

1. 耐震設計法と試行設計概要

逢坂 博文^{*1}

松元 昭一^{*1}

萩原 幸男^{*2}

澤谷 芳広^{*2}

要 旨

ここでは、A-HRC30構法の耐震設計法ならびにその耐震設計法を確立するために行った純ラーメン構造の30階建鉄筋コンクリート造住宅の試行設計の結果について概要を述べる。

キーワード

耐震設計目標／純ラーメン／設計用地震力／保有水平耐力／終局強度／耐震設計基準／高層建築／鉄筋コンクリート

目 次

1. まえがき
2. 適用範囲
3. 耐震設計法と試行設計概要
4. あとがき

1. OUTLINES OF SEISMIC DESIGN METHOD AND EXPERIMENTAL DESIGN

Hirofumi Ohsaka
Shoichi Matsumoto
Yukio Hagiwara
Yoshihiro Sawaya

Abstract

We report on the outlines of seismic design method employed for A-HRC30 system and of the result of the experimental design of a rigid frame 30-story reinforced concrete residential building we conducted to establish the seismic desing method.

^{*1} 大阪本店設計部

^{*2} 東京本店設計部

1. まえがき

高層建築物を設計する場合、大地震に対しては部材の曲げ降伏を許容し、振動エネルギーを吸収させる方法を用いるのが経済的であり、かつ、合理的である。ただし、降伏ヒンジの発生部位については、骨組全体がじん性に富む構造となるように設定することが肝要であり、構造を純ラーメンとした場合、崩壊形としては一般に降伏ヒンジを梁端部に設定した全体崩壊形が採用されている。これは主に、振動エネルギーを数多くのヒンジにより消費させることを目的としている。また、鉄筋コンクリート造の場合、高軸力の作用する下層階柱に、大きなエネルギー消費能を確保することが容易でないことから梁崩壊形を保証することが特に重要である。

筆者らは、A-HRC30 構法開発の一環として、その設計法を確立するために以上の考え方をもとに純ラーメン構造による30階建て鉄筋コンクリート造住宅の試行設計を行った。試行設計建物の概要については既に報告した¹⁾が、ここでは、その耐震設計法の1次設計と2次設計ならびに試行設計について、概要を述べる。

2. 適用範囲

A-HRC30 構法の適用範囲を以下に示す。

2.1 階数・形状・用途

- 1) 階数は、地上20階以上かつ30階以下とする。
- 2) 平面形は、ほぼ正方形とし、地震時にねじれ振動がほとんど生じない形状とする。
- 3) 立面形は、長方形またはこれに近い形状で、剛性および耐力が急激に変化しないものとする。
- 4) 主な用途は、共同住宅とする。ただし、2階以上の階については、すべて住宅とする。

2.2 敷地地盤および構造計画

- 1) 敷地の地盤種別は、建設省告示第1793号に定める第1種または第2種地盤とする。
- 2) 架構の形式は、純ラーメン構造とする。
- 3) 柱および梁は、平面的には地震時にねじれ振動がほとんど生じない配置とし、上下方向には剛性および耐力が急激に変化しない断面寸法とする。梁のスパン長はほぼ均等とし、6m程度までとする。
- 4) 柱は場所打ち鉄筋コンクリート造とし、その断面形状は正方形または長方形とする。

- 5) 梁は、すべて場所打ち鉄筋コンクリート造とするか、または、場所打ち鉄筋コンクリート造とハーフPCa合成梁の併用とする。ただし、場所打ち鉄筋コンクリート造とハーフPCa合成梁を併用する場合は、一方向を場所打ち鉄筋コンクリート造とし、他方向をハーフPCa合成梁とする。

断面形状は長方形とし、梁せいは梁の内法長さの1/4以下とする。

- 6) 床スラブは、地震時に生じる床面内の応力に対して、十分な強度と剛性を持つ構造とし、ハーフPCa合成床板〔オムニア床板（BCJ-C1027）およびカイザー床板（BCJ-構C39）〕とする。
- 7) 間仕切り壁および外壁は、非構造部材とし、架構の変形を拘束することなく、かつ、その変形に追従できる構造とする。
- 8) 基礎は、鉛直荷重および地震時の荷重に対し、十分な強度と剛性を持つ直接基礎または杭基礎とする。なお、基礎の根入れ深さは、建物軒高の8%以上とする。

2.3 使用材料

- 1) 使用するコンクリートは普通コンクリートとし、上部構造のコンクリートの設計基準強度は、 $270 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ 以上かつ $420 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ 以下とする。
- 2) 使用する鉄筋は、JIS G 3112（鉄筋コンクリート用棒鋼）の規格に定めるSD30A、SD35、SD40およびJIS G 3109（PC鋼棒）の規格に定めるSBPD130/145（ウルボン）とする。柱および梁の主筋にはSD40を用い、呼び名の上限はD41とする。柱、梁および柱梁接合部のせん断補強筋にはSBPD130/145を用いる。
- 3) 柱軸方向鉄筋の接合は、ネジテツコンの無機グラウト継手（BCJ-C1167）または異形鉄筋のNKE溶接継手工法（一部変更）（BCJ-C1234）とする。梁軸方向鉄筋の接合は、異形鉄筋のNKE溶接継手工法（一部変更）（BCJ-C1234）とする。

3. 耐震設計法と試行設計概要

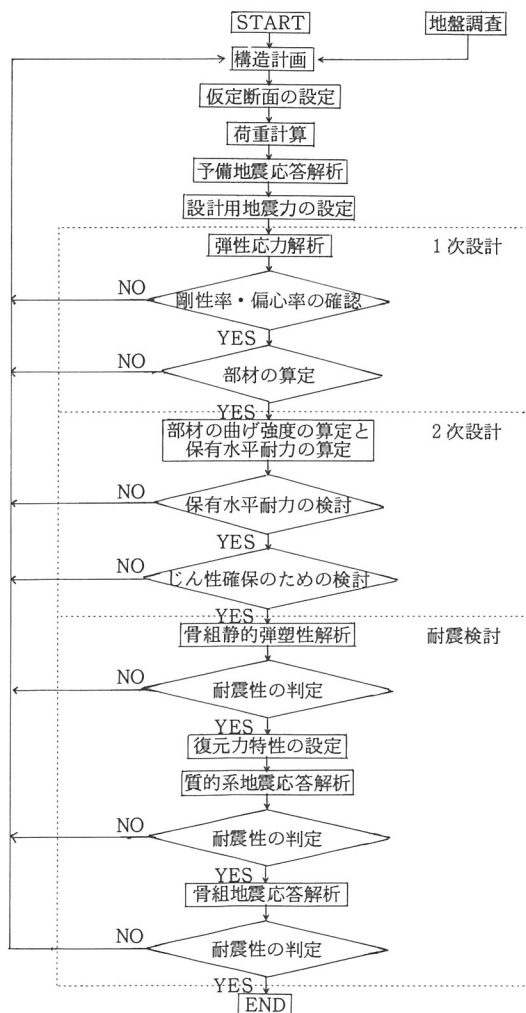
3.1 耐震設計方針と耐震設計フロー

- (1) 耐震性能目標

目標とする耐震性能を次のように設定する。すなわち、建物が受ける地震動の強さとして、表-1に示すレベル1とレベル2の強さを想定し、それぞれ同表に

表－1 地震動の規模および耐震性能目標

地震動の強さ	レベル1の地震動	レベル2の地震動
地震動の規模	耐用年数中に、一度以上受ける可能性が大きい地震動。	将来において、受けることが考えられる最強の地震動。
耐震性能目標	主要構造体に軽微なひび割れが生じても、小規模の修復により建物を再使用できる。	主要構造体は、梁両端、1階柱脚および最上階柱頭が曲げ降伏しても、過大な変形を生じない。また、人命に損傷を与える可能性のある破損を生じない。



図－1 耐震設計フローチャート

示す耐震性能目標を満たす構造とする。

(2) 基本方針

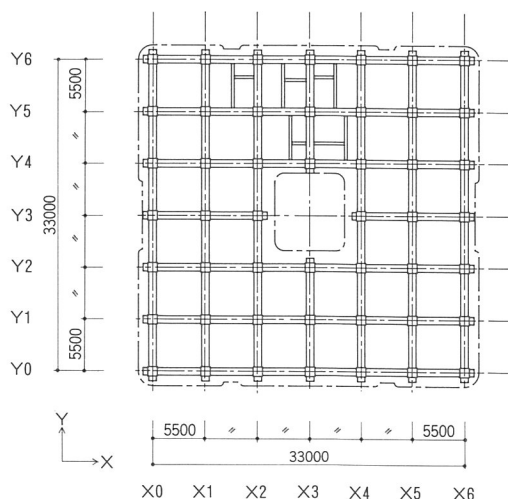
耐震設計は、主として、レベル2の強さの地震動に対して行い、骨組がじん性に富み、かつ、過大な変形を生じない耐震性に優れたものとなるように行う。このための方法として、骨組が崩壊形を形成する場合を想定した設計を行う。設定する崩壊形は、地震入力による振動エネルギーを骨組全体で消費するように、梁の曲げ降伏による全体崩壊形とする。また、曲げ降伏を想定する部材には、十分な強度とじん性を、曲げ降伏を想定しない部材には十分な強度を確保する。

(3) 耐震設計フロー

耐震設計フローを図－1に示す。設計は1次設計、2次設計に分けて行う。その後さらに、耐震検討を行い、骨組の応力と変形量を検討し、耐震安全性を確認する。

(4) 試行設計建物の部材断面

上記の耐震設計フローに基づき、最終決定された試行設計建物（柱梁伏図および軸組図を図－2、図－3に示す。）の代表的な部材断面を表－2および表－3に示す。なお、試行設計建物はX、Y両方向の架構形状が同じであるため、設計はX方向のみについて行った。



図－2 基準階柱梁伏図

表-2 代表的な柱断面リスト

階	外 柱				内 柱			
	b × D	主 筋	芯 筋	帯 筋	b × D	主 筋	芯 筋	帯 筋
30	800 × 800	12-D29	——	■-φ 7.4 @100	800 × 800	12-D29	——	■-φ 7.4 @100
25	800 × 800	12-D32	——	■-φ 9.2 @100	800 × 800	12-D32	——	■-φ 9.2 @100
20	850 × 850	12-D35	——	■-φ 11 @100	850 × 850	12-D32	——	■-φ 11 @100
15	850 × 850	12-D41	——	■-φ 13 @100	850 × 850	12-D35	——	■-φ 13 @100
10	900 × 900	16-D41	——	■-φ 13 @100	900 × 900	12-D35	——	■-φ 13 @100
5	900 × 900	16-D41	——	■-φ 13 @100	900 × 900	12-D38	——	■-φ 13 @100
1	1000 × 1000	16-D41	8-D41	■-φ 13 @80*	1000 × 1000	16-D41	——	■-φ 13 @80

* 柱脚より柱せいの 1.5 倍までの範囲は70mm 間隔とする。

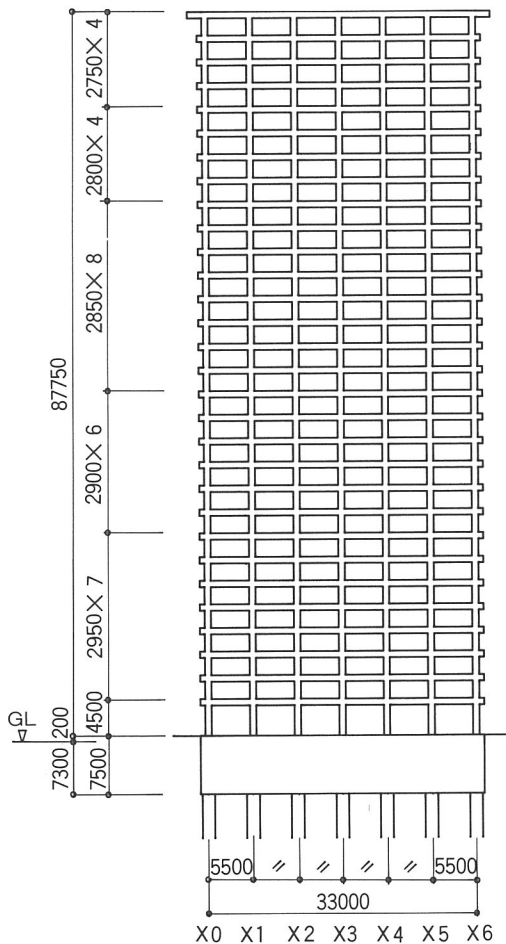


図-3 軸 組 図

表-3 代表的な梁断面リスト

階	内 ス パ ン 梁		
	b × D	主 筋	あばら筋
30	550 × 700	上端 6-D29	■-φ 9.2 @200
		下端 5-D29	
25	600 × 750	上端 7-D32	■-φ 9.2 @150
		下端 6-D32	
20	600 × 800	上端 7-D35	■-φ 13 @150
		下端 7-D35	
15	650 × 850	上端 8-D35	■-φ 13 @125
		下端 7-D35	
10	650 × 850	上端 7-D38	■-φ 13 @125
		下端 7-D38	
5	650 × 900	上端 8-D38	■-φ 13 @100
		下端 7-D38	
2	700 × 1000	上端 8-D38	■-φ 13 @100
		下端 7-D38	

3.2 設計用地震力

(1) 1次設計用地震力

1階の設計用層せん断力は、建築基準法施行令第88条により求めた値に設定し、高さ方向の分布として、頂部集中荷重と震度逆三角形分布を組み合わせた分布を用いる。ただし、レベル1の強さの地震動を入力し

た予備地震応答解析を行い、設計用層せん断力が応答最大層せん断力を上回ることを確認する。なお、頂部集中荷重は1階の層せん断力の8.5%~15%とする。

試行設計では、1階の層せん断力係数を0.12、頂部集中荷重を1階の層せん断力の8.8%とした。1次設計用地震力と予備地震応答解析の最大応答層せん断力を図-4に示す。

(2) 目標保有水平耐力

目標保有水平耐力は1次設計用地震力による層せん断力の1.5倍とする。

3.3 1次設計

部材の弾性剛性に立脚した応力解析および許容応力度法による部材の算定を行う。また、剛性率および偏心率の検討を行う。

(1) 応力解析

応力解析は、日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」（以下、「RC規準」という）に準拠する他、以下に示す方針に従う。

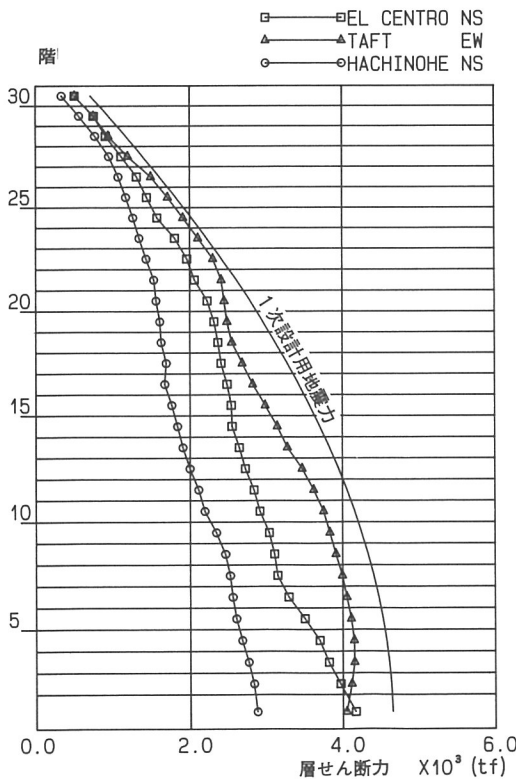


図-4 1次設計用地震力

1) 解析モデルは平面骨組モデルとする。

2) 地震力による応力の解析では、各階床位置の水平変位が同一であると仮定する。

3) 地震力による応力の解析では、柱梁接合部には「RC規準」に示されている剛域を仮定する。

4) 部材の変形要素としては表-4に示すものを考慮する。

(2) 部材の算定

部材の算定は「RC規準」に準拠して行う。ただし、せん断力に対する算定は高周波熱錬株式会社「鉄筋コンクリート造り、柱のせん断補強筋としてP C鋼棒ウルボンを使用する工法 設計指針」（BCJ-C1166）（以下、「ウルボン指針」という）に準拠して行う。

(3) 剛性率および偏心率の検討

「建築基準法施行令」第82の3に定義されている剛性率および偏心率を算定し、剛性率は0.6以上、偏心率は0.10以下（最上階については0.15まで許容）であることを確認する。

試行設計では、剛性率の最小値は0.786（X、Y両方向の16階）であった。偏心率については、塔屋位置の影響により重心がY方向に偏心しており、X方向偏心率の値は最上階で0.127、その他の階の最大値は29階における0.072であった。Y方向偏心率の最大値は最上階の0.007であった。

3.4 2次設計

部材の終局強度に基づき保有水平耐力の検討およびじん性確保のための検討を行う。

(1) 保有水平耐力の検討

骨組に過大な変形が生じないように、十分な水平耐力を確保する。

表-4 部材の変形要素

部 材	変形要素	長 期	地震力
柱	曲 げ 変 形	○	○
	せん断変形	×	○
	軸方向変形	×	○
梁	曲 げ 変 形	○	○
	せん断変形	×	○

○：考慮する ×：考慮しない

崩壊形は、梁端部および1階柱脚に曲げ降伏ヒンジを設定する全体崩壊形とする。ただし、最上階柱頭には曲げ降伏ヒンジの発生を許容する。

各階の保有水平耐力は、節点モーメントの分割率を0.5として節点振り分け法により求めた柱のせん断力を各階ごとに総和したものとし、それが目標保有水平耐力を上回ることを確認する。

柱の設計用軸力 $cNud$ には以下の式により算定される値以上を仮定して用いる。ただし、 $Ri \leq 1.0$ とする。なお、仮定した設計用軸力が骨組地震応答解析により得られる応答軸力を下回らないことを確認することとし、この確認は耐震検討にておこなう。

$$cNud = NL \pm Ri \cdot cNgq$$

$$Ri = 0.8 + 0.01(i - 1)$$

ここで、 NL は柱長期軸力、 Ri は動的軸力低減係数、 $cNgq$ は梁両端曲げ降伏時の梁せん断力に対応する柱軸力、 i は算定階の階数である。

試行設計建物の保有水平耐力および目標保有水平耐力を図-5に示す。

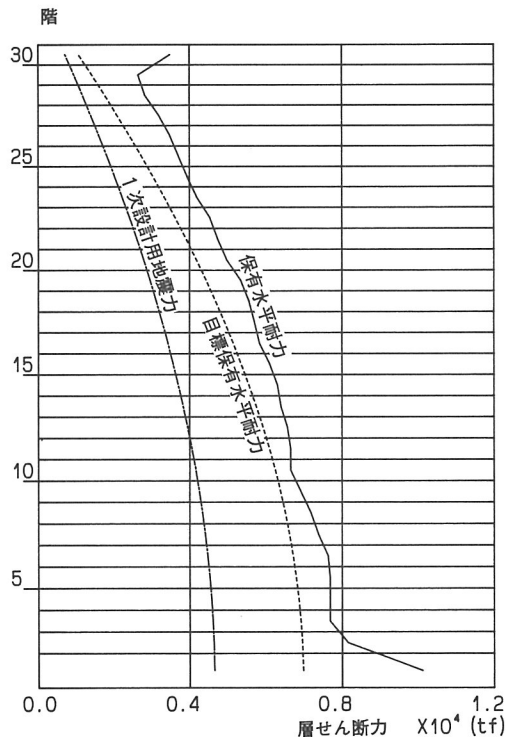


図-5 保有水平耐力

(2) じん性確保のための検討

じん性に富む骨組とするためには、曲げ降伏ヒンジを想定する部材には曲げ降伏後の十分な塑性変形能力を確保し、また、曲げ降伏ヒンジを想定しない部材には十分な強度を与える必要がある。そのため、表-5に示す耐震設計基準を設けた。同表には、試行設計における設計値を併せて示す。終局強度式は表-6に示す。

3.5 構造規定

以下に定める規定以外の構造規定については、「RC規準」および「ウルボン指針」に示される構造上の規定に従う。

(1) 柱の規定

- 1) 芯鉄筋を除いた主筋比は0.8%以上、かつ4.0%以下とする。
- 2) 中間主筋のうち2本以上は、接続する梁部材の主筋の内側に配置する。また、1階柱脚の主筋の間隔は200mm程度以下とする。
- 3) せん断補強筋の配筋形状は罫形とし、外周に使用する鉄筋は、角スパイラルとする。
- 4) せん断補強筋比は0.2%以上とする。
- 5) せん断補強筋の間隔は100mm以下とする。
- 6) 外柱の1階柱脚の塑性ヒンジ部分（柱脚から柱せいの1.5倍以内の部分）には、以下の式を満足する横補強筋を配筋する。

$$Cc \geq 5.0 \times 10$$

$$Cc = \rho_s (\sqrt{\sigma_{wy}'} / F_c) (1 - 0.5S/W_c)$$

$$\rho_s = (a_w \cdot \sum \ell_w) / (B_c \cdot D_c \cdot S)$$

ここで、 Cc ：拘束係数、 ρ_s ：コアコンクリートに対する横補強筋体積比、 σ_{wy}' ：横補強筋の降伏点（ $\sigma_{wy}' = 13000 \text{ kgf/cm}^2$ ）、 F_c ：コアコンクリートの設計基準強度、 W_c ：コアコンクリートの断面最小寸法で $W_c = \min(B_c, D_c)$ を示す、 S ：横補強筋の柱材軸方向の間隔、 a_w ：一本の横補強筋の断面積、 $\sum \ell_w$ ：罫形配筋を一組とした場合の一組、の横補強筋の合計長さ、 B_c 、 D_c ：コアコンクリートの幅およびせい。

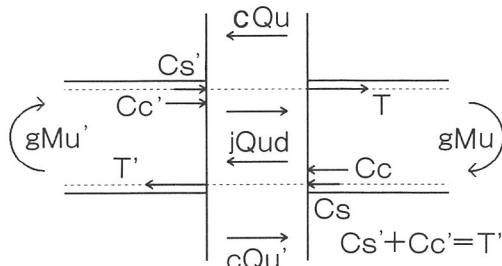
(2) 梁の規定

- 1) 主筋の配値は2段以下とし、1段筋は全て通し配筋とする。
- 2) 引張鉄筋比は2.0%以下とする。
- 3) 複筋比は0.6以上とする。

- 4) 2 段目主筋をカットオフする場合、その鉄筋は柱面から梁中央方向へ、梁の有効せいに $35d$ (d は鉄筋の呼び名に用いた数値で、以下同じ) 以上を加えた長さを定着する。
- 5) セン断補強筋の配筋形状は $\square$ 形とする。
- 6) セン断補強筋比は 0.2% 以上とする。
- 7) 梁端部 (柱面から梁せいの 1.5 倍以内の部分) のセン断補強筋間隔は梁せいの $\frac{1}{2}$ 以下、かつ、一段目主筋の $8d$ 以下とし、さらに 200mm 以下とする。

(3) 柱梁接合部の規定

- 1) 横補強筋比は 0.2% 以上とする。
- 2) 横補強筋間隔は 100mm 以下とする。
- 3) 十字形および T 形接合部内への梁主筋の定着長は $20d$ 以上とする。
- 4) ト形および L 形接合部の梁主筋は図-7 に示す方法により定着し、その定着長 L は $35d$ 以上とする。



$$jQud = T' + Cs' + Cc' - cQu$$

$$cQu = 2 \left\{ \left(\ell / \ell_o \right) gMu + \left(\ell' / \ell_o' \right) gMu' \right\} / (h + h')$$

gMu, gMu' : 左右の梁の曲げ強度
 ℓ, ℓ' : 左右の梁スパン長さ
 ℓ_o, ℓ_o' : 左右の梁内法長さ
 h, h' : 上下の柱長さ

図-6 接合部のせん断力

表-5 設計基準値と設計値

			設計基準値	設計値
柱	軸力	中柱	$NL \leq 0.3 cNud$	$NL \leq 0.27 cNud$
		外柱	$-0.7 tNu \leq cNud \leq 0.6 cNu$	$-0.68 tNu \leq cNud \leq 0.56 cNu$
	曲げ	圧縮外柱	$cMu \geq 1.6 cMud$	$cMu \geq 3.74 cMud$
		その他の柱	$cMu \geq 1.4 cMud$	$cMu \geq 1.42 cMud$
	せん断	降伏ヒンジ設定柱	$cQsu \geq 1.1 cQud$	$cQsu \geq 1.15 cQud$
		上記以外圧縮外柱	$cQsu \geq 1.5 cQud$	$cQsu \geq 2.88 cQud$
		その他の柱	$cQsu \geq 1.3 cQud$	$cQsu \geq 1.33 cQud$
梁	1 階柱付着		$c\tau bu \geq 1.1 c\tau ud$	$c\tau bu \geq 1.69 c\tau ud$
	せん断		$gQsu \geq gQL + 1.1 gQud$	$gQsu \geq gQL + 1.1 gQud$
	付着		$g\tau bu \geq 1.1 g\tau ud$	$g\tau bu \geq 1.54 g\tau ud$
	主筋定着長		$j\ell \geq j\ell d$	$j\ell \geq 1.06 j\ell d$
柱梁接合部	せん断		$jQu \geq 1.1 jQud$ ただし $jPw \geq 0.003 \times 1.1 jQud / jQu$	$jQu \geq 1.25 jQud$

NL : 柱の長期軸力
 $cNud$: 柱の設計用軸力。
 $tNu = \sum a \cdot \sigma_y$
 $cNu = 0.85 (b \cdot D - \sum a) F_c + \sum a \cdot \sigma_y$
 cMu : 柱の曲げ強度。
 $cMud$: 柱の設計用曲げモーメントで、保有水平耐力の算定から得られる応力。
 $cQsu$: 柱のせん断強度。
 $cQud$: 柱の設計用せん断力で、保有水平耐力の算定から得られる応力。
 $c\tau bu$: 柱の付着強度。
 $c\tau ud = 2\sigma_y \cdot db / \left\{ 4(\ell_o - d) \right\}$

$gQsu$: 梁のせん断強度。
 gQL : 梁の長期せん断力。
 $gQud$: 梁の両端降伏時のせん断力。
 $g\tau bu$: 梁の付着強度。
 $g\tau ud = 2\sigma_y \cdot db / \left\{ 4(\ell_o - d) \right\}$
 $j\ell$: 梁主筋の柱梁接合部内への定着長。
 $j\ell d = 1.5\sigma_y \cdot db / (16\sqrt{F_c})$
 jQd : 柱梁接合部のせん断強度。
 $jQud$: 柱梁接合部の設計用せん断力。(図-6 参照)

表-6 終局強度式

		終 局 強 度 式
梁	曲 げ	$gMu = 0.9 \Sigma (at \cdot \sigma_y \cdot d)$ 「RC 規準」によるスラブの有効幅内にある鉄筋を含む。
	せん断	$gQsu = \left\{ \frac{0.068 Pt^{0.23} (Fc + 180)}{M/Qd + 0.12} + 2.7 \sqrt{Pw \cdot \sigma_{wy}} \right\} b \cdot j$ ただし、 $\sigma_{wy} = 6000 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $1 \leq M/Qd \leq 3$ 、 $Pw \leq 0.7\%$
	付 着	$\tau_{bu}^{2)} = \tau_{co} + \tau_{st}$ ただし、上端主筋の場合には得られた値を0.8倍して用いる。
柱	曲 げ	平面保持の仮定に基づき算定。 コンクリートのストレスブロックはACI 規準 ³⁾ の仮定による。圧縮縁ひずみ度は0.3%
	せん断	〔一般階柱 ($\sigma_o \geq -Fc/15$ のとき)〕 $cQsu = \left\{ \frac{0.068 Pt^{0.23} (Fc + 180)}{M/Qd + 0.12} + 2.7 \sqrt{Pw \cdot \sigma_{wy}} + 0.1 \sigma_o \right\} b \cdot j$ 〔一般階柱 ($\sigma_o < -Fc/15$ のとき)、1階全柱〕 $cQsu = Pw \cdot \sigma_{wy} \cdot b \cdot j$ ただし、 $\sigma_{wy} = 6000 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $1 \leq M/Qd \leq 3$ 、 $Pw \leq 0.7\%$ $\sigma_o \leq 0.4 Fc$ かつ $\sigma_o \leq NL / (b \cdot D)$
	付 着	$\tau_{bu}^{2)} = \tau_{co} + \tau_{st}$
接合部	せん断	$jQu^{2)} = K \cdot Fc \cdot j_b \cdot cD$

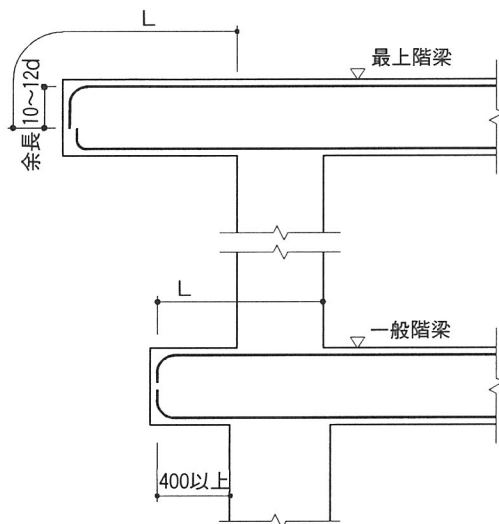


図-7 梁主筋の定着方法

4. あとがき

ここでは、本構法の耐震設計法の1次設計、2次設計および試行設計の概要を示した。

耐震設計法としては、これらに続き、耐震安全性を確認するための耐震検討を行うこととしている。その方法については「2. 試行設計建物の耐震安全性評価」に述べる。

参考文献

- 1) 森口五郎他：浅沼超高層RC住宅(A-HRC30)構法の開発に向けて、浅沼組技術研究所報創刊号1989
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針(案)・同解説
- 3) American Concrete Institute : Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83)