

2 ダイアフラム

2.1 木質構造とダイアフラム

木質構造の古からの構造形式は「骨組形式」である。建物に作用する荷重・外力に対し、建物内に配置された線材で構成されたラーメン・トラス（不完全ではあるが）などの骨組みにより抵抗する形式である。

一方、柱・梁に製材板を斜め張りして壁や床を構成すれば、面で抵抗する面構造ができる。このような構造では必ずしも太い柱や梁は必要としないので、北米では、住宅・非住宅を問わず発達してきた。それがライトフレーム構法である。そして合板が登場し、製材板が合板に代わることによって、強力な面構造となった。

北米ではこのような構面をダイアフラムといい、水平構面を単にダイアフラムあるいは水平ダイアフラム、耐力壁を鉛直ダイアフラムという。

この構造方法は枠組壁工法の名で日本に導入されたが、木質プレハブ工法や、今日の合板で壁・床・屋根を構成する軸組構法も、ダイアフラムによる構造といえる。

ダイアフラム構造では、厚い合板に太いくぎを多数打つことにより、非常に高い耐力を得ることができる。北米では、製材に代わって集成材を用い、くぎを多数打つことで、中層・大規模の建築物が建てられており、非住宅市場の一つの典型的な構法となっている。

ダイアフラムについては多くの理論的研究と実験がなされ、簡略化された実用式も提案されている。ダイアフラムの大きな特徴としては、ラーメンなどの他構造と比べて構面のせん断性能が著しく高いことや、くぎを打つことで構造が一体となり強度性能が施工精度に比較的左右されないことなどがあげられる。

ダイアフラムは、他構造と組み合わせることが可能である。例えば、鉛直構面をトラスやラーメンとしても、水平構面はダイアフラムとすることが多い。また、鉛直構面を二方向ともラーメンとするのは設計上容易でないことが多いので、一方向ラーメン・一方向ダイアフラムとすることは構造的・経済的に有利である。さらに、鉛直構面の主体はダイアフラムとしながらも、一部の開口を大きくとるためにラーメンを部分的に併用することも可能である。

2.2 ダイアフラムのメカニズム

ダイアフラムのメカニズムは、I形ばりと同じで、図2-1のように、鉛直構面の場合は片持ちのI形ばり、水平構面の場合は、両端を支持されたI形ばりと考えることができる。I形ばりでは、曲げモーメントに対しては主としてフランジが、せん断力に対しては主としてウェブが抵抗する。

I形ばりのフランジに相当する部材は、鉛直構面の柱や水平構面の胴差し・桁・はりなどの軸材であり、ウェブに相当する部材は合板である。ただし、ウェブは一枚の連続した材料ではなく複数の合板で構成されることになるので、合板と合板とは受材を介してくぎで接合される。つまり、ウェブにはくぎによる多数の継ぎ目があることになる。

ウェブだけを取り出して引っ張ると、くぎで接合されているウェブは、胴差し・桁・はりなどの軸部材と比べてはるかに小さな力で変形を生じる。従ってウェブは曲げ応力（引張・圧縮）を負担することはできない。このため、ウェブのせん断応力の分布は放物線ではなく、ほぼ等分布の形になる。以上から、ダイアフラムの設計では、一般的に、ウェブはせん断力のみを負担し、フランジは曲げ（引張・圧縮）のみを負担すると仮定する。

ダイアフラムは、スパンが短くはりせいが大きいはりであるから、その変形は、せん断変形が主体となる。せん断変形は、合板自体のせん断変形と、合板を軸材に留めているくぎ接合部（以下、合板くぎ接合部という）のせん断変形（slip、スリップと言われる）である。耐力壁では、曲げ変形は無視されることが多いが、高強度水平構面で奥行きに対してスパンが大きい場合、フランジ相当部材に継ぎ目がある場合などでは、曲げ変形を計算する必要がある。

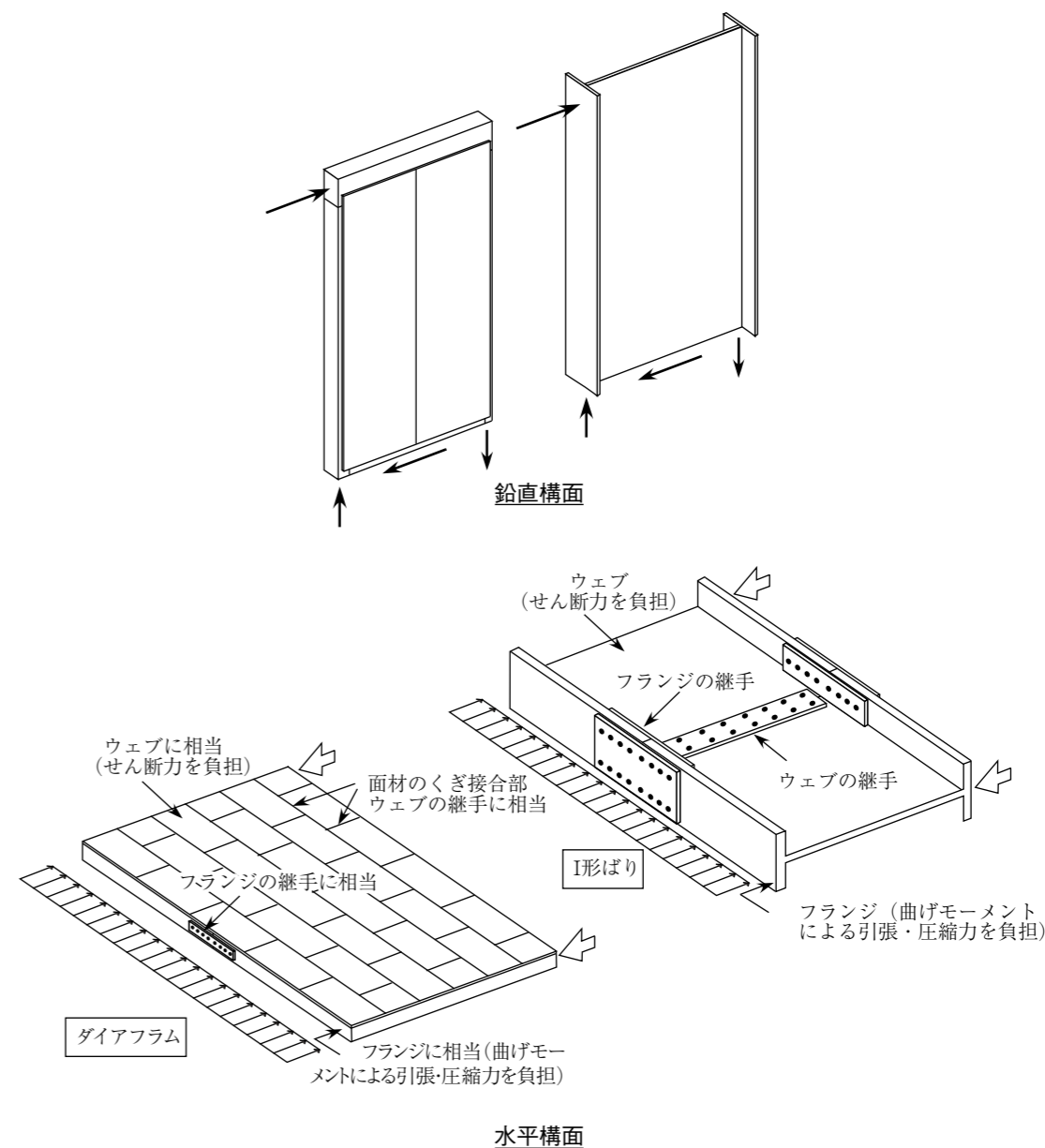


図2-1 ダイアフラムのI形ばりへのモデル化

2.3 ダイアフラムのせん断要素モデルと耐力の算定式

せん断力は合板の周囲をとめているくぎを介してフランジなどの軸材から合板へ、逆に言えば合板から軸材へと伝達される。1枚の合板を張った要素（以後ダイアフラムユニットと称す）についてみると、くぎの応力の方向は、図2-2左のように、基本的に、せん断力の方向と平行になると考えることができる。

しかし、このモデルはくぎ応力の主力だけを取り上げたもので、実際は幾何学的変形条件から、くぎ応力の方向は、図2-2右のようにせん断力の方向に対してやや角度をもつことになる。

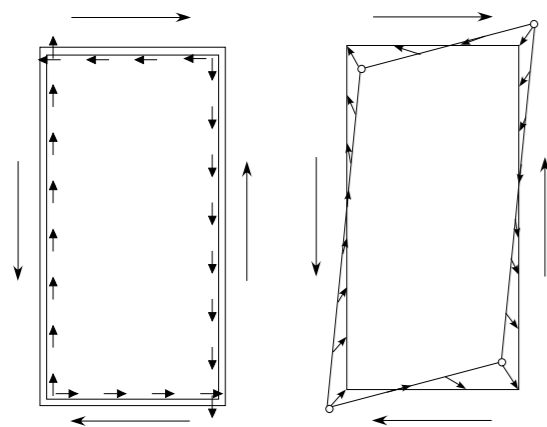


図2-2 ダイアフラムユニットに作用するせん断力と合板を留めているくぎ応力の方向

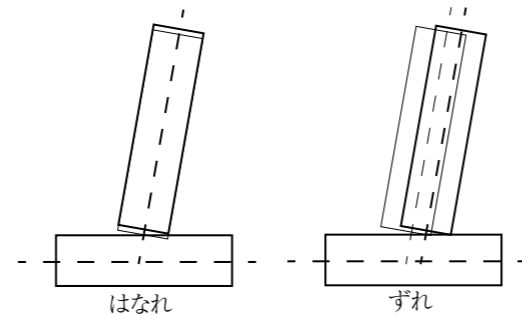


図2-3 軸組相互のはなれとずれ

○ 緑本の算定方法

図2-2左に示すモデルをベースとした設計式は、北米のAPA（旧称：アメリカ合板協会）より提唱され、長期間の使用実績がある。（社）日本ツーバイフォー建築協会編「2007年枠組壁工法建築物構造計算指針」（以後緑本）では、この式をベースとし、合板くぎ接合部の降伏耐力と剛性から耐力壁の降伏耐力と剛性を算定している。しかし、許容せん断耐力の算定には、靱性による低減係数 K_d が必要であり、これは実験から求めることになっている。なお、くぎ間隔だけが異なる構面の実験データがあれば、その靱性と計算した剛性などから換算できるとしている。ただし、くぎ間隔をかなり狭くする高強度構面に適用可能か否かの検証は必ずしもされていない。

○ グレー本の算定方法

図2-2右のモデルをベースとする設計式が、（公財）日本住宅・木材技術センター「木造軸組工法住宅の許容応力度設計」（以後グレー本）に示されている。グレー本式は、本来、非線形（曲線）である合板くぎ接合部の荷重-変形関係をバイリニア（2直線）化しており、実験から求めた係数を使用している。さらに、合板くぎ接合部の荷重-変形関係は合板を側材として中央に軸材を配置したいわゆるロケット型のくぎ接合試験ではなく、小型のダイアフラムユニットの加力試験から逆算して求めるので、理論式と実験式からなるハイブリッド法であるといえる。

グレー本の算定式は、計算で許容耐力を算定できるメリットがあるが、実験で得た係数を使用していること等から、適用範囲として、くぎの太さ、縁端距離、間隔などの制限を設けているため、高強度構面はカバーされていない。

○ 実験的検証の必要性

図2-2右の変形条件が成立するには、軸材相互のピン接合部が横ずれやかい離を生じてはならないが、現実的には、図2-3のように、はなれ、めり込み、ずれを生じる。また、後述するように、他にも考慮すべき変形や破壊があるので、特に耐力壁の設計においては、実験的に評価された耐力壁を用いるか、新たに設計する場合は、グレー本や緑本の算定式を参考にするとしても、実験を行って性能の検証を行う必要がある。

2.4 耐力壁の許容せん断耐力の評価方法

耐力壁の大臣認定では、実験的評価方法が定められている。すなわち、柱脚固定式またはタイロッド式で面内せん断試験を行い、得られた荷重-変形関係をバイリニア化し（図2-4）、降伏荷重 P_y 、終局荷重 P_u 、塑性率 μ 等から、下記4項目の試験荷重を算出し、その平均値（信頼水準75%の50%下側許容限界値）の最小値をせん断耐力とする。

- (a) P_y （降伏荷重）
- (b) $0.2\sqrt{2\mu-1}P_u$ （靱性を評価する項目）
- (c) $2/3 P_{max}$ （最大荷重）
- (d) P_{120} （柱脚固定式の場合）又は P_{150} （タイロッド式の場合）

P_{120} ：見かけの変形量 1/120 の荷重

P_{150} ：真の変形量 1/150 の荷重

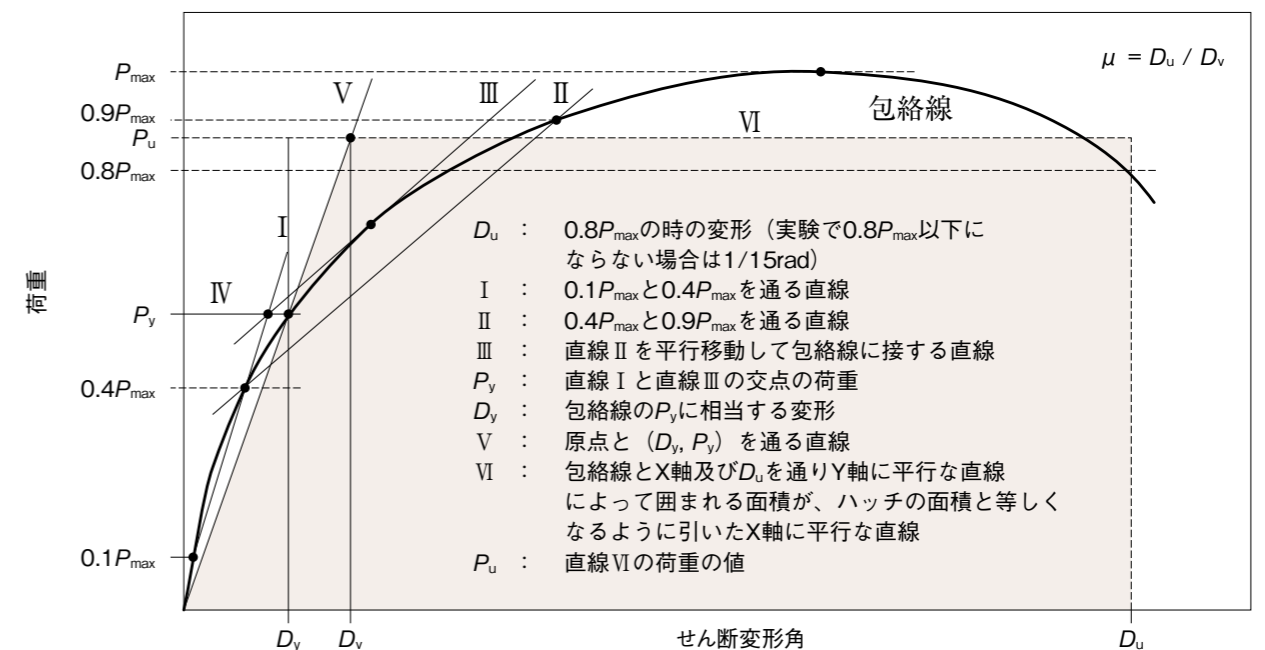


図2-4 荷重-変形関係のバイリニア化

これは、基本的に壁量計算に用いる耐力壁を対象とした評価方法で、高強度耐力壁の場合の評価基準はないが、基本的にはこれを基準とする。

2.5 水平構面の許容せん断耐力の評価方法

水平構面に必要な性能は、構面に加わる地震力・風圧力を耐力壁に適切に伝達することである。つまり、十分な強度と剛性である。

グレー本では、水平構面の許容せん断耐力の評価方法は、耐力壁のそれと同じとしており、靱性に関する評価項目が入っている。しかし、耐力壁において靱性に関する評価項目があるのは、建物の地震入力耐力壁の靱性によって決定されるからであるが、通常の設計では、水平構面の靱性は地震入力に無関係であるとされている。実際、CLT パネル工法告示（H28 国交告第 611 号）や、CLT を床版とする枠組壁工法の告示では、靱性の確保は要求されていない。

そこで、本書では、水平構面の許容せん断耐力の算定方法として、耐力壁の算定方法から靱性を評価する項目を除き、以下の最小値をせん断耐力とすることを推奨する。

- (a) P_y (降伏荷重)
- (b) $2/3 P_{max}$ (最大荷重)
- (c) P_{120} (見かけの変形量 1/120 の荷重)

なお緑本では、水平構面の評価方法については言及されていない。これは、枠組壁工法では、水平構面は仕様規定によることとなっているためである。

また、構面スパンが一定以上に長いと水平構面の振動により水平方向の A_i 分布を考慮する必要がある。これについては、(一財) 建築行政情報センター・(一財) 日本建築防災協会編「2015 年版建築物の構造関係技術基準解説書」の付録 1-5.3 を参照されたい。

2.6 ダイアフラムユニットのせん断耐力

本書では、基本的に、図 2-2 左のモデルに基づき計算する。ダイアフラムユニットのせん断耐力は、

- ① 合板を留めるくぎ接合部のせん断耐力から決定される耐力
- ② 合板のせん断強度から決定される耐力

の二つの耐力のうち、低い方の値となる。

① 合板を留めるくぎ接合部のせん断耐力から決定される耐力 Q_N

APA 式によれば、ユニットの許容耐力 Q_N (kN/m) は、くぎのせん断耐力を q_N (kN)、くぎ間隔を s (m) として

$$Q_N = \frac{q_N}{s}$$

で求められる。合板を留めるくぎ 1 本の許容せん断耐力は、緑本では表 8-6 (P.64) のように示されている。従って、いくつかのくぎ間隔に応じてユニットの耐力を計算した例は、表 2-1 のようになる。

なお、緑本式の耐力壁の計算では、 Q_N を 1.5 倍した値を降伏せん断耐力 Q_y としている。

$$Q_y = 1.5Q_N$$

② 合板の許容せん断応力度から求められる耐力 Q_{PW}

合板の許容せん断応力度から決定される耐力 Q_{PW} (kN/m) は、合板の短期許容せん断応力度を f_{PW} 、合板の厚さを t_{PW} として、

$$Q_{PW} = f_{PW} \times t_{PW}$$

で求められる。

合板の短期許容せん断応力度は、日本建築学会「木質構造設計規準・同解説」によれば $f_{PW} = 1.6\text{N/mm}^2$ である。

以上から主なユニットのせん断耐力は表 2-1 の値となる。ただし、合板のせん断で決定される場合は、ユニットの性状が脆性的になるおそれがあるので除外した。

表 2-1 ダイアフラムユニットの許容せん断耐力 (kN/m)

(降伏耐力は表の 1.5 倍の値とする)

合板厚さ (mm)	くぎ 種類	くぎ間隔														
		@100mm			@75mm			@50mm			2列-@75mm			2列-@50mm		
		軸材の種類														
		スギ、 エゾマツ、 スプルース など	ヒノキ、 ベイツガ、 ヒバなど	カラマツ、 ペイマツ など	スギ、 エゾマツ、 スプルース など	ヒノキ、 ベイツガ、 ヒバなど	カラマツ、 ペイマツ など	スギ、 エゾマツ、 スプルース など	ヒノキ、 ベイツガ、 ヒバなど	カラマツ、 ペイマツ など	スギ、 エゾマツ、 スプルース など	ヒノキ、 ベイツガ、 ヒバなど	カラマツ、 ペイマツ など	スギ、 エゾマツ、 スプルース など	ヒノキ、 ベイツガ、 ヒバなど	カラマツ、 ペイマツ など
12	N50	4.1	4.2	4.3	5.5	5.6	5.7	8.2	8.4	8.6	10.9	11.2	11.5	16.4	16.8	17.2
	CN50	4.4	4.5	4.6	5.9	6.0	6.1	8.8	9.0	9.2	11.7	12.0	12.3	17.6	18.0	18.4
	N65	4.8	4.9	5.0	6.4	6.5	6.7	9.6	9.8	10.0	12.8	13.1	13.3			
	CN65	5.3	5.4	5.5	7.1	7.2	7.3	10.6	10.8	11.0	14.1	14.4	14.7			
15	N65	5.3	5.5	5.6	7.1	7.3	7.5	10.6	11.0	11.2	14.1	14.7	14.9	21.2	22.0	22.4
	CN65	5.9	6.0	6.1	7.9	8.0	8.1	11.8	12.0	12.2	15.7	16.0	16.3	23.6		
	N75	6.0	6.2	6.3	8.0	8.3	8.4	12.0	12.4	12.6	16.0	16.5	16.8			
	CN75	7.0	7.2	7.4	9.3	9.6	9.9	14.0	14.4	14.8	18.7	19.2	19.7			
24	N65	5.8	6.0	6.2	7.7	8.0	8.3	11.6	12.0	12.4	15.5	16.0	16.5	23.2	24.0	24.8
	CN65	6.4	6.6	6.8	8.5	8.8	9.1	12.8	13.2	13.6	17.1	17.6	18.1	25.6	26.4	27.2
	N75	6.6	6.9	7.1	8.8	9.2	9.5	13.2	13.8	14.2	17.6	18.4	18.9	26.4	27.6	28.4
	CN75	8.1	8.4	8.7	10.8	11.2	11.6	16.2	16.8	17.4	21.6	22.4	23.2	32.4	33.6	34.8
28	N75	6.6	6.9	7.1	8.8	9.2	9.5	13.2	13.8	14.2	17.6	18.4	18.9	26.4	27.6	28.4
	CN75	8.1	8.4	8.7	10.8	11.2	11.6	16.2	16.8	17.4	21.6	22.4	23.2	32.4	33.6	34.8
	N90	8.1	8.4	8.6	10.8	11.2	11.5	16.2	16.8	17.2	21.6	22.4	22.9	32.4	33.6	34.4
	CN90	9.7	10.0	10.3	12.9	13.3	13.7	19.4	20.0	20.6	25.9	26.7	27.5	38.8	40.0	41.2
35	N75	6.6	6.9	7.1	8.8	9.2	9.5	13.2	13.8	14.2	17.6	18.4	18.9	26.4	27.6	28.4
	CN75	8.1	8.4	8.7	10.8	11.2	11.6	16.2	16.8	17.4	21.6	22.4	23.2	32.4	33.6	34.8
	N90	8.1	8.4	8.6	10.8	11.2	11.5	16.2	16.8	17.2	21.6	22.4	22.9	32.4	33.6	34.4
	CN90	9.7	10.0	10.3	12.9	13.3	13.7	19.4	20.0	20.6	25.9	26.7	27.5	38.8	40.0	41.2

空白の仕様は合板のせん断で決定されるため推奨しない。

2.7 注意すべき事項

2.7.1 設計上の注意すべき事項

○ くぎの縁端距離 (ダイアフラムユニット)

厚物合板を使い CN75 くぎを多数打ち込むような水平構面であれば、合板の縁距離は 20mm 程度を確保したい。そうすると受材の幅は 80mm 以上が必要となり、くぎの打ち込み深さも考慮すると 90mm 角程度となる (図 2-5)。さらに、くぎを 2 列打ちするような場合は、くぎの列間隔も 20mm 程度確保する必要があり、材幅は 120mm 程度となる。

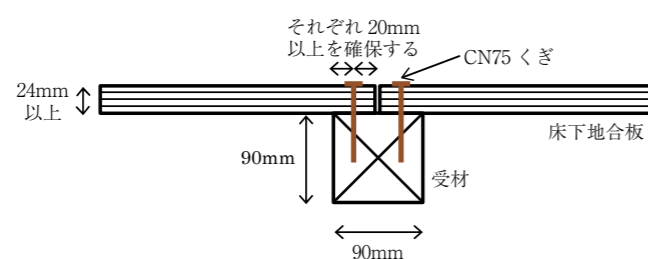


図 2-5 くぎの縁端距離と受材の断面寸法

○ 合板目地の受材のせん断破壊 (ダイアフラムユニット)

受材には、図 2-6 に示すように長手方向にせん断応力が発生するので、高強度の場合は受材の断面設計が必要である。ただし、応力が合板側に集中するので、受材の全高さが有効に働くわけではない。これまでの実験では、くぎ CN75、2 列 @50mm で、受材が 120mm 角の場合、構面が最大荷重に到達してしばらくすると、せん断破壊が始まっている。これから逆算すると、受材の有効高さはくぎの打ちこみ深さとなるが、踏み込んだ研究はないので、あくまで参考にとどめておいていただきたい。

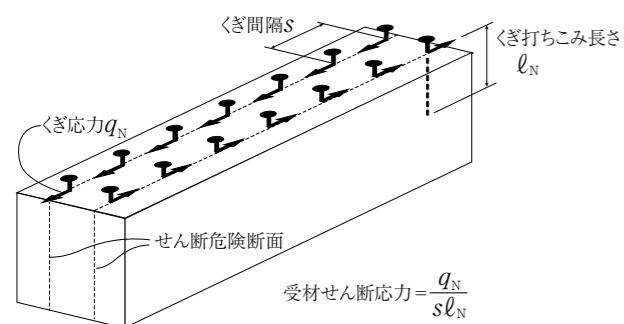


図 2-6 受材のせん断破壊



図 2-7 柱の横架材へのめり込み



図 2-8 柱の引張破壊



図 2-9 耐圧プレートのめり込み



図 2-10 土台の割れ

○ 合板の面外座屈 (ダイアフラムユニット)

合板張りの水平構面でくぎを特に多数打ち込む場合、合板に作用する面内せん断力によって終局時に合板が面外に孕み、他の部分より先に局部的なくぎの引き抜けや面外座屈を生じる危険性がある。そのため、厚さが薄い合板を用いる場合でくぎを密に打ち込む場合にはこのような破壊性状に対する安全性の確保が必要で、検定方法についてはグレー本の詳細計算法 (p.200 ~ 203) を参照されたい。

○ 柱の横架材へのめり込み (耐力壁)

横架材勝ちとする耐力壁では、柱が横架材へめり込むため、めり込み変形が大きい場合は、表 2-1 の性能は得られない。高強度で横架材勝ちとする耐力壁では、耐力壁の変形・強度・靱性に及ぼすめり込みの影響を考慮する必要がある (図 2-7)。

○ 柱頭柱脚接合強度及び柱の強度

柱頭柱脚接合部は一般にピンとして設計されるが、完全なピン接合を構成しない場合は、耐力壁のせん断変形に伴う回転変形によって接合強度を低下させることがある。また、これにともない、柱の主力である引張・圧縮応力に加えて 2 次応力として曲げ応力が加わる。さらに、柱が長い場合は、座屈を生じる場合がある。従って、柱頭柱脚接合部と柱の設計ではこれらのことに注意する必要がある (図 2-8)。

○ タイダウン方式での耐圧プレートのめり込み (耐力壁)

タイダウン方式では、耐圧プレートの横架材へのめり込み変形と強度を考慮する必要がある (図 2-9)。

○ タイダウン方式でのタイダウンの伸びと土台等の割裂 (耐力壁)

タイダウン方式では、タイダウンの伸びを考慮するとともに、伸びが大きく柱は浮き上がるが土台等がアンカーボルトにより浮き上がらなくなっている場合は、合板くぎによる土台等の割り裂きを考慮する必要がある (図 2-10)。

○ 建築物の平面的不整形 (水平構面)

建築物に平面的な突出部、くびれ、雁行型などの不整形がある場合は (図 2-11)、水平構面の接続部に大きな軸力が発生し、構面のせん断応力が集中する。このような場合は、グレー本の 3.8.1 や、(一財) 建築行政情報センター・(一財) 日本建築防災協会編「2015 年版建築物の構造関係技術基準解説書」の付録 1-5.4 を参照されたい。

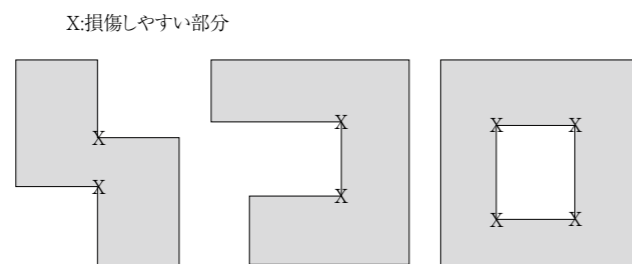


図2-11 建物の平面的不整形

○ 構面全体の座屈 (水平構面)

水平構面のスパンが長い場合、水平構面全体の面外座屈が危惧される。しかし、この問題についての研究はほとんど行われていない。北米ではスパンが100mを超える水平構面が設計されているが、それらの設計指針を見ると、検討の方法は確立していないとした上で、構面全体の面外座屈は皆無であるというこれまでの経験から、スパンが長くなるとそれに比例して横架材の曲げ剛性(構面全体の面外剛性)が高くなるので、安全性が確保されているのだろうとしている。

2.7.2. 施工上の注意すべき事項

○ 水平構面の合板の張り方

合板の長手方向は、原則として、はり、根太、垂木などに直交して張るのが望ましい。この理由は、水平構面としての性能に違いはないものの、合板の長手方向の曲げヤング係数が、短手方向の曲げヤング係数より高いために、鉛直荷重に対するたわみが平行張りの場合と比べて小さくなるからである。

合板は、千鳥に張ることを推奨する。水平構面に大きな水平力が加わった場合、合板を留めているくぎには変形(スリップ)が生じるが、合板が互いに接触するとスリップを小さくする効果がある。目地が通っていない千鳥目地の方が、通っているイモ目地の場合と比べ、その効果がより大きいからである。また、千鳥張りの場合は、合板が不完全ながら直交ばりの役目を果たし、たわみが多少なりとも小さくなる効果もある。

○ 合板のくぎ打ち

くぎ頭は合板にめり込まないように、くぎ打ち機の空気圧力を調整する。めり込みが大きい場合は、打ち直または打ち増しを行う。合板を切り欠く場合は、本来打つべきくぎを近辺に移動して打ち、くぎの本数が減らないようにする。

○ 水平構面における床用現場接着剤の併用

くぎ打ちの際に接着剤を併用すると、一般に初期剛性が格段に向上する。また、床鳴りの対策にも有効である。床用接着剤には色々の種類があるが、剛性・強度の増強を目的とする場合には、(公財)日本住宅・木材技術センター認定の床用接着剤または同等品を用いる。

ただし、ダイアフラムユニットの耐力が高い場合は、接着層(合板と横架材との接着層、または合板の第1層と第2層間の接着層)が先行破壊して、急激な剛性低下を招くおそれがあるので、構造設計では、このことによる悪影響がないことを確認するとともに、原則として強度向上の効果を見込んではいならない。さらに、耐力壁では、その製造工程の管理と効果を工学的に見込む場合を除いて、接着剤の併用を行ってはならない。

○ 養生

雨ぬれを生じないように養生はしっかりと行う。合板は木材と同様に水分を吸収・放出する性質があり、それに伴って、木材ほどではないが寸法変化を生じる。雨ぬれによって多くの水分を吸収すると、膨らみやねじれを生じる。雨ぬれの程度が軽微であればほぼ元の状態に戻るが、程度が激しいと戻らないことがある。

強度は水分によって変化するが、乾けばほぼ元の値に戻る。構造用合板の製造では、JAS規格に規定された特類(屋外又は常時湿潤状態となる場所で使用)または1類(断続的に湿潤状態となる場所で使用)の接着剤が使用されているため、水分によって単板がはがれるようなことはない(雨や湿気で単板がはがれた合板を見ることがあるが、このような合板は、耐水性の低い接着剤を使用した造作用の合板である)。なお、今日、国内で生産されている構造用合板のほとんどには、特類の接着剤が使用されている。

なお、雨ぬれによってスギやカラマツなどに含まれる化学成分が反応し、板面が褐色や黒色に変色することがあるが、そのために強度が低下することはない。