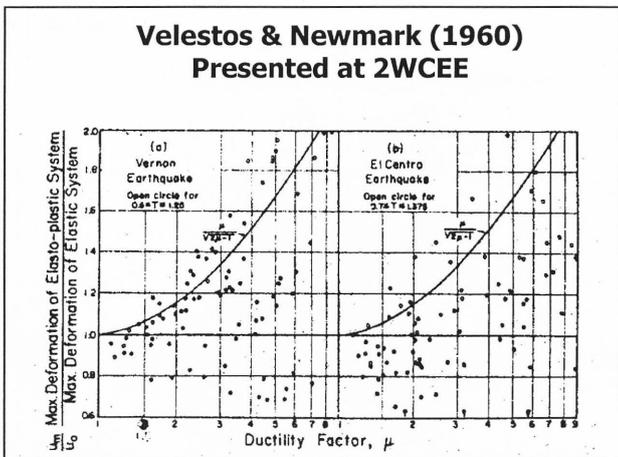
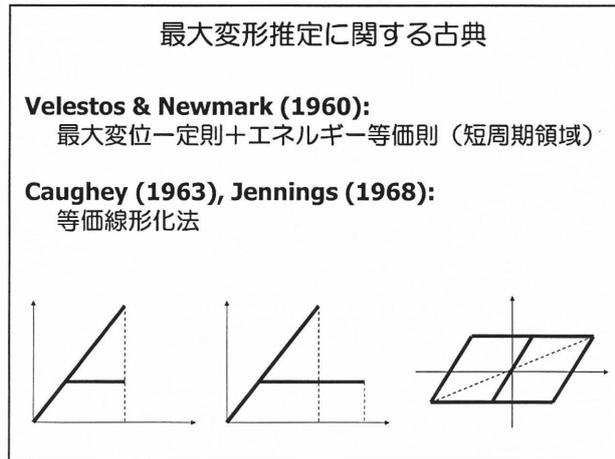
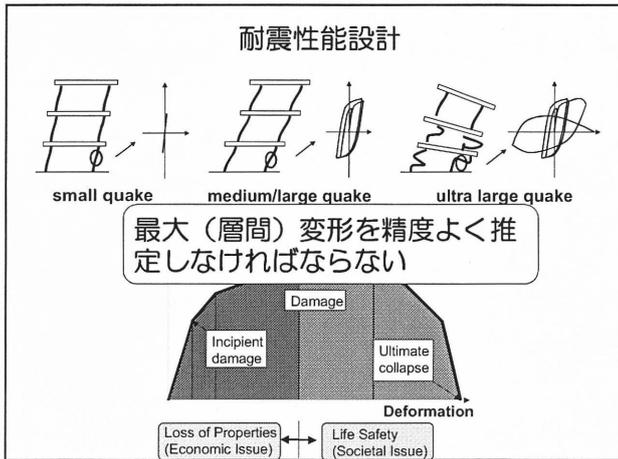
本日のトピック

- (1) 設計規準における見かけの違いと実質の違い
- (2) 国やジャンルを超えた耐震設計規準の整備における性能設計の位置づけ
- (3) 耐震設計技術と耐震施工技術の違いと死守すべき耐震施工技術

議論その2

国を越えた耐震設計規準の整備における性能設計の位置づけ

昨今性能設計の御旗の下で、**“Modal Pushover”**だとか **“Capacity Spectrum Method”**とかが声高に語られるけれども、それが国を越えた設計規準の規範となるのか？



古典から派生した最大変形推定
Displacement Coefficient Method (FEMA273)

δ_i ; Target Displacement

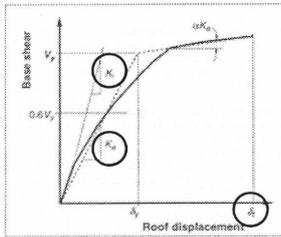


Figure 3-1 Calculation of Effective Stiffness, K_e

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}}$$

T_e = Effective fundamental period
 T_i = Elastic fundamental period
 K_i = Elastic lateral stiffness
 K_e = Effective lateral stiffness

$$\delta_i = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g = S_d$$

古典から派生した最大変形推定
Displacement Coefficient Method (FEMA273)

C_0 = spectral displacement
 = the first modal participation factor
 C_1 = expected maximum inelastic displacements
 = 1.0 for $T_e \geq T_0$
 = $[1.0 + (R-1)T_0/T_e]/R$ for $T_e < T_0$

$$R = \frac{S_a}{V_y/W C_0} \quad R: \text{strength ratio}$$

C_2 = the effect of hysteresis shape

$$C_2 = 1.0 - 1.5$$

C_3 = increased displacements due to dynamic P- Δ effects

$$= 1.0 + \frac{|\alpha|(R-1)^{3/2}}{T}$$

$$\delta_i = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g$$

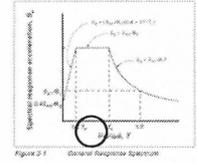
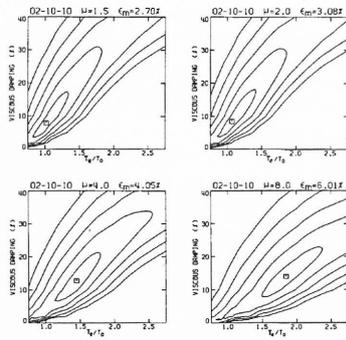


Figure 3-2 General Response Spectrum

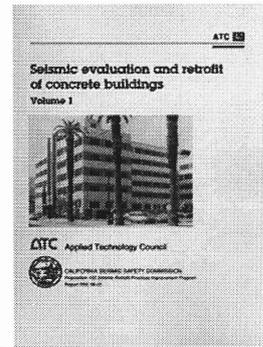
古典から派生した最大変形推定

Jennings の流れ
 Iwan (1988)



Optimized Period and Damping

古典から派生した最大変形推定
Capacity Spectrum Method (CSM) (ATC40)



古典から派生した最大変形推定

Capacity Spectrum Method (CSM) (ATC40)

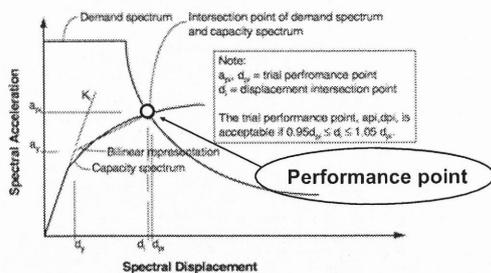


Figure 8-22. Intersection Point of Demand and Capacity Spectrums Within Acceptable Tolerance

最大変形推定法の精度

Veletos / Newmark	$\Delta_p = \Delta_e$	(NHD)
	$\Delta_p = (\mu / \sqrt{2\mu - 1}) \Delta_e$	(NHE)
Jennings	$T_e / T_0 = \sqrt{\mu}$	$h_e = (2/\pi)(1 - 1/\mu)$ (Simple)
Shibata / Sozen	$T_e / T_0 = \sqrt{\mu}$	$h_e = 0.2(1 - 1/\mu)$ (Substitute)
Iwan	$T_e / T_0 = 1 + 0.12(\mu - 1)^{0.939}$	$h_e = 0.0587(\mu - 1)^{0.371}$
AIJ	$T_e / T_0 = 1 + 0.12(\mu - 1)$	$\tau = \{1 + 0.12(\mu - 1)\} / \sqrt{\mu}$
		$h_e = 0.0258(\mu - 1)\tau$ ($T_0 \leq 0.7$)
		$h_e = 0.0564(\mu - 1)\tau$ ($T_0 > 0.7$)

最大変形推定法の精度

Analysis Variables

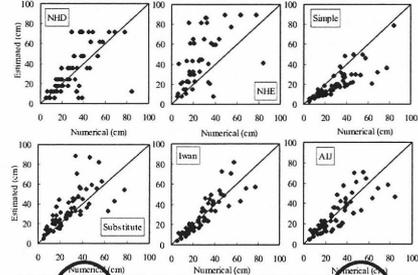
- Natural period (T)
0.25 s, 0.5 s, 0.75 s, 1.0 s, 1.5 s, 2.0 s, 3.0 s
- Input ground motion:
El Centro NS (1940), NTT-NS (1995), Yokohama
- Yield strength (Q_y/Q_e)
0.5, 0.3, 0.15 (equivalent to D_s)
- r Viscous damping ratio = 0.02

Procedure to Estimate Accuracy of Linearization Methods

- (1) perform inelastic analysis and obtain max. displacement and m
- (2) insert m to estimate equivalent period (T_e) and damping ratio (h_e)
- (3) perform elastic analysis with T_e and $h_{eq} = h_e + 0.02$
- (4) compare max displacements obtained from (1) and (3)

最大変形推定法の精度

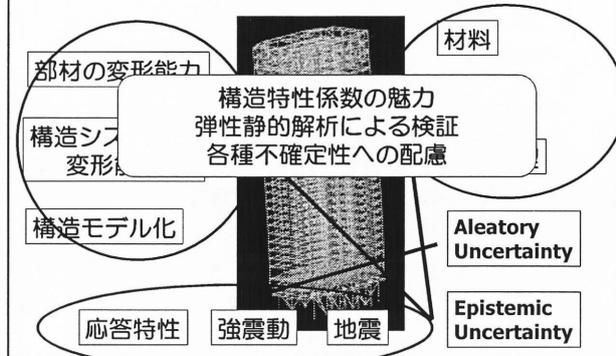
中島 & 稲岡 (1999)



	NHD	NHE	NH	Simple	Substitute	Iwan	AIJ
Ave	1.07	1.27	1.4	0.7	1.36	1.02	0.97
COV	0.46	0.69	0.6	0.31	0.36	0.26	0.35

構造特性係数：ATC3 (1978)

耐震設計にまつわる種々の不確定性



静的解析と動的解析

- 弾性静的解析
- 弾塑性静的解析 (Pushover)
- 応答スペクトル法 (弾性)
- 弾性時刻歴応答解析
- 弾塑性時刻歴応答解析 (Stick model)
- 弾塑性時刻歴応答解析 (Frame model)

日本
高層等の評定

米国
弾性静的解析

米国における弾塑性解析・時刻歴応答解析

1631.6.1 Time history. Time-history analysis shall be performed with pairs of appropriate horizontal ground-motion time-history components that shall be selected and scaled from not less than three recorded events. Appropriate time histories shall have magnitudes, fault distances and source mechanisms that are consistent with those that control the design-basis earthquake (or maximum credible earthquake). Where three appropriate recorded ground-motion time-history pairs are not available, appropriate simulated ground-motion time-history pairs may be used to make up the total number required. For each pair of horizontal ground-motion components, the square root of the sum of the squares (SRSS) of the 5 percent-damped site-specific spectrum of the scaled horizontal components shall be constructed. The motions shall be scaled such that the average value of the SRSS spectra does not fall below 1.4 times the 5 percent-damped spectrum of the design-basis earthquake for periods from 0.27 second to 1.57 seconds. Each pair of time histories shall be applied simultaneously to the model considering torsional effects.

The parameter of interest shall be calculated for each time-history analysis. If three time-history analyses are performed, then the maximum response of the parameter of interest shall be used for design. If seven or more time-history analyses are performed, then the average value of the response parameter of interest may be used for design.

1631.6.2 Elastic time-history analysis. Elastic time history shall conform with 1631.2, 1631.3, 1631.5.2, 1631.5.4, 1631.5.5, 1631.5.6, 1631.5.7 and 1631.6.1. Response parameters from elastic time-history analysis shall be denoted as Elastic Response Parameters. All elements shall be designed using Strength Design. Elastic Response Parameters may be scaled in accordance with Section 1631.5.4.

1631.6.3 Nonlinear time-history analysis.

1631.6.3.1 Nonlinear time history. Nonlinear time-history analysis shall conform with Section 1629.10, and time histories shall be developed and results determined in accordance with the requirements of Section 1631.6.1. Capacities and characteristics of nonlinear elements shall be modeled consistent with test data or substantiated analysis, considering the Importance Factor. The maximum inelastic response displacement shall not be reduced and shall comply with Section 1630.10.

1631.6.3.2 Design review. When nonlinear time-history analysis is used to justify a design, a design review of the lateral force-resisting system shall be performed by an independent engineering team, including persons licensed in the appropriate disciplines and experienced in seismic analysis methods. The lateral-force-resisting system design review shall include, but not be limited to, the following:

1. Reviewing the development of site-specific spectra and ground-motion time histories.
2. Reviewing the preliminary design of the lateral-force-resisting system.
3. Reviewing the final design of the lateral-force-resisting system and all supporting analyses.

The engineer of record shall submit with the plans and calculations a statement by all members of the engineering team doing the review stating that the above review has been performed.

米国におけるEngineering Review

Comartin (2003)

Plan
建築

"Peer Review"が必要な対象や、動的解析の方法に "Standard"がない米国の実情 —
ATC55(2003)

Value Engineering:

建築主が費用削減を図るために、別の設計者に内容をチェックさせる行為

Peer
建築

設計

計に

する行為

弾塑性解析や時刻歴応答解析法の耐震設計実践への適用が盛んな日本の実情と、それを促進するために「評定」が果たした役割

設計

所見

昨今性能設計の御旗の下で、“Modal Pushover”だとか“Capacity Spectrum Method”とかが声高に語られるけれども、それが国を越えた設計規準の規範となるのか？

日本が育ててきた非線形時刻歴応答解析による検証法が風下にたつ理由は全くない

⇨

この方法を断固死守すべきで、そのためのキャンペーンを展開しよう

本日のトピック

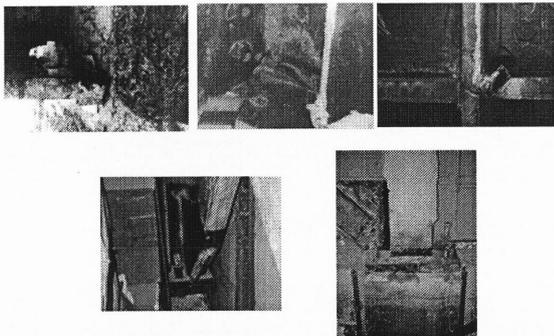
- (1) 設計規準における見かけの違いと実質の違い
- (2) 国やジャンルを超えた耐震設計規準の整備における性能設計の位置づけ
- (3) 耐震設計技術と耐震施工技術の違いと死守すべき耐震施工技術

議論その3

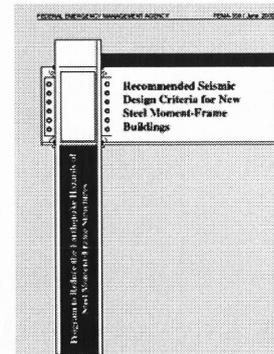
耐震設計技術と耐震施工技術の違いと死守すべき耐震施工技術

米国ノースリッジと神戸で鋼構造建物は未曾有の被害を受け、現行の耐震設計プラクティスの是非が問われる結果となった。同種の被害を受けたのに、それを解決するための取り組みは、太平洋の両岸でかくも異なっている。なぜか？

ノースリッジ地震による鋼構造被害



SAC-Joint Venture for Steel Research/Development



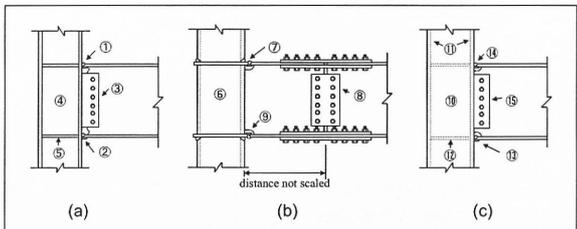
被害・設計・施工の相違

梁の塑性変形能力 ● 塑性化・局部座屈後の破断 〻 塑性化の見られない破断	鋼材 ● SN鋼、降伏比 〻 Dual-purpose steel
柱梁接合部 ● ボックス柱・通シダイアフラム 〻 H形断面柱・フランジ溶接 / ウェブ高ボルト接合	溶接 ● GMAW、工場溶接 〻 FCAW、現場溶接
	構造システム ● 完全剛接合 〻 ピン接合・剛接合混合

梁塑性変形能力の違い

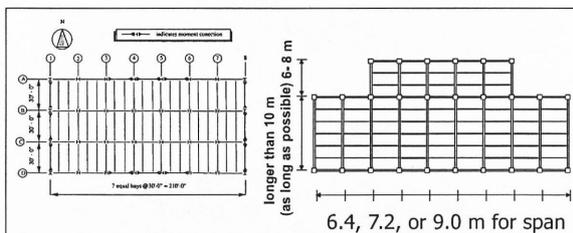
● 塑性化・局部座屈後の破断	〻 塑性化の形跡がない破断

日米で多用される溶接柱梁接合部



①CJP FCAW field welds: ②backing bar left in place: ③fillet weld if required: ④continuity plate or stiffener if required: ⑤double plate if required: ⑥cold formed steel tube: ⑦CJP GMAW shop welds: ⑧field bolted splices: ⑨backing bar left in place: ⑩built-up tubular column: ⑪longitudinal submerged arc welds: ⑫internal stiffeners welded in place: ⑬backing bar left in place: ⑭CJP GMAW field welds: ⑮ field bolted splices

日米で用いられる構造システム



米国
ピン接合・剛接合併用

日本
全剛接合

地震後の動きの相違

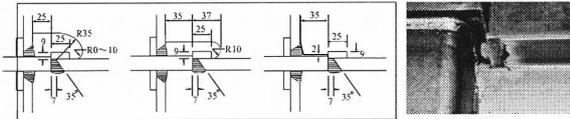
じん性の高い鋼材 ● SN鋼、降伏比<0.8 〻 A992鋼、降伏比<0.85 日本の高い意識	溶接 ● ていねいな溶接 〻 じん性値の高い溶接棒 米国における大きな変化
接合部 ● スカラップ形式の改良 〻 カバープレート、ハンチ、RBS 日米の顕著な相違	構造システム ● ボックス柱、全剛接合 〻 H形断面柱、ピン接合・剛接合併用形式、不静定係数 日米ともに変わらないシステム

ノースリッジ・神戸における鋼構造建物被害とその後の動き

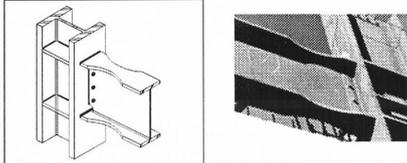
● 〻	● 〻
Similarities <input type="checkbox"/> 鋼構造建物への被害 <input type="checkbox"/> 現行設計地震荷重を越す強震動記録 <input type="checkbox"/> 新しい建物への被害 <input type="checkbox"/> 溶接柱梁接合部への被害	● Post-Kobe Steel Design/Construction 〻 Post-Northridge Steel Design/Construction

接合詳細の相違

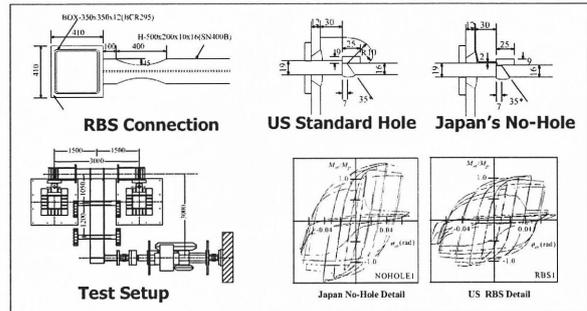
● スカラップ形式の改良



■ カバープレート、ハンチ、RBS

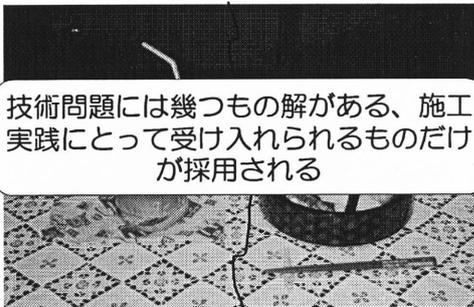


Seismic Performance of Welded Beam-to-Column Connection in Japan and U.S.

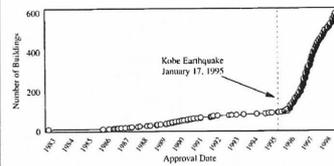


Publication:
 Suita, K., Tamura, T., Morita, S., Nakashima, M., and Engelhardt, M. D., "Plastic Rotation Capacity of Steel Beam-to-Column Connections Using a Reduced Beam Section and No Weld Access Hole Design," Journal of Structural and Construction Engineering, Architectural Institute of Japan, No.526, December 1999, pp.177-184 (in Japanese).

建設文化に対する日米の顕著な相違



免震建物の発展と適用



Growth of Construction of Base-Isolated Buildings

Publication:
 Clark, P., Aiken, I., Nakashima, M., Midorikawa, M., and Miyazaki, M., "The 1995 Kobe Earthquake as a Trigger for Implementing New Seismic Design Technologies in Japan," EERI, Vol.III, 1999.



耐震技術革新への道 — 実践に受け入れられるまで —

同等なコストでより高い安全性が得られる確証があるまでのためらい

継続的な広報活動

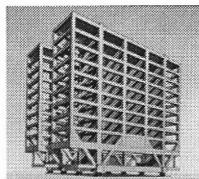
タイミング (In the right place at the right time)

条件:

確固たる技術の存在

人的物的資源の確保
 (装置、製造、流通)

被害地震



所見

ノースリッジと神戸で同種の被害を受けたのに、その解決策が、太平洋の両岸でかくも異なるのは、なぜか?

設計は机上の議論、施工こそが建設実践を支配する。施工（インタストリ）が許容できない構法は日の目をみない

⇨

日本が誇る耐震施工技術の優位性を死守しなければならない