

材料強度のばらつきが道路橋の耐震性能に及ぼす影響

大住 道生¹・運上 茂樹²

¹正会員 工修 建設省土木研究所耐震研究室(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

²正会員 工博 建設省土木研究所耐震研究室(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

1. はじめに

構造物の設計を行う上で、建設材料の物性値としては常にそのばらつき度合いを考慮に入れて用いる必要があるが、特に限界状態設計法によって設計を行う場合には、各要因のばらつきを個別に扱う必要がある。

建設材料が保有する強度等の性能は、ある程度のばらつきを持った値となっているが、このばらつきを持った材料によって道路橋の橋脚を施工した場合に、道路橋の耐震性能としてのばらつきはもとの材料の性能のばらつきとは異なったものとなる。そこで、本研究では地震時保有水平耐力法を用いて、RC橋脚、鋼製橋脚を対象に既往のデータから、コンクリートの圧縮強度、鉄筋の降伏強度がRC断面の曲げモーメント-曲率関係、RC橋脚の水平力-水平変位関係に及ぼす影響、鋼材の降伏強度がコンクリート充填鋼断面の曲げモーメント-曲率関係、コンクリート充填鋼製橋脚の水平力-水平変位関係に及ぼす影響を試算した。

2. 建設材料の物性値のばらつき

(1) 道路橋橋脚の耐震性に影響を及ぼす因子

建設材料として用いられるものとしては、鋼、コンクリート、土、石、レンガ、木等さまざまなものがあるが、本研究では道路橋橋脚を対象としたため、鉄筋コンクリート橋脚、鋼製橋脚について検討を行った。

これらの建設材料はそれぞれいくつかの物性値を持っている。例えばコンクリートでは、圧縮強度、引張強度、ヤング率、単位体積重量、空隙率、温度などさまざまな物性値を持っているが、これら各々の物性値のばらつきが道路橋の耐震性能に及ぼす影響はよく分かっていない。

道路橋示方書V耐震設計編¹⁾によれば、鉄筋コンクリート橋脚について考えると、ひび割れモーメント(M_c)はコンクリートの設計基準強度、橋脚に作用する軸力、お

よび橋脚の断面積の関数として表される。また、ひび割れ曲率(ϕ_c)は M_c 、コンクリートのヤング係数、および橋脚の断面2次モーメントの関数として表される。

鉄筋コンクリート橋脚の初降伏モーメント(M_{y0})および初降伏曲率(ϕ_{y0})は、断面の最も外側に配置された軸方向引張鉄筋に生じるひずみが降伏ひずみに達したときの曲げモーメントおよび曲率として定義されている。鉄筋の降伏ひずみは降伏点をヤング係数によって除すこととされている。

鉄筋コンクリート橋脚の終局モーメント(M_u)および終局曲率(ϕ_u)は軸方向圧縮鉄筋位置においてコンクリートのひずみが終局ひずみに達したときの曲げモーメントおよび曲率であり、終局ひずみはコンクリートの設計基準強度、および横拘束筋の降伏点の関数として表されている。

一方、コンクリートを充填した鋼製橋脚について考えると、鋼製橋脚の降伏モーメント、降伏曲率は鋼材の降伏強度の関数として表される。

また、鋼製橋脚の終局モーメント、終局曲率は鋼材の終局ひずみが5%となるときと定義されており、終局ひずみが5%となるときの応力度は鋼材の降伏強度とヤング係数の関数として表される。

以上のような材料物性値のばらつきが道路橋橋脚の耐震性能に主に影響すると考えられる。ただし、本研究では物性値間に強い関係を持つものについては、その関係を既存の評価式で表すこととし、鉄筋コンクリート橋脚の耐震性を評価する材料の指標として、コンクリートの圧縮強度、鉄筋の降伏強度、鋼材の降伏強度のみを取り扱い、これらの値が道路橋橋脚の耐震性に及ぼす影響を検討した。

(2) 各因子の物性値のばらつき

材料物性値のばらつきが道路橋橋脚の耐震性能に及ぼす影響を調べるために、既往の文献に示される材料物性値を調べた。

まずコンクリート強度については、コンクリート強度を調べた文献の例は多いが、橋梁構造を対象としているという点から、佐藤らの研究²⁾による統計値を用いた。佐藤らの調べた統計値の内、道路橋で標準的に使われる設計基準強度 20.6、23.5(N/mm²)のものについて表-1に示す。

表-1 コンクリートの圧縮強度の統計値

設計基準強度 N/mm ²	データ数	平均値 N/mm ²	標準偏差 N/mm ²	変動係数
20.6	1066	26.3	1.84	0.070
23.5	2023	29.4	1.96	0.067

次に、鉄筋の降伏点について調べた文献の例は多いが、道路橋に一般に使われるSD295とSD345の両方についてデータがあるもので比較的新しいものとして池田の研究³⁾による統計値を用いた。本研究で設計対象としたRC橋脚の主鉄筋をD32としたので、池田の調査した統計値のうちD32の値を用いた。用いた統計値を表-2に示す。

表-2 鉄筋の降伏点強度の統計値 (D32)

材質記号	データ数	平均値 N/mm ²	標準偏差 N/mm ²	変動係数
SD295	1281	360	21	0.057
SD345	54	400	17	0.041

最後に、構造用鋼材については、本研究で設計対象とした鋼製橋脚に用いた鋼材がSM490Yの板厚16mm(橋軸方向)と19mm(直角方向)としたため、板厚ごとに降伏点の統計量が示されている材料強度問題タスクグループによる研究⁴⁾に示される統計値を用いた。用いた統計値を表-3に示す。

表-3 鋼材の降伏点強度の統計値

材質記号	厚さ	データ数	平均値 N/mm ²	標準偏差 N/mm ²	変動係数
SM490Y	≤16mm	1379	376	26.5	7.0
SM490Y	>16mm	2189	359	24.6	6.9

3. 材料強度のばらつきが部材の耐震性能に及ぼす影響

(1) 検討対象構造

材料強度のばらつきが部材の耐震性能に及ぼす影響を検討するときに、断面寸法、断面形状、鉄筋比などの部材の構造特性が異なれば、材料強度のばらつきの影響も異なると考えられるが、本研究では、代表的な断面と

して道路橋の耐震設計に関する資料⁵⁾にて試算対象となっている橋脚を検討対象とし、材料強度のばらつきが道路橋橋脚の曲げモーメント-曲率関係、水平力-水平変位関係に与える影響を試算した。検討対象とした橋脚の正面図及び断面図を図-1に示す。

(2) 材料強度のばらつきが道路橋橋脚の耐震性能に及ぼす影響

a) コンクリート強度が変動する場合

コンクリート強度の変動がひび割れ時、初降伏時、終局時の曲げモーメント、曲率に与える影響を図-2に示す。ただし、本論では設計基準強度 20.6N/mm²の場合を示し、それぞれコンクリート強度の平均値によって除して正規化した。また、図中の黒点は、設計基準によって定められている基準値である。

これらの図を見ると、コンクリート強度が標準偏差の3倍の変動範囲では、各変動幅はひび割れ時の曲げモーメントが±10%程度、曲率が±1%程度、初降伏時の曲げモーメントが±1%程度、曲率が+4%~2%程度、終局時の曲げモーメントが±1%程度、曲率が-6%~0%程度であり、コンクリート強度のばらつきはひび割れ時の曲げモーメント、降伏時の曲率、終局時の曲率に対して影響が大きいことが分かる。また、各基準値は初降伏時の曲率を除いて標準偏差の3倍の変動範囲で得られる変動幅より小さい値を与えている。

ひび割れ時の曲げモーメントに対するコンクリート強度の変動の影響が大きい、これはひび割れという状態を定義している式がコンクリートの強度の関数であるため、状態の定義そのものが変化していることが考えられるが、その影響は無視すると、標準偏差の3倍の変動範囲では曲げモーメントの変動が1割程度の増減となっている。ただし、基準値はこの範囲よりも小さい値となっている。

降伏時および終局時の曲率は多少変動する程度である。基準値は標準偏差の3倍の変動範囲で得られる曲率より小さい値を与える。

次に、コンクリート強度の変動が初降伏時、降伏時、終局時の水平力、水平変位、許容塑性率に与える影響を図-3に示す。

これらの図を見ると、コンクリート強度が標準偏差の3倍の変動範囲では、各変動幅は初降伏時の水平力が±1%程度、水平変位が±5%程度、降伏時の水平力が±1%程度、水平変位が±6%程度、終局時の水平変位が-5%~0%程度、許容塑性率が-10%~+2%程度である。

初降伏時、降伏時のそれぞれの変動はほぼ等しく、水平力に対するコンクリート強度の変動の影響はほとんど無い。水平変位は6%程度の増減となっている。これは初降伏時の曲率の変動の影響が出ている。また、基準値

また、終局時の水平変位の変動はそれほど大きくないが、これは終局時の曲率の影響が出ており、基準値は標準偏差の3倍の変動範囲で得られる変位より小さい。

許容塑性率は降伏変位、終局変位の関数であるので、それぞれの変動の影響が出ており、基準値は標準偏差の3倍の変動範囲で得られる値より小さい。

鉄筋強度の変動がひび割れ時、初降伏時、終局時の曲げモーメント、曲率に与える影響を図-4に示す。ただし、本論ではSD295の場合を示し、それぞれ鉄筋強度の平均値によって除して正規化した。また、図中の黒点は、設計基準によって定められている基準値である。

これらの図を見ると、鉄筋強度が標準偏差の3倍の変動範囲では、各変動幅はひび割れ時の曲げモーメント、曲率は変動がなく、初降伏時の曲げモーメントが $\pm 14\%$ 程度、曲率が $\pm 17\%$ 程度、終局時の曲げモーメントが $\pm 14\%$ 程度、曲率が $\pm 6\%$ 程度である。初降伏時は、引張鉄筋のひずみで定義されるため、鉄筋強度の変動の影響が大きい。

終局時は、曲げモーメントは、初降伏時の曲げモーメントと等しいので、変動も等しい。曲率は、初降伏時に比較すると変動の影響が小さくなる。

また、基準値はすべて標準偏差の3倍の変動範囲より小さい値を与える。

次に、鉄筋強度の変動が初降伏時、降伏時、終局時の水平力、水平変位、許容塑性率に与える影響を図-5に示す。

これらの図を見ると、鉄筋強度が標準偏差の3倍の変動範囲では、各変動幅は初降伏時の水平力が $\pm 14\%$ 程度、水平変位が $\pm 18\%$ 程度、降伏時の水平力が $\pm 14\%$ 程度、水平変位が $\pm 19\%$ 程度、終局時の水平変位が $\pm 7\%$ 程度、許容塑性率が $-12\% \sim +9\%$ 程度であり、すべての項目において鉄筋強度の変動の影響は大きい。

初降伏時、降伏時のそれぞれの変動はほぼ等しく、水平力の変動は初降伏時の曲げモーメントの影響であり、水平変位の変動は初降伏時の曲率の影響である。標準偏差の3倍の変動範囲では水平力は14%程度の増減があり、基準値はこの値より小さい。道路橋示方書において規定される基礎に作用させる荷重は橋脚に作用する荷重の1.1倍である。標準偏差の3倍の変動範囲で考えれば、水平力が14%程度変動することによって基礎に塑性ヒンジが生じる恐れがある。

また、終局時の水平変位の変動は、終局時の曲率の変動が初降伏時の曲率に比べて小さいことから、初降伏時の水平変位の変動より小さくなる。

水平力、水平変位の基準値はいずれも標準偏差の3倍の変動範囲で得られる値より小さい。

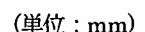


図-1 検討対象橋脚

許容塑性率は、降伏変位、終局変位の関数であるので、それぞれの変動の影響が出ているが、この場合、降伏変位の変動と終局変位の変動が逆の効果を与えているため、変動は降伏時の水平変位の変動と比較して小さくなっている。

また、許容塑性率の基準値は標準偏差の3倍の変動範囲で得られる値より大きい。

c) 鋼材強度が変動する場合

鋼材強度の変動が降伏時、終局時の曲げモーメント、曲率に与える影響を図-6に示す。ただし、本論では厚さ16mm以下の場合を示し、それぞれ鋼材強度の平均値によって除して正規化した。また、図中の黒点は、同様に設計基準によって定められている基準値である。

これらの図を見ると、鋼材強度が標準偏差の3倍の変動範囲では、各変動幅は降伏時の曲げモーメントが-24~+22%程度、曲率が-24~+22%程度、終局時の曲げモーメントが±16%程度、曲率が-4~+2%程度である。

降伏時は曲げモーメント、曲率ともに変動が非常に大きい、これは降伏が鋼材の強度により定義されているからであると考えられる。

終局時の曲げモーメント、曲率についても変動はあるが、曲率の変動は降伏時の変動ほど大きくない。

また、各基準値はすべて平均値から約1σだけ小さいところにある。

次に、鋼材強度の変動が初降伏時、降伏時、終局時の水平力、水平変位、許容塑性率に与える影響を図-7に示す。

これらの図を見ると、鋼材強度が標準偏差の3倍の変動範囲では、各変動幅は初降伏時の水平力が-24~+22%程度、水平変位が-24~+22%程度、降伏時の水平力が±16%程度、水平変位が±18%程度、終局時の水平変位が-5~+12%程度、許容塑性率が+36~-18%程度であり、すべての項目において鋼材強度の変動の影響は大きい。

初降伏時、降伏時の水平力、水平変位の変動はそれぞれ初降伏時の曲げモーメント、曲率の変動の影響である。ただし、降伏時の水平力、水平変位は鋼製橋脚の水平力、水平変位をエネルギー一定則を適用するために完全弾塑性モデルとした場合の値であるので、この影響で変動の程度が異なっている。

終局時の水平変位は、終局時の曲率の変動が降伏時の曲率の変動に比べて小さいことから、降伏時の変動より小さくなる。

許容塑性率は、変動が相対的に大きい。これは、許容塑性率は降伏変位、終局変位の関数であり、各変位の変動の相乗効果で許容塑性率が変動しているためである。

また基準値は、すべて平均値から約1σのところであり、初降伏時は水平力、水平変位とも平均値より約7%、降伏時は水平力、水平変位とも平均値より約5%小さい

ところであり、終局時の水平変位は平均値より約3%、許容塑性率は平均値から9%大きい。

6. まとめ

道路橋橋脚の材料強度のばらつきが耐震性能に及ぼす影響として、コンクリート、鉄筋、鋼材の強度が曲げモーメント、曲率、水平力、水平変位に及ぼす影響を試算により求めた。その結果、以下のような知見を得た。

- (1) コンクリート強度が橋脚の耐震性能に及ぼす影響は比較的小さく、標準偏差の3倍の変動範囲では大きくても1割程度の増減である。また、基準値は標準偏差の3倍の変動範囲の外側である。
- (2) 鉄筋強度が橋脚の耐震性能に及ぼす影響は比較的大きく、標準偏差の3倍の変動範囲では2割程度の増減がある。また、基準値は標準偏差の3倍の変動範囲の外側である。
- (3) 鋼材強度が橋脚の耐震性能に及ぼす影響は比較的大きく、標準偏差の3倍の変動範囲では2割以上の増減がある。また、基準値は鋼材強度の平均値に対して1σ程度のところにある。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編、1996年12月
- 2) 佐藤 勉、寺田年夫：コンクリート構造物の信頼性設計、鉄道総研報告、Vol.3、No.7、1989年7月
- 3) 池田 茂：受託試験における鉄筋コンクリート用異形棒鋼の引張及び曲げ試験に関する調査-昭和60年度-、日本建築総合試験所、44号、1986年10月
- 4) 材料強度タスクグループ：構造用鋼材の強度・寸法に関する統計量、JSSC、Vol17、1981
- 5) (社) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料、1996年12月

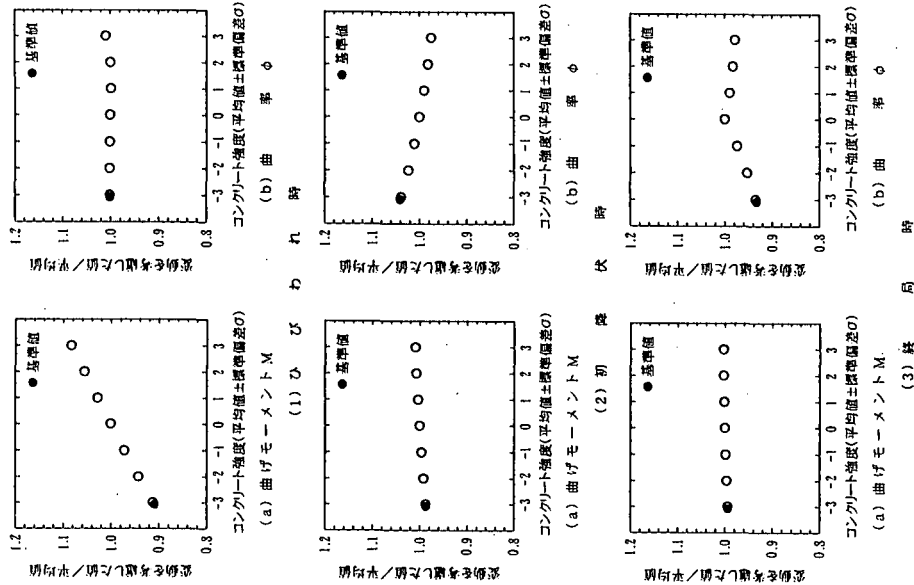


図-2 コンクリート強度の変動が曲げモーメント-曲率に与える影響
 鉄筋: SD295 コンクリート: 設計基準強度210.0kgf/cm²
 コンクリート強度: 平均値 263.0kgf/cm² 標準偏差 18.3kgf/cm²

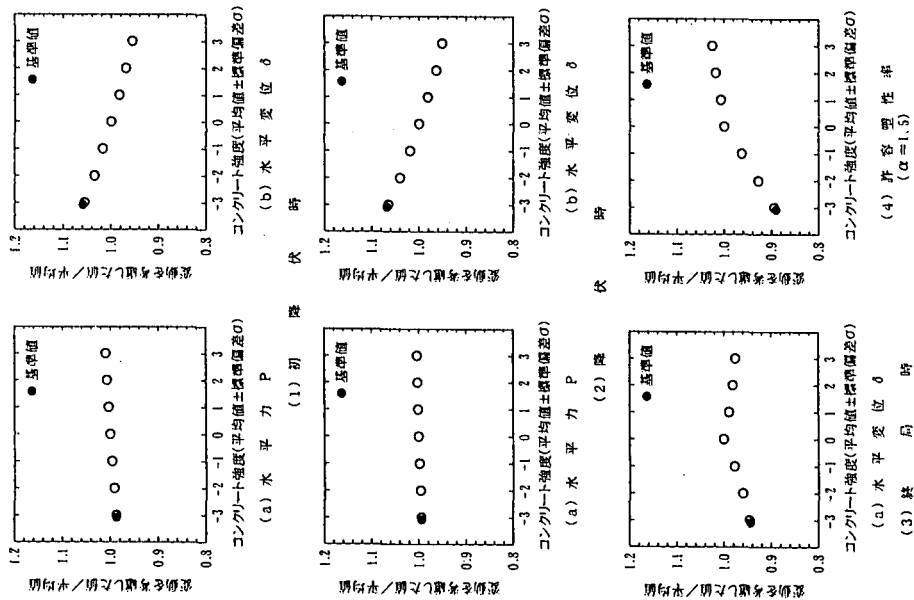


図-3 コンクリート強度の変動が水平力-水平変位および許容変位率に与える影響
 鉄筋: SD295 コンクリート: 設計基準強度210.0kgf/cm²
 コンクリート強度: 平均値 268.0kgf/cm² 標準偏差 18.3kgf/cm²

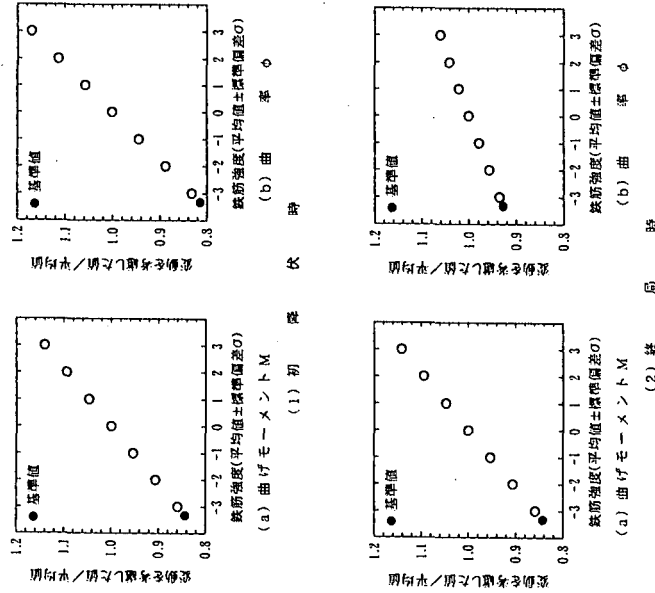
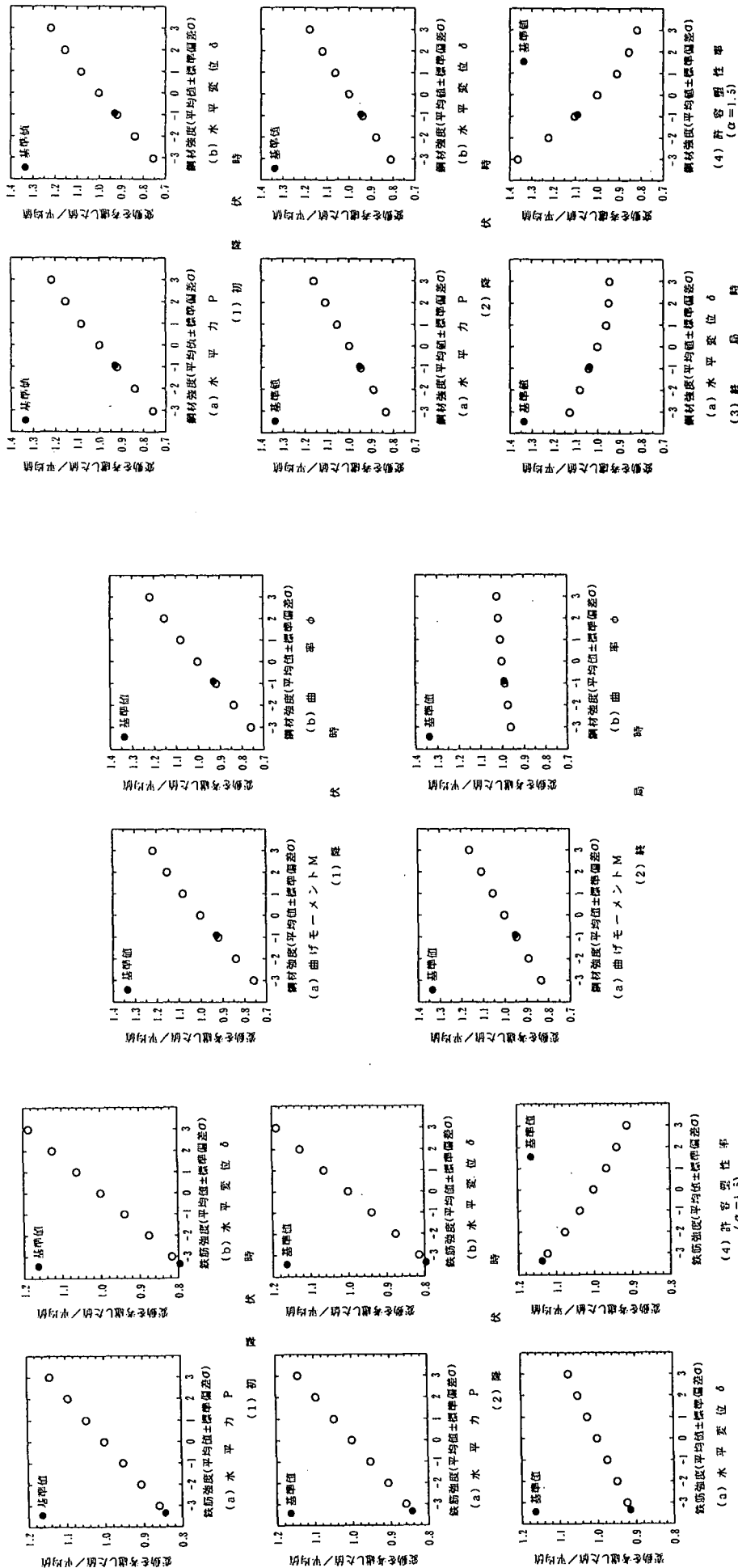
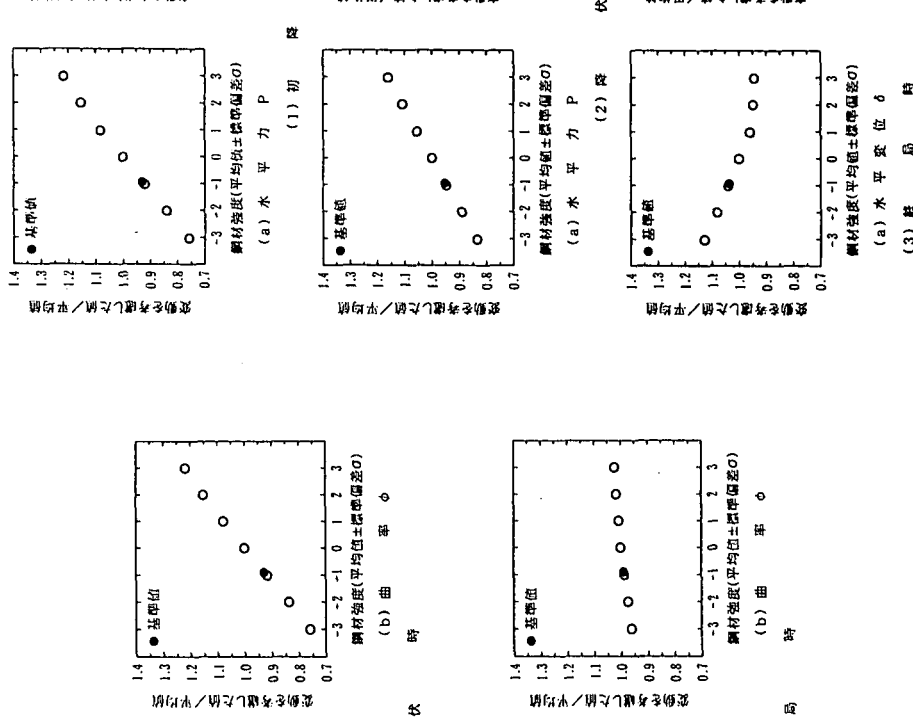


図-4 鉄筋強度の変動が曲げモーメント-曲率に与える影響
 鉄筋: SD295 コンクリート: 設計基準強度210.0kgf/cm²
 鉄筋強度: 平均値 3000kgf/cm² 標準偏差 210kgf/cm²



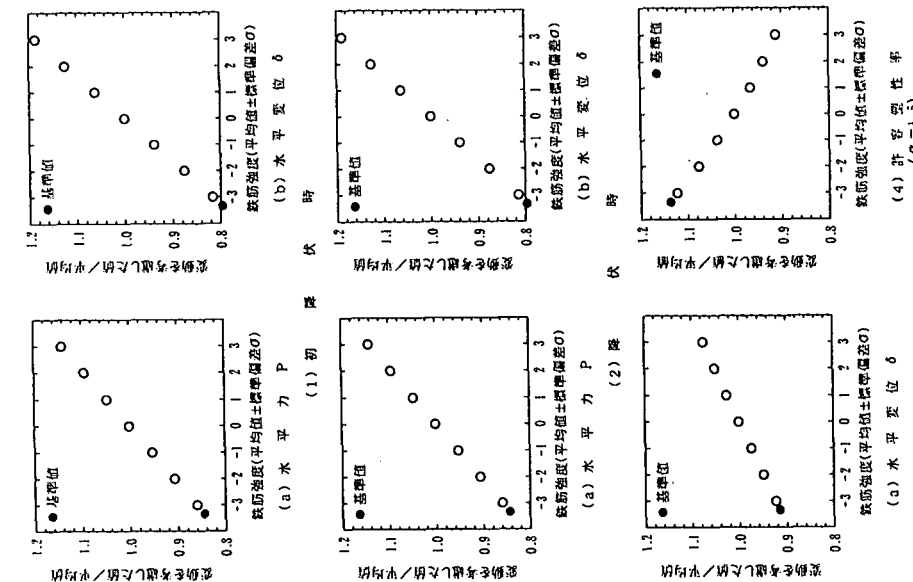
図一 鋼材強度の変動が水平力-水平変位および許容塑性率に与える影響

鋼材の規格: SM490Y (屈服点 1600, 引張方向断面 1600)
 充填コンクリート: 設計圧縮強度 3600, 0.01/100, 0.01/100
 鋼材の強度: 平均値 3840, 標準偏差 270, 0.01/100



図一 鋼材強度の変動が水平力-水平変位および許容塑性率に与える影響

鋼材の規格: SM490Y (屈服点 1600, 引張方向断面 1600)
 充填コンクリート: 設計圧縮強度 3600, 0.01/100, 0.01/100
 鋼材の強度: 平均値 3840, 標準偏差 270, 0.01/100



図一 鋼材強度の変動が水平力-水平変位および許容塑性率に与える影響

鋼材の規格: SM490Y (屈服点 1600, 引張方向断面 1600)
 充填コンクリート: 設計圧縮強度 3600, 0.01/100, 0.01/100
 鋼材の強度: 平均値 3840, 標準偏差 270, 0.01/100